www.kirr.or.kr

Recycling Korea 2026 Daejeon

리싸이클링 코리아 2026 대전



주최
(사)한국자원리싸이클링학회

협찬
LS MnM
KOREA ZINC
SP 에스피네이처
성일하이메탈(주) SungEel HiMetal
한국광해광업공단 KOMIR
EcoPro
(주)대흥엠앤티 DAEHEUNG M&T CO.,LTD
태형(주) www.tae-hyung.co.kr
MTIG
PKoLAB 한국입자분석연구소
(주)페트로마인코리아
Metariver Technology
(주)신성금속

2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회

[특별심포지엄]

▶ 금속부산물을 활용한 탄소저감형 합금강 전구물질 제조 기술 개발
▶ 철강 부산물 자원순환의 현재와 미래
▶ 자원순환 연구의 길을 열다: 안재우 교수의 학문과 미래세대의 도전
▶ 순환경제형 미활용 흑연 고부가 소재화 기술개발
▶ 제3회 무기계 산업 부산물의 순환형 자원화 기술

▶ 리싸이클 연구의 새로운 방향
▶ 아연 정광 및 분진으로부터 탄소저감형 건식제련 기술개발
▶ 백금족 순환소재 활용 에너지 산업용 부품 제조 기술 개발
▶ 저품위 산화광 대상 니켈원료 제조공정 기술개발
▶ Ni, Cr 함유 폐 스크랩으로부터 신제련/추출 기술 기반 전주기 Ni/Cr 소재화 기술 개발

2026년 10월 14일(수)~16일(금), 호텔인터시티 대전

KIRR 1992
사단법인 한국자원리싸이클링학회
THE KOREAN INSTITUTE OF RESOURCES RECYCLING

Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corp.
한국광해광업공단

4차산업시대를 선도하는 광해광업 전주기 전문기관

한국광해광업공단 KOMIR

국내외 광물자원 개발과 광물자원산업 육성, 지원을 통해 광물자원의 안정적 수급을 도모해온
한국광물자원공사와 광산피해 복구와 지역사회 개발로 지역경제 활성화에 기여한 한국광해관리공단이
체계적인 광해광업 전주기 지원 전문기관 **한국광해광업공단**으로 새롭게 시작합니다.

KOMIR 주요 업무 및 역할

- 국내 광물자원산업 고도화를 위한 스마트 광업체계 구축
- 민간 국내·외 자원개발 지원을 위한 전 주기 단계별 맞춤형 광업·광해기술 및 금융서비스
- 광산지역의 지속가능한 성장을 위한 친환경적 광산피해 복구
- 지역경제 활성화를 위한 지역특화형 도시재생과 대체산업 육성
- 국가핵심광물 조달을 위한 희소금속의 비축 고도화·재순환 지원



www.kirr.or.kr

Recycling Korea 2026 Daejeon

리싸이클링 코리아 2026 대전



주최
(사)한국자원리싸이클링학회

협찬
LS MnM Metals & Materials
KOREA ZINC
SP 에스피네이처
성일하이메탈(주) SungEel HiMetal
한국광해광업공단 KOMIR
EcoPro
(주)대흥엠앤티 DAEHEUNG M&T CO.,LTD
태형(주) www.tae-hyung.co.kr
MTIG Material Technical Innovation Group
PKoLAB 한국입자분석연구소
(주)페트로마인코리아
Metariver Technology
(주)신성금속

2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회

[특별심포지엄]

▶ 금속부산물을 활용한 탄소저감형 합금강 전구물질 제조 기술 개발
▶ 철강 부산물 자원순환의 현재와 미래
▶ 자원순환 연구의 길을 열다: 안재우 교수의 학문과 미래세대의 도전
▶ 순환경제형 미활용 흑연 고부가 소재화 기술개발
▶ 제3회 무기계 산업 부산물의 순환형 자원화 기술

▶ 리싸이클 연구의 새로운 방향
▶ 아연 정광 및 분진으로부터 탄소저감형 건식제련 기술개발
▶ 백금족 순환소재 활용 에너지 산업용 부품 제조 기술 개발
▶ 저품위 산화광 대상 니켈원료 제조공정 기술개발
▶ Ni, Cr 함유 폐 스크랩으로부터 신제련/추출 기술 기반 전주기 Ni/Cr 소재화 기술 개발

2026년 10월 14일(수)~16일(금), 호텔인터시티 대전

KIRR 1992
사단법인 한국자원리싸이클링학회
THE KOREAN INSTITUTE OF RESOURCES RECYCLING

Recycling Korea 2026 Daejeon

2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회

모시는 글



안녕하십니까?

한국자원리싸이클링학회 회장 손성호입니다.

한 해의 노력이 결실로 이어지는 가을을 맞아, 회원 여러분의 연구와 사업에 뜻깊은 성과가 함께하시고 가정에도 건강과 행복이 가득하시기를 기원합니다.

우리 학회는 올해 봄, 제주에서 개최한 제64회 학술발표대회를 시작으로 6월 대전 KW컨벤션에서 '2026년 1차 순환자원 재활용공정 기술강좌'를 열어 자원리싸이클링 분야의 연구 성과를 나누고, 산·학·연 관계자의 전문 역량 강화와 교류의 장을 이어왔습니다. 각자의 자리에서 연구와 기술개발에 힘쓰시며 학회의 활동에 함께해 주신 회원 여러분께 깊이 감사드립니다.

이러한 교류를 이어가고자 「2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회」를 오는 10월 14일(수)부터 16일(금)까지 호텔인터시티 대전에서 개최합니다. 이번 대회가 순환자원 분야의 연구자와 산업계 전문가들이 한자리에 모여 그동안의 성과를 공유하고, 새로운 협력의 방향을 찾아가는 자리가 되기를 기대합니다.

세계적으로 자원 안보와 탄소 중립 실현을 위한 규제 강화가 가속화되는 가운데, 핵심 자원의 안정적 확보와 순환경제로의 전환은 국가 경쟁력의 핵심 과제가 되고 있습니다. 이에 발맞추어 정부와 산업계도 핵심광물의 재자원화, 고도 재활용 기술 확보에 집중하고 있으며, 우리 학회가 그 중심에서 학술적, 정책적 기여를 이어가고 있습니다. 학술대회에서는 기초연구부터 공정개발과 산업적 활용에 이르는 다양한 경험을 나누고, 현장에서 마주하는 어려움과 해결 방향을 함께 논의하는 시간을 마련하고자 합니다.

이번 학술대회에 이어 오는 11월 1일부터 4일까지는 태국 방콕에서 제18차 동아시아 자원리싸이클링 국제심포지엄(EARTH 2026)이 개최될 예정이며, 11월 19일에는 이차전지 및 전기·전자 분과위원회 워크샵을 대전에서 개최합니다. 회원 여러분의 많은 관심과 참여를 부탁드립니다. 아울러 자원리싸이클링 산업 및 학회의 발전을 위한 고려아연과 LS MnM 등 유관기관의 후원을 바탕으로 이번 학술발표대회부터 학회상을 확대 개편하여 보다 풍성한 가을 학회를 맞이하려고 합니다.

학회의 발전은 회원 여러분의 꾸준한 참여와 소통에서 비롯됩니다. 이번 대회가 서로의 연구에 귀 기울이고 경험을 나누며, 앞으로의 연구와 협력을 준비하는 유익한 시간이 되기를 바랍니다. 또한, 추계정기총회를 통해 학회의 활동을 돌아보고 향후 발전 방향에 대한 소중한 의견을 나눠 주시기를 부탁드립니다.

이번 대회를 준비해 주시는 준비위원회와 사무국, 그리고 학회의 활동을 지원해 주시는 후원기관과 기업 관계자 여러분께 감사드립니다. 과학 기술의 중심 도시 대전에서 회원 여러분을 건강한 모습으로 뵙기를 바라며, 많은 관심과 성원을 부탁드립니다.

2026년 10월

한국자원리싸이클링학회 회장 **손 성 호**

Recycling Korea 2026 Daejeon
2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회

축 사



존경하는 한국자원리싸이클링학회 회원 여러분, 안녕하십니까.

한국광해광업공단 사장 황영식입니다.

대한민국 자원 순환 기술의 요람이자 산실인 '2026년도 추계 정기총회 및 제65회 학술발표대회'가 과학과 혁신의 도시 대전에서 개최되게 된 것을 진심으로 축하드립니다.

아울러, 대내외적인 불확실성과 글로벌 공급망의 급격한 변동 속에서도 묵묵히 국가 산업 경쟁력의 기틀을 다져오신 학회 관계자 여러분과 연구자 여러분의 헌신적인 노고에 깊은 경의를 표합니다.

오늘날 국제사회는 기후위기 대응과 탄소중립 실현을 넘어, 자원의 무기화와 공급망 재편이라는 엄중한 도전에 직면해 있습니다. 안정적인 자원 확보는 더 이상 경제적 효율성의 차원을 넘어 국가 안보와 직결되는 지상 과제입니다.

이러한 중차대한 시점에서 이번 학술대회가 집중 조명하는 희소금속의 재자원화 기술은 2차 자원의 가치를 극대화하고 국가 자원 안보의 외연을 넓히는 핵심적 이정표입니다.

환경적 책무와 경제적 실익을 동시에 달성하는 이 고도의 기술들은 대한민국의 지속 가능한 미래를 담보할 든든한 반석이 될 것입니다.

우리 한국광해광업공단은 국가 자원안보와 친환경 광해 관리 전담기관으로서 광산의 개발부터 환경 복원, 그리고 핵심광물 비축 및 재자원화 등 무너진 산업원료 공급망의 회복을 위해 추진해야 할 산적한 과제들이 있습니다.

묵묵히 기술 고도화를 위해 노력하시는 회원 여러분들과 끊임없이 소통하고 함께 동행한다면 무너져가는 국내외 공급망 생태계를 회복하고자 하는 국가적 소명은 반드시 달성될 것으로 여깁니다. 이에 공단은 학계와 산업계가 일궈낸 소중한 연구 성과가 산업현장에 원활히 안착하고 상용화될 수 있도록, 산·학· 연·관의 유기적 협력 체계를 공고히 하는데 소임을 다할 것입니다.

오늘 이 자리가 대한민국이 자원 순환 선도국가로 도약하는 데 필요한 지혜를 모으고, 미래지향적 연대의 가치를 확인하는 장이 되기를 기대합니다.

다시 한번 이번 학술대회의 개최를 축하드리며, 한국자원리싸이클링학회의 무궁한 발전과 참석하신 모든 분들의 건승과 영광을 기원합니다. 감사합니다.

2026년 10월

한국광해광업공단 사장 **황 영 식**

Recycling Korea 2026 Daejeon

2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회

축 사



존경하는 한국자원리싸이클링학회 회원 여러분, 그리고 자원순환 분야의 산·학·연 전문가 여러분, 반갑습니다. 한국지질자원연구원 원장 권이균입니다.

「한국자원리싸이클링학회 2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회」의 개최를 진심으로 축하드립니다. 뜻깊은 학술대회를 준비해 주신 한국자원리싸이클링학회 관계자 여러분과 귀중한 연구 성과를 발표하고 토론하기 위해 참석해 주신 모든 분께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

특히 이번 학술대회가 대한민국을 대표하는 과학기술의 도시이자 대덕연구개발특구가 자리한 대전에서 개최된 것을 매우 기쁘게 생각하며, 행사를 위해 애써 주신 관계자 여러분께 다시 한번 감사드립니다.

최근 핵심광물은 단순한 산업 원료를 넘어 국가 경제안보와 첨단산업의 경쟁력을 좌우하는 전략자산으로 부상하고 있습니다. 이차전지, 반도체, 전기자동차, 재생에너지, 방위산업 등 미래 핵심산업의 성장과 탄소중립 실현을 위해서는 리튬, 니켈, 코발트, 희토류를 비롯한 핵심광물의 안정적인 확보가 반드시 필요합니다. 그러나 핵심광물 자원은 특정 국가에 매장과 생산이 편중되어 있으며, 자원민족주의의 확산과 지정학적 갈등, 수출통제 및 공급망 재편으로 인해 수급 불확실성이 더욱 커지고 있습니다. 자원의 대부분을 해외에 의존하는 우리나라로서는 해외 자원개발과 공급망 다변화뿐만 아니라, 국내에서 발생하는 폐배터리와 폐전기·전자제품, 산업 부산물 등으로부터 유가금속을 회수하여 다시 산업 원료로 활용하는 재활용 기술의 확보가 무엇보다 중요합니다.

이제 재활용은 폐기물을 처리하는 환경기술을 넘어, 핵심광물을 안정적으로 확보하는 '도시광산 개발'이자 국가 자원안보를 강화하는 전략산업으로 인식되어야 합니다. 또한 저에너지·저탄소 공정, 고효율 선별과 정제련, 고순도 소재화 및 전 과정 평가 기술을 연계하여 자원순환 전주기의 경쟁력을 확보해야 합니다. 연구개발 성과가 실증과 사업화로 이어지고, 재활용 원료가 다시 첨단산업에 투입되는 완결형 순환생태계를 구축하는 것도 중요한 과제입니다.

한국지질자원연구원은 광물자원의 탐사와 평가부터 선광·제련, 핵심금속 회수, 폐배터리 재활용과 소재화에 이르기까지 자원 전주기에 걸친 연구를 수행하고 있습니다. 앞으로도 학회와 산업계, 대학 및 관계기관과 긴밀히 협력하여 핵심광물 공급망의 안정화와 국내 재자원화 산업의 기술경쟁력 강화에 적극적으로 기여하겠습니다.

이번 학술대회가 우수한 연구 성과를 공유하는 데 그치지 않고, 우리나라 자원순환 기술의 발전 방향을 모색하며 산·학·연 협력을 더욱 공고히 하는 소중한 자리가 되기를 기대합니다. 아울러 젊은 연구자들이 새로운 아이디어를 나누고 미래의 자원순환 산업을 이끌어 갈 수 있는 뜻깊은 교류의 장이 되기를 바랍니다.

다시 한번 「한국자원리싸이클링학회 2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회」의 개최를 축하드리며, 참석하신 모든 분의 건강과 발전을 기원합니다.

감사합니다.

2026년 10월

한국지질자원연구원 원장 **권 이 균**

준비위원회

직 책	성 명	소 속
총괄 준비위원장	유경근	국립한국해양대학교
공동 준비위원장	이 훈	한국지질자원연구원
준비위원	박경태	한국생산기술연구원
준비위원	김홍인	한국지질자원연구원
준비위원	박지환	㈜엠티아이지
준비위원	김대근	고등기술연구원
준비위원	강영조	동아대학교
준비위원	신동주	한국지질자원연구원
준비위원	한요셉	한국지질자원연구원
준비위원	권한중	국립전북대학교
사무국	민지원	학회

협찬사

LS MnM Metals & Materials
KOREA ZINC
SP NATURE (주)에스피네이처
성일하이메탈(주) SungEel HiMetal
한국광해광업공단 KOMIR
EcoPro
(주)대흥엠앤티 DAEHEUNG M&T CO.,LTD
태형(주) www.tae-hyung.co.kr
MTIG Material Technical Innovation Group
PKoLAB 한국입자분석연구소
(주)페트로마인코리아
Metariver Technology
(주)신성금속

Recycling Korea 2026 Daejeon

2026년 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회 총괄일정표

2026년 10월 14일(수)~16일(금), 호텔 인터시티

◎ 2026년 10월 14일(수)

13:00~	참가자 등록 (5층 LOBBY)					
14:00~17:30	특별심포지엄					
	강의실 2 가이아	강의실 3 에메랄드	강의실 4 사파이어	강의실 5 토파즈	강의실 6 가온	강의실 7 미르
	아연 정광 및 분진으로부터 탄소저감형 건식제련 기술개발	백금족 순환소재 활용 에너지 산업용 부품 제조 기술 개발	저품위 산화광 대상 니켈원료 제조공정 기술개발	Ni, Cr 함유 폐 스크랩으로부터 신제련/추출 기술 기반 전주기 Ni/Cr 소재화 기술 개발	금속부산물을 활용한 탄소 저감형 합금강 전구물질 제조 기술 개발	리싸이클 연구의 새로운 방향

◎ 2026년 10월 15일(목)

09:00~	참가자 등록 (5층 LOBBY)				
	제65회 학술발표대회			특별심포지엄	
	강의실 1 머큐리	강의실 4 사파이어	강의실 5 토파즈	강의실 3 에메랄드	강의실 6 가온
10:30~12:20	개회식 특별강연 추계정기총회				
12:00~13:30	중식 및 포스터발표 시작				
13:30~14:00	기조강연				자원순환 연구의 길을 열다: 안재우 교수의 학문과 미래세대의 도전
14:00~15:45	습식제련	자원처리	건식제련	철강 부산물 자원순환의 현재와 미래	
15:45~16:00	휴식				
16:00~17:15	습식제련	전해제련	순환정책		
17:20~17:50	포스터발표 질의응답				
18:00~20:00	우수발표상 시상 및 만찬				

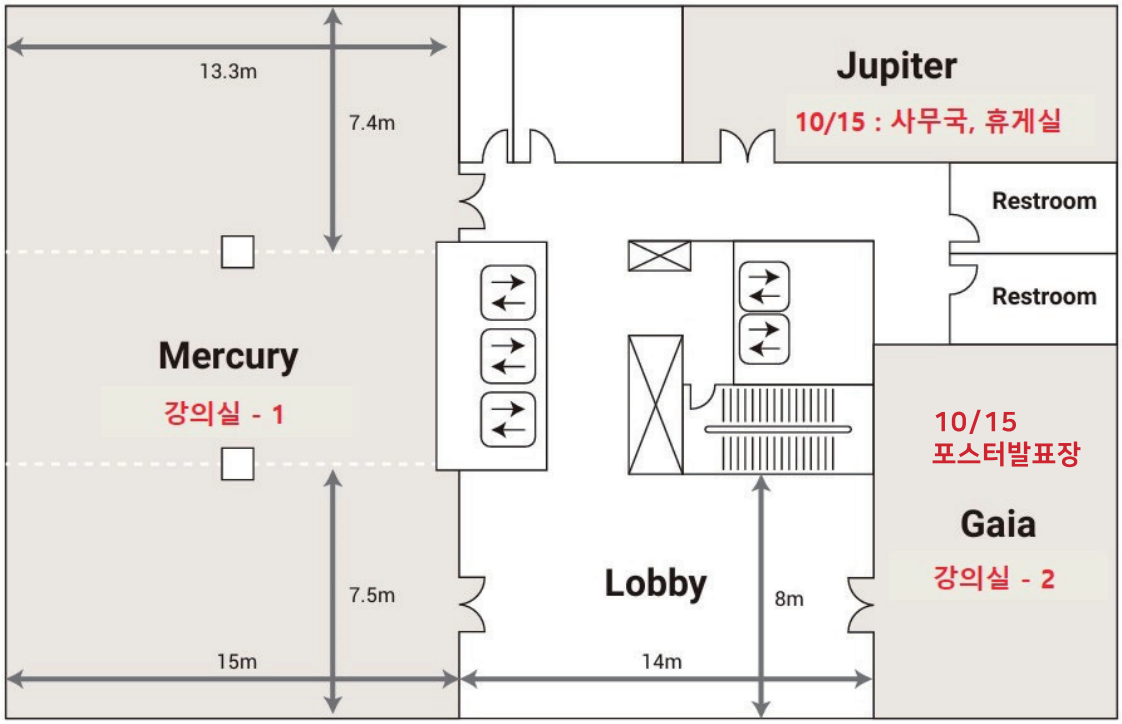
◎ 2026년 10월 16일(금)

09:00~15:15	특별심포지엄	
	강의실 4 - 사파이어	강의실 5 - 토파즈
	순환경제형 미활용 흑연 고부가 소재화 기술개발	제3회 무기계 산업 부산물의 순환형 자원화 기술

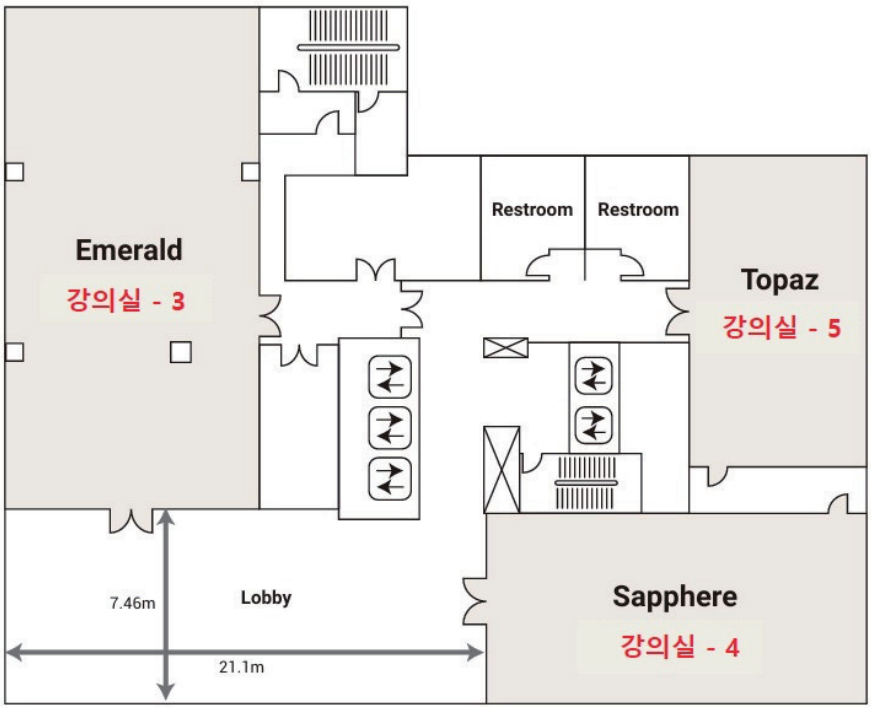
행사장 위치 안내

구 분	세 부	장 소	위 치
등록	등록접수대	LOBBY	5층
강의실	강의실 1	머큐리	4층
	강의실 2	가이아	4층
	강의실 3	에메랄드	5층
	강의실 4	사파이어	5층
	강의실 5	토파즈	5층
	강의실 6	가온	6층
	강의실 7	미르	6층
식사	점심	Table D'hote(100석) 파인(200석)	2층 3층
	만찬	파인(200석)	3층

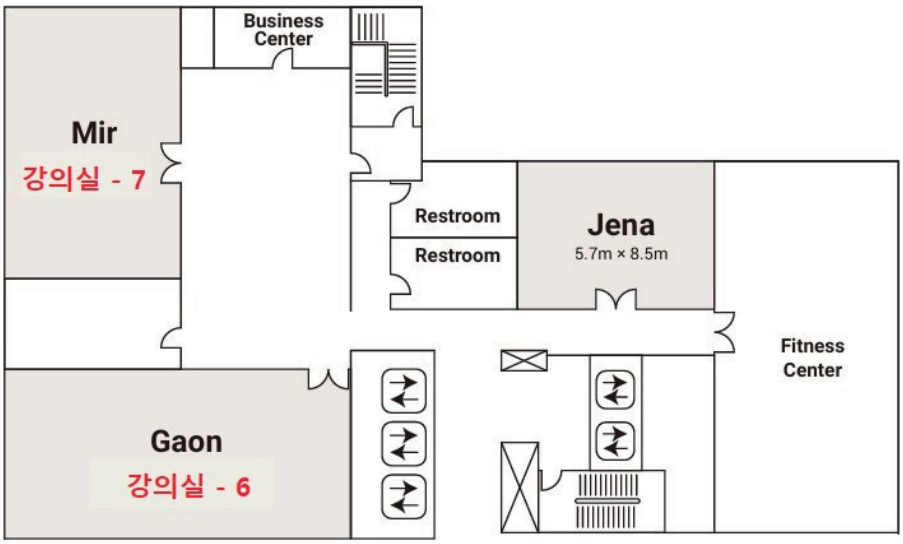
본관 4F – 머큐리, 가이아, 쥬피터



본관 5F – 에메랄드, 사파이어, 토파즈



본관 6F – 가온, 미르, 제니



세부 프로그램

◎ 제65회 학술발표대회 : 개회식 / 특별강연 / 추계정기총회

[10월 15일(목) 10:30~12:20, 강의실 1 – 머큐리]

발표시간	발표제목(* 발표자)
10:30-11:00	**[개회식]** 좌장 : 이훈 부회장 개회사 : 손성호 회장(한국자원리싸이클링학회) 축사 1 : 황영식 사장(한국광해광업공단) 축사 2 : 권이균 원장(한국지질자원연구원)
11:00-11:30	**[특별강연]** 제련에서 순환으로: 습식제련 연구의 발자취와 배터리 재활용의 미래 안재우 교수(대진대학교)
11:30-12:20	**「 2026년 추계정기총회 」** 사회 : 김대근 총무이사

◎ 제65회 학술발표대회 : 구두발표 – 습식제련

[10월 15일(목) 13:30~17:15, 강의실 1 – 머큐리]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자) 좌장 : 황국화(전북대학교)
[기조강연]	13:30-14:00	From Electronic Waste to Critical Metals: Selective Recovery of Indium and Gallium Using Siderophores *Eric D. van Hullebusch (Université Paris Cité Institut de Physique du Globe de Paris)
H-01	14:00-14:15	용매추출 믹서-세틀러 다상유동 전산 모사 연구 *김병준, 송시정, 한상우, 김완이(포스코홀딩스), 김나영, 조성묵(국립부경대학교)
H-02	14:15-14:30	폐리튬이온배터리의 황산침출액 내 미량 불순물 제거 연구 *송시정, 박준용, 이상혜, 김채림, 김완이(포스코홀딩스)
H-03	14:30-14:45	활성탄을 이용한 황동광 정광의 부동태 억제 구리 침출 메커니즘 연구 *Jae-Yeon Kim(Korea Institute of Materials Science, Colorado school of mines), Yu-Jin Kim(Seoul National University of Science and Technology), Jaeheon Lee(Colorado school of mines)

◎ 제65회 학술발표대회 : 구두발표 – 습식제련

[10월 15일(목) 13:30~17:15, 강의실 1 – 머큐리]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자)
		좌장 : 황국화(전북대학교)
H-04	14:45-15:00	열처리 전처리에 의한 Zinc-Rich Leach Residue로부터 갈륨 침출 향상 *최종원, 배무기, 이수경(한국지질자원연구원)
H-05	15:00-15:15	폐리튬이온배터리 음극재로부터 고순도 흑연 회수 및 정제 공정에 대한 연구 *김기현, 류철희, 안낙균, 박경수(고등기술연구원)
H-06	15:15-15:30	폐연료전지 촉매로부터 메탄설폰산과 염화물을 이용한 백금족 원소의 침출 및 회수에 관한 연구 *김승현, 친빅하, 송준근, 정지혜, 이재령(강원대학교)
H-07	15:30-15:45	전기화학 분말화 니켈선철의 황산 침출액으로부터 철 제거 및 니켈 회수 *페브리나와르타 부르한, 하룬 카멜, 박경태, 신재홍(한국생산기술연구원, 과학기술연합대학원대학교), 김명석(한국생산기술연구원, 고려대학교)
15:45-16:00		휴 식
		좌장 : 신동주(한국지질자원연구원)
H-08	16:00-16:15	침출-철 재침전 통합공정을 통한 NdFeB 슬러지로부터 희토류 선택적 회수 *임지수, 김리나(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), 이수경, 윤호성(한국지질자원연구원)
H-09	16:15-16:30	블랙매스 관련 금속 산화물 및 유기화합물이 NCM 바이오침출에 미치는 영향 *손우진, 윤선종, 이승은, 이상현, 안준모, 황국화(전북대학교)
H-10	16:30-16:45	메탄술폰산-염화콜린 심층공융용매(DES)를 이용한 LCO 내 코발트의 선택적 침출 및 NMR 기반 메커니즘 규명 *김유진, 이소미, 변재원(서울과학기술대학교), 카인와이진, 김재연(한국재료연구원)
H-11	16:45-17:00	대체 환원제 보릿짚을 이용한 하이니켈 NCM 블랙매스의 메탄술폰산 침출반응 속도론 *원정환, 양시영, 안준모(전북대학교)
H-12	17:00-17:15	Mn pre-loading 기반 불순물 제거 및 Ni, Co, Mn 공추출을 통한 메탄술폰산 침출액의 전구체 합성 용액 제조연구 *정현수, 양시영, 안준모(전북대학교)

◎ 제65회 학술발표대회 : 구두발표 – 자원처리

[10월 15일(목) 14:00~15:45, 강의실 4 – 사파이어]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자) 좌장 : 이돈우(한국지질자원연구원)
R-01	14:00-14:15	사용후 리튬이온배터리로부터 음극재와 양극재, 리튬을 회수하는 친환경 전처리(부유선별) 공정 *유광석, 김관호, 홍길상(한국지질자원연구원)
R-02	14:15-14:30	열처리 온도에 따른 NCM계 블랙매스의 상변환 및 흑연, 양극재, 리튬의 선별 거동 *양찬우(과학기술연합대학원대학교), 김관호, 홍길상, 유광석(한국지질자원연구원)
R-03	14:30-14:45	부유선별을 통해 회수된 NCM 양극활물질의 직접 재생을 통한 결정구조 및 전기화학적 성능 회복 *김동우(한국지질자원연구원, 세종대학교), 김관호, 홍길상, 유광석(한국지질자원연구원), 권경중(세종대학교)
R-04	14:45-15:00	추적자(Tracer)를 이용한 몰리브덴광 컬럼부선기의 체류시간분포(RTD) 특성평가 *푸레브오윤빌렉, 박철현(조선대학교), 이경현(조선대학교, KIGAM)
R-05	15:00-15:15	EOL 배터리 리사이클링 효율 향상을 위한 플라스틱 회수기술 개발 *김학순, 김민식, 권태우, 김완이, 이주승(포스코홀딩스)
R-06	15:15-15:30	다이렉트 리싸이클링 전처리를 위한 전해액 제거 셀 제조 공정에 대한 기초 실험 *김종배, 이정, 김민혁(이알)
R-07	15:30-15:45	광산 공정 폐기물 내 Ni의 존재형태에 따른 회수 가능성 평가 *김재현, 주원정, 정은혜(서울대학교)

15:45-16:00 휴 식

◎ 제65회 학술발표대회 : 구두발표 – 전해제련

[10월 15일(목) 16:00~17:00, 강의실 4 – 사파이어]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자) 좌장 : 배무기(한국지질자원연구원)
E-01	16:00-16:15	미생물 전기분해전지에서 수소 생산 향상을 위한 운전 시간 및 양극 구성 최적화 *손성훈, 장연서, 정해성(국립창원대학교)
E-02	16:15-16:30	중성 전해질을 이용한 스테인리스강 전기화학적 제염 공정의 전해질 재사용성 평가 *신재명(한국재료연구원, 경북대학교), 이주영, 김완배, 유병욱(한국재료연구원), 손인준(경북대학교)
E-03	16:30-16:45	미생물연료전지를 이용한 NCM523양극재스크랩으로부터 유가금속 회수 및 에너지 생산 *장연서, 손성훈, 정해성(국립창원대학교)
E-04	16:45-17:00	EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속의 일괄 전해 기초 연구 *하륜, 신한균, 강영조(동아대학교), 류지훈(에바싸이클)

◎ 제65회 학술발표대회 : 구두발표 – 건식제련

[10월 15일(목) 14:00~15:30, 강의실 5 – 토파즈]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자) 좌장 : 김영재(인하대학교)
P-01	14:00-14:15	압력 및 온도 조건에 따른 니켈 카보닐화 반응속도론과 반응 메커니즘 규명 *배성욱(한국생산기술연구원, 한양대학교), 박경태, 신재홍(한국생산기술연구원), 박주현(한양대학교)
P-02	14:15-14:30	조갈륨의 진공증류를 통한 고순도화 기초 연구 *김기현, 홍명환, 박경수(고등기술연구원)
P-03	14:30-14:45	바이오차 적용에 따른 철강부산물 내 Cr 환원 거동 *박종형, 김선중(조선대학교)
P-04	14:45-15:00	신경망을 이용한 다성분 용융 슬래그의 전기전도도 예측 *임성록(오사카대학교, 서울대학교), Yuki Nobe, Masashi Nakamoto, Kiyoshi Fuji-ta, Toshihiro Tanaka(오사카대학교)
P-05	15:00-15:15	철강슬래그 기반 재활용 무기섬유의 기계적 특성 및 자동차용 복합부직포 적용 가능성 연구 *박종빈(한국섬유기계융합연구원)
P-06	15:15-15:30	DRI 기반 전기로 공정 내 이차정련 슬래그 재활용성 평가 *김유리, 김기범, 손일(연세대학교), 이상범(포스코)

15:45-16:00 휴 식

◎ 제65회 학술발표대회 : 구두발표 – 순환정책

[10월 15일(목) 16:00~17:00, 강의실 5 – 토파즈]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자) 좌장 : 진태영(전북대학교)
C-01	16:00-16:15	전해박리를 이용한 폐은스크랩 재자원화의 에너지 효율 및 환경성 평가 *강청민, 김춘산, 김수현, 이규림, 황용우(인하대학교), 강기현(에스지금속)
C-02	16:15-16:30	폴리에스터 함유 폐의류의 자원순환 및 관리체계 분석: 국내외 제도와 관리현황을 중심으로 *김수현, 차민교, 황용우(인하대학교)
C-03	16:30-16:45	리튬이온 배터리 재활용 중간생성물 용어 표준화: black mass, black powder, black alloy 제대로 파헤치기 *노원규, 강진모, 김원우, 손지수, 박준혁, 권경중(세종대학교)
C-04	16:45-17:00	플라즈마 기반 수소 생산기술의 전과정 온실가스 배출량 분석 *이규림, 김수현, 황용우(인하대학교), 서홍석(한국화학융합시험연구원)
C-05	17:00-17:15	LCA 기반 K-pop 앨범의 에코디자인 시나리오별 탄소배출 저감 효과 분석 *김우진, 김선빈, 박가영, 황용우(인하대학교)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 습식제련

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PH-01	폐리튬이온전지 침출액으로부터 고순도 탄산리튬 회수를 위한 다단계 습식 정제 공정의 설계 및 최적화 *주우현, 신현호, 권현석(국립금오공과대학교), 조용수(아이에스에코솔루션), 이철경(국립금오공과대학교)
PH-02	Black Mass 내 불소 제거에 따른 리튬의 선택적 회수 특성 연구 *신현호, 주우현, 권현석(국립금오공과대학교), 조용수(아이에스에코솔루션), 이철경(국립금오공과대학교)
PH-03	폐 Ti/MMO 전극 코팅 내 루테늄 및 이리듐 산화물의 침출 제고 방안 *이현서, 윤수연, 하지윤, 이상훈(계명대학교)
PH-04	수산화리튬 제조 공정 발생 저농도 리튬 함유 폐액의 재이용 *유가연, 조형준, 이재원(충남대학교), 장한권, 류태공(한국지질자원연구원)
PH-05	심층공융용매를 이용한 NCM 양극재의 침출 및 선택적 니켈 회수를 통한 황산니켈 제조 *이지현, 홍현선(성신여자대학교)
PH-06	NCM811 블랙매스의 침출 거동에 미치는 환원배소의 영향 *김진혁, 최상훈, 김연우, 김지영, 박은수, 서상윤(전남대학교)
PH-07	망초(Na_2SO_4)자원화를 위한 바이폴라막 전기투석 공정의 2액실 및 3액실 운전 특성 비교 *김준희, 장재혁, 김주희, 박혜인, 안재우(대진대학교)
PH-08	아연 옥살산염으로부터 열처리에 따른 결정상 변화에 관한 연구 *김희선, 김대원, 진연호(고등기술연구원)
PH-09	HF 사용량을 줄인 고순도 흑연 제조를 위한 EDDS 보조 H_2SO_4–HF 공정의 새로운 접근법 *Serin Kang(국립창원대학교), Donghyun Kim, Jaemin Ahn, Sunghyun Bae, Seungwook Shin(한국지질자원연구원), Haesung Jeong(국립창원대학교), Yosep Han(한국지질자원연구원)
PH-10	저농도 리튬 함유 폐액으로부터 불화리튬 회수를 위한 반응 특성 연구 *임정현, 한수진, 이창제, 우재현, 신준호(세중이에스), 류태공(한국지질자원연구원), 유재춘(세중이에스)
PH-11	아연 함유 2차 자원의 습식 침출 반응 속도론 연구 동향 *김대원, 김희선(고등기술연구원)
PH-12	NCM 블랙매스 메탄설폰산 침출액의 반용매 결정화 거동에 대한 용액 조성의 영향 *박은지, 박현수, 김현중(한양대학교)
PH-13	열분해 조건에 따른 NCM계 블랙매스의 금속 침출 거동 *박소휘, 김현중(한양대학교)
PH-14	Cu 및 Zn 제련 부산물로부터 Te 회수 및 scorodite 형성을 통한 As 안정화 사례 연구 *안준모, 김현주, 임채린, 박찬희, 원정환(전북대학교)
PH-15	폐리튬이온전지 음극재 조금속으로부터 고순도 구리 회수를 위한 다전극 전해채취 공정 연구 *박성철, 한승연, 김용환, 정찬엽, 김재환, 김민서(한국생산기술연구원), 이아름(성일하이텍), 손성호(한국생산기술연구원)
PH-16	황산배소 및 수침출 기반 폐 반응용기로부터 리튬 회수 효율 평가 *김혜인, 조형준, 유가연, 구은주, 장한권, 류태공(한국지질자원연구원)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 습식제련(계속)

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PH-17	NCM 조성에 따른 무환원제 황산 침출계에서의 LFP-NCM 혼합 양극재 침출 영향 연구 *박찬희, 안준모(전북대학교)
PH-18	국내 극저품위 Ni 함유 광석의 자원화를 위한 FeNi 슬래그 내 Ni 용해 거동의 열역학적 평가 *김동우(과학기술연합대학원대학교), 허정호(한국지질자원연구원)
PH-19	침출제 종류에 따른 IGZO 타겟 공정 부산물 내 금속 침출 거동 비교 *안낙균, 김대원, 류철희, 김하준, 이광희(고등기술연구원)
PH-20	황산염 배소산물 중 리튬침출에 미치는 탄산리튬형성의 영향 *임동연, 유경근(국립한국해양대학교)
PH-21	LIB 블랙매스 중 Al 불순물 제거를 위한 세멘테이션 후 자력선별공정개발 *조민정, 유경근(국립한국해양대학교)
PH-22	PC88A를 이용한 Tb 및 Dy의 선택적 용매추출 분리 특성 *이종락(과학기술연합대학원대학교), 신동주(한국지질자원연구원)
PH-23	알칼리 바나듐(V)용액으로부터 $VOSO_4$ 합성을 위한 화학적 환원 및 침전 *장익제, 이만승(국립목포대학교)
PH-24	NCM622의 메탄설폰산-말릭산 혼합 유기산 침출액 대상 D2EHPA 기반 용매추출을 통한 유가금속 회수 연구 *이진영, 하금단, 김유진, 이소미, 변재원(서울과학기술대학교)
PH-25	PC88A를 이용한 Y-Dy 용매추출 분리에서의 추출거동 및 선택성 *임서영, 유경근(국립한국해양대학교), 신동주(한국지질자원연구원)
PH-26	베타 스포듀민의 리튬 수침출에 미치는 Ca계 첨가제의 영향 *김태웅, 유경근(국립한국해양대학교), 신동주(한국지질자원연구원)
PH-27	바스트나사이트 원광, 부유선별 정광 및 광미로부터 희토류 회수를 위한 바이오침출 거동 연구 *윤선종, 손우진, 이승은, 김시온, 정현, 황국화(전북대학교)
PH-28	폐 DSA스크랩으로부터 이리듐, 루테늄 농축을 위한 황산 기반 티타늄의 선택적 침출 연구 *박민서(전북대학교, 성일하이메탈), 안준모(전북대학교), 윤호상, 김인태, 공수진, 서덕형(성일하이메탈)
PH-29	폐 반응용기로부터 회수된 리튬추출액(Li_2SO_4)의 불순물 제어 및 수산화리튬 전환 공정 연구 *최민서, 왕제필(국립부경대학교)
PH-30	철 세멘테이션 후 자력선별 공정을 이용한 양극재의 선택적 회수 *김지영, 유경근(국립한국해양대학교)
PH-31	생물전기화학적 시스템을 통한 리튬이온배터리 양극재스크랩의 금속 침출 거동 *장연서, 손성훈, 정해성(국립창원대학교)
PH-32	석탄회로부터 희토류 회수를 위한 침투식 추출제련의 열역학 및 동역학적 거동 분석 *Lai Quang Tuan(한국지질자원연구원), Choi Sung Oong(강원대학교), Jiwhan Ahn(한국지질자원연구원)
PH-33	알칼리 및 아민 매개 반응 환경의 해수로부터 침전 탄산칼슘을 생성하기 위한 수계 광물화 경로 *Mihret Melese Baruda(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원), Lai Quang Tuan, Jiwhan Ahn(한국지질자원연구원)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 습식제련(계속)

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PH-34	베나노스케일 탄소점 제조를 위한 베트남 연소 부산물 내 잔류 탄소질 분획의 순차적 탄산화 및 부유 선별 분리 *Adrian Javier Sing Jethmal(과학기술연합대학원대학교, 한국지질자원연구원), Mohd Danish Khan(Daeho-Al), Jiwhan Ahn(한국지질자원연구원)
PH-35	조성이 다양한 열전 폐기물 매트릭스로부터 리튬염 수율 최적화를 위한 다변량 데이터 모델링 *Mohd Danish Khan(Daeho Al, 한국지질자원연구원), Adrian Javier Sing Jethmal(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), Ji Whan Ahn(한국지질자원연구원)
PH-36	이온성 액체와 CO_2 결합 탈거법을 이용한 석탄 비산재로부터 3가 라타넘족 원소의 저독성 시약 기반 용매금속학적 추출 *Hyebin Kim, Ahn Ji Whan(한국지질자원연구원), Adrian Javier Sing Jethmal(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교)
PH-37	알루미노실리케이트 비산재의 미세다공성 제올라이트 13X로의 순환적 전환 및 산업용 흡착제와의 정량적 CO_2 흡착 성능 비교 *김주언(한국지질자원연구원), Mohd Danish Khan(Daeho-Al), 안지환(한국지질자원연구원)
PH-38	란타나이드의 이동성 증대 및 선택적 용해를 위한 유리질 알루미노실리케이트 미세구조의 알칼리 열수 재구성 *Abdullah Bin Fazal(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교), Mohd Danish Khan(Daeho-Al), Choi Sung Oong(강원대학교), Ahn Ji-Whan(한국지질자원연구원)
PH-39	흡착제 도금막을 이용한 전자산업 폐수 내 유가금속 전기화학적 회수 *김마리앙드레, 한종인(한국과학기술원, 레빙엠포)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 소재

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PM-01	폐배터리 회복전압 제어를 위한 저항방전 장치 개발 및 처리공정 안전성 평가 *양현선, 김건우, 최수경, 김민재, 임유정, 문종근(한국건설생활환경시험연구원)
PM-02	비활성 촉매로부터 재활용된 희유금속의 시험기준과 품질인증 방안 연구 *김효경, 류지승, 전미진, 전용우(한국산업기술시험원)
PM-03	NCM811 블랙파우더로부터 직접 전기화학적 리튬 금속 회수를 위한 작동 전위 범위의 제일원리 계산 기반 고찰 *응우옌 쑤언 비엣, 주신형, 이종현(충남대학교)
PM-04	단일 단계 용융 합금화 및 급랭을 통한 $Li_{13}Si_4$의 선택적 합성 *주신형, 이종현(충남대학교)
PM-05	Taylor-Couette 유동을 이용한 가-액 반응 강화 및 고순도 탄산마그네슘의 신속 합성 *김지민, 정재민(한국지질자원연구원), 유재범(충남대학교)
PM-06	폐배터리 유래 조탄산리튬의 고순도화 및 수산화리튬 전환 공정 연구 *김재형, 이지현, 홍현선(성신여자대학교)
PM-07	제조방식 변화에 따른 소다라임 특성 평가 *김영진, 김나영, 김태형, 정우철, 조진상(한국석회석신소재연구소)
PM-08	폐 Cu 타겟 전해정련 시 전위 및 시간 조건에 따른 Cu 전착 성장 거동 및 평가 *문정식, 박지니, 김대근(고등기술연구원)
PM-09	아연 제련공정에서 발생 된 폐Mg-Cr내화벽돌을 재활용한 내화물의 기초 평가 *김희선, 김대원, 진연호(고등기술연구원), 김현아, 양수영(금강RC)
PM-10	폐리튬전지 재자원화에서 NaOH 처리를 통한 블랙매스로부터 알루미늄 제거가 리튬 회수율에 미치는 영향 *권현석, 주우현, 신현호(국립금오공과대학교, 아이에스에코솔루션), 조용수(아이에스에코솔루션), 이철경(국립금오공과대학교)
PM-11	염소화 기반 재활용 공정 중 $LiFePO_4$ 양극재의 입자 단위 분석 *김성욱, 전민구, 김형섭(한국원자력연구원), 김경선(한국원자력연구원, 고려대학교)
PM-12	사용후 배터리로부터 전기화학적 수산화리튬 회수 및 양극활물질 재합성을 통한 폐쇄형 자원순환 연구 *김은석(한국생산기술연구원, 인하대학교), 임하나, 김현종(한국생산기술연구원), 최진섭(인하대학교)
PM-13	커피박의 다단계 처리공정을 통한 친환경 기능성 소재화 *신창훈(네오에코, 서울시립대학교), 하정현(네오에코)
PM-14	폐공시체 기반 순환골재의 잔류 페이스트 영향에 따른 ASR 내구성 평가 *정우철, 조진상, 김병렬, 김나영, 최문관(한국석회석신소재연구소)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 자원

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PR-01	산업부산물 기반 인공골재의 CO_2 양생에 따른 탄산화 특성 *김나영, 김태형, 최문관, 김영진(한국석회석신소재연구소)
PR-02	디스크 방식 펠릿타이저 운전 조건에 따른 인공골재의 입도 분포 특성 *김나영, 김영진, 김태형, 정우철, 조진상(한국석회석신소재연구소)
PR-03	볼밀링 공정변수에 따른 산화아연 미세구조 제어 및 자외선 차단 적용성 평가 *김예린, 홍현선(성신여자대학교)
PR-04	리튬이온배터리 Black Mass 부유선별 후 양극 유가금속 회수 및 활용 *전찬미, 유준상, 홍길상, 김관호, 유광석(한국지질자원연구원)
PR-05	타이타늄 광석의 자원활용 확대를 위한 선광 및 광미 활용 특성 연구 *김양수, 이형주, 조진상, 김영진, 서준형(한국석회석신소재연구소)
PR-06	사용 후 배터리 전극의 집전체–활물질 분리를 위한 초음파 박리 기초 연구 *김민혁, 이정, 김종배(이알)
PR-07	소형 폐전기전자(Small WEEE)로부터 블랙매스의 회수 및 부유선별: 열전처리에 따른 흑연·금속·불순물의 분리 특성 평가 *Donghyun Kim, Sunghyun Bae, Jaemin Ahn, Serin Kang, Seongmin Kim, Seongsoo Han, Wonjae Lee, Yosep Han(KIGAM)
PR-08	재활용 알루미늄 합금의 불순물 및 압출 공정 조건에 따른 기계적 신뢰성 변화 연구동향 *김유진, 이정재, 차민준, 이진영(서울과학기술대학교), 하원, 김명균(포항산업과학연구원), 신병수(고등기술연구원), 최성규(동산테크), 김병철(디에스리퀴드), 박수림(휘일), 한상돈(신화에이치앤티), 변재원(서울과학기술대학교)
PR-09	폐배터리 블랙파우더 내 정전기적 피복 파괴 및 공기-비중선별을 통한 Al·Cu 불순물 제어 공정 연구 *이재웅(한국생산기술연구원), 서지민, 박경준, 장성호(페트로마인코리아)
PR-10	배터리 재활용 공정 산물의 분리막 함량 정량화 연구 *문서진, 강세린(한국지질자원연구원, 국립창원대학교), 이원재, 서주범(한국지질자원연구원), 정해성(국립창원대학교), 한요셉, 한성수(한국지질자원연구원, 과학기술연합대학원대학교)
PR-11	폐배터리 재활용 공정에서 유가금속 손실 방지를 위한 습식 선별 기술의 적용성 평가 *김민규, 권석제, 손재홍, 김종일, 오영기(에너지머티리얼즈)
PR-12	자력선별 및 알칼리 개질을 적용한 철강슬래그의 니켈·인 제거 연구 *권효정, 차종문(동아대학교)
PR-13	AI 활용 폐플라스틱 선별 공정 및 기술 연구 *박명선, 황용우(인하대학교)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 건식제련

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PP-01	부산물 재활용 Flux가 탈황에 미치는 영향 및 반응기구 제시 *차은환, 정용석(한국공학대학교)
PP-02	폐IGZO 타겟 분말의 수소 열환원 기초 연구 *김대원, 안낙균, 이광희(고등기술연구원), 박태준(한국지질자원연구원)
PP-03	폐PGM 촉매로부터 회수된 Cu 합금의 산화정련 공정을 통한 귀금속 농축 거동 *이자성, 한승연, 김영민, 황인성, 김용환(한국생산기술연구원)
PP-04	탄소열 환원 기반 Fe-P 합금의 수소 발생 촉매 특성 및 메커니즘 *명재욱, 김선중(조선대학교)
PP-05	1273K에서 Biomass 활용 DRI 복합 펠렛의 환원 및 탄소 거동 *김윤하, 김선중(조선대학교)
PP-06	비철제련슬래그 플럭스를 이용한 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석으로부터 네오디뮴의 건식제련 회수 거동 연구 *김창정(국립부경대학교), 정연준(현대자동차), 왕제필(국립부경대학교)
PP-07	전로슬래그 팽창성 저감을 위한 스팀에이징 연구 *강은솔, 조성구, 박성훈(포항산업과학연구원)

◎ 제65회 학술발표대회 : 포스터발표 – 순환정책

[10월 15일(목) 14:00~17:50(질의응답 17:20~17:50), 강의실 2-가이아]

No.	발표제목(* 발표자)
PC-01	시멘트 산업 배출 이산화탄소의 화학적 전환 실증 현황 및 사례 분석 *김영진, 김나영, 김태형, 최문관, 조진상(한국석회석신소재연구소)
PC-02	폐플라스틱 열분해유 생산공정의 ORC 폐열회수 설비 도입에 따른 온실가스 배출 저감 효과 분석 *김민채, 노형주, 이규림, 황용우(인하대학교)
PC-03	전과정 관점의 영농폐 LDPE 발생 및 수거·재활용에 따른 환경영향 시계열 분석 *어진성, 노형주, 이재영, 황용우(인하대학교)

◎ 특별심포지엄 – 아연 정광 및 분진으로부터 탄소저감형 건식제련 기술개발

[10월 14일(수) 14:00~16:50, 강의실 2 – 가이아]

No.	발표시간	발표제목(* 발표자) 좌장 : 김한진 센터장(세일정기)
	14:00-14:10	「개회 및 인사말」 김한진 센터장(세일정기(주))
아연정광-1	14:10-14:30	TSL 스파이스 산물의 안티모니 침출거동 *유경근(국립한국해양대학교)
아연정광-2	14:30-14:50	아연 소광 내 Fe 영향에 따른 Pb 염화 반응 거동 *정항철, 장대환, 정우철, 문정식(고등기술연구원)
아연정광-3	14:50-15:10	아연 소광 분진으로부터 선택적 침출 및 반응속도론 적용 연구 *김희선, 김대원, 진연호(고등기술연구원)
아연정광-4	15:10-15:30	비철 제련 기술의 탄소배출량 검증 체계 고도화 *조연민, 설소영, 김동윤((재)한국화학융합시험연구원)
15:30-15:50		휴 식
아연정광-5	15:50-16:10	비철 제련 기술개발에 따른 제품(아연괴, 산화아연) 탄소배출량 산정 *송유근, 위대형, 강병주, 박세연, 곽인호((주)엔디렉션)
아연정광-6	16:10-16:30	커피찌꺼기 바이오차를 이용한 아연 배소 분진의 탄소열환원-재산화 기반 고순도 ZnO 회수 *심선호, 신선명, 류태공, 김선경, 정인철, 박태준(한국지질자원연구원)
아연정광-7	16:30-16:50	소광아연으로부터 Zn 회수를 위한 Mg Turnings 및 폐태양광셀 유래 Si의 환원특성 비교 *유주원, 왕제필(국립부경대학교)
16:50~		기념촬영 및 폐회

◎ 특별심포지엄 – 백금족 순환소재 활용 에너지 산업용 부품 제조 기술 개발

[10월 14일(수) 13:30~17:15, 강의실 3 – 에메랄드]

No.	발표시간	발표제목(*발표자)
		좌장 : 최인혁(에스쓰리알)
13:30-13:35		**개회**
백금족-1	13:35-13:50	귀금속 함유 폐촉매로부터 Pd, Pt 회수, 농축 및 분리 연구 및 실증 *최인혁, 소홍일, 권숙철, 구본우, 이환수(에스쓰리알)
백금족-2	13:50-14:05	백금 회수 공정 최적화 및 파일럿 구축 기술개발 *이희수, 정상진(대흥엠앤티)
백금족-3	14:05-14:20	백금족 자원순환 고도화를 위한 친환경 침출·전해 및 전자구조 기반 촉매 스크리닝 기술 *배무기, 최영중, 정인철, 김수경, 이현주(한국지질자원연구원)
백금족-4	14:20-14:35	산화 정련 공정을 통한 폐 PGM 촉매 구리합금의 귀금속 농축 거동 연구 *김영민, 황인성, 한승연, 이자성, 김용환(한국생산기술연구원)
백금족-5	14:35-14:50	산화 온도 및 시간에 따른 Pd-Pt 합금의 PdO 형성 거동 *권주혁, 윤유정, 박헌수(엔에이치리사이텍컴퍼니)
백금족-6	14:50-15:05	순환자원 기반 백금·팔라듐 촉매 전구체 합성 공정 연구 *박재량, 강유빈, 안낙균(고등기술연구원)
백금족-7	15:05-15:20	리싸이클 귀금속 활용한 연료전지용 고성능 촉매 소재 설계 및 특성 평가 *양대수, 최소원, 박현열(코렌스알티엑스)
15:20-15:30		**휴 식**
		좌장 : 윤호상(성일하이메탈)
백금족-8	15:30-15:45	이리듐, 루테늄의 분리를 위한 용매추출 기초 연구 *안준모, 이상현, 정현수, 김현주(전북대학교), 김혜인(한국지질자원연구원), 안재우(대진대학교)
백금족-9	15:45-16:00	DSA 전극스크랩으로부터 이리듐 자원의 회수 및 이리듐 전구체 화합물 제조 기술에 관한 연구 *김인태, 공수진, 서덕형, 박민서, 하다혜, 윤호상(성일하이메탈)
백금족-10	16:00-16:15	이리듐 재자원화를 위한 건식 박리 및 후처리 연구 *이승욱, 이초롱, 유연정, 장원영(동아특수금속)
백금족-11	16:15-16:30	전해질 침투 방지용 산화물 박막을 이용한 DSA 전극 내구성 향상 연구 *남상훈, 장혜림, 신경선, 유희종, 김영준(테크윈)
백금족-12	16:30-16:45	이리듐계 치수안정성 전극의 표면형상에 따른 전기화학적 특성 평가 *박성철, 장진만, 이원식, 김민서, 김재환, 정찬엽, 손성호(한국생산기술연구원)
백금족-13	16:45-17:00	양극전기도금법에 의한 Ir 산화물 전극 형성 거동에 관한 연구 *전하윤, 김혜령, 김민영, 이규환(한국재료연구원)
백금족-14	17:00-17:15	다공성 Ir 코팅 전극 실험 환경 조성 및 성능 평가 *이진아, 유문상(심텍)
17:15~		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – 저품위 산화광 대상 니켈원료 제조공정 기술개발

[10월 14일(수) 13:30~18:00, 강의실 4 – 사파이어]

No.	발표시간	발표제목(*발표자)
		좌장 : 김진주(삼영플랜트)
산화광-1	13:30-13:45	효율적인 니켈선광을 위한 파분쇄 설비의 기술개발 *김진주, 기형호, 이창선, 채경호, 이수민(삼영플랜트)
산화광-2	13:45-14:00	탄자니아 린디지역 니켈 자원 확보를 위한 기초탐사 *김흥원, 윤주선, 이종진(문무)
산화광-3	14:00-14:15	탄자니아 니켈광 선별 기술 최적화 및 복합 선별 공정 개발 *전호석, 고병헌, 홍길상, 김성민, 이경현, 최희경, 최성보(한국지질자원연구원)
산화광-4	14:15-14:30	고 배율 광학시스템 기반 광물 파분쇄 공정 모니터링 기술개발 *이준하, 김병학(한국생산기술연구원)
산화광-5	14:30-14:45	저품위 니켈광 공정 및 공급망 데이터 분석을 위한 시뮬레이션 알고리즘 개발 *정호영, 주민석(국립부경대학교)
14:45-15:00		휴 식 좌장 : 이승훈(한일화학)
산화광-6	15:00-15:15	니켈광/매트 습식공정기반 미립화 및 침출연구 *이승훈, 박찬우, 손진영(한일화학공업)
산화광-7	15:15-15:30	니켈매트 황산침출에 대한 3가철이온의 영향 *유경근, 김대령(국립한국해양대학교)
산화광-8	15:30-15:45	탄자니아산 니켈광의 니켈농축 및 미세분말화 공정 연구 *배성욱, 김명석, 신재홍, 서석준(한국생산기술연구원)
산화광-9	15:45-16:00	고순도 니켈정제 효율 향상을 위한 니켈 매트 침출액 내 미량 코발트, 망간의 선별적 분리 거동 연구 *이진영, 강희남, 이태혁, 장윤재(한국지질자원연구원)
산화광-10	16:00-16:15	탈철니켈매트 내 니켈 침출률 향상에 관한 연구 *이준섭, 강동준, 김해곤, 김혜림(한국광해광업공단)
산화광-11	16:15-16:30	니켈매트 활용, 분리막 전해침출을 통한 고순도 황산니켈 수용액 제조기술 개발 *조주영, 강용호, 황봉준, 남용준(한라캐스트)
16:30-16:45		휴 식 좌장 : 윤성진(대웅)
산화광-12	16:45-17:00	탄자니아 니켈광 광미의 물리화학적 특성 및 니켈 존재형태 평가 *배상용, 주원정, 김재현, 정은혜(서울대학교)
산화광-13	17:00-17:15	탄자니아 니켈광 광미의 공정 조건에 따른 유가금속 침출 특성 평가 *이다경, 강희원 김정우, 김현중(한양대학교)
산화광-14	17:15-17:30	니켈광물 공정폐기물 재활용을 위한 DEM 기반 혼합 공정 모델 개발 및 혼합 특성 분석 *이한솔, 이경현, 김광목, 최준현, 이훈(한국지질자원연구원)
산화광-15	17:30-17:45	탄자니아 니켈광 광미를 활용한 건설자재 개발에 관한 기초연구 *윤성진, 이영원, 이종주(대웅), 박수현(지안산업)
산화광-16	17:45-18:00	니켈산화광 광물찌꺼기의 비소흡착 특성평가 *최의규, 이영재, 김행운, 박제현(한국광해광업공단)
18:00~		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – Ni, Cr 함유 폐 스크랩으로부터 신제련/추출 기술 기반 전주기 Ni/Cr 소재화 기술 개발

[10월 14일(수) 14:00~17:30, 강의실 5 – 토파즈]

No.	발표시간	발표제목(*발표자)
		좌장 : 신재홍(한국생산기술연구원)
14:00-14:10		**개회**
소재화-1	14:10-15:00	저품위 STS 스크랩으로부터 황산니켈 제조를 위한 Bench Scale 침출·정제 공정 최적화 *강용호(한라캐스트), 박경태(한국생산기술연구원), 김홍인(한국지질자원연구원), 이종혁(한국나노오트), 강정신(서울대학교), 최진섭(인하대학교), 송민섭(코스모신소재)
15:00-15:10		**휴 식**
		좌장 : 강용호(한라캐스트)
소재화-2	15:10-16:00	폐스크랩 기반 고순도 전해니켈 회수 및 MLCC용 초미립 나노분말 합성 공정 최적화 *심문수, 김지용(엔에이치리사이텍컴퍼니), 강민석(창성), 심재진(한국생산기술연구원), 유병욱(한국재료연구원), 강희수(포항산업과학연구원)
16:00-16:10		**휴 식**
		좌장 : 심문수(엔에이치리사이텍컴퍼니)
소재화-3	16:10-17:00	니켈화합물 활용 고활성 니켈 분말 제조를 위한 카보닐 공정 기술 개발 및 촉매특성 평가 *이장수, 이서환(비씨엔씨), 최상훈, 김호병(고등기술연구원), 김인호(엔에이티엠), 신재홍(한국생산기술연구원), 김영재(인하대학교), 이근재(단국대학교)
소재화-4	17:00-17:30	니켈, 크롬 함유 폐스크랩 내 니켈/크롬 추출 및 소재화를 위한 신제련/추출 공정 기술 개발 *강용호(한라캐스트)
17:30~		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – 금속부산물을 활용한 탄소저감형 합금강 전구물질 제조 기술 개발

[10월 14일(수) 13:30~17:00, 강의실 6 – 가온]

No.	발표시간	발표제목(*발표자)
		좌장 : 안재영(세아창원특수강)
합금강-1	13:30-14:00	철강 열간압연공정에서 발생한 밀스케일(FeO) 및 석회부산물(CaO)을 활용한 탈인제 개발을 위한 원료 선정 및 탈인능 시뮬레이션 *박찬근, 이창민(렘코)
합금강-2	14:00-14:30	폐 Mg 탈황제의 CaO 코팅이 탈황능에 미치는 영향에 관한 연구 *정재윤, 강유빈, 채홍준(고등기술연구원)
14:30-14:45		**휴 식**
		좌장 : 최상배(조선내화)
합금강-3	14:45-15:15	전기로 제강 공정의 Scope 1~3 탄소배출 모니터링을 위한 데이터·분석 플랫폼 *강성은, 친시에, 임성우, 김윤미, 김기한(인이지)
합금강-4	15:15-15:45	폐배터리 부산물 기반 재활용 니켈 생산공정의 전과정 온실가스 배출량 평가 *차준호, 박찬규(한국산업기술시험원)
15:45-16:00		**휴 식**
		좌장 : 박찬규(한국산업기술시험원)
합금강-5	16:00-16:30	로터리 킬른을 이용한 Zn dust recycling 열역학 해석 *정인호, Marie-Aline Van Ende, 최운오, 노병일(서울대학교)
합금강-6	16:30-17:00	Ni-Cr 함유 부산물 자원화 기술 개발 *정용수, 김희원(포항산업과학연구원), 홍순곤(POMIA), 성민경(베페사징크코리아)
17:00~		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – 리싸이클 연구의 새로운 방향

[10월 14일(수) 16:00~17:30, 강의실 7 – 미르]

No.	발표시간	발표제목(*발표자)
		좌장 : 유경근 교수(국립한국해양대학교)
리싸이클-1	16:00-16:30	침출액으로부터 고순도 금속 회수를 위한 고선택도 및 고회수율 전기증착 기술 *김귀용(울산과학기술원)
리싸이클-2	16:30-17:00	공융용매를 활용한 친환경적인 이차전지 리사이클링 기술 이현국(건국대학교), 이지현, 홍현선(성신여자대학교), *김재엽(건국대학교)
리싸이클-3	17:00-17:30	폐리튬이온배터리 재활용을 위한 유기산 기반 대체침출 연구 *안준모, 정혜원, 이제승, 원정환, 정현수(전북대학교)
17:30~		**종합토론 및 폐회, 기념촬영**

◎ 특별심포지엄 – 철강 부산물 자원순환의 현재와 미래

[10월 15일(목) 14:00~17:40, 강의실 3 – 에메랄드]

No.	발표시간	발표제목(*발표자) 좌장 : 문석윤(서울과학기술대학교)
기조연설	14:00-14:30	탄소중립 시대, 철강 슬래그 자원순환의 패러다임 전환 *조종오(현대제철)
[Part1] 슬래그 재활용 관련 당면 과제 및 대응 방안	14:30-14:50	철강 슬래그의 재활용 현황 및 정책 과제 *남정임(한국철강협회)
	14:50-15:10	건설용 골재로서 슬래그의 주요 특성 및 적용 사례 *홍성인(현대제철)
[Part2] 슬래그 기반 친환경 건설소재 자원순환 기술	15:10-15:30	친환경 고속도로 건설을 위한 슬래그 활용 방안 및 향후 계획 *김홍삼(도로교통연구원)
	15:30-15:50	시멘트 산업 탄소중립을 위한 슬래그 비탄산염 원료 활용 기술 *최재원(아세아시멘트)
	15:50-16:10	친환경 콘크리트 혼합재로써 전로슬래그의 재활용 활성화 방안 고찰 *류근우(실크로드시앤티)
휴식	16:10-16:30	**Coffee Break**
[Part3] 슬래그 기반 저탄소 고부가 자원순환 기술	16:30-16:50	철강부산물 활용 광물탄산화 기반 CCU 기술 개발 및 적용 방안 *남성영(현대제철)
	16:50-17:10	간접탄산화 기술을 이용한 슬래그 기반 고순도 탄산염 제조 기술 개발 *조환주(한국지질자원연구원)
	17:10-17:30	철강부산물 기반 유가금속 회수 및 기술 개발 동향 *문석윤(서울과학기술대학교)
종합 정리	17:30-17:40	세션 주요 논의사항 및 향후 과제 *차광서(현대제철)
17:40~		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – 자원순환 연구의 길을 열다: 안재우 교수의 학문과 미래세대의 도전

[10월 15일(목) 13:30~17:40, 강의실 6 – 가온]

No.	발표시간	발표제목(*발표자)
13:30-13:40		심포지엄 소개 : 박경수(고등기술연구원) 축사 : 손성호 회장, 이강명 대표(성일하이텍)
[기조강연]	13:40-14:00	사용후 리튬이온배터리 자원회수를 위한 습식제련 기술과 미래 과제 *안재우(대진대학교)
[세션-1] 좌장 : 이아름(성일하이텍)		
자원순환-1	14:00-14:20	폐리튬이온배터리 전해액의 순환 자원화를 위한 감압 여과–용매추출 연계 분리·정제 공정 개발 *홍승택, 장재혁, 김준희. 윤연영, 안재우(대진대학교)
자원순환-2	14:20-14:40	친환경 금속광물자원의 습식제련을 위한 대체 침출 시스템 연구 *안준모(전북대학교), Jaeheon Lee(Colorado School of Mines)
자원순환-3	14:40-15:00	배터리 핵심소재의 고순도 회수를 위한 용매추출 공정 *김홍인, 손정수, 김수경, 양동효, 심현우, 제진영(한국지질자원연구원)
자원순환-4	15:00-15:20	마이크로웨이브를 활용한 폐리튬이온전지에서 리튬의 선택적 침출 및 Li_2CO_3 회수 *안낙균, 김기현, 박경수(고등기술연구원)
15:20-15:40		**휴 식**
[세션-2] 좌장 : 안준모(전북대학교)		
자원순환-5	15:40-16:00	자원순환 시대의 용매추출: 산업의 요구와 대응전략 *이고기, 홍영란, 김병규(포항산업과학연구원), 박주황, 장승규(포스코에이치와이클린메탈)
자원순환-6	16:00-16:20	LFP 배터리 시장 성장과 재활용 산업의 대응 *조연철, 이아름, 최희영(성일하이텍)
자원순환-7	16:20-16:40	수소산업의 폐자원과 순환자원화 공정의 소개 *김인태, 공수진, 주성연, 서덕형, 김지훈, 조의현, 박민서, 하다혜, 오창관, 윤호상(성일하이메탈)
자원순환-8	16:40-17:00	용매추출제 합성 공정 및 적용 *문용수, 장연희(이에이포스)
17:00~17:40		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – 순환경제형 미활용 흑연 고부가 소재화 기술개발사업

[10월 16일(금) 09:00~15:15, 강의실 4 – 사파이어]

No.	발표시간	발표제목(*발표자) 좌장 : 국민철 이사(케이비엘러먼트)
09:00-09:30		**개회**
순환경제-1	09:30-09:45	흑연재자원화 공정의 LCA 분석 프레임워크 구축 *김하나, 신지우, 송민주, 신규수(한국과학기술원), 이청희(충남대학교)
순환경제-2	09:45-10:00	신공정의 경제성 분석 *류귀태, 신지혜, 서지한(지티랩)
순환경제-3	10:00-10:15	흑연 재자원화 제품의 전주기 탄소배출량 산정결과에 대한 검증 *심소정, 홍길환, 차재두, 박대건, 박주은, 전혜원(한국산업기술시험원)
순환경제-4	10:15-10:30	미활용 흑연의 물성규명 및 전처리(파쇄/선별/입도제어) 공정 기초설계 *제현국(코넥서스글로벌), 김왕현(강원테크노파크)
10:30-10:45		**휴식**
순환경제-5	10:45-11:00	폐배터리 파쇄분말 내 유가금속 추출정제를 통한 음극카본 분리 및 고순도 카본소재화 기술 *송기환, 서장현, 김은혁, 이아정(새빗켐), 정재민(한국지질자원연구원)
순환경제-6	11:00-11:15	저농도 황산 및 CO_2 보조 유동 반응을 이용한 미활용 흑연의 고순도 정제 *변련수, 황승욱, 김지민, 정재민(한국지질자원연구원)
순환경제-7	11:15-11:30	고온염소가스처리를 통한 흑연 고순도화 및 흑연 응용기술 개발 *구혜영, 이준원, 오정은, 김현우, 양철민, 안석훈(한국과학기술연구원)
순환경제-8	11:30-11:45	상용흑연 음극소재의 물리·전기화학적 특성 분석 기반 미활용 흑연 재자원화 기준 성능 확보 *곽철환, 허윤석, 황승규(인하대학교), 한영규(동국대학교)
11:45-13:00		**휴식 및 점심**
순환경제-9	13:00-13:15	CO2 활용 리튬 자원화를 위한 탄산화 공정 개발 및 탄산리튬 특성 평가 *최원민, 윤조희(에모닉), 권순억, 고진만(에코프로HN)
순환경제-10	13:15-13:30	Co/Ni/Mn 탄산염·수산화물의 황산화를 통한 $CoSO_4$·$NiSO_4$·$MnSO_4$ 제조 기술 개발 *유재춘, 임정현, 한수진, 이창제, 우재현, 신준호(세중이에스)
순환경제-11	13:30-13:45	미활용 흑연 정제 공정 모니터링 센서 및 시스템 개발 *노동기, 박주하, 이경균(나노종합기술원)
순환경제-12	13:45-14:00	AI 공정 최적화 및 최적화 프레임워크 구축 *박재영, 이건준, 류경민, 한영규(동국대학교)
14:00-14:15		**휴식**
순환경제-13	14:15-14:30	상용 정제흑연을 활용한 플라즈마 박리 조건 파악 및 장비 설계 *안해준, 배현민, 최민영, 국민철(케이비엘러먼트)
순환경제-14	14:30-14:45	미활용 흑연의 고부가 소재를 위한 유동 제어 기반 박리 공정 개발 *최원민, 최봉길(강원대학교)
순환경제-15	14:45-15:00	블랙매스 양극 침출 후 잔사의 콜타르 코팅을 통한 음극재 재생 *양인찬, 오건희, 김태훈, 안정철(포항산업과학연구원)
순환경제-16	15:00-15:15	도전재 조합을 통한 리튬이차전지 NCM 양극의 전도 네트워크 및 전기화학적 성능 향상 *유선율, 김도원(국립한밭대학교)
15:15~		**기념촬영 및 폐회**

◎ 특별심포지엄 – 제3회 무기계 산업 부산물의 순환형 자원화 기술

[10월 16일(금) 09:00~12:10, 강의실 5 – 토파즈]

No.	발표시간	발표제목(*발표자) 좌장 : 차종문(동아대학교)
09:00-09:10		**「개회사」 – 이준호 센터장(고려대학교 친환경금속센터)**
무기계-1	09:10-09:40	[초청강연] 핵심광물 공급망과 국내 자원순환 산업의 연계 방향 *정은진(한국산업기술기획평가원)
무기계-2	09:40-10:10	[초청강연] 반도체 CMP 공정의 자원순환 이슈와 기술 동향 *이강천(광운대학교)
무기계-3	10:10-10:40	[초청강연] 탈황 폐촉매에서 바나듐의 건식 제련 회수 *박동휘, 이준호(고려대학교), Morita Kazuki(도쿄대학교), 정인호(서울대학교)
10:40-10:50		**휴 식**
무기계-4	10:50-11:10	[학생발표] 스크랩 기반 EAF 강의 강–산화물 계면에서의 구리 농화상 형성 및 안정성에 관한 연구 *조민서, 이준호, 김하은, 박지우, 이주영, 김도훈, 최연지(고려대학교)
무기계-5	11:10-11:30	[학생발표] EoL LIB로부터 유가금속 회수를 위한 공정 연구 *하륜, 권효정, 신현우, 강영조(동아대학교)
무기계-6	11:30-11:50	[학생발표] 무기계 부산물을 활용한 폐배터리의 업싸이클링 기술 *이주혁, 김영재, 권오서, 전상현, 최지원(인하대학교)
무기계-7	11:50-12:10	[학생발표] 폐플라스틱을 활용한 무기 부산물계 Bunsenite(NiO)의 환원 메커니즘 연구 *조모현, 김세호, 이원형, 조연하, 홍석우, 정두효(고려대학교)
12:10~		**기념촬영 및 폐회**

Contents

특별강연

제련에서 순환으로: 습식제련 연구의 발자취와 배터리 재활용의 미래 ····· 3
안재우

구두발표 : 습식제련

H-기조강연 From Electronic Waste to Critical Metals: Selective Recovery of Indium and Gallium Using Siderophores ····· 7
Eric D. van Hullebusch

H-01 용매추출 믹서-세틀러 다상유동 전산 모사 연구 ····· 8
김병준, 김나영, 송시정, 한상우, 김완이, 조성묵

H-02 폐리튬이온배터리의 황산침출액 내 미량 불순물 제거 연구 ····· 10
송시정, 박준용, 이상혜, 김채림, 김완이

H-03 활성탄을 이용한 황동광 정광의 부동태 억제 구리 침출 메커니즘 연구 ····· 11
Jae-Yeon Kim, Yu-Jin Kim, Jaeheon Lee

H-04 열처리 전처리에 의한 Zinc-Rich Leach Residue로부터 갈륨 침출 향상 ····· 13
최종원, 배무기, 이수경

H-05 폐리튬이온배터리 음극재로부터 고순도 흑연 회수 및 정제 공정에 대한 연구 ····· 14
김기현, 류철희, 안낙균, 박경수

H-06 폐연료전지 촉매로부터 메탄설폰산과 염화물을 이용한 백금족 원소의 침출 및 회수에 관한 연구 ····· 16
김승현, 친빅하, 송준근, 정지혜, 이재령

H-07 전기화학 분말화 니켈선철의 황산 침출액으로부터 철 제거 및 니켈 회수 ····· 18
페브리나와르타 부르한, 김명석, 하룬 카멜, 박경태, 신재흥

H-08 침출-철 재침전 통합공정을 통한 NdFeB 슬러지로부터 희토류 선택적 회수 ····· 20
임지수, 이수경, 윤호성, 김리나

H-09 블랙매스 관련 금속 산화물 및 유기화합물이 NCM 바이오침출에 미치는 영향 ····· 22
손우진, 윤선종, 이승은, 이상현, 안준모, 황국화

H-10 메탄술폰산-염화콜린 심층공융용매(DES)를 이용한 LCO 내 코발트의 선택적 침출 및 NMR 기반 메커니즘 규명 ····· 24
김유진, 카인와이진, 이소미, 김재연, 변재원

H-11 대체 환원제 보릿짚을 이용한 하이니켈 NCM 블랙매스의 메탄술폰산 침출반응 속도론 ····· 26
원정환, 양시영, 안준모

H-12 Mn pre-loading 기반 불순물 제거 및 Ni, Co, Mn 공추출을 통한 메탄술폰산 침출액의 전구체 합성 용액 제조연구 ····· 28
정현수, 양시영, 안준모

구두발표 : 자원처리

R-01 사용후 리튬이온배터리로부터 음극재와 양극재, 리튬을 회수하는 친환경 전처리(부유선별) 공정 ····· 33
유광석, 김관호, 홍길상

R-02 열처리 온도에 따른 NCM계 블랙매스의 상변환 및 흑연, 양극재, 리튬의 선별 거동 ····· 34
양찬우, 김관호, 홍길상, 유광석

R-03 부유선별을 통해 회수된 NCM 양극활물질의 직접 재생을 통한 결정구조 및 전기화학적 성능 회복 ····· 35
김동우, 김관호, 홍길상, 권경중, 유광석

R-04 추적자(Tracer)를 이용한 몰리브덴광 컬럼부선기의 체류시간분포(RTD) 특성평가 ····· 37
푸레브오윤빌렉, 이경현, 박철현

R-05 EOL 배터리 리사이클링 효율 향상을 위한 플라스틱 회수기술 개발 ····· 38
김학순, 김민식, 권태우, 김완이, 이주승

R-06 다이렉트 리싸이클링 전처리를 위한 전해액 제거 셀 제조 공정에 대한 기초 실험 ····· 39
김종배, 이정, 김민혁

R-07 광산 공정 폐기물 내 Ni의 존재형태에 따른 회수 가능성 평가 ····· 40
김재현, 주원정, 정은혜

구두발표 : 전해제련

E-01 미생물 전기분해전지에서 수소 생산 향상을 위한 운전 시간 및 양극 구성 최적화 ····· 43
손성훈, 장연서, 정해성

E-02 중성 전해질을 이용한 스테인리스강 전기화학적 제염 공정의 전해질 재사용성 평가 ····· 45
신재명, 이주영, 김완배, 손인준, 유병욱

E-03 미생물연료전지를 이용한 NCM523양극재스크랩으로부터 유가금속 회수 및 에너지 생산 ····· 47
장연서, 손성훈, 정해성

E-04 EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속의 일괄 전해 기초 연구 ····· 49
하륜, 신한균, 강영조, 류지훈

구두발표 : 건식제련

P-01 압력 및 온도 조건에 따른 니켈 카보닐화 반응속도론과 반응 메커니즘 규명 ····· 53
배성욱, 박경태, 박주현, 신재홍

P-02 조갈륨의 진공증류를 통한 고순도화 기초 연구 ····· 55
김기현, 홍명환, 박경수

P-03 바이오차 적용에 따른 철강부산물 내 Cr 환원 거동 ····· 57
박종형, 김선중

P-04 신경망을 이용한 다성분 용융 슬래그의 전기전도도 예측 ····· 59
임성록, Yuki Nobe, Masashi Nakamoto, Kiyoshi Fuji-ta, Toshihiro Tanaka

P-05 철강슬래그 기반 재활용 무기섬유의 기계적 특성 및 자동차용 복합부직포 적용 가능성 연구 ····· 61
박종빈

P-06 DRI 기반 전기로 공정 내 이차정련 슬래그 재활용성 평가 ····· 63
김유리, 이상범, 김기범, 손일

구두발표 : 순환정책

C-01 전해박리를 이용한 폐은스크랩 재자원화의 에너지 효율 및 환경성 평가 ····· 67
강청민, 강기현, 김춘산, 김수현, 이규림, 황용우

C-02 폴리에스터 함유 폐의류의 자원순환 및 관리체계 분석: 국내외 제도와 관리현황을 중심으로 ····· 69
김수현, 차민교, 황용우

C-03 리튬이온 배터리 재활용 중간생성물 용어 표준화: black mass, black powder, black alloy 제대로 파헤치기 ····· 71
노원규, 강진모, 김원우, 손지수, 박준혁, 권경중

C-04 플라즈마 기반 수소 생산기술의 전과정 온실가스 배출량 분석 ····· 73
이규림, 김수현, 서홍석, 황용우

C-05 LCA 기반 K-pop 앨범의 에코디자인 시나리오별 탄소배출 저감 효과 분석 ····· 75
김우진, 김선빈, 박가영, 황용우

포스터발표 : 습식제련

PH-01 폐리튬이온전지 침출액으로부터 고순도 탄산리튬 회수를 위한 다단계 습식 정제 공정의 설계 및 최적화 ····· 79
주우현, 신현호, 권현석, 조용수, 이철경

PH-02 Black Mass 내 불소 제거에 따른 리튬의 선택적 회수 특성 연구 ····· 81
신현호, 주우현, 권현석, 조용수, 이철경

PH-03 폐 Ti/MMO 전극 코팅 내 루테늄 및 이리듐 산화물의 침출 제고 방안 ····· 82
이현서, 윤수연, 하지윤, 이상훈

PH-04 수산화리튬 제조 공정 발생 저농도 리튬 함유 폐액의 재이용 ····· 83
유가연, 조형준, 이재원, 장한권, 류태공

PH-05 심층공융용매를 이용한 NCM 양극재의 침출 및 선택적 니켈 회수를 통한 황산니켈 제조 ····· 85
이지현, 홍현선

PH-06 NCM811 블랙매스의 침출 거동에 미치는 환원배소의 영향 ····· 87
김진혁, 최상훈, 김연우, 김지영, 박은수, 서상윤

PH-07 망초(Na_2SO_4)자원화를 위한 바이폴라막 전기투석 공정의 2액실 및 3액실 운전 특성 비교 ····· 89
김준희, 장재혁, 김주희, 박혜인, 안재우

PH-08 아연 옥살산염으로부터 열처리에 따른 결정상 변화에 관한 연구 ····· 90
김희선, 김대원, 진연호

PH-09 HF 사용량을 줄인 고순도 흑연 제조를 위한 EDDS 보조 H_2SO_4–HF 공정의 새로운 접근법 ····· 91
Serin Kang, Donghyun Kim, Jaemin Ahn, Sunghyun Bae, Seungwook Shin, Haesung Jeong, Yosep Han

PH-10 저농도 리튬 함유 폐액으로부터 불화리튬 회수를 위한 반응 특성 연구 ····· 93
임정현, 한수진, 이창제, 우재현, 신준호, 류태공, 유재춘

PH-11 아연 함유 2차 자원의 습식 침출 반응 속도론 연구 동향 ····· 95
김대원, 김희선

PH-12 NCM 블랙매스 메탄설폰산 침출액의 반용매 결정화 거동에 대한 용액 조성의 영향 ····· 96
박은지, 박현수, 김현중

PH-13 열분해 조건에 따른 NCM계 블랙매스의 금속 침출 거동 ····· 97
박소휘, 김현중

PH-14 Cu 및 Zn 제련 부산물로부터 Te 회수 및 scorodite 형성을 통한 As 안정화 사례 연구 ····· 98
안준모, 김현주, 임채린, 박찬희, 원정환

PH-15 폐리튬이온전지 음극재 조금속으로부터 고순도 구리 회수를 위한 다전극 전해채취 공정 연구 ····· 100
박성철, 한승연, 김용환, 정찬엽, 김재환, 김민서, 이아름, 손성호

PH-16 황산배소 및 수침출 기반 폐 반응용기로부터 리튬 회수 효율 평가 ····· 102
김혜인, 조형준, 유가연, 구은주, 장한권, 류태공

PH-17 NCM 조성에 따른 무환원제 황산 침출계에서의 LFP-NCM 혼합 양극재 침출 영향 연구 ····· 104
박찬희, 안준모

PH-18 국내 극저품위 Ni 함유 광석의 자원화를 위한 FeNi 슬래그 내 Ni 용해 거동의 열역학적 평가 ····· 106
김동우, 허정호

PH-19 침출제 종류에 따른 IGZO 타겟 공정 부산물 내 금속 침출 거동 비교 ····· 108
안낙균, 김대원, 류철희, 김하준, 이광희

PH-20 황산염 배소산물 중 리튬침출에 미치는 탄산리튬형성의 영향 ····· 109
임동연, 유경근

PH-21 LIB 블랙매스 중 Al 불순물 제거를 위한 세멘테이션 후 자력선별공정개발 ····· 110
조민정, 유경근

PH-22 PC88A를 이용한 Tb 및 Dy의 선택적 용매추출 분리 특성 ····· 111
이종락, 신동주

PH-23 알칼리 바나듐(V)용액으로부터 $VOSO_4$ 합성을 위한 화학적 환원 및 침전 ····· 112
장익제, 이만승

PH-24 NCM622의 메탄설폰산-말릭산 혼합 유기산 침출액 대상 D2EHPA 기반 용매추출을 통한 유가금속 회수 연구 ····· 114
이진영, 하금단, 김유진, 이소미, 변재원

PH-25 PC88A를 이용한 Y-Dy 용매추출 분리에서의 추출거동 및 선택성 ····· 116
임서영, 유경근, 신동주

PH-26 베타 스포듀민의 리튬 수침출에 미치는 Ca계 첨가제의 영향 ····· 117
김태웅, 유경근, 신동주

PH-27 바스트나사이트 원광, 부유선별 정광 및 광미로부터 희토류 회수를 위한 바이오침출 거동 연구 ····· 118
윤선종, 손우진, 이승은, 김시온, 정현, 황국화

PH-28 폐 DSA스크랩으로부터 이리듐, 루테늄 농축을 위한 황산 기반 티타늄의 선택적 침출 연구 ····· 120
박민서, 안준모, 윤호상, 김인태, 공수진, 서덕형

PH-29 폐 반응용기로부터 회수된 리튬추출액(Li_2SO_4)의 불순물 제어 및 수산화리튬 전환 공정 연구 ····· 122
최민서, 왕제필

PH-30 철 세멘테이션 후 자력선별 공정을 이용한 양극재의 선택적 회수 ····· 124
김지영, 유경근

PH-31 생물전기화학적 시스템을 통한 리튬이온배터리 양극재스크랩의 금속 침출 거동 ····· 126
장연서, 손성훈, 정해성

PH-32 석탄회로부터 희토류 회수를 위한 침투식 추출제련의 열역학 및 동역학적 거동 분석 ····· 128
Lai Quang Tuan, Choi Sung Oong, Jiwhan Ahn

PH-33 알칼리 및 아민 매개 반응 환경의 해수로부터 침전 탄산칼슘을 생성하기 위한 수계 광물화 경로 ····· 131
Mihret Melese Baruda, Lai Quang Tuan, Jiwhan Ahn

PH-34 베나노스케일 탄소점 제조를 위한 베트남 연소 부산물 내 잔류 탄소질 분획의 순차적 탄산화 및 부유 선별 분리 ····· 134
Adrian Javier Sing Jethmal, Mohd Danish Khan, Jiwhan Ahn

PH-35 조성이 다양한 열전 폐기물 매트릭스로부터 리튬염 수율 최적화를 위한 다변량 데이터 모델링 ····· 136
Mohd Danish Khan, Adrian Javier Sing Jethmal, Ji Whan Ahn

PH-36 이온성 액체와 CO_2 결합 탈거법을 이용한 석탄 비산재로부터 3가 라타넘족 원소의 저독성 시약 기반 용매금속학적 추출 ····· 139
Hyebin Kim, Adrian Javier Sing Jethmal, Ahn Ji Whan

PH-37 알루미노실리케이트 비산재의 미세다공성 제올라이트 13X로의 순환적 전환 및 산업용 흡착제와의 정량적 CO_2 흡착 성능 비교 ····· 141
김주언, Mohd Danish Khan,안지환

PH-38 란타나이드의 이동성 증대 및 선택적 용해를 위한 유리질 알루미노실리케이트 미세구조의 알칼리 열수 재구성 ····· 143
Abdullah Bin Fazal, Mohd Danish Khan, Choi Sung Oong, Ahn Ji-Whan

PH-39 흡착제 도금막을 이용한 전자산업 폐수 내 유가금속 전기화학적 회수 ····· 146
김마리앙드레, 한종인

포스터발표 : 소재

PM-01 폐배터리 회복전압 제어를 위한 저항방전 장치 개발 및 처리공정 안전성 평가 ····· 151
양현선, 김건우, 최수경, 김민재, 임유정, 문종근

PM-02 비활성 촉매로부터 재활용된 희유금속의 시험기준과 품질인증 방안 연구 ····· 153
김효경, 류지승, 전미진, 전용우

PM-03 NCM811 블랙파우더로부터 직접 전기화학적 리튬 금속 회수를 위한 작동 전위 범위의 제일원리 계산 기반 고찰 ····· 154
응우옌 쑤언 비엣, 주신형, 이종현

PM-04 단일 단계 용융 합금화 및 급랭을 통한 $Li_{13}Si_4$의 선택적 합성 ····· 157
주신형, 이종현

PM-05 Taylor-Couette 유동을 이용한 가-액 반응 강화 및 고순도 탄산마그네슘의 신속 합성 ····· 158
김지민, 정재민, 유재범

PM-06 폐배터리 유래 조탄산리튬의 고순도화 및 수산화리튬 전환 공정 연구 ····· 159
김재형, 이지현, 홍현선

PM-07 제조방식 변화에 따른 소다라임 특성 평가 ····· 161
김영진, 김나영, 김태형, 정우철, 조진상

PM-08 폐 Cu 타겟 전해정련 시 전위 및 시간 조건에 따른 Cu 전착 성장 거동 및 평가 ····· 162
문정식, 박지니, 김대근, 임병용

PM-09 아연 제련공정에서 발생 된 폐Mg-Cr내화벽돌을 재활용한 내화물의 기초 평가 ····· 164
김희선, 김대원, 진연호, 김현아, 양수영

PM-10 폐리튬전지 재자원화에서 NaOH 처리를 통한 블랙매스로부터 알루미늄 제거가 리튬 회수율에 미치는 영향 ····· 165
권현석, 주우현, 신현호, 조용수, 이철경

PM-11 염소화 기반 재활용 공정 중 $LiFePO_4$ 양극재의 입자 단위 분석 ····· 166
김성욱, 전민구, 김형섭, 김경선

PM-12 사용후 배터리로부터 전기화학적 수산화리튬 회수 및 양극활물질 재합성을 통한 폐쇄형 자원순환 연구 ····· 168
김은석, 임하나, 최진섭, 김현종

PM-13 커피박의 다단계 처리공정을 통한 친환경 기능성 소재화 ····· 170
신창훈, 하정현

PM-14 폐공시체 기반 순환골재의 잔류 페이스트 영향에 따른 ASR 내구성 평가 ····· 171
정우철, 조진상, 김병렬, 김나영, 최문관

포스터발표 : 자원

PR-01 산업부산물 기반 인공골재의 CO_2 양생에 따른 탄산화 특성 ····· 175
김나영, 김태형, 최문관, 김영진

PR-02 디스크 방식 펠릿타이저 운전 조건에 따른 인공골재의 입도 분포 특성 ····· 176
김나영, 김영진, 김태형, 정우철, 조진상

PR-03 볼밀링 공정변수에 따른 산화아연 미세구조 제어 및 자외선 차단 적용성 평가 ····· 177
김예린, 홍현선

PR-04 리튬이온배터리 Black Mass 부유선별 후 양극 유가금속 회수 및 활용 ····· 179
전찬미, 유준상, 홍길상, 김관호, 유광석

PR-05 타이타늄 광석의 자원활용 확대를 위한 선광 및 광미 활용 특성 연구 ····· 181
김양수, 이형주, 조진상, 김영진, 서준형

PR-06 사용 후 배터리 전극의 집전체-활물질 분리를 위한 초음파 박리 기초 연구 ····· 182
김민혁, 이정, 김종배

PR-07 소형 폐전기전자(Small WEEE)로부터 블랙매스의 회수 및 부유선별: 열전처리에 따른 흑연·금속·불순물의 분리 특성 평가 ····· 183
Donghyun Kim, Sunghyun Bae, Jaemin Ahn, Serin Kang, Seongmin Kim, Seongsoo Han, Wonjae Lee, Yosep Han

PR-08 재활용 알루미늄 합금의 불순물 및 압출 공정 조건에 따른 기계적 신뢰성 변화 연구동향 ····· 185
김유진, 이정재, 차민준, 이진영, 하원, 김명균, 신병수, 최성규, 김병철, 박수림, 한상돈, 변재원

PR-09 폐배터리 블랙파우더 내 정전기적 피복 파괴 및 공기-비중선별을 통한 Al·Cu 불순물 제어 공정 연구 ····· 186
이재웅, 서지민, 박경준, 장성호

PR-10 배터리 재활용 공정 산물의 분리막 함량 정량화 연구 ····· 188
문서진, 강세린, 이원재, 서주범, 한요셉, 정해성, 한성수

PR-11 폐배터리 재활용 공정에서 유가금속 손실 방지를 위한 습식 선별 기술의 적용성 평가 ····· 189
김민규, 권석제, 손재홍, 김종일, 오영기

PR-12 자력선별 및 알칼리 개질을 적용한 철강슬래그의 니켈·인 제거 연구 ····· 190
권효정, 차종문

PR-13 AI 활용 폐플라스틱 선별 공정 및 기술 연구 ····· 191
박명선, 황용우

▌포스터발표 : 건식제련

PP-01 부산물 재활용 Flux가 탈황에 미치는 영향 및 반응기구 제시 ····· 195
차은환, 정용석

PP-02 폐IGZO 타겟 분말의 수소 열환원 기초 연구 ····· 196
김대원, 안낙균, 이광희, 박태준

PP-03 폐PGM 촉매로부터 회수된 Cu 합금의 산화정련 공정을 통한 귀금속 농축 거동 ····· 197
이자성, 한승연, 김영민, 황인성, 김용환

PP-04 탄소열 환원 기반 Fe-P 합금의 수소 발생 촉매 특성 및 메커니즘 ····· 198
명재욱, 김선중

PP-05 1273K에서 Biomass 활용 DRI 복합 펠렛의 환원 및 탄소 거동 ····· 200
김윤하, 김선중

PP-06 비철제련슬래그 플럭스를 이용한 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석으로부터 네오디뮴의 건식제련 회수 거동 연구 ····· 202
김창정, 정연준, 왕제필

PP-07 전로슬래그 팽창성 저감을 위한 스팀에이징 연구 ····· 204
강은솔, 조성구, 박성훈

▌포스터발표 : 순환정책

PC-01 시멘트 산업 배출 이산화탄소의 화학적 전환 실증 현황 및 사례 분석 ····· 209
김영진, 김나영, 김태형, 최문관, 조진상

PC-02 폐플라스틱 열분해유 생산공정의 ORC 폐열회수 설비 도입에 따른 온실가스 배출 저감 효과 분석 ····· 210
김민채l, 노형주, 이규림, 황용우

PC-03 전과정 관점의 영농폐 LDPE 발생 및 수거·재활용에 따른 환경영향 시계열 분석 ····· 213
어진성, 노형주, 이재영, 황용우

▌특별심포지엄 : 아연 정광 및 분진으로부터 탄소저감형 건식제련 기술개발

아연정광-1 TSL 스파이스 산물의 안티모니 침출거동 ····· 219
유경근

아연정광-2 아연 소광 내 Fe 영향에 따른 Pb 염화 반응 거동 ····· 220
정항철, 장대환, 정우철, 문정식

아연정광-3 아연 소광 분진으로부터 선택적 침출 및 반응속도론 적용 연구 ····· 222
김희선, 김대원, 진연호

아연정광-4 비철 제련 기술의 탄소배출량 검증 체계 고도화 ····· 223
조연민, 설소영, 김동윤

아연정광-5 비철 제련 기술개발에 따른 제품(아연괴, 산화아연) 탄소배출량 산정 ····· 224
송유근, 위대형, 강병주, 박세연, 곽인호

아연정광-6 커피찌꺼기 바이오차를 이용한 아연 배소 분진의 탄소열환원-재산화 기반 고순도 ZnO 회수 ····· 225
심선호, 신선명, 류태공, 김선경, 정인철, 박태준

아연정광-7 소광아연으로부터 Zn 회수를 위한 Mg Turnings 및 폐태양광셀 유래 Si의 환원특성 비교 ····· 226
유주원, 왕제필

특별심포지엄 : 백금족 순환소재 활용 에너지 산업용 부품 제조 기술 개발

백금족-1 귀금속 함유 폐촉매로부터 Pd, Pt 회수, 농축 및 분리 연구 및 실증 ····· 231
최인혁, 소홍일, 권숙철, 구본우, 이환수

백금족-2 백금 회수 공정 최적화 및 파일럿 구축 기술개발 ····· 232
이희수, 정상진

백금족-3 백금족 자원순환 고도화를 위한 친환경 침출·전해 및 전자구조 기반 촉매 스크리닝 기술 ····· 233
배무기, 최영중, 정인철, 김수경, 이현주

백금족-4 산화 정련 공정을 통한 폐 PGM 촉매 구리합금의 귀금속 농축 거동 연구 ····· 234
김영민, 황인성. 한승연, 이자성, 김용환

백금족-5 산화 온도 및 시간에 따른 Pd-Pt 합금의 PdO 형성 거동 ····· 235
권주혁, 윤유정, 박헌수

백금족-6 순환자원 기반 백금·팔라듐 촉매 전구체 합성 공정 연구 ····· 237
박재량, 강유빈, 안낙균

백금족-7 리싸이클 귀금속 활용한 연료전지용 고성능 촉매 소재 설계 및 특성 평가 ····· 239
양대수, 최소원, 박현열

백금족-8 이리듐, 루테늄의 분리를 위한 용매추출 기초 연구 ····· 240
이상현, 김혜인, 정현수, 김현주, 안재우, 안준모

백금족-9 DSA 전극스크랩으로부터 이리듐 자원의 회수 및 이리듐 전구체 화합물 제조 기술에 관한 연구 ····· 242
김인태, 공수진, 서덕형, 박민서, 하다혜, 윤호상

백금족-10 이리듐 재자원화를 위한 건식 박리 및 후처리 연구 ····· 244
이승욱, 이초롱, 유연정, 장원영

백금족-11 전해질 침투 방지용 산화물 박막을 이용한 DSA 전극 내구성 향상 연구 ····· 245
남상훈, 장혜림, 신경선, 유희종, 김영준

백금족-12 이리듐계 치수안정성 전극의 표면형상에 따른 전기화학적 특성 평가 ····· 247
박성철, 장진만, 이원식, 김민서, 김재환, 정찬엽, 손성호

백금족-13 양극전기도금법에 의한 Ir 산화물 전극 형성 거동에 관한 연구 ····· 248
전하윤, 김혜령, 김민영, 이규환

백금족-14 다공성 Ir 코팅 전극 실험 환경 조성 및 성능 평가 ····· 250
이진아, 유문상

특별심포지엄 : 저품위 산화광 대상 니켈원료 제조공정 기술개발

산화광-1 효율적인 니켈선광을 위한 파분쇄 설비의 기술개발 ····· 255
김진주, 기형호, 이창선, 채경호, 이수민

산화광-2 탄자니아 린디지역 니켈 자원 확보를 위한 기초탐사 ····· 256
김흥원, 윤주선, 이종진

산화광-3 탄자니아 니켈광 선별 기술 최적화 및 복합 선별 공정 개발 ····· 257
전호석, 고병헌, 홍길상, 김성민, 이경현, 최희경, 최성보

산화광-4 고 배율 광학시스템 기반 광물 파분쇄 공정 모니터링 기술개발 ····· 258
이준하, 김병학

산화광-5 저품위 니켈광 공정 및 공급망 데이터 분석을 위한 시뮬레이션 알고리즘 개발 ····· 259
주민석, 정호영

산화광-6 니켈광/매트 습식공정기반 미립화 및 침출연구 ····· 261
이승훈, 박찬우, 손진영

산화광-7 니켈매트 황산침출에 대한 3가철이온의 영향 ····· 262
유경근, 김대령

산화광-8 탄자니아산 니켈광의 니켈농축 및 미세분말화 공정 연구 ····· 263
배성욱, 김명석, 신재흥, 서석준

산화광-9 고순도 니켈정제 효율 향상을 위한 니켈 매트 침출액 내 미량 코발트, 망간의 선별적 분리 거동 연구 ····· 264
이진영, 강희남, 이태혁, 장윤재

산화광-10 탈철니켈매트 내 니켈 침출률 향상에 관한 연구 ····· 265
이준섭, 강동준, 김해곤, 김혜림

산화광-11 니켈매트 활용, 분리막 전해침출을 통한 고순도 황산니켈 수용액 제조기술 개발 ····· 266
조주영, 강용호, 황봉준, 남용준

산화광-12 탄자니아 니켈광 광미의 물리화학적 특성 및 니켈 존재형태 평가 ····· 267
배상용, 주원정, 김재현, 정은혜

산화광-13 탄자니아 니켈광 광미의 공정 조건에 따른 유가금속 침출 특성 평가 ····· 268
이다경, 강희원 김정우, 김현중

산화광-14 니켈광물 공정폐기물 재활용을 위한 DEM 기반 혼합 공정 모델 개발 및 혼합 특성 분석 ····· 269
이한솔, 이경현, 김광목, 최준현, 이훈

산화광-15 탄자니아 니켈광 광미를 활용한 건설자재 개발에 관한 기초연구 ····· 270
윤성진, 이영원, 이종주, 박수현

산화광-16 니켈산화광 광물찌꺼기의 비소흡착 특성평가 ····· 271
최의규, 이영재, 김행운, 박제현

▌특별심포지엄 : Ni, Cr 함유 폐 스크랩으로부터 신제련/추출 기술 기반 전주기 Ni/Cr 소재화 기술 개발

소재화-1 저품위 STS 스크랩으로부터 황산니켈 제조를 위한 Bench Scale 침출·정제 공정 최적화 ····· 275
강용호, 박경태, 김홍인, 이종혁, 강정신, 최진섭, 송민섭

소재화-2 폐스크랩 기반 고순도 전해니켈 회수 및 MLCC용 초미립 나노분말 합성 공정 최적화 ····· 276
심문수, 김지용, 강민석, 심재진, 유병욱, 강희수

소재화-3 니켈화합물 활용 고활성 니켈 분말 제조를 위한 카보닐 공정 기술 개발 및 촉매특성 평가 ····· 277
이장수, 이서환, 최상훈, 김호병, 김인호, 신재홍, 김영재, 이근재

소재화-4 니켈, 크롬 함유 폐스크랩 내 니켈/크롬 추출 및 소재화를 위한 신제련/추출 공정 기술 개발 ····· 278
강용호

▌특별심포지엄 : 금속부산물을 활용한 탄소저감형 합금강 전구물질 제조 기술 개발

합금강-1 철강 열간압연공정에서 발생한 밀스케일(FeO) 및 석회부산물(CaO)을 활용한 탈인제 개발을 위한 원료 선정 및 탈인능 시뮬레이션 ····· 281
박찬근, 이창민

합금강-2 폐 Mg 탈황제의 CaO 코팅이 탈황능에 미치는 영향에 관한 연구 ····· 283
정재윤, 강유빈, 채홍준

합금강-3 전기로 제강 공정의 Scope 1~3 탄소배출 모니터링을 위한 데이터·분석 플랫폼 ····· 285
강성은, 친 시에, 임성우, 김윤미, 김기한

합금강-4 폐배터리 부산물 기반 재활용 니켈 생산공정의 전과정 온실가스 배출량 평가 ····· 287
차준호, 박찬규

합금강-5 로터리 킬른을 이용한 Zn dust recycling 열역학 해석 ····· 289
정인호, Marie-Aline Van Ende, 최운오, 노병일

합금강-6 Ni-Cr 함유 부산물 자원화 기술 개발 ····· 293
정용수, 김희원, 홍순곤, 성민경

특별심포지엄 : 리싸이클 연구의 새로운 방향

리싸이클-1 침출액으로부터 고순도 금속 회수를 위한 고선택도 및 고회수율 전기증착 기술 ····· 299
김귀용

리싸이클-2 공융용매를 활용한 친환경적인 이차전지 리사이클링 기술 ····· 301
이현국, 이지현, 홍현선, 김재엽

리싸이클-3 폐리튬이온배터리 재활용을 위한 유기산 기반 대체침출 연구 ····· 303
안준모, 정혜원, 이제승, 원정환, 정현수

특별심포지엄 : 철강 부산물 자원순환의 현재와 미래

철강-현대제철 철강 부산물 자원순환의 현재와 미래 ····· 307

특별심포지엄 : 자원순환 연구의 길을 열다: 안재우 교수의 학문과 미래세대의 도전

기조강연 사용후 리튬이온배터리 자원회수를 위한 습식제련 기술과 미래 과제 ····· 311
안재우

자원순환-1 폐리튬이온배터리 전해액의 순환 자원화를 위한 감압 여과-용매추출 연계 분리·정제 공정 개발 ····· 312
홍승택, 장재혁, 김준희. 윤연영, 안재우

자원순환-2 친환경 금속광물자원의 습식제련을 위한 대체 침출 시스템 연구 ····· 314
안준모, Jaeheon Lee

자원순환-3 배터리 핵심소재의 고순도 회수를 위한 용매추출 공정 ····· 315
김홍인, 손정수, 김수경, 양동효, 심현우, 제진영

자원순환-4 마이크로웨이브를 활용한 폐리튬이온전지에서 리튬의 선택적 침출 및 Li_2CO_3 회수 ····· 316
안낙균, 김기현, 박경수

자원순환-5 자원순환 시대의 용매추출: 산업의 요구와 대응전략 ····· 318
이고기, 홍영란, 김병규, 박주황, 장승규

자원순환-6 LFP 배터리 시장 성장과 재활용 산업의 대응 ····· 319
조연철, 이아름, 최희영

자원순환-7 수소산업의 폐자원과 순환자원화 공정의 소개 ····· 320
김인태, 공수진, 주성연, 서덕형, 김지훈, 조의현, 박민서, 하다혜, 오창관, 윤호상

자원순환-8 용매추출제 합성 공정 및 적용 ····· 322
문용수, 장연희

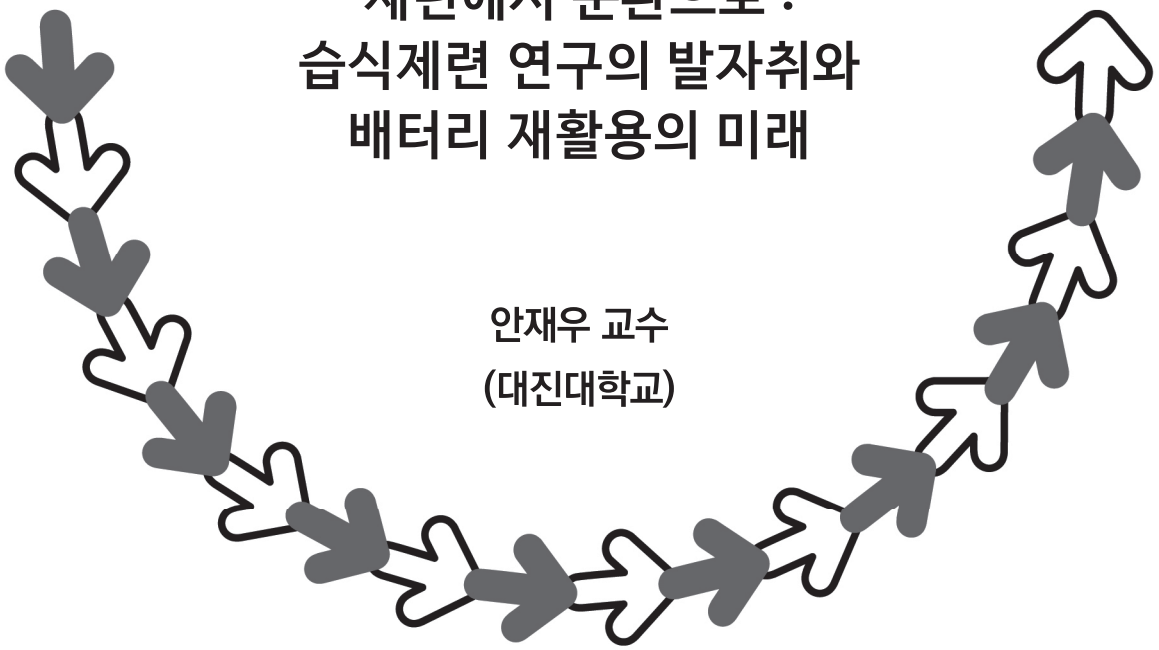
Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별강연

제련에서 순환으로 :
습식제련 연구의 발자취와
배터리 재활용의 미래

안재우 교수
(대진대학교)



The Korean Institute of Resources Recycling

특별강연

제련에서 순환으로: 습식제련 연구의 발자취와 배터리 재활용의 미래

From Metallurgy to Circularity: The Legacy of Hydrometallurgical Research and the Future of Battery Recycling

안재우*
대진대학교 신소재공학과

초록

습식제련 분야의 연구에 매진해 온 지난 시간을 돌이켜보면, 연구의 대상과 기술은 시대에 따라 변화해 왔지만 그 중심에는 언제나 '한정된 자원을 어떻게 보다 효율적이고 가치 있게 활용할 것인가'라는 질문이 자리하고 있었습니다. 광석으로부터 유가금속을 회수하고, 복잡한 용액계에서 목적 금속을 선택적으로 분리·정제하기 위해 침출, 용매추출, 이온교환 및 전기화학적 분리 등 다양한 기술을 연구해 왔으며, 그 과정에서의 수많은 시행착오와 작은 발견들이 오늘의 습식제련 기술로 이어졌음을 되새기게 됩니다.

최근에는 사용후 배터리가 중요한 미래 자원으로 주목받고 있습니다. 리튬, 니켈, 코발트 등 핵심금속을 회수하여 다시 산업의 원료로 활용하는 기술은, 광석을 중심으로 발전해 온 습식제련의 경험이 '자원순환'이라는 새로운 영역으로 확장되는 과정이라 할 수 있습니다. 이제 습식제련은 단순한 금속 회수를 넘어 버려지는 자원에 새로운 가치를 부여하고, 한정된 자원의 지속가능한 이용에 기여하는 기술로 발전하고 있습니다.

오랜 연구생활을 마무리하는 시점에서 돌아보면, 연구의 진정한 가치는 논문이나 기술적 성과만으로 설명하기 어렵다는 생각을 하게 됩니다. 함께 고민하고 실험했던 동료와 제자들, 그리고 서로의 지식과 경험을 나누며 새로운 가능성을 모색했던 시간들이야말로 제 연구 인생에서 가장 소중한 결실이라 생각합니다.

제가 걸어온 연구의 여정은 이제 하나의 장을 마무리하지만, 습식제련과 자원순환 기술의 발전은 앞으로도 계속 이어질 것입니다. 본 강연에서는 그동안의 습식제련 연구 발자취를 되돌아보고, 축적된 경험과 기술이 배터리 재활용과 자원순환 기술로 어떻게 이어지고 있는지를 살펴보고자 합니다. 아울러 '제련에서 순환으로'의 전환이 앞으로 자원기술이 나아가야 할 새로운 방향을 모색하는 계기가 되기를 기대합니다.

* Corresponding author : 안재우 / jwahn@daejin.ac.kr

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

구두발표

습식제련

The Korean Institute of Resources Recycling

H-기조강연

From Electronic Waste to Critical Metals: Selective Recovery of Indium and Gallium Using Siderophores

Eric D. van Hullebusch*

Université Paris Cité, Institut de Physique du Globe de Paris, CNRS, F-75005, Paris, France

Abstract

The increasing demand for critical metals such as indium and gallium, driven by applications in displays, optoelectronics, semiconductors, and advanced technologies, has intensified the need for sustainable secondary resources. End-of-life electronic products, including liquid crystal displays (LCDs) and light-emitting diodes (LEDs), represent promising urban mining resources, but conventional hydrometallurgical processes often require strong acids and generate complex leachates containing large amounts of non-target elements.

This work investigates a bio-based approach for the selective recovery of critical metals from electronic waste using the microbial siderophore desferrioxamine E (DFOE). Adapted pre-treatment procedures were first employed to concentrate indium- and gallium-bearing fractions from spent LCD screens and surface-mounted device (SMD) LEDs. The resulting materials were subsequently subjected to DFOE-assisted selective leaching, and the effects of pH, solid-to-liquid ratio, temperature, chelator-to-metal ratio, and leaching time were evaluated to elucidate metal–siderophore complexation and optimize metal dissolution.

For spent LCD screens, optimized conditions enabled selective indium leaching, reaching approximately 32% after prolonged treatment, while aluminum dissolution remained substantially lower. The results demonstrate that competition between aluminum and indium for DFOE complexation is an important factor controlling indium mobilization and selectivity. For spent SMD LEDs, comparison with conventional acid leaching showed that strong acid treatment can achieve very high Ga and In dissolution, but with significant co-leaching of non-target elements such as Cu, Pb, Al, and Fe. In contrast, DFOE-assisted leaching offers a more selective alternative, although further optimization is required to improve overall metal recovery.

Together, these findings demonstrate the potential of siderophore-based leaching as a greener strategy for recovering critical metals from complex electronic waste streams. By combining targeted pre-treatment, selective complexation, and downstream metal-refining approaches, this research contributes to the development of more selective and sustainable hydrometallurgical processes for urban mining and circular recovery of critical raw materials.

Key words : Indium; Gallium; Electronic waste; Desferrioxamine E; Siderophore-assisted leaching; Selective metal recovery; Circular economy.

References

Zheng, K., Benedetti, M. F., Jain, R., Pollmann, K., & van Hullebusch, E. D. (2024). Recovery of gallium (and indium) from spent LEDs: Strong acids leaching versus selective leaching by siderophore desferrioxamine E. *Separation and Purification Technology*, *338*, 126566.

Zheng, K., Benedetti, M. F., & van Hullebusch, E. D. (2023). Recovery technologies for indium, gallium, and germanium from end-of-life products (electronic waste)–A review. *Journal of environmental management*, *347*, 119043.

Zheng, K., Benedetti, M. F., Jain, R., Guy, B. M., Pollmann, K., & van Hullebusch, E. D. (2024). Selective leaching of indium from spent LCD screens by siderophore desferrioxamine E. *Journal of Hazardous Materials*, *469*, 134013.

* Corresponding author : Eric D. van Hullebusch / vanhullebusch@ipgp.fr

H-01

용매추출 믹서-세틀러 다상유동 전산 모사 연구

CFD Analysis of Multiphase Flow in a Solvent Extraction Mixer-Settler

김병준[1], 김나영[2], 송시정[1], 한상우[1], 김완이[1], 조성묵[2*]

[1]포스코홀딩스 미래기술연구원, [2]국립부경대학교 금속공학전공

초록

본 연구는 리튬이온 배터리 리싸이클링 과정에서 니켈, 코발트, 구리 등 고부가가치 유가금속을 고순도로 회수하기 위한 습식 정제 용매추출 공정을 대상으로 한다. 용매추출의 핵심 장치인 믹서-세틀러(Mixer-Settler) 내에서 발생하는 수상, 유기상, 공기 간의 복잡한 3상 혼합 및 분리 현상을 예측하기 위해 전산유체역학(CFD) 기반의 전산모사 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 신뢰성을 확보하기 위해 랩 스케일(Lab-scale) 실험 장치를 구축하고, 실험 데이터와의 비교를 통해 모델의 정합성을 검증하였다. 연구 결과, 믹서 영역에서의 난류 강도가 두 상의 혼합 효율에 미치는 영향을 정량화하였으며, 세틀러 영역에서의 계면 거동과 에멀젼의 형성 및 분리 과정을 시계열적으로 분석하였다. 본 연구의 결과는 향후 용매추출 공정의 최적 설계 및 운전 효율 향상을 위한 중요한 수치적 근거를 제공할 것으로 기대된다.

주제어 : 리튬이온 배터리, 리사이클링, 습식정제, 용매추출, 이온교환, 전산모사

서론

전 세계적인 전기차 수요 급증에 따라 폐배터리 발생량이 증가하고 있으며, 이에 포함된 니켈, 코발트, 구리 등의 유가금속을 효율적으로 회수하는 리싸이클링 기술이 경제적·환경적 측면에서 주목받고 있다. 습식정제 공정의 핵심인 용매추출은 금속 이온이 용해된 수상과 추출제가 포함된 유기상을 접촉시켜 선택적으로 금속을 분리하는 기술이다. 이 과정은 두 상의 밀도 차이를 이용한 상 분리 원리를 기반으로 하며, 믹서-세틀러 공정 내에서의 혼합 및 분리 효율이 전체 회수율을 결정짓는 중요한 요소가 된다. 그러나 장치 내부의 유동 현상은 수상과 유기상뿐만 아니라 공기까지 포함된 복잡한 다상유동(Multiphase flow) 특성을 보이므로, 이를 실험적으로만 파악하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 전산모사를 통해 믹서-세틀러 내부의 유동 현상을 가시화하고 정량적으로 분석하고자 한다.

해석 방법

본 연구에서는 믹서-세틀러 내 수상, 유기상, 공기의 3상 간 상호작용을 모사하기 위해 다상유동 전산모사 모델을 수립하였다. 믹서 내 임펠러 회전에 의한 강한 난류 유동을 계산하기 위해 적절한 난류 모델을 적용하였으며, 상간 접촉 영역에서의 이온 교환 반응 환경을 모사하기 위해 수상과 유기상의 분산 및 혼합 과정을 수치적으로 구현하였다. 또한, 세틀러 영역에서의 밀도 차에 의한 상 분리 현상을 모사하기 위해 계면 추적 기법을 활용하였다. 모델의 타당성을 검증하기 위해 실제 랩 스케일의 믹서-세틀러 실험 장치를 제작하였으며, 실험에서 관찰된 상 분리 시간 및 계면의 높이 변화 데이터를 전산모사 결과와 비교 분석하여 모델의 정합성을 확보하였다.

결과 및 고찰

전산모사 결과, 믹서 영역에서의 난류 강도는 수상과 유기상의 미세 분산 및 혼합 면적 증대에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 난류 강도가 증가함에 따라 두 상의 접촉 효율은 향상되었으나, 과도한 난류는 세틀러 영역에서의 분리 시간을 지연시키는 원인이 됨을 확인하였다. 세틀러 영역에서는 유기상과 수상의 계면 거동을 시계열적으로 추적하였으며, 초기 혼합물 상태에서 에멀젼 층이 형성된 후 점진적으로 맑은 상으로 분리되는 과정을 정량적으로 도출하였다. 특히 공기층의 존재가 상

* Corresponding author : 조성묵 / smcho1@pknu.ac.kr

분리 속도 및 계면 안정성에 미치는 영향을 분석함으로써, 실제 공정에서 발생할 수 있는 변수들을 수치적으로 고찰하였다.

4. 결론

본 연구에서는 리튬이온 배터리 리싸이클링을 위한 믹서-세틀러 공정의 다상유동 현상을 예측할 수 있는 전산모사 모델을 개발하고 실험적으로 검증하였다. 연구를 통해 믹서 내 난류 특성이 혼합 효율에 미치는 영향과 세틀러 내에서의 시계열적 상 분리 메커니즘을 명확히 규명하였다. 이러한 수치해석적 접근은 실험적 관찰이 어려운 대형 산업용 믹서-세틀러의 내부 유동을 예측하는 데 유용하게 활용될 수 있다. 최종적으로 본 연구 결과는 유가금속 회수 공정의 최적화된 운전 조건을 제시하고, 장치의 스케일업(Scale-up) 설계 시 발생할 수 있는 시행착오를 최소화하는 데 기여할 것으로 판단된다.

H-02

폐리튬이온배터리의 황산침출액 내 미량 불순물 제거 연구

Removal of Trace Impurities from Sulfuric Acid Leach Solutions of Spent Lithium-ion Batteries

송시정[1], 박준용[1], 이상혜[1], 김채림[1], 김완이[1*]

[1]포스코홀딩스 미래기술연구원 핵심자원ENG연구소 자원순환연구센터

초록

전 세계적인 전기차(EV) 시장의 급격한 성장과 탄소중립 정책에 따라, 사용 후 리튬이온배터리(LiBs)로부터 Ni, Co, Mn, Li 등 핵심 유가금속을 회수하는 자원 선순환 기술의 중요성이 날로 증대되고 있다. 일반적으로 습식 제련 공정은 산 침출을 통해 금속을 용해시킨 후 정제 과정을 거치게 되는데, 이때 침출액 내에 잔류하는 미량 불순물은 최종 생성물인 양극재 전구체의 순도와 배터리 성능에 치명적인 영향을 미친다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 흡착법을 도입하여 침출액 내 미량의 Si(IV)를 선택적으로 제거하는 실험을 수행하였다. 이를 위해 다양한 흡착제의 종류와 투입량 등 주요 변수에 따른 Si 제거 효율을 평가하였다. 본 연구 결과는 황산 침출액 내 미량 불순물을 효과적으로 제어함으로써, 고순도 배터리 원료 회수를 위한 공정 최적화 및 상용화 공정 설계에 기여할 것으로 기대된다.

주제어 : 리튬이온배터리, 재활용, 유가금속, 정제

*Corresponding author : 김완이 / wanyikim911@posco-inc.com

H-03

활성탄을 이용한 황동광 정광의 부동태 억제 구리 침출 메커니즘 연구

Mechanistic Study of Passivation-Suppressed Cu Leaching from Chalcopyrite Concentrate Using Activated Carbon

Jae-Yeon Kim[1,2*], Yu-Jin Kim[3], Jaeheon Lee[2]

[1]Light Weight Materials Division, Korea Institute of Materials Science, Korea

[2]Department of Mining Engineering, Kroll Institute for Extractive Metallurgy, Colorado school of mines, USA

[3]Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Korea

Abstract

In this study, the effect of activated carbon (AC) on the H_2SO_4 leaching system without adding any oxidants was investigated to enhance the Cu leaching kinetics. In the absence of the AC, the Cu of 19.2% was extracted from chalcopyrite for 96 hours at 65℃. On the other hand, the addition of the 10 g/L AC increased the Cu extraction efficiency up to 98 % for 48 hours at 65℃ in 10 g/L H_2SO_4 solution with 10 g/L pulp density. The rate-controlling steps were changed by increasing the leaching temperature from the diffusion control through a product layer (25-45 ℃) to the surface chemical reaction control (55, 65 ℃). The E_a of the H_2SO_4-activated carbon leaching system was 127.47 kJ/mol from the 25-65℃ temperature range, indicating the reaction is controlled by the chemical reaction. The catalytic mechanism of AC on the chalcopyrite leaching in H_2SO_4 solution was discussed based on the Eh value of the solution and the results of SEM observation and XRD analysis on residues.

Keywords: Chalcopyrite, Leaching, Copper, Activated carbon, Sulfuric acid, Methanesulfonic acid

Introduction

Copper has played a key role as one of the energy transition metals due to the expansion of electrification for clean energy transitions. Its global demand is expected to rise to more than double by 2040 (IEA 2021). In this respect, for the Cu mining field, the improvement of production rates is one of the important issues. In this study, the effect of activated carbon (AC) on the H_2SO_4 leaching system without adding any oxidants was investigated to enhance the Cu leaching kinetics in sulfuric acid lixiviant. The kinetic mechanism was explained based on the shrinking core modeling and the activation energy. The catalytic mechanism of AC was elaborately discussed in terms of the Eh value of the solution and the results of SEM observation and XRD analysis on residues. Furthermore, the comparative study of the Cu leaching yield, rate, and mechanism on various oxidative H_2SO_4 leaching systems was performed for the sake of the objective evaluation of their leaching performance as an alternative additive.

Materials and Experimental Methods

A chalcopyrite concentrate sample (P80 = 40 μm) used in this study was provided from an active copper mine in southern Arizona. Copper, iron, and sulfur contents were 28.8%, 26.4%, and 30.8%, respectively, and 0.62% aluminum, 0.19% molybdenum, and 90.5 ppm silver were present in the sample. Mineralogical analysis shows that the sample consists of 89.5% chalcopyrite, 5.0% pyrite, and 5.5% other minerals such as molybdenite (0.2%), quartz (0.7%), K-feldspar (3.1%), and plagioclase (1.5%).

The batch leaching tests were conducted using the samples of 10 g/L in 300 mL sulfuric acid (SA, H_2SO_4, Fisher Chemical,

* Corresponding author : Jae-Yeon Kim / jaeyeonkim@kims.re.kr

USA) or methanesulfonic acid (MSA, CH_3SO_3H, Acros Organics, USA) solution. Fine-type (-140 mesh) and granule-type (+ 20 mesh, company) activated carbons (ACs) were used as an additive. The effect of carbon concentration (0-20g/L), ferric concentration (0-6.4 g/L) and temperature (20-65℃) on the copper extraction from a chalcopyrite concentrate was investigated. The solution pH and Eh were measured by using Ag/AgCl reference electrodes filled with 3M KCl (Orion 9156BNWP Combination pH Electrode, Thermo Scientific™, USA) and ORP electrode (STORP1, Ohaus, USA). The pH of the leaching solution was adjusted to the initial values every 24 hours by using 2.5 M H_2SO_4 or 5M MSA. Cu and Fe concentrations in leachate were analyzed by Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS, PinAAcle 900F, Perkin-Elmer, USA).

Results and Discussions

Figure 1 compares the Cu leaching rate and efficiency of various chalcopyrite leaching systems based on the H_2SO_4 and MSA solution for the sake of the objective evaluation of their leaching performance as an alternative additive. The AC, $Cr_2O_7^{2-}$ and combination of ferric and carbon were effective additives in terms of the Cu leaching rate and efficiency. Although the leaching rate in the presence of AC was slower than in the presence of $Cr_2O_7^{2-}$ and both of ferric and carbon, the leaching efficiency was approximately 10 % higher. Considering high Cu leaching efficiency, fast leaching rate, environmental perspective using natural raw sources, and reusability, the AC is expected to be one of the most sustainable candidates to alternate conventional additives or oxidants.

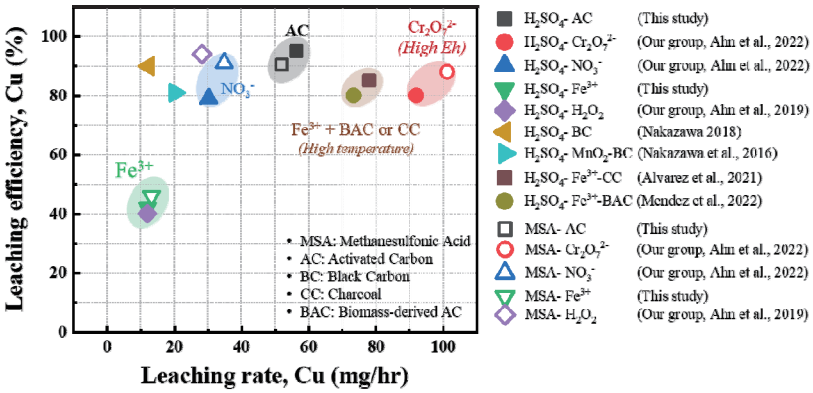


Figure 1 Cu leaching rate and efficiency of various chalcopyrite leaching systems.

Conclusion

In this study, the effect of activated carbon (AC) on the H_2SO_4 leaching system without adding any oxidants was investigated to enhance the Cu leaching kinetics. In the absence of the AC, the Cu of 19.2% was extracted from chalcopyrite for 96 hours at 65℃. On the other hand, the addition of the 10 g/L AC increased the Cu extraction efficiency up to 98 % for 48 hours at 65℃ in 10 g/L H_2SO_4 solution with 10 g/L pulp density. The addition of ferric ions caused a decrease in the leaching kinetics even though it is the most widely used oxidant for chalcopyrite leaching because it increased the Eh values of leaching solution up to the value where the passivating jarosite layer can be formed. The rate-controlling steps of the H_2SO_4-AC leaching system were changed by increasing the leaching temperature from the diffusion control through a product layer (25-45 ℃) to the surface chemical reaction control (55, 65 ℃). The E_a was 127.47 kJ/mol, indicating the reaction is controlled by the chemical reaction. The catalytic mechanism of AC on the chalcopyrite leaching in H_2SO_4 solution could be discussed due to 1) the generation of ferric ions as an oxidant, 2) the enhancement of electron transport rate through the passivating sulfur layer, and 3) the leaching at the low redox potentials. The H_2SO_4-AC leaching system exhibited a high Cu leaching efficiency and fast leaching rate compared to other oxidants such as $Cr_2O_7^{2-}$, NO_3^{2-}, Fe^{3+}, and H_2O_2. Considering high Cu leaching efficiency, fast leaching rate, environmental perspective using natural raw source, and reusability, the AC is believed to be the most sustainable additive for effective chalcopyrite leaching in the H_2SO_4 and MSA solutions.

H-04

열처리 전처리에 의한 Zinc-Rich Leach Residue로부터 갈륨 침출 향상

Enhancement of Ga leaching from zinc-rich leach residue by thermal pretreatment

최종원*, 배무기, 이수경

한국지질자원연구원(KIGAM), 자원활용연구본부

Gallium (Ga) is a strategic metal that is essential for advanced industries, including semiconductors, optoelectronics, and high-frequency/high-power devices. As concerns over supply security continue to grow, increasing attention has been paid to the recovery of Ga from secondary resources. In particular, zinc-rich leach residue (ZLR) generated from zinc smelting processes is considered a promising secondary source of Ga. However, the direct leaching of Ga from such materials is often limited because Ga is closely associated with refractory Zn–Fe-bearing phases. In this study, the effect of thermal pretreatment on the leaching behavior of Ga was investigated using a Ga-bearing ZLR obtained from an industrial zinc smelting process. The chemical and mineralogical characteristics of the residue were examined, and leaching tests were carried out after thermal pretreatment under selected conditions. The study aimed to broadly evaluate whether thermal pretreatment could improve the leachability of Ga and provide a basis for developing a more effective recovery route from industrial zinc-smelting residues. The results showed that thermal pretreatment increased the Ga leaching efficiency from approximately 68% to 85%, corresponding to an improvement of about 17%p. These findings indicate that thermal pretreatment can be an effective approach for enhancing Ga recovery from ZLR. This work suggests the potential of zinc smelting residues as a secondary Ga resource and provides a practical basis for further process optimization and resource recovery studies.

Keywords : Gallium, Zinc-rich leach residue, Thermal pretreatment, Hydrometallurgy

* Corresponding author : 최종원 / jwchoi@kigam.re.kr

H-05

폐리튬이온배터리 음극재로부터 고순도 흑연 회수 및 정제 공정에 대한 연구

A Study on the Recovery and High-Purity Purification of Graphite from End-of-Life Lithium-Ion Batteries

김기현[1], 류철희[1], 안낙균[1], 박경수[1*]
[1]고등기술연구원 융합소재연구센터

초록

습식제련 침출잔사에서 회수된 폐흑연(spent graphite, SG)은 난용성 산화물 불순물과 전기화학적 사이클링에 의해 유발된 구조적 결함을 포함하고 있다. 본 연구에서는 Na_2CO_3 배소와 순차적 수침출-산침출을 결합한 후, 1600 °C 열화학적 활성화 및 최종 산세척을 수행하는 불소계 시약을 사용하지 않는 재생 공정을 제안하였다. 열역학 계산 결과, 배소 온도가 증가함에 따라 Al 및 Si 함유 불순물이 반응성이 높은 Na계 화합물로 점진적으로 전환되었으며, 약 916 °C 이상에서는 슬래그 상이 안정하게 형성되는 것으로 예측되었다. 이러한 상변화는 950—1000 °C에서 불순물의 전환과 후속 침출을 촉진하였다. 1600 °C 열처리는 난용성 W 종을 포함한 잔류 불순물의 이동과 편석을 추가적으로 유도하여, 표면에 노출된 다성분 상을 형성하였고 이들은 후속 산침출을 통해 효과적으로 제거되었다. 최적 조건을 적용한 시료는 회분 함량 0.08 wt%, Al 및 Si 농도 각각 2.7 및 8.9 ppm을 달성하였으며, W는 95% 이상 제거되었다. 또한 d_{002} 값 3.3543 Å, I_D/I_G 비 0.22 및 π-π^*위성 피크의 회복을 통해 흑연 구조의 재생이 확인되었다. 따라서 본 통합 공정은 흑연화 온도보다 낮은 조건에서 폐흑연의 고순도화와 구조 재생을 동시에 달성할 수 있음을 보여준다.

주제어 : 폐흑연, 알칼리배소, 열화학적 활성화, 리튬이온배터리 재활용, 구조 재생

서론

리튬이온배터리(LIB)의 사용 확대에 따라 폐리튬이온배터리(EoL LIB)의 발생량이 증가하고 있으며, 이에 따라 전극 소재의 폐쇄형 자원순환(closed-loop recovery) 기술에 대한 필요성도 커지고 있다. 산업적 재활용은 주로 양극재 금속 회수에 집중되어 왔으나, 폐흑연은 LIB 질량의 상당 부분을 차지하며, 인조흑연 제조에 필요한 2500—3000 °C의 흑연화 공정을 거치지 않고도 재생 가능한 흑연 구조를 유지하고 있다.

폐흑연의 불순물 특성은 전처리 및 회수 경로에 따라 크게 달라진다. 특히 습식제련 침출잔사에서 회수된 흑연에는 수용성 전이금속 황산염뿐만 아니라 Al_2O_3, SiO_2, WO_3 및 ZrO_2와 같은 난용성 산화물도 함께 존재한다. 이를 제거하기 위해 불소화, 알칼리 배소, 산침출 및 열처리 등 다양한 재생 기술이 연구되어 왔다. NH_4F 배소는 Al 및 Si 함유 불순물을 수용성 불소계 화합물로 전환할 수 있으며, 알칼리 배소와 열처리 역시 불순물 제거 및 흑연 구조 회복에 효과적인 것으로 보고되었다. 또한 열처리를 통해 불순물을 흑연 표면으로 이동시켜 후속 침출성을 향상시킬 수 있음이 보고되었다.

본 연구에서는 산업 습식제련 침출잔사에서 회수된 폐흑연을 대상으로 단계적 재생 공정을 제안하였다. 먼저 수침출을 통해 수용성 불순물을 제거한 후, 800—1000 °C에서 Na_2CO_3 배소와 순차적 수침출-산침출을 적용하여 난용성 산화물을 전환·제거하고 실리카 겔 형성에 의한 표면 부동태화를 억제하였다. 이후 1600 °C 열처리와 산세척을 통해 잔류 난용성 불순물을 활성화하는 동시에 흑연 구조의 회복을 유도하였다.

재료 및 실험방법

폐흑연은 상용 폐리튬이온배터리 재활용 공정에서 열처리된 블랙매스를 황산으로 침출한 후 발생한 여과 잔사로부터 회수하였다. 회수된 잔사는 80 °C에서 24시간 건조한 후 100 ㎛체로 체가름하였다. 1차 정제를 위해 폐흑연을 고액농도 20 wt%로 탈

*Corresponding author : 박경수 / kspark@iae.re.kr

이온수에 분산시키고 상온에서 400 rpm으로 2시간 교반하였다.
수침출한 폐흑연에 10 wt% Na_2CO_3를 혼합한 후, Ar 분위기에서 800—1000 °C까지 가열하여 1시간 배소하였다. 배소 생성물은 80 °C에서 2시간 수침출한 후, 질산을 이용하여 70 °C에서 2시간 침출하였다. 최종 생성물은 중성이 될 때까지 세척한 후 80 °C에서 건조하였다.
이후 시료는 Ar 분위기에서 1600 °C로 1시간 열처리한 후, 질산을 사용하여 70 °C에서 2시간 추가 침출하였다. 회분 함량과 원소 조성은 연소 분석, ICP-OES, 및 XRF를 통해 평가하였으며, 형상 및 원소 분포는 SEM-EDS를 이용해 분석하였다. 구조적 및 표면 특성은 XRD, Raman spectroscopy 및 XPS로 평가하였고, 상용 천연흑연을 구조 비교용 기준 시료로 사용하였다.

결과

표 1과 같이 1,000 °C에서 순차적 침출 공정을 적용한 경우 회분 함량은 0.40 wt%로 감소하였으며, 이는 수침출만 수행한 경우의 1.01 wt% 및 직접 산침출을 수행한 경우의 1.21 wt%보다 낮은 값이다. Al과 Si 농도는 침출 후 흑연에서 각각 17,077 ppm과 2,098 ppm이었으나, 배소 후 침출된 흑연에서는 각각 258 ppm과 541 ppm으로 감소하였다. 또한 Zr 농도도 363 ppm에서 56.6 ppm으로 감소하였다. 반면 W는 다른 원소들과 상이한 거동을 보였으며, 침출 후 흑연에서 2,078 ppm, 배소 후 침출된 흑연에서 2,163 ppm으로 농도 변화가 거의 없었다. 이는 W 함유 불순물이 1,000 °C의 알칼리 배소 및 후속 침출 공정만으로는 효과적으로 제거되지 않았음을 의미한다.

Table 1. Ash contents and chemical composition of pre-experimental graphite samples

시료	Ash (wt%)	Al (ppm)	Si (ppm)	W (ppm)
폐흑연	5.42	13,432	2,113	2,771
침출 후 흑연	4.07	17,077	2,098	2,078
배소 및 침출 후 흑연	0.40	258	541	2,163
재생 흑연	0.08	2.7	8.9	97.2

사사

본 연구는 기후에너지환경부 재원으로 한국환경산업기술원 환경기술개발사업 이차전지 순환이용성 향상 기술개발사업(이차전지 재활용 공정 발생 오염물질 저감 기술개발) 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: RS-2024-00345911)

H-06

폐연료전지 촉매로부터 메탄설폰산과 염화물을 이용한 백금족 원소의 침출 및 회수에 관한 연구

Leaching and Recovery of Platinum Group Metals from Spent Fuel Cell Catalysts Using Methanesulfonic Acid and Chloride

김승현[1], 친빅하[2], 송준근[3], 정지혜[3], 이재령[3*]

[1]강원대학교 에너지인프라융합학과 에너지자원공학 전공, [2]강원대학교 지구자원연구소,
[3]강원대학교 에너지자원공학과

초록

폐연료전지 촉매로부터 백금족 원소를 회수하기 위해 메탄설폰산(MSA)과 NaCl을 이용한 침출 특성을 평가하였다. MSA 농도, NaCl 농도, 산화제 첨가량 및 침출시간의 영향을 조사한 결과, MSA 단독 조건보다 염화물과 산화제를 함께 첨가한 조건에서 Pt 침출률이 크게 증가하였다. 특히 MSA 3 M, NaCl 1.5 M 조건에서 약 97%의 Pt 침출률을 확인하였으며, 이를 바탕으로 MSA 기반 백금족 원소 회수공정의 적용 가능성을 검토하였다

주제어 : 폐연료전지, 백금족 원소, 메탄설폰산, 염화물, 침출

서론

수소연료전지는 높은 에너지 변환효율과 친환경성을 바탕으로 수송 및 발전 분야에서 활용이 확대되고 있으며, 이에 따라 사용 후 연료전지의 재활용 및 유가금속 회수에 대한 필요성이 증가하고 있다. 특히 고분자전해질막 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)의 전극에는 전기화학적 반응을 촉진하기 위하여 Pt를 비롯한 백금족 원소(Platinum Group Metals, PGMs)가 촉매로 사용된다. 백금족 원소는 높은 경제적 가치와 제한적인 자원 부존량을 가지므로 폐연료전지로부터 효율적으로 회수하여 재자원화하는 기술이 중요하다.

기존 백금족 원소의 습식제련 공정에서는 염산, 질산 및 왕수 등의 강무기산과 산화제를 이용한 침출법이 일반적으로 사용된다. 이러한 공정은 높은 침출효율을 확보할 수 있으나, 강한 부식성과 산성 폐액 발생 등 환경적·공정적 부담이 존재한다. 이에 본 연구에서는 기존 무기산 기반 침출공정을 보완하기 위한 대체 침출제로 메탄설폰산(Methanesulfonic acid, MSA)을 적용하였다. 또한 염화이온 공급원으로 NaCl을 첨가하고 산화제를 함께 사용하여 폐연료전지 촉매 내 백금족 원소의 침출거동을 평가하고, 침출액으로부터의 후속 회수 가능성을 검토하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 폐연료전지로부터 회수 및 전처리된 Pt/C 기반 촉매를 침출 원료로 사용하였다. 침출실험은 MSA를 주 침출제로 사용하고, 염화이온 공급을 위하여 NaCl을 첨가하였다. 백금의 산화 및 용출을 촉진하기 위하여 산화제를 함께 첨가하였으며, MSA 농도, NaCl 농도, 산화제 첨가량 및 침출시간을 주요 실험변수로 설정하였다.

침출실험은 고액비(S/L) 1 g/50 mL 및 90 ℃ 조건을 기준으로 수행하였으며, MSA 및 NaCl 농도를 변화시켜 각각의 조건에 따른 Pt 침출률을 비교하였다. 또한 침출시간을 변화시켜 시간에 따른 Pt 용출거동을 조사하였다. 침출이 종료된 후 고액분리를 실시하였으며, 여액 내 Pt 농도는 ICP-OES를 이용하여 분석하였다. 침출률은 원료 내 초기 Pt 함량과 침출액 내 Pt 함량을 기준으로 산정하였다. 원료 및 침출 후 잔사의 표면과 성분 변화를 확인하기 위하여 SEM-EDS, XRD 및 XPS 분석을 수행하였으며, 최적조건에서 얻어진 침출액에 대해서는 침전 및 분리방법을 적용하여 Pt 회수 가능성을 검토하였다.

*Corresponding author : 이재령 / jr-lee@kangwon.ac.kr

결과 및 고찰

폐연료전지 촉매로부터 Pt를 침출하기 위하여 MSA의 적용 가능성을 검토하였다. MSA를 이용한 침출실험 결과, MSA 단독 조건에서도 Pt의 침출이 확인되었으며, NaCl 및 산화제를 첨가함에 따라 Pt 침출효율이 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 MSA 3 M 및 NaCl 1.5 M을 포함하는 조건에서 약 97% 수준의 Pt 침출률을 확인하여 MSA를 이용한 폐연료전지 촉매 내 Pt 침출 가능성을 확인하였다.

Pt는 높은 화학적 안정성으로 인해 산성 용액에서의 용출이 제한될 수 있으나, 산화제가 존재하는 경우 금속상 Pt의 산화가 촉진될 수 있다. 또한 NaCl 첨가에 의해 공급된 염화이온은 산화된 Pt와 염화착물을 형성하여 용액 내 Pt의 안정화에 기여하는 것으로 판단된다. 이에 따라 MSA와 염화물 및 산화제를 조합하는 경우 MSA 단독 조건에 비하여 Pt의 침출이 촉진되는 것으로 판단된다.

현재까지의 실험 결과를 바탕으로 MSA 농도, 염화물 농도 및 산화제 첨가조건이 Pt 침출에 영향을 미치는 주요 인자로 판단되며, 각 인자에 따른 백금족 원소의 침출거동 및 최적조건에 대한 추가적인 검토가 필요하다. 또한 침출 후 용액으로부터 백금족 원소를 분리·회수하기 위한 침전 및 용매추출 등의 후속 공정을 적용함으로써 폐연료전지 촉매로부터 백금족 원소의 일련의 회수공정에 대한 적용 가능성을 평가할 예정이다.

결론

본 연구에서는 폐연료전지 촉매로부터 백금족 원소를 회수하기 위하여 MSA와 염화물을 이용한 침출공정의 적용 가능성을 검토하였다. MSA를 이용한 침출조건에서 Pt의 용출이 확인되었으며, NaCl 및 산화제의 첨가에 따라 Pt 침출효율이 향상되는 경향을 나타냈다. 특히 MSA 3 M 및 NaCl 1.5 M 조건에서 약 97% 수준의 Pt 침출률을 확인하였다. 이는 산화제에 의한 Pt의 산화와 염화이온에 의한 Pt 염화착물의 형성이 침출반응에 영향을 미친 것으로 판단된다. 따라서 MSA와 염화물을 이용한 침출방법은 폐연료전지 촉매로부터 Pt를 회수하기 위한 대체 침출공정으로 적용 가능성이 있는 것으로 판단되며, 향후 침출조건의 최적화 및 침출액으로부터 백금족 원소의 선택적 분리·회수에 관한 추가 연구를 수행하고자 한다.

H-07

전기화학 분말화 니켈선철의 황산 침출액으로부터 철 제거 및 니켈 회수

Iron Rejection and Nickel Recovery from Sulfuric Acid Leachate of Electrochemically Powderized Nickel Pig Iron

페브리나와르타 부르한[1,2], 김명석[1,3], 하룬 카멜[1,2], 박경태[1,2], 신재홍[1,2*]

[1]한국생산기술연구원 국가희소금속센터,

[2]과학기술연합대학원대학교(UST) 한국생산기술연구원 스쿨 융합제조시스템공학전공, [3]고려대학교 신소재공학부

Abstract

Nickel pig iron (NPI) is an abundant low cost nickel source, but its high iron content limits its use for battery grade nickel production. In this study, NPI was powderized electrochemically and leached with sulfuric acid, and the leachate was purified by NaOH precipitation followed by two step solvent extraction. Partial saponification of 0.3 M Cyanex 272 created a selective window in which 87.5% of the iron was removed without detectable nickel loss, and two stages at an O/A ratio of 1 achieved quantitative iron removal. Nickel was recovered from the raffinate with 1.0 M Versatic Acid 10 (98.5%) and stripped with H_2SO_4, giving an overall nickel recovery of approximately 87%.

Keywords: Nickel Pig Iron, Solvent Extraction, Saponification, Iron Removal, Nickel Recovery

Introduction

Nickel demand is increasing rapidly with the growth of battery production, whereas the supply of high purity nickel remains limited. NPI, a low-cost ferronickel intermediate composed predominantly of iron, is consumed almost exclusively in stainless steel manufacturing, and upgrading it into battery grade nickel sulfate would open a substantial secondary nickel resource. In this study, NPI was converted into a nickel bearing sulfate solution by electrochemically assisted powderization and sulfuric acid leaching. Since hydroxide precipitation left residual iron at a level comparable to that of nickel, a two-step solvent extraction process was developed, consisting of selective iron rejection with partially saponified Cyanex 272 and nickel recovery with saponified Versatic Acid 10 followed by acid stripping.

Materials and Methods

NPI was powderized by EAP and leached with sulfuric acid, and the filtrate obtained after NaOH precipitation served as the feed solution; metal concentrations were determined by ICP. In the first extraction step, Cyanex 272 in kerosene (0.1 to 0.5 M), partially saponified with NaOH at 0 to 40%, was contacted at an O/A ratio of 1 and initial pH 4 for 30 min. In the second step, Versatic Acid 10 (0.3 to 1.0 M, 40% saponified) recovered nickel from the initial pH 5 to 8, and the loaded organic was stripped with 2 M acids.

Results and Discussion

After NaOH precipitation the filtrate still contained 1,790 mg/L Fe and 1,676 mg/L Ni; since the two metals remained at nearly equal concentrations, solvent extraction was applied as a polishing step. As shown in Fig. 1, saponification neutralized the protons released during extraction and raised the equilibrium pH, which markedly enhanced iron extraction while nickel remained essentially unextracted, creating a selective operating window at 20 to 25% saponification. Under the optimum

*Corresponding author : 신재홍 / shinclusion@kitech.re.kr

condition (0.3 M Cyanex 272, 20% saponification), 87.5% of the iron was removed with no detectable nickel loss, and McCabe–Thiele analysis indicated that two stages at an O/A ratio of 1 achieve quantitative iron removal. Nickel recovered from the raffinate with 1.0 M Versatic Acid 10 at 98.5% efficiency (initial pH 8) and stripped with 2 M H_2SO_4, which directly yields a sulfate medium suitable for nickel sulfate crystallization. Combining the three steps, the overall nickel recovery is approximately 87%, with the largest loss occurring in stripping.

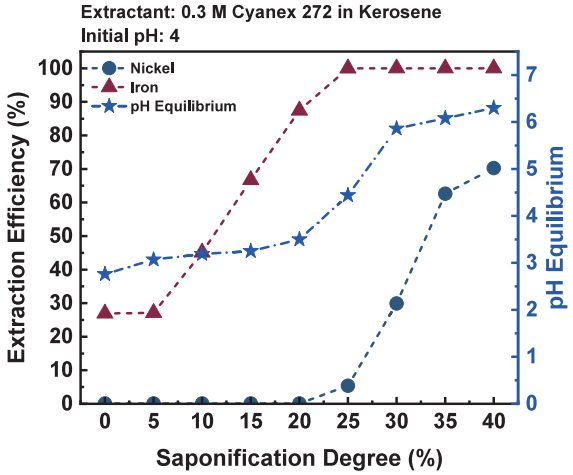


Fig. 1. Effect of saponification degree on the extraction of Fe and Ni with 0.3 M Cyanex 272 in kerosene (initial pH 4, O/A = 1).

Conclusion

A stepwise purification process was demonstrated for producing a high purity nickel solution from NPI leachate. Partial saponification of Cyanex 272 created a selective iron rejection window (87.5% Fe removal without detectable Ni loss at 0.3 M and 20% saponification), and two stages at an O/A ratio of 1 achieved quantitative iron removal. Nickel was recovered with 1.0 M Versatic Acid 10 at 98.5% efficiency and stripped with H_2SO_4, giving an overall recovery of approximately 87% and confirming NPI as a practical secondary resource for battery grade nickel production.

H-08

침출-철 재침전 통합공정을 통한 NdFeB 슬러지로부터 희토류 선택적 회수

An Integrated Leaching-Fe Reprecipitation Process for Selective Recovery of Rare Earth Elements from NdFeB Sludge

임지수[1,2], 이수경[1], 윤호성[1], 김리나[1,2*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]과학기술연합대학원대학교 자원공학전공

초록

NdFeB 슬러지는 Nd, Pr, Dy, Tb 등의 희토류를 함유하는 유망한 2차 자원이지만, 습식제련 기반 재활용 공정에서 높은 철 함량으로 인해 산 침출 시 철이 함께 용출되어 선택적 희토류 회수 및 후속 분리·정제를 어렵게 한다. 본 연구에서는 NaOH 침지 전처리 후 HCl 침출과 pH 조절을 연계하여 희토류의 선택적 회수와 잔류 철 저감 거동을 평가하였다. NaOH 침지 시료를 0.5 M HCl, 25°C 조건에서 2시간 침출한 후 고액분리 없이 NaOH, NH_4OH 또는 $Ca(OH)_2$를 이용하여 pH를 약 4로 조절한 결과, 침출액 내 철 농도는 88.3~94.9% 저감되었으며, Nd, Pr, Dy, Tb의 침출율은 99.5~99.9%로 유지되어 희토류에 대한 선택성을 높일 수 있는 것으로 나타났다.

주제어 : NdFeB 슬러지, 희토류, 선택적 침출, 철 재침전, pH 조절

서론

NdFeB 영구자석은 전기차, 풍력 발전기, 전자기기 등 첨단 산업 전반에 널리 사용되며, 이에 따라 Nd, Pr, Dy, Tb 등 자석용 희토류(REE)의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 자석의 절단·연삭·연마 공정에서 발생하는 NdFeB 슬러지는 상당량의 희토류를 함유하고 있어 유망한 2차 자원으로 평가되나, 습식제련 기반 재활용 공정에서 높은 철 함량으로 인해 산 침출 시 철이 희토류와 함께 용출되어 선택적 회수 및 후속 분리·정제 공정을 저해하는 문제가 있다.

이에 본 연구에서는 NdFeB 슬러지에 NaOH 침지 전처리를 적용한 후 HCl 침출을 수행하고, 희토류와 철의 침출 거동을 평가하였다. 또한 침출액에 잔류하는 철을 추가로 저감하기 위해 침출 도중 별도의 중간 고액분리 없이 pH를 조절하는 침출-철 재침전 통합공정을 적용하여 NaOH, NH_4OH 및 $Ca(OH)_2$의 효과를 비교하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 NdFeB 슬러지는 XRF 분석 결과 Fe 41.12 wt.%, 총 희토류(Nd, Pr, Dy, Tb) 22.43 wt.%를 함유하고 있으며, XRD 분석 결과 주요 상은 $Nd_2Fe_{14}B$ 및 Fe_3O_4로 확인되었다 (Table 1).

Table 1. Chemical composition of the NdFeB sludge (XRF)

성분	Fe	O	B	Nd	Pr	Tb	Dy	Others
함량(wt.%)	41.12	18.87	2.70	15.33	4.90	2.03	0.17	14.89

NdFeB 슬러지는 50 wt.% NaOH를 이용하여 145°C에서 5시간 동안 침지 처리하였으며, XRD 분석을 통해 $Nd(OH)_3$ 및 Fe_3O_4의 형성을 확인하였다. 이후 0.5 M HCl, 25°C, 고액비 1:10, 교반속도 250 rpm 조건에서 침출하였다. pH 조절 실험에서는 2시간 침출 후 고액분리 없이 NaOH, NH_4OH 또는 $Ca(OH)_2$를 이용하여 pH를 약 4로 조절하고 추가로 2시간 반응시킨 후, ICP 분석을 통해 철 저감률과 희토류 침출율을 평가하였다.

*Corresponding author : 김리나 / rkim@kigam.re.kr

결과 및 고찰

NaOH 침지 시료의 XRD 분석 결과 $Nd(OH)_3$ 및 Fe_3O_4 형성이 확인되었으며, 이러한 상변환은 후속 HCl 침출에서 나타난 희토류와 철의 서로 다른 침출 거동에 기여한 것으로 판단된다. 실제로 0.5 M HCl, 25 °C 조건에서 2시간 침출한 결과, 희토류 침출율은 98−100%로 나타났다(Fig. 1). 반면 철 침출율은 0.5% 이하로 나타나 높은 선택성을 확인하였다. 그러나 침출액 내 용존 철 농도는 172.6~198.1 mg/L 수준으로 잔류하여, 이를 추가로 저감하기 위해 중간 고액분리 없이 pH 조절을 적용하였다.

pH 조절 실험 결과(Fig. 2), 조절 직전 용존 철 농도는 NaOH, NH_4OH 및 $Ca(OH)_2$ 실험에서 각각 172.6, 177.9 및 198.1 mg/L였으며, pH를 약 4로 조절한 후 2시간 동안 반응시켰을 때 각각 20.2, 9.0 및 15.4 mg/L까지 감소하였다. 철 저감률은 각각 88.3%, 94.9% 및 92.2%였고, Nd, Pr, Dy, Tb의 침출율은 99.5~99.9%로 유지되었다. 따라서 3종의 pH 조절제 모두 희토류 손실을 최소화하면서 철을 효과적으로 저감시켜 희토류 회수의 선택성을 높일 수 있는 것으로 나타났다. 다만 NaOH와 $Ca(OH)_2$는 각각 Na^+와 Ca^{2+}를 침출액에 추가로 도입하므로, 후속 분리·정제 공정에 미치는 영향도 고려할 필요가 있다.

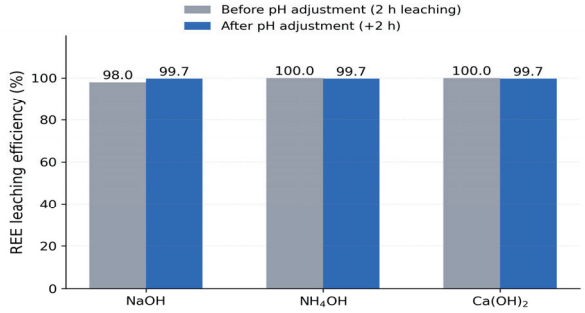


Fig. 1. REE leaching efficiencies before and after pH adjustment using NaOH, NH_4OH, and $Ca(OH)_2$

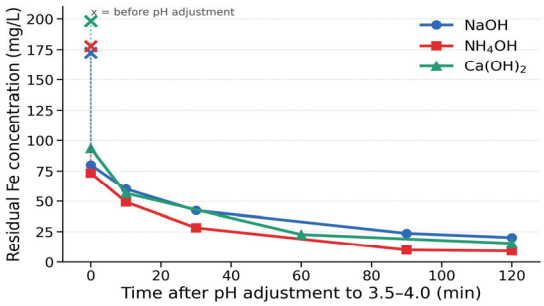


Fig. 2. Change in residual Fe concentration during pH adjustment (NaOH, NH_4OH, and $Ca(OH)_2$)

결론

NdFeB 슬러지로부터 희토류를 선택적으로 회수하기 위해 NaOH 침지 전처리 후 0.5 M HCl 침출과 pH 조절을 연계한 통합 공정을 적용하였다. 침출 2시간 후 고액분리 없이 pH를 약 4로 조절한 결과, NaOH, NH_4OH 및 $Ca(OH)_2$ 조건에서 침출액 내 철 농도가 88.3~94.9% 저감되었으며 희토류 침출율은 99.5~99.9%로 유지되었다. 이를 통해 높은 희토류 침출율을 유지하면서 철을 선택적으로 저감하여 REE/Fe 분리 선택성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 중간 고액분리를 생략한 침출-철 재침전 통합공정의 적용 가능성을 확인하였으며, 향후 pH 조절제가 후속 분리·정제 공정에 미치는 영향을 평가할 필요가 있다.

사사

이 연구는 2026년도 산업통상부 및 한국산업기술기획평가원 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00431939, 2410017770/NP2024-039).

H-09

블랙매스 관련 금속 산화물 및 유기화합물이 NCM 바이오침출에 미치는 영향

Effects of Black-Mass-Related Metal Oxides and Organic Compounds on NCM bioleaching

손우진[1], 윤선종[1], 이승은[1], 이상현[2], 안준모[2*], 황국화[1,2†]

[1]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2]전북대학교 자원 · 에너지공학과

초록

전기차의 수요 급증으로 인해 리튬이온배터리의 수요 또한 증가하고 있으며, 이에 따라 친환경 침출 공정인 바이오침출에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 폐리튬이온배터리 블랙매스 내에 존재하는 금속 산화물 및 유기물들은 바이오침출 과정에서 침출 효율을 저해할 수 있다. 이에 본 연구에서는 NCM계 양극활물질을 대상으로 블랙매스 관련 금속 산화물 및 유기물이 바이오침출에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, NiO, Co_3O_4 및 VC의 투입에 따른 침출률 감소는 미미하였으나, Al_2O_3, CuO 및 PVDF 투입 시, 약 10-15%의 침출률 감소가 관찰되었다. MnO와 NMP 투입 시 침출률이 25-50% 정도로 크게 감소하는 모습이 관찰되었다. 이러한 결과는 금속 산화물의 용해가 침출 시스템에 영향을 미치며, 유기물은 고유의 물리화학적 특성에 따라 서로 다른 영향을 나타냄을 시사한다. 본 연구는 블랙매스의 복잡한 구조 내에서 바이오침출 성능을 제한할 수 있는 요인들에 대한 통찰을 제공한다.

주제어 : 폐리튬이온배터리, 바이오침출, 블랙매스, 유기물, 금속 산화물

서론

내연기관 자동차에서 전기자동차로의 전환은 리튬이온배터리의 지속적인 수요 증가로 이어지고 있다. 이에 따라 배터리 제조에 사용되는 핵심광물인 리튬(Li), 니켈(Ni), 코발트(Co) 및 망간(Mn)의 수요도 증가할 것으로 전망된다. 하지만 Li, Ni, Co 및 Mn은 특정 국가에 편재되어 있어 공급이 불안정한 상태이다. 따라서 핵심광물의 안정적인 공급망을 확보하기 위한 폐리튬이온배터리의 재활용이 필수적이다. 폐배터리 재활용 기술 중 바이오침출은 미생물을 이용하여 생물학적으로 금속을 회수하는 비용 효율적이고 친환경적인 대체 침출 공정이다. 폐리튬이온배터리 블랙매스에는 유가금속인 Ni, Co 및 Mn 외에 집전체로 사용되는 Al 및 Cu가 포함될 수 있으며, 전해질 및 바인더 등의 유기물들이 일부 존재할 수 있다. 이들 물질은 불순물로서 바이오침출 과정에서 침출 효율에 영향을 미칠 수 있다. 블랙매스는 다양한 물리화학적 형태의 불순물이 존재할 수 있는 복합 혼합물이며, 바이오침출 과정에서 각기 다른 반응성을 나타낼 수 있다. 하지만, 개별 금속 산화물과 유기물이 바이오침출 시스템에 어떤 영향을 미치는지는 여전히 불분명한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 금속 산화물 및 유기물질들이 바이오침출 과정에 미치는 영향에 대해 규명하고자 하였다.

재료 및 실험방법

실험에 사용된 미생물은 9-P1 (*Acidithiobacillus ferriphilus*) 균주이며, 대구 달성광산에서 확보 후 분리되었다. 침출 실험에는 NCM 111, pyrite, 금속 산화물 (NiO, Co_3O_4, MnO, Al_2O_3 및 CuO) 및 유기물 (PVDF, VC 및 NMP)이 사용되었다. 유기물은 블랙매스 대상 TGA 분석 및 문헌 조사를 통해 선정되었으며, 블랙매스의 화학 조성은 ICP-OES로 분석되었다 (Table 1).

*Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr
† Corresponding author : 황국화 / ghhwang@jbnu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of black mass

Materials	Chemical composition (%)					
	Li	Ni	Co	Mn	Al	Cu
Black mass	3.32	12.14	6.6	5.98	5.95	4.21

실험은 9K medium 90 mL에 미생물 10 mL (10% (v/v)) 접종 후, 배양 3일 차에 황철석 (pyrite, FeS_2) 1 g과 NCM 1 g을 투여하였으며, 각 금속 산화물 및 유기물을 농도별로 투입하였다. 각 물질의 투입 농도는 블랙매스 화학 조성 분석 결과와 TGA 분석 결과를 참고하여 P/D 10 g/L를 기준으로 최소 농도, 100 g/L를 최대 농도로 선정하였다. 실험은 2-STEP 침출 조건에서 양극활물질 기준 광액농도 (P/D) 10 g/L로 2회 수행하였으며, 각 물질의 투입에 따른 영향을 분석하기 위해 금속 산화물과 유기물을 투입하지 않은 control 조건을 병행하였다. 모든 실험은 30°C와 160 rpm 조건에서 진행되었으며, H_2SO_4 투입에 따른 침출 영향을 배제하기 위해 pH 조정은 진행하지 않았다. 침출 실험은 5일간 진행하였고, 24시간마다 pH, Eh 및 Fe^{3+}/Fe^{2+}를 모니터링하였으며, 침출률은 24시간마다 ICP-OES를 통해 측정하였다.

결과 및 고찰

유의미한 결과를 보인 물질에 대해 NCM 양극활물질 대상 48시간 이후의 침출률 결과를 Figure 1에 나타내었다. 실험 결과, NiO, Co_3O_4, 및 Al_2O_3 투입에 따른 침출률 감소는 거의 관찰되지 않았거나 10% 내외였으며, 투입된 금속 산화물 자체의 용해 또한 미미했다. 반면 MnO 및 CuO 투입 시, 금속 산화물 자체의 용해가 관찰되었으며, MnO의 경우 침출률이 최대 약 50%까지 감소하였다. 이는 금속 산화물의 용해 여부에 따른 차이인 것으로 보이며, 금속 산화물의 용해에 따른 pH 상승으로 인한 철의 침전과 같은 침출 시스템의 변화가 주된 원인인 것으로 판단된다. 유기물의 경우, PVDF 및 NMP 투입 시 약 10-20%의 침출률 감소가 관찰되었으며, VC의 경우 침출률 감소는 거의 관찰되지 않았다. 이는 유기물의 물리화학적 특성에 따라 서로 다른 영향을 나타낼 수 있음을 시사한다.

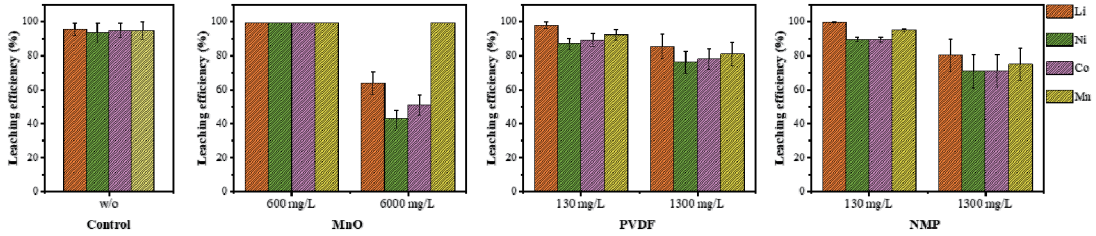


Figure 1. Leaching efficiency of Li, Ni, Co, and Mn from NCM cathode materials at 48h in the presence of selected substances

결론

본 연구에서는 블랙매스 내 금속 산화물 및 유기물이 바이오침출 과정에 미치는 영향을 평가하였다. 그 결과, 금속 산화물 자체는 미생물 및 침출 시스템에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 판단되며, 금속 산화물 용해에 의한 침출 시스템 변화가 주된 원인으로 작용하는 것으로 보인다. 또한, 유기물의 물리화학적 특성에 따라 바이오침출 과정에서 충분한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 결과적으로 저해 기작을 규명하고 침출 효율 개선을 위한 체계적인 후속 연구가 필요하다.

사사

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-25444020).
본 연구는 정부(환경부)의 재원으로 국립생물자원관의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIBR202522202).

H-10

메탄술폰산-염화콜린 심층공융용매(DES)를 이용한 LCO 내 코발트의 선택적 침출 및 NMR 기반 메커니즘 규명

Mechanism of Co-selective Leaching from LCO Using Methanesulfonic Acid-Choline Chlordie DES

김유진[1], 카인와이진[2], 이소미[1], 김재연[2*], 변재원[1†]

[1]서울과학기술대학교 신소재공학과, [2]한국재료연구원 경량재료연구본부

초록

$LiCoO_2$(LCO) 양극재의 친환경 재활용을 위해 메탄술폰산(MSA)과 염화콜린(ChCl)을 1:1 몰비로 혼합한 저점도 심층공융용매(DES)를 개발하였다. ^{1}H NMR 및 DSC 분석을 통해 안정적인 수소 결합 형성 및 낮은 유리 전이 온도(T_g=-17.45℃)를 입증하였다. 최적 침출 조건에서 Co의 침출율은 94.1%였으며, Li은 리튬 메탄술폰염($LiCH_3SO_3$) 잔여물로 침전되어 침출 단계에서 즉각적인 금속 분리를 구현하였다. 결과적으로 액상 기반 저점도 DES는 물질 전달 속도를 극대화함으로써 저온 및 단시간 조건에서도 높은 침출 효율을 확보하여 향후 배터리 재활용 공정의 에너지 절감과 효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 심층공융용매(DES), 메탄술폰산(MSA), 양극재 재활용, 선택적 침출

서론

전기차 시장 확대에 따른 전략 금속 확보 및 환경 보호를 위해 사용 후 배터리 재활용의 중요성이 증대되고 있다. 기존 습식제련 공정은 강산 사용으로 인한 유해 가스 발생과 환경 오염 문제가 심각하여 이를 대체할 친환경 용매로 DES가 주목받고 있다. 그러나 옥살산, 시트르산 등 기존 고체 유기산 기반 DES는 상온 점도가 매우 높아 물질 전달 속도가 저해되어 100℃ 이상의 고온 공정이 강제되는 한계가 있다.

본 연구에서는 고점도 한계를 극복하기 위해 상온에서 액상으로 존재하는 유기산은 MSA를 새로운 HBD로 도입하였다. MSA는 생분해성이 뛰어나고 부식성이 적어 친환경적인 장점을 지니지만, 산해리상수(pKa) 값이 −1.9 수준의 강산으로 완전 해리되기 쉬어 안정적인 DES 수소결합 네트워크 형성이 어려울 것으로 간주되어 왔다. 이에 본 연구는 MSA와 ChCl를 혼합하여 강산 기반 DES의 수소결합 형성 가능성을 ^{1}H NMR로 검증하였고, 이를 LCO 침출에 적용하여 코발트의 선택적 침출을 확인하였으며 ^{1}H NMR 분석을 통해 선택적 침출 메커니즘을 입증하고자 하였다.

재료 및 실험방법

DES 합성을 위한 HBD 및 수소결합 수용체(HBA)로 각각 MSA와 ChCl을 사용하였다. ChCl은 60℃ 오븐에서 24시간 건조한 후 사용되었다. MSA와 ChCl을 다양한 몰비로 배합하여 상온에서 투명한 액상이 형성될때까지 자력 교반하여 DES를 제조하였다. 침출실험은 DES 50 mL에 LCO 분말을 투입하여 수행되었으며, 반응 중 방출 가스는 증류수에 포집하여 pH를 추적되었다.

결과 및 고찰

MSA-ChCl(1:1) DES의 열적 특성을 DSC로 분석한 결과, 유리 전이 온도가 −17.45℃로 매우 낮게 나타나 상온에서 안정적인 저점도 액상 상태를 유지함을 확인하였다. DES의 1H NMR 분석 결과 MSA의 $-SO_3H$, ChCl의 −OH, 시스템 내 미량의 수분의

* Corresponding author : 김재연 / jaeyeonkim@kims.re.kr,
† Corresponding author : 변재원 / byeonjw@seoultech.ac.kr

-OH 프로톤 피크가 단일 피크로 합쳐지는 현상이 관찰되었다. 이는 Cl^- 이온을 매개로 성분 간 빠른 프로톤 교환(Fast proton exchange)이 일어나며 수소결합 네트워크가 구축되었음을 의미한다. 가중 평균 화학적 이동(δ_{av}^{H}) 이론 계산값과 실측값의 일치를 통해 강산 계열인 MSA가 HBD로서 성공적으로 작동하여 안정적인 DES 구조를 형성함을 입증하였다.

저점도 DES 기반 LCO 선택적 침출의 최적 조건은 1:1 몰비의 DES, 고액비 20 g/L, 반응온도 70℃ 및 반응시간 2시간으로 확립되었다. 해당 조건에서 Co는 Cl^- 이온과 착화합물을 형성하여 94.1% 침출된 반면, Li은 고체 메탄술폰염($LiCH_3SO_3$)으로 침전(침출율 27.6%)되어, 침출 단계에서 Co와 Li의 즉각적인 상분리를 구현하였다.

침출액의 ^{1}H NMR 분석 결과 수분량이 증가하는 현상이 관찰되었으며, 이는 수분 용해도가 높은 $LiCH_3SO_3$ 염 일부가 재용해된 결과로 추측된다. 향후 엄격한 건조 환경 구축 시 선택적 분리 효율을 추가로 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

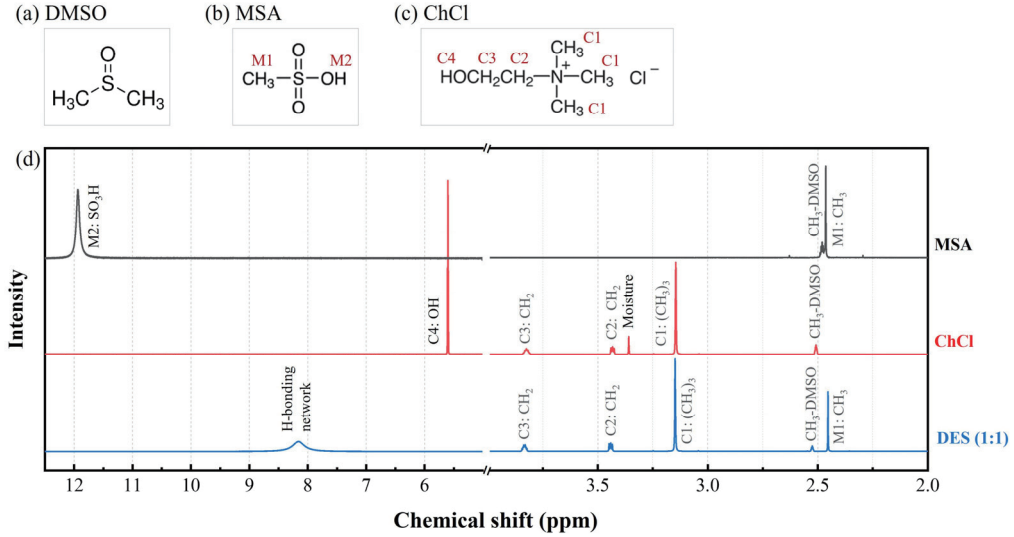


Fig. 1. Chemical structures of (a) DMSO, (b) MSA, and (c) ChCl, and (d) 1H NMR spectra of MSA, ChCl, and MSA-ChCl DES (1:1) in DMSO

결론

본 연구에서는 상온 액상 유기산인 MSA와 ChCl을 1:1로 혼합하여 저점도 친환경 DES를 성공적으로 합성하였다. ^{1}H NMR 분석을 통해 Cl^- 이온 매개 수소결합 네트워크를 확인하였으며, DSC를 통해 낮은 유리 전이 온도를 확인하여 기존 DES의 고점도 한계를 극복하였다. 최적 조건(1:1 DES, 고액비 20 g/L. 70℃, 2시간)에서 Co는 착화합물 형태로 94.1% 침출된 반면, Li은 고체 $LiCH_3SO_3$ 염으로 침전되어 단일 침출 단계 내 즉각적인 금속 상분리를 구현하였다. 결과적으로 본 DES 시스템은 저온·단시간 반응에서도 고효율 선택적 금속 회수가 가능하여 향후 배터리 재활용 공정의 에너지 절감 및 후속 공제 단순화에 기여할 것으로 기대된다.

H-11

대체 환원제 보릿짚을 이용한 하이니켈 NCM 블랙매스의 메탄술폰산 침출반응 속도론

Leaching Kinetics of High-Ni NCM Black Mass Using Barley Straw as an Alternative Reductant in a Methanesulfonic Acid System

원정환, 양시영, 안준모*
전북대학교 자원 · 에너지공학과

초록

폐 NCM 블랙매스의 친환경 재활용을 위해 과산화수소를 대체할 수 있는 보릿짚 유래 환원당을 MSA 침출계에 적용하였다. MSA 2.0 M, 80℃, 4 h, P/D 20 g/L에서 보릿짚 0.5 g/g을 함께 투입한 one-step 공정으로 Ni과 Co 침출률을 각각 82.6%, 88.1%까지 향상시켰다. 이후 citric acid의 착화 작용을 결합한 결과, MSA 1.9 M−citric acid 0.1 M에서 Ni 92.0%, Co 94.7%를 달성하여 MSA−보릿짚 기반 친환경 침출계의 적용 가능성을 확인하였다.

주제어 : High-Ni NCM Blackmass, Methanesulfonic acid(MSA), Alternative reductant, Barley straw, Leaching kinetics

서론

리튬이온배터리(Lithium-ion batteries, LIBs)의 사용 증가와 함께 폐배터리 발생량도 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 Li, Ni, Co 및 Mn과 같은 핵심금속을 회수하기 위한 재활용 기술의 중요성이 높아지고 있다. 특히 하이니켈 NCM 양극재는 Ni 함량이 높아 자원적 가치가 크므로, 폐 NCM 블랙매스로부터 유가금속을 효율적으로 회수할 수 있는 습식제련 공정 개발이 요구된다. NCM 블랙매스의 침출시, 고원자가 금속 환원을 위해 과산화수소를 이용하고 있다. 하지만, 고온에서의 불안정성과 고가의 특성상, 이를 대체할 수 있는 환원제에 대한 연구가 필요하다. 보릿짚은 셀룰로스와 헤미셀룰로스를 함유한 농업부산물로, 산성 조건에서 glucose와 xylose 등의 환원당을 생성할 수 있다. 생성된 환원당은 산화 과정에서 전자를 제공하여 NCM 내 전이금속의 환원 및 용해를 촉진할 수 있어 대체 환원제로 활용 가능하다. 하지만, 전북특별자치도에서 발생하는 농업부산물은 대체로, 대부분 소각으로 처리되고 있어, 폐자원의 고부가가치화가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 대체침출제 메탄술폰산(MSA) 침출계에서 보릿짚을 대체 환원제로 적용하여 하이니켈 NCM 블랙매스의 Li, Ni, Mn 및 Co 침출 거동 및 침출반응 메커니즘을 규명하였다.

재료 및 실험방법

블랙매스 샘플 내 Li, Ni, Co, Mn 금속 조성은 각각 5.8%, 36.6%, 5.7%, 2.1%이다. 블랙매스 침출 실험은 MSA 2.0 M 조건에서 보릿짚 0.05-1 g/g NCM 블랙매스를 투입하여 진행하였다. 보릿짚과 블랙매스를 함께 투입하여 침출하는, One-step 방식과 보릿짚을 MSA 수용액으로 사전 가수분해 후, 여과액으로 블랙매스를 침출하는 Two-step 침출 방식도 비교하였다. 또한, Citric acid 0.1-0.4 M를 첨가하여 Citric acid의 금속 착화에 따른 침출률 개선 여부를 평가하였다. 모든 실험에서 P/D(pulp density), 침출 시간, 침출 온도는 20 g/L, 4시간, 80℃로 동일한 조건으로 설정하였다.

*Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

결과 및 고찰

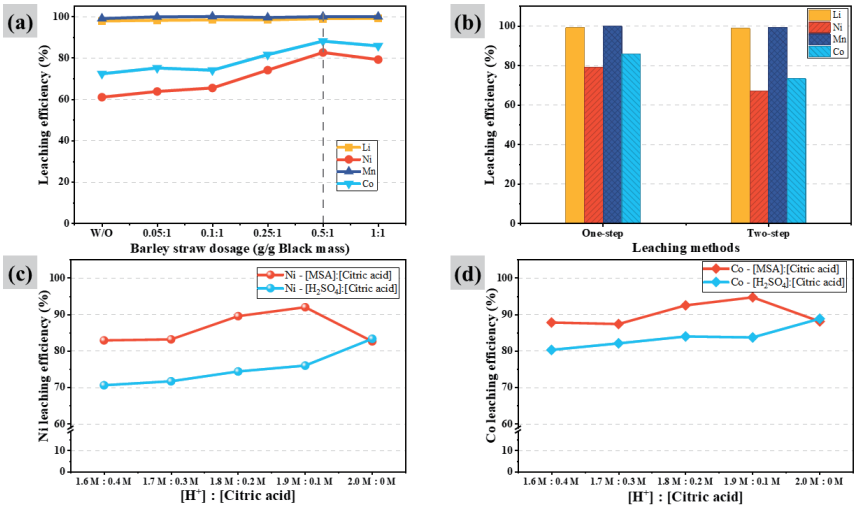


Fig. 1. 폐 NCM 블랙매스 대상 MSA 침출계 (a)보릿짚 투입량 (b)침출 방식에 따른 금속 침출률과 MSA, H_2SO_4 침출계 Citric acid 첨가에 따른 (c)Ni (d)Co 침출률

MSA 침출계에서 보릿짚 투입량에 따른 Li, Ni, Mn 및 Co 침출률을 평가하였다. Li와 Mn은 보릿짚 투입량과 관계없이 98% 이상의 높은 침출률을 보였으나, Ni과 Co는 보릿짚 투입량 증가에 따라 침출률이 향상되었다. 특히 보릿짚 0.5 g/g NCM 블랙매스를 투입한 One-step 조건에서 Li, Ni, Mn, Co의 침출률은 각각 99.0%, 82.6%, 99.9%, 88.1%였다. 동일 투입량에서 Two-step 조건은 각각 98.8%, 67.1%, 99.3%, 73.4%로, Ni과 Co는 One-step 방식에서 각각 15.5%p, 14.7%p 높았다. 이는 보릿짚과 블랙매스를 동시에 반응시킬 경우 환원당이 지속적으로 생성·공급되어 환원 환경이 유지되기 때문으로 판단된다. 또한 MSA 침출계의 침출률 개선을 위해 complexing agent로 citric acid를 첨가하였다. MSA-citric acid 계에서는 총 산 농도 2.0 M에서 MSA 비율이 증가하고 citric acid 비율이 감소할수록 Ni 및 Co 침출률이 향상되었으며, MSA 1.9 M:Citric acid 0.1 M 조건에서 각각 92.0%, 94.7%로 가장 높았다. 이는 H_2SO_4-citric acid 계의 76.0%, 83.7%보다 높은 값으로, MSA의 금속 산화물 용해, 보릿짚 유래 환원당의 환원 작용, citrate의 Ni 및 Co 착화에 따른 용출 이온 안정화가 복합적으로 작용한 결과로 판단된다.

결론

MSA 2.0 M에서 보릿짚 0.5 g/g 까지 투입량을 증가하였을 때, 침출률이 Li 99.0%, Ni 82.6%, Mn 99.9% Co 88.1%로 증가하였으며, 그 이상의 투입은 물질 전달 저해로 침출률이 감소하였다. 또한, 보릿짚 투입 방식 비교 실험 결과, one-step 공정은 Ni 82.6%, Co 88.1% 침출률로 two-step 공정에 비해 높은 침출률을 보였다. 보릿짚 내 지속적인 환원당 추출 방식이 금속 침출에 더 효과적인 것을 확인하였다. 추가로 $[H^+]$=2.0 M 조건으로 Citric acid를 첨가하였을 때, MSA 1.9 M-Citric acid 0.1 M에서 Ni 92.0%, Co 94.7%의 침출률을 나타내어 H_2SO_4-citric acid 계보다 높은 침출 성능을 보였다. Citric acid 첨가를 통해 수용액 내 안정적인 금속 착화로 침출률이 개선된 것을 확인하였다. 이를 통해 보릿짚 내 MSA 기반 침출계의 적용 가능성을 확인하였다.

사사

본 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발 특구진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (RS-2025-25444020).

H-12

Mn pre-loading 기반 불순물 제거 및 Ni, Co, Mn 공추출을 통한 메탄술폰산 침출액의 전구체 합성 용액 제조연구

Preparation of a Precursor Synthesis Solution from Methanesulfonic Acid Leachate via Mn Pre-loading-Assisted Impurity Removal and Co-extraction of Ni, Co, and Mn

정현수[1], 양시영[1], 안준모[1*]

[1]전북대학교 자원 · 에너지공학과

초록

본 연구는 폐리튬이온배터리 재활용 시, 친환경 침출을 위해 메탄술폰산(MSA) 기반 침출 후 용매추출 공정 단순화를 위한 공추출을 수행하였다. MSA 모사 침출액 대상 침전을 통해, Fe, Al을 98.9% 이상 제거 후, Mn^{2+} pre-loading한 0.3 M D2EHPA로 Cu 93.5%를 추출하며 Fe, Al, Cu의 사전 제가가 가능하였다. 이후 1.0 M D2EHPA로 Ni 95.6%, Co 97.3%, Mn 99.7%를 공추출 하였으며, 동반 추출된 Li는 금속이온교환 세정으로 98.4% 제거하였다. 최종적으로, 0.5 M H_2SO_4 2단 탈거를 통해 Ni, Co, Mn을 99.0% 이상 회수하여 공정 단순화 및 전구체 합성 용액 제조 가능성을 확인하였다.

Keywords : Spent lithium-ion batteries, MSA leachate, Pre-loading extraction, Co-extraction, Li ion-exchange scrubbing

서론

탄소중립 2050 목표 달성을 위한 전기차 보급 확대에 따라 리튬이온배터리의 수요와 폐배터리 발생량이 증가하면서, Ni, Co, Li 등 핵심광물 확보를 위한 재활용의 중요성이 커지고 있다. 폐리튬이온배터리의 재활용 시, 습식제련 공정을 적용하며 폐배터리 전처리 후 생산되는 블랙매스를 주로 황산과 과산화수소로 침출한다. 이후, 침출액 대상 용매추출을 통해 유가금속을 분리·정제한다. 최근에는 기존 무기산을 대체하기 위한 친환경 침출제로 메탄술폰산(Methanesulfonic acid, MSA)이 연구되고 있으나, MSA 침출액을 대상으로 한 금속 분리·정제 연구는 부족한 실정이다. 특히, 블랙매스 침출액 내 Al, Cu 등의 불순물 제거 시, 유가금속(Ni, Co, Li)의 손실이 발생할 수 있으며 Ni, Co, Mn의 개별로 용매추출 시, 공정이 복잡하다. 따라서, 공정 단순화를 위해 Ni, Co, Mn 공추출을 적용할 수 있다. 하지만, 공추출 시, Li가 동반 추출 문제가 발생하며, Li 세정이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 MSA 기반 모사 침출액을 대상으로 침전 및 Mn^{2+} pre-loading을 통해 불순물 금속을 제거하고 Ni, Co, Mn 공추출 및 금속이온교환 세정을 통해 Li를 선택적으로 제거하는 전구체 합성 용액 제조 가능성을 평가하였다.

재료 및 실험방법

MSA 기반 모사 침출액을 불순물 제거 및 금속 공추출용으로 각각 제조하였으며, 금속 농도는 Table 1에 제시하였다. MSA와 H_2O_2 농도는 각각 0.5 M과 0.1 M로 고정하였다. 불순물(Fe, Al, Cu) 제거는 수산화나트륨을 첨가하여 Fe, Al, Cu을 수산화물 형태로 침전하였다. 이후, 잔존 Cu를 Mn^{2+}를 0-5.8 g/L pre-loading 된 0.3 M D2EHPA를 이용하여 추출하였다. 이후 추출 여액 대상, 0.6-1.4 M D2EHPA를 이용하여 Ni, Co, Mn 공추출을 수행하였으며, 동반 추출된 Li는 Ni^{2+}와 Co^{2+}(각각 0.5-4.0 g/L)를 포함한 0.125-0.25 M MSA 용액으로 세정하였다. D2EHPA는 ISD-108(hydrogenated kerosene)에 희석하여 사용하였다. 실험은 25 ° C, O/A = 0.1-3.0에서 수행하였으며, pH는 5.0 M NaOH로 조절하였다.

* Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

Table 1. 불순물 제거 및 유가금속 회수에 사용된 모사 침출액의 초기 금속 농도

Elements			Fe	Al	Cu	Mn	Co	Ni	Li
Concentration (g L^{-1})	Impurity removal	Precipitation	0.1	0.75	1.0	2.0	2.0	5.0	2.0
		Solvent extraction	-	-	0.79	1.97	1.92	4.68	1.85
	Metal recovery	Solvent extraction	-	-	-	2.0	2.0	5.0	2.0

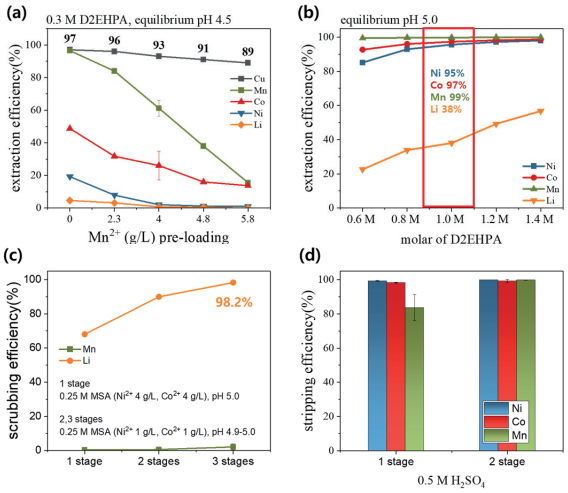


Fig. 1. (a) Mn^{2+} pre-loading 농도에 따른 금속 추출, (b) D2EHPA 농도에 따른 금속 추출, (c) 금속 이온교환법 Li 세정 (d) H_2SO_4를 이용한 탈거(추출제 0.3-1.4 M, O/A = 1, 25 ° C)

결과 및 고찰

MSA 금속 수용액을 수산화나트륨으로 침전한 결과, Fe, Al은 pH 4.25, 60 ° C 조건에서 98.9% 이상 수산화물 형태로 침전되었다. 잔존 Cu(0.79 g/L)는 0.3 M D2EHPA에 Mn^{2+}를 0-5.8 g/L로 pre-loading 한 추출제를 이용하여 실험을 수행하였다. 실험 결과, Mn^{2+} pre-loading 농도 증가에 따라 Cu 추출률은 3.6%로 소폭 감소한 반면 Co, Ni, Li의 추출은 억제한 것으로 판단된다. Mn^{2+} 4.0 g/L 조건에서 Cu 93.5%, Co 26.0%, Ni 2.0%, Li 0.6%의 추출률을 나타내어 추출 여액 내 Co, Ni, Li의 손실을 최소화하였다. 이후 추출 여액 대상 1.0 M D2EHPA, equilibrium pH 5.0 조건에서 Ni 95.6%, Co 97.3%, Mn 99.7%, Li 38.0%의 공추출률을 달성하였다. 동반 추출된 Li는 Ni^{2+}와 Co^{2+}를 포함한 세정액을 이용한 금속이온교환법으로 제거하였다. D2EHPA와 친화도가 높은 Ni^{2+}와 Co^{2+}가 유기상 내 Li^{+}와 치환되면서 Li^{+}가 수상으로 이동 및 교환되는 Crowd out effect 효과를 유도하였으며, 3단 세정에서 Li 98.2%를 선택적으로 수상으로 제거하였다. 이후 유기상 내 Ni, Co, Mn은 5.0 M H_2SO_4를 이용한 2단 탈거로 세 금속 모두 99.0%이상 탈거하여 전구체 합성 용액 제조 가능성을 확인하였다.

결론

MSA 기반 모사 침출액에서 수산화나트륨을 이용해 Fe, Al를 수산화물 형태로 98.9%이상 침전 제거하였다. 이후 4.0 g/L Mn^{2+} pre-loading 된 0.3 M D2EHPA로 Cu 93.5% 선택적 추출과 Co 26.0%, Ni 2.0%, Li 0.6%의 낮은 유가금속 손실을 달성하였다. 이후, 추출 여액 내 Ni, Co, Mn 공추출 하여 Ni 95.6%, Co 97.3%, Mn 99.7%, Li 38.0%의 공추출률을 달성하였다. 또한, 공추출된 Li는 금속 이온교환 세정을 통해 98.2% 수상으로 제거하였다. 최종적으로 0.5 M H_2SO_4을 이용한 2단 탈거를 수행하여 Ni, Co, Mn 모두 99.0% 이상 탈거하여 전구체 합성 용액 제조 가능성을 확인하였다.

사사

이 연구는 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발 특구진흥재단의 지원을 받아 수행되었습니다 (RS-2025-25444020).

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

구두

자원처리



The Korean Institute of Resources Recycling

R-01

사용후 리튬이온배터리로부터 음극재와 양극재, 리튬을 회수하는 친환경 전처리(부유선별) 공정

The eco-friendly pretreatment(flotation) for recovering graphite, cathode material, and lithium from End-of-life battery

유광석[1*], 김관호[1], 홍길상[1]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부

초록

최근 리튬이온배터리에 사용되는 전략자원을 안정적으로 확보하기 위한 국가 간 경쟁이 전 세계적으로 심화되고 있다. 이에 따라 사용 후 리튬이온배터리를 해체·파쇄하는 과정에서 발생하는 블랙매스(Black Mass)를 새로운 배터리 자원으로 활용하기 위한 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 일반적인 리튬이온배터리 재활용 공정에서는 사용 후 배터리를 해체·파쇄하고 열처리를 거쳐 블랙매스를 제조한 후, 습식제련 및 용매추출 공정을 통해 블랙매스로부터 리튬과 양극재 구성 금속인 니켈, 코발트, 망간 등을 회수한다. 그러나 기존 전처리 공정의 열처리 과정에서는 배터리 내 탄소계 물질과 전해액 등이 연소 또는 분해되면서 다량의 CO_2와 HF 등의 가스가 발생할 수 있으며, 후속 습식제련 공정에서도 황산염계 부산물, 흑연 잔사 및 폐수 등이 발생하는 문제가 있다. 또한 양극재와 음극재가 충분히 분리되지 않은 상태로 습식제련 공정에 투입될 경우 후단 공정의 처리량과 환경부하가 증가할 수 있다.

한국지질자원연구원은 이러한 기존 공정의 문제점을 개선하기 위해 국내 배터리 전처리 기업과 협력하여 전처리 단계에서 전해액, 리튬, 양극활물질 및 흑연을 단계적으로 분리·회수하는 친환경 전처리 공정을 개발하고 있다. 개발 공정은 크게 진공 전해액 회수, 건식 리튬 탄산화, 무방류 부유선별의 세 단계로 구성된다.

첫 번째 단계에서는 사용 후 배터리를 파쇄하기 전에 진공 조건에서 전해액을 기화·회수함으로써 파쇄 및 후속 열처리 과정에서 발생할 수 있는 유해가스와 유기물의 영향을 최소화한다. 두 번째 단계에서는 기존 열처리 공정의 분위기와 반응조건을 제어하여 리튬을 탄산리튬 형태로 전환하는 건식 탄산화 공정을 적용하고, 이를 통해 후속 부유선별 공정에서 리튬을 선택적으로 회수할 수 있도록 공정을 설계하였다. 마지막 단계에서는 흑연, 양극활물질 및 리튬 성분을 선택적으로 분리·회수하기 위한 부유선별 기반 선별 공정을 적용하였다.

KIGAM은 이 과정에서 Denver사의 Sub-A형 부유선별기와 자체 개발한 Cone형, Tank형 및 Column형 등 다양한 부유선별기를 이용하여 실험을 수행하였다. 이 과정에서 미립의 양극재가 기포층에 유입되는 비말동반유입(entrainment)을 효과적으로 억제할 수 있는 부유선별 장치 및 조건을 확보하였다. 본 공정은 기존의 단순한 블랙매스 제조 중심의 전처리 공정에서 벗어나, 습식제련 이전 단계에서 전해액, 리튬, 흑연 및 양극활물질을 선택적으로 분리·회수하는 것을 특징으로 한다. 이를 통해 후단 습식제련 공정으로 투입되는 양극재의 양을 증가시키고, 흑연으로 인한 고정 문제 뿐만아니라 환경부하와 공정 부담을 동시에 줄일 수 있을 것으로 기대된다. 배터리 셀 기준 연간 500톤 규모의 준상용급 공정을 구축하고 있으며, 2026년 11월 완공을 목표로 하고 있다.

주제어 : 사용후 리튬이온배터리, 블랙매스, 부유선별, 흑연, 양극재, 리튬

사사

본 결과물은 기후에너지환경부 재원으로 한국환경산업 기술원의 사용 후 배터리 안전관리 및 재제조 유통순환 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(유해가스 및 폐수 등 환경오염 물질 배출 저감을 위한 사용 후 배터리 전처리 기술 및 글로벌 현지화 기술 개발, RS-2025-02172969).

*Corresponding author : 유광석 / youks@kigam.re.kr

R-02

열처리 온도에 따른 NCM계 블랙매스의 상변환 및 흑연, 양극재, 리튬의 선별 거동

Effect of Thermal Treatment Temperature on Phase Transformations and Separation Behavior of Graphite, Cathode Materials, and Lithium in NCM-Type Black Mass

양찬우[1], 김관호[2], 홍길상[2], 유광석[2*]

[1]과학기술연합대학원대학교, [2]한국지질자원연구원 자원활용연구본부

초록

본 연구에서는 블랙매스의 열처리 조건에 따른 구성 물질의 상변화와 이에 따른 양극재, 음극재 및 리튬의 선별 거동을 고찰하였다. 열처리 온도는 일반적인 배터리 전처리 공정에서 전해액과 바인더를 제거하기 위해 적용되는 400~500 °C 영역과 리튬을 탄산리튬(Li_2CO_3) 형태로 전환하기 위한 700 °C 영역을 중심으로 설정하여 연구가 진행되었다.

먼저 TG-DTA 분석을 통해 온도 변화에 따른 블랙매스 내 유기물 및 탄소계 물질의 열분해 거동을 분석하였으며, XRD 분석을 이용하여 각 열처리 온도에서 흑연, 양극활물질 및 리튬 함유상의 상변화를 관찰하였다. 이러한 열적·광물학적 특성 분석 결과를 바탕으로 열처리 온도가 이후의 부유선별, 자력선별 및 리튬 회수 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

선별 실험 결과, 기존 문헌에서 보고된 바와 유사하게 500 °C에서 열처리한 블랙매스에서 양극재와 음극재의 부유선별 분리 효율이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 열처리 과정에서 전해액 및 바인더 성분이 제거됨에 따라 양극재와 흑연 사이의 표면 특성, 특히 친수성·소수성의 차이가 보다 명확해졌기 때문으로 판단된다.

반면, 700 °C와 같은 비교적 높은 온도에서 열처리된 블랙매스에서는 양극재의 환원반응이 진행되면서 니켈과 코발트가 금속상 또는 환원된 형태로 전환되었으며, 이에 따라 자화 특성이 증가하였다. 이러한 상변화로 인해 고온 열처리 시료에서는 자력선별을 이용한 양극재 분리가 효과적인 것으로 나타났다. 즉, 열처리 온도에 따라 블랙매스 구성 물질의 상과 표면 특성이 변화하며, 이에 적합한 선별 방법도 달라지는 것을 확인하였다.

리튬의 경우에는 열처리 온도가 증가함에 따라 탄산리튬으로의 전환이 증가하였으며, 생성된 탄산리튬이 수계 부유선별 과정에서 공정수로 용출되는 현상이 관찰되었다. 고온 열처리 시료에서는 부유선별 과정에서 리튬의 용출률이 최대 80% 후반 수준까지 증가하였다. 이러한 결과는 열처리 과정에서 리튬의 탄산화 조건을 보다 정밀하게 제어할 경우, 부유선별 공정과 연계하여 90% 이상의 리튬을 선택적으로 회수할 수 있는 가능성을 보여준다.

따라서 본 연구를 통해 중온 영역인 500 °C에서는 표면 특성의 차이를 이용한 부유선별이, 700 °C 이상의 고온 영역에서는 양극재의 환원 및 자화 특성을 이용한 자력선별이 효과적임을 확인하였다. 또한 고온 열처리를 통한 리튬의 탄산화와 수계 선별 공정을 연계함으로써 양극재·음극재의 분리와 동시에 리튬을 선택적으로 회수할 수 있는 새로운 전처리 공정의 가능성을 제시하였다.

주제어 : 블랙매스, 선별, 흑연, 양극재, 리튬

사사

본 결과물은 기후에너지환경부 재원으로 한국환경산업 기술원의 사용 후 배터리 안전관리 및 재제조 유통순환 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(유해가스 및 폐수 등 환경오염 물질 배출 저감을 위한 사용 후 배터리 전처리 기술 및 글로벌 현지화 기술 개발, RS-2025-02172969).

*Corresponding author : 유광석 / youks@kigam.re.kr

R-03

부유선별을 통해 회수된 NCM 양극활물질의 직접 재생을 통한 결정구조 및 전기화학적 성능 회복

Structural and Electrochemical Performance Recovery of Degraded NCM Cathode Active Materials Recovered by Flotation through Selective Component Removal and Direct Regeneration

김동우[1,2], 김관호[1], 홍길상[1], 권경중[2], 유광석[1*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]세종대학교 에너지자원공학과

초록

기존 폐배터리 재활용 공정은 높은 에너지 및 시약 소비가 요구되며, 최종적으로 회수되는 물질이 원료 형태라는 한계가 있다. 이에 비해 직접 재생법은 폐양극활물질의 결정구조와 전기화학적 성능을 회복하여 고부가가치 양극활물질로 직접 재활용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 직접 재생 과정에서 흑연과 같은 불순물의 존재는 양극활물질의 구조 및 성능 회복에 영향을 미칠 수 있어, 재생 전 양극활물질의 고순도화가 필요하다. 상용 NCM613 ($LiNi_{0.6}Co_{0.1}Mn_{0.3}O_2$)과 인조흑연을 혼합하여 모사 블랙매스를 제조한 후, 질소 분위기에서 400–700°C로 환원 열처리하여 열화 정도가 상이한 블랙매스를 제조하였다. 이후 흑연을 제거하고 산소 분위기에서 고상반응을 통해 직접 재생하였다. 재생 전후의 결정구조 및 전기화학적 특성을 분석한 결과, 재생 후 NCM613의 층상구조 및 전기화학적 성능이 회복되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 부유선별을 통한 흑연 분리와 직접 재생을 연계하는 공정이 고부가가치 자원화를 위한 효과적인 방법임을 보여준다.

주제어 : NCM613, 직접 재생, 부유선별, 결정구조

서론

리튬이온배터리의 보급 확대에 따라 폐배터리 발생량이 증가하면서 효율적인 재활용 기술의 필요성이 높아지고 있다. 직접 재생법은 폐양극활물질의 결정구조를 회복하고 부족한 Li을 보충하여 양극활물질을 직접 재생할 수 있어 기존 재활용 공정의 한계를 보완할 수 있는 기술이다. 그러나 블랙매스에 포함된 흑연 및 기타 불순물은 재생 과정에서 양극활물질의 구조와 전기화학적 특성에 영향을 미칠 수 있으므로, 효과적인 직접 재생을 위해서는 전처리 단계에서의 양극활물질 고순도화가 중요하다. 따라서 본 연구에서는 부유선별을 통한 흑연 분리와 양극활물질의 직접 재생을 연계하고, 열화 정도를 조절한 NCM613의 구조 및 전기화학적 성능 회복 거동을 분석하였다. 이를 통해 부유선별-직접 재생 연계 공정의 적용 가능성을 평가하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 블랙매스를 모사하기 위해 상용 NCM613 양극활물질과 인조 흑연을 85:15 wt.%의 비율로 혼합하여 모사 블랙매스를 제조하였다. 이후 양극활물질의 열화 및 환원 정도를 모사하기 위해 질소 분위기에서 400–700°C의 온도 범위에서 100°C 간격으로 각각 12시간 동안 열처리하였다. 환원 열처리된 모사 블랙매스의 재생을 위해 공기 분위기에서 600°C, 12시간 동안 열처리하여 흑연을 연소·제거하였다. 이후 흑연이 제거된 시료에 LiOH를 첨가하여 Li/TM 몰비를 1.05로 조정한 후, 산소 분위기에서 850°C, 12시간 동안 고상반응을 통해 양극활물질을 재생하였다. 재생 전후의 입자 형상 및 결정구조 변화를 확인하기 위해 SEM (Scanning Electron Microscope) 및 XRD (X-ray Diffraction) 분석을 수행하였으며, 재생에 따른 전기화학적 성능 회복 여부를 평가하기 위해 전기화학 평가를 진행하였다.

*Corresponding author : 유광석 / youks@kigam.re.kr

결과 및 고찰

Fig. 1(a)는 모사 블랙매스를 질소 분위기에서 환원 열처리한 시료의 XRD 패턴을 나타낸다. $N_2$400°C 및 $N_2$500°C에서는 NCM613의 주요 회절 피크가 유지되어 층상구조가 비교적 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. 반면, $N_2$600°C에서는 층상구조의 회절 피크가 사라지고 rock-salt 상과 Li_2CO_3및 금속 Ni의 형성이 관찰되어 NCM613의 결정구조가 붕괴되기 시작하는 것을 확인하였다. $N_2$700°C에서는 $N_2$600°C에 비해 금속 Ni의 회절 피크가 더욱 뚜렷하게 나타났으며, 추가적으로 MnO 상이 형성되는 것을 확인하였다. 이는 환원 온도가 증가함에 따라 NCM613의 환원이 더욱 진행되어, 전이금속의 환원 및 층상구조의 붕괴가 심화되었음을 의미한다. Fig. 1(b)는 환원 열처리 후 재생 공정을 진행한 시료의 XRD 패턴을 나타낸다. 모든 환원 온도 조건에서 재생 후 $R\bar{3}m$ 공간군을 갖는 NCM613의 층상구조 회절 피크가 다시 나타나는 것을 확인하였다. 특히 환원 온도가 증가함에 따라 rock-salt, 금속 Ni 및 MnO 등으로 심하게 상전이 된 시료에서도 층상구조가 회복되는 것을 확인하였다. 이는 열화된 NCM613의 구조가 산소분위기 고상 재생 열처리를 통해 회복될 수 있음을 보여준다.

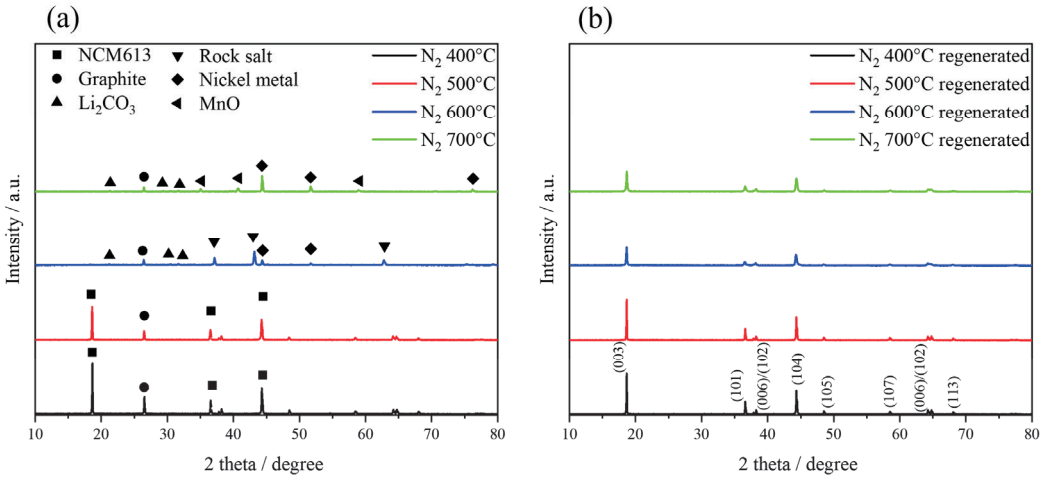


Fig. 1. XRD patterns of (a) simulated black mass after reductive heat treatment at 400–700 °C under N_2atmosphere and (b) regenerated NCM613.

결론

본 연구에서는 부유선별을 통한 흑연 분리와 직접 재생 공정을 연계하여 열화된 NCM613의 결정구조 및 전기화학적 성능이 회복되는 것을 확인하였다. 이를 통해 부유선별-직접 재생 연계 공정의 폐양극활물질 고부가가치 재활용 가능성을 확인하였다.

Acknowledgement

결과물은 기후에너지환경부 재원으로 한국환경산업 기술원의 사용 후 배터리 안전관리 및 재제조 유통순환 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(유해가스 및 폐수 등 환경오염 물질 배출 저감을 위한 사용 후 배터리 전처리 기술 및 글로벌 현지화 기술 개발, RS-2025-02172969).

R-04

추적자(Tracer)를 이용한 몰리브덴광 컬럼부선기의 체류시간분포(RTD) 특성평가

Characterization of Residence Time Distribution (RTD) in a Molybdenite Flotation Column Using a Tracer

푸레브오윤빌렉[1], 이경현[1,2], 박철현[1*]

[1]조선대학교 첨단에너지공학과, [2]KIGAM

초록

컬럼부선의 회수율은 부선속도상수(Kc)와 체류시간뿐 아니라 축믹싱에 영향을 받는다. 실제 컬럼에서는 기포 후류와 밀도차 순환류로 혼합이 발생해 플로그플로 가정 시 회수율이 과대평가되며, 이러한 비이상 유동은 축분산모델의 분산수 Nd로 정량화된다. Nd는 이론적 예측이 불가능하고 잔류시간분포(RTD) 실측으로만 결정되며, 본 연구에서는 몰리브덴 정광을 대상으로 3상 RTD를 측정하여 혼합 특성을 평가하였다.

실험은 내경 4 cm, 높이 180 cm 컬럼에서 광액 농도 5%(MoS_2 85%), 세척수 속도, 기포제 농도, 입도 및 가스속도를 3수준 직교배열로 수행하였다. NaCl 1 M 용액 20 mL를 급광 입구에 펄스 주입하고 배출구 전도도를 20분간 실시간 측정하였다(0~60초 5초, 60~360초 20초, 360~1,200초 60초 간격, 총 42점). 초기 전도도값을 차감한 ΔC를 E(t)로 정규화한 뒤 Δt 가중 적분으로 평균체류시간과 분산을 산출하고, 축분산모델식으로 Nd를 결정하였다.

사사

본 연구는 2026학년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

* Corresponding author : 박철현 / chpark@chosun.ac.kr

R-05

EOL 배터리 리사이클링 효율 향상을 위한 플라스틱 회수기술 개발

Development of Plastic Recovery Technology for Improving EOL Battery Recycling Efficiency

김학순, 김민식, 권태우, 김완이*, 이주승
포스코홀딩스 미래기술연구원

초록

본 연구는 리튬이온 배터리 재활용 공정에서 니켈, 코발트, 구리 등 고부가가치 유가금속의 회수 순도를 극대화하기 위한 센서 기반 하이브리드 선별 시스템을 제안한다. 수명이 다한(EOL) 배터리는 파쇄 공정을 거치며 활물질, 집전체, 분리막, 플라스틱 등 다양한 성분으로 혼재된다. 이 중 플라스틱은 타 물질 대비 물리적 고유 특성이 불분명하여 선택적 선별에 어려움이 있었다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 금속 검출 센서와 RGB 비전(Vision) 인식 시스템을 연계하여, 금속 성분 사이에서 플라스틱만을 정밀하게 식별하고 분리하는 선별 시스템을 개발하였다. 연구 과정에서 파쇄 시 발생하는 플라스틱의 거동 특성과 선별 효율 최적화를 위한 형상 인자를 분석하였으며, 이를 시스템 알고리즘에 반영하였다. 본 연구 결과는 폐배터리 재활용 공정의 효율을 높일 뿐만 아니라, 다양한 복합 소재에서 비금속 물질을 정밀하게 분리하는 핵심 기술로 활용될 것으로 기대된다.

주제어 : 리튬이온 배터리, 리사이클링, 플라스틱 재활용, 색채선별, 금속인식

* Corresponding author : 김완이 / wanyikim911@posco-inc.com

R-06

다이렉트 리싸이클링 전처리를 위한 전해액 제거 셀 제조 공정에 대한 기초 실험

A Fundamental Study on the Fabrication Process of Electrolyte-Removed Cells for Direct Recycling Pretreatment

김종배[1*], 이정[1], 김민혁[1]

[1](주)이알

전기차 시장의 급속한 성장과 함께 사용 후 리튬이온전지(LIB)의 발생량이 빠르게 증가하고 있다. 현재 상용화된 습식·건식 제련 기반의 재활용 공정은 Ni, Co, Li 등 유가금속을 원소 단위로 회수하는 데 초점이 맞추어져 있어 양극 활물질이 보유한 층상 결정구조와 부가가치가 소실되며, 고온 처리와 다량의 산·알칼리 사용에 따른 에너지 소비 및 환경 부하가 크다는 한계를 가진다. 이에 대한 대안으로 양극활물질의 결정구조를 유지한 상태에서 열화된 부분만을 보수하여 재사용하는 다이렉트 리싸이클링(direct recycling) 기술이 주목받고 있다. 다이렉트 리싸이클링의 성패는 재생 공정 자체보다도, 활물질의 구조적 손상과 이물 혼입을 최소화한 고품위 블랙 파우더를 확보할 수 있는가에 크게 의존한다.

기존 블랙 매스 기반 전처리의 본질적 한계는 양극과 음극을 분리하지 않은 채 셀 전체를 파쇄한다는 점에 있다. 이 경우 흑연 음극재가 혼입되어 별도의 열처리 또는 부유선별 공정을 통한 제거가 요구되며, 이 과정에서 활물질의 표면 손상과 회수 손실이 발생한다. 더욱이 음극 집전체인 Cu foil이 파쇄 과정에서 미분화되어 혼입되므로, 블랙 매스 내 구리 불순물은 사실상 회피가 불가능하다. Cu는 제련 공정에서는 후단 침출·정제를 통해 처리가 가능하지만, 다이렉트 리싸이클링에서는 재생 활물질 내에 잔류하여 전기화학적 특성을 직접적으로 저하시키는 치명적 불순물로 작용한다.

본 연구에서는 이러한 한계를 근본적으로 회피하기 위해, 파쇄에 선행하여 전해액을 제거한 "전해액 제거 셀"을 제조하고 이를 기점으로 양극과 음극을 물리적으로 분리한 후 양극만을 단독 처리하여 블랙 파우더를 제조하는 전처리 공정을 제안하였다. 사용 후 셀을 방전 후 진공 증류(vacuum distillation)에 적용하여 전해액을 제거하였으며, 진공도·증류 온도·유지 시간·셀 처리 형태를 공정 변수로 설정하였음.

감압 조건에서 전극 기공 내부에 함침된 전해액이 급격히 기화하면서 캐비테이션(cavitation) 현상이 발생하고, 기포의 생성·팽창·붕괴가 활물질층과 집전체 계면에 국부적인 응력을 인가하여 바인더 접합력을 저하시킴

분리된 양극재는 열처리, 초음파 등의 변수를 통해 집전체와 활물질을 분리하였으며, 해당 공정의 블랙 파우더에 대한 순도 및 XRD 분석을 진행하였음.

본 실험을 통하여, 사용 후 배터리에서 발생한 셀을 직접재활용 전처리 공정을 통하여 블랙파우더로 제조하였으며, 이에 대한 기초적인 물성을 평가하였음.

*Corresponding author : 김종배 / jobkim98@er-energy.co.kr

R-07

광산 공정 폐기물 내 Ni의 존재형태에 따른 회수 가능성 평가

Assessment of Ni Recovery Potential in Mining Waste Based on Speciation

김재현[1], 주원정[2], 정은혜[1,2*]

[1]서울대학교 에너지시스템공학부, [2]서울대학교 에너지자원신기술연구소

초록

최근 산업 전반에 걸쳐 니켈의 수요가 급증함에 따라, 니켈 공정에서 발생하는 광미 및 폐기물을 이차 자원으로 활용하기 위한 재자원화 연구가 활발하다. 다양한 침출 공정과 회수 기술이 연구되어 왔으나 폐기물 내 니켈의 존재형태를 고려한 침출 설계는 미흡하다. 존재형태를 선행 규명할 경우 회수 가능한 니켈의 상한을 예측할 수 있을 뿐 아니라, 목표상만 선택적으로 용해시키는 조건 설계가 가능해져 불순물 공용출과 후단 정제 부담을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 광산 폐기물 내 니켈의 존재형태를 확인하고, 이에 대응하는 선택적 침출 공정을 도출하고자 한다.

테시어 연속 추출 실험(Tessier sequential extraction)법을 수행한 결과, 전체 니켈(원시료 기준 22 wt%) 중 약 50 wt%가 철/망간 산화물 결합 형태(Fe/Mn oxides-bound fraction, 3단계)로 존재하였으며, 이온교환형태(1단계) 약 30 wt%, 탄산염 결합 형태(2단계) 1 wt%, 유기물/황화물 결합 형태(4단계) 2 wt%, 잔류 형태(5단계) 약 1 wt%로 확인되었다. 따라서 니켈의 효율적 회수를 위해서는 Fe(III)/Mn(IV) 산화물의 결합을 끊는 과정이 선행되어야 한다.

이를 바탕으로 본 연구에서는 황산(H_2SO_4)을 기본 침출 용매로 사용하되, 환원제인 아스코르빈산(Ascorbic acid)을 첨가하는 환원 침출(Reductive leaching) 공정을 적용하였다. 아스코르빈산은 Fe(III)/Mn(IV)를 Fe(II)/Mn(II)로 환원시켜 산화물 격자를 붕괴시키고, 그 결과 격자 내에 포획된 니켈까지 용출시킬 수 있었다.

실험은 대기압 조건에서 황산 농도, 아스코르빈산 첨가량, 반응 온도 및 시간을 변수로 수행했다. 본 연구는 존재형태 분석에 기반한 침출 설계가 니켈 회수의 효율과 선택성을 동시에 향상시킬 수 있음을 보여준다.

주제어 : 니켈광, 광산 공정 폐기물, 존재형태, 연속추출, 침출율 향상

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02634555)

* Corresponding author : 정은혜 / echung@snu.ac.kr

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

구두

전해제련



The Korean Institute of Resources Recycling

E-01

미생물 전기분해전지에서 수소 생산 향상을 위한 운전 시간 및 양극 구성 최적화

Optimization of Operation Time and Anode Configuration for Enhanced Hydrogen Production in Microbial Electrolysis Cells

손성훈[1,2], 장연서[1], 정해성[1*]

[1]국립창원대학교 인공지능화학공학과, [2]국립창원대학교 첨단나노과학기술연구소

초록

미생물 전기분해 전지(Microbial Electrolysis Cell, MEC)는 전기활성 미생물의 유기물 산화를 이용하여 수소를 생산하는 기술이다. 본 연구에서는 MEC의 수소 생산 향상을 위해 운전 시간과 anode configuration을 최적화했다. 운전 시간 실험에서는 서로 다른 성능의 anode를 이용하여 18, 24 및 67 h 조건에서 수소 생산, COD 제거 및 에너지 효율을 평가했으며, 고성능 anode의 24 h 운전에서 hydrogen production rate(HPR)는 2.03 L/L·d, COD 제거율은 95.5%, 전체 수소 에너지 효율은 78.9%로 가장 우수했다. 또한, 종료 전류 약 1.0–1.5 mA가 효율적인 운전 종료 지표로 나타났다. 반면 67 h의 장시간 운전에서는 COD 제거와 총 coulomb은 증가하였으나 수소 생산 및 에너지 효율은 감소했다. Anode configuration 실험에서는 수평·수직 배향과 anode–cathode 간 거리를 변화시킨 네 가지 조건을 비교했다. Anode를 수평으로 배치하고 전극 간 거리를 약 27.5 mm로 확보한 조건에서 HPR 1.95 L/L·d, 수소 순도 94.5%, 전체 에너지 효율 56.2%로 가장 우수한 성능을 나타냈다. 반면, 짧은 전극 간 거리에서는 내부저항 감소로 전류가 증가하였으나 생성된 수소의 역확산 및 재산화가 촉진되어 실제 수소 회수량이 감소했다. 따라서 MEC의 적절한 운전시간과 anode configuration이 수소 생산의 큰 영향을 미치는 것을 확인했다.

주제어 : 미생물 전기분해 전지, 수소 생산, 운전 시간, 양극 구성, 에너지 효율

서론

수소는 사용 과정에서 탄소 배출을 최소화할 수 있는 에너지 운반체로 주목받고 있으나, 현재의 주요 수소 생산 공정은 화석연료 또는 높은 전력 소비를 기반으로 한다. 미생물 전기분해 전지는 미생물이 유기물을 산화하면서 생성한 전자와 수소이온을 이용하여 비교적 낮은 외부전압에서 수소를 생산할 수 있어, 폐수처리와 에너지 회수를 동시에 수행할 수 있는 기술로 연구되고 있다.

MEC의 성능은 일반적으로 운전시간, 인가전압, pH, 반응기 구성 및 형태, anode의 종류 등에 많은 영향을 받는다. 이러한 운전조건을 최적화하면 MEC의 성능을 증진할 수 있다. 대표적인 예시로 운전 시간이 지나치게 짧을 경우 기질이 충분히 이용되지 못하고 수소 생산량이 감소할 수 있는 반면, 과도하게 긴 운전은 기질 고갈과 불필요한 전력 소비 및 methanogenesis 증가를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 MEC의 시간적 운전조건과 공간적 전극구조를 함께 고려하여, 운전 시간 및 anode configuration이 수소 생산과 에너지 회수에 미치는 영향을 분석하고 고효율 MEC 운전을 위한 주요 인자를 도출하고자 하였다.

재료 및 실험방법

반응기는 30 mL의 부피를 가졌으며, anode는 carbon fiber brush, cathode는 stainless steel mesh를 flame oxidized하여 사용했다. Medium은 100 mM CBS를 사용했으며 substrate는 20 mM sodium acetate를 사용했다. 인가전압은 0.9 V, 외부저항은 10 Ω을 사용했다.

*Corresponding author : 정해성 / haesung.jung@changwon.ac.kr

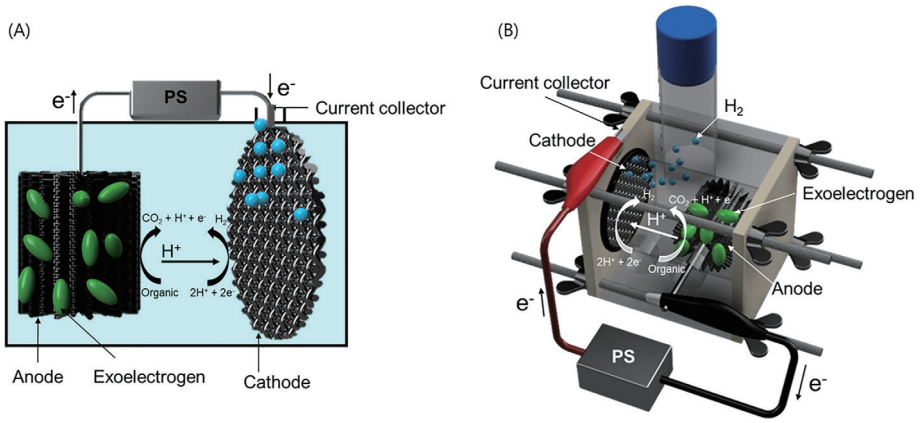


Fig. 1. Front cross-sectional (A) and 3D (B) schematic diagram of the reactor.

결과 및 고찰

운전 시간에 따른 에너지 효율을 비교한 결과(Fig. 2A), S-24에서 $EE_{P\text{-}H}$, $EE_{S\text{-}H}$ 및 $EE_{PS\text{-}H}$가 각각 166.5, 132.5 및 78.9%로 가장 높았다. 반면 W-67에서는 $EE_{P\text{-}H}$와 $EE_{PS\text{-}H}$가 49.2 및 31.2%로 감소하여, 과도한 장시간 운전은 기질 고갈과 methanogenesis로 인해 에너지 손실을 증가시키는 것으로 판단된다.

Anode configuration에 따른 에너지 효율(Fig. 2B)은 전극 간 거리가 긴 조건에서 높았으며, H2에서 $EE_{P\text{-}H}$ $EE_{S\text{-}H}$ 및 $EE_{PS\text{-}H}$가 각각 85.4, 167.7 및 56.2%로 가장 우수하였다. 짧은 전극 간 거리는 수소의 역확산과 재산화를 촉진하므로, 충분한 전극 간 거리와 큰 projected area를 확보하는 것이 수소 에너지 회수에 유리한 것으로 나타났다.

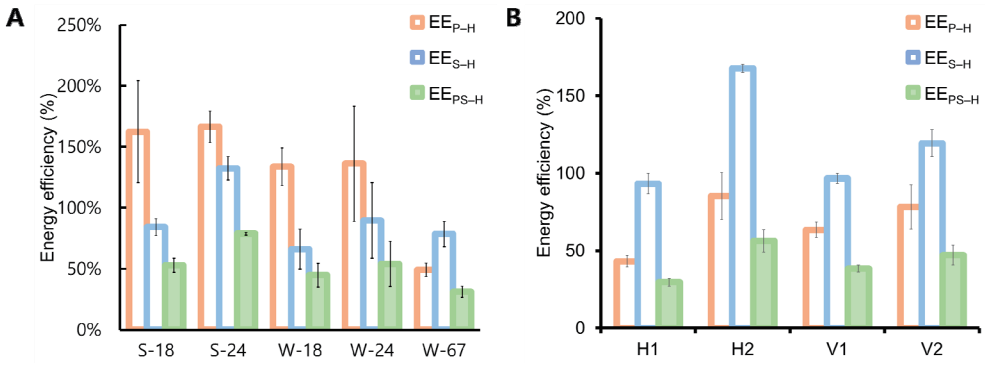


Fig. 2. Energy efficiency based on operation time (A) and anode configuration (B)

결론

MEC의 수소 생산 향상을 위해서는 운전 시간을 단순히 연장하거나 전극 간격을 최소화하기보다, 적절한 batch 종료 시점과 수소 재산화를 억제할 수 있는 anode configuration을 함께 최적화하는 것이 중요하다.

E-02

중성 전해질을 이용한 스테인리스강 전기화학적 제염 공정의 전해질 재사용성 평가

Evaluation of Electrolyte Reusability in Electrochemical Decontamination of Stainless Steel Using Neutral Electrolyte

신재명[1,2], 이주영[1], 김완배[1], 손인준[2], 유병욱[1*]

[1]한국재료연구원, [2]경북대학교

초록

최근 원자력 발전소 해체가 본격화되면서 방사능 오염 금속의 처리 및 재활용 기술 개발이 중요한 과제로 부상하고 있다. 특히 원자로 구조물 및 배관 재질로 사용되는 스테인리스강은 표면에 방사성 오염물이 흡착되어 직접적인 재활용이 어려워, 효율적인 제염 기술 확보가 요구된다. 이에 본 연구에서는 스테인리스강 합금을 대상으로 중성 용액을 활용하여 전해 제염 실험을 수행하였다. 그 결과 전해 용액에서 50 μm이상 제염이 가능하였으며, 전류 효율과 두께 균일도 또한 우수한 수준을 보였다. 또한 동일 전해 용액을 이용한 제염용액 재사용성을 평가하기 위해 용액의 pH, 전도도 및 제염 성능 변화를 분석하였다.

주제어 : 스테인리스강, 전해 제염, 방사능 오염 금속, 전해질 재사용

서론

금속 제염 기술은 주로 기계적 연마, 화학 용해, 레이저 어블레이션 및 전해 제염 공정에 기반하고 있다. 이 중 전해 제염은 전기화학적 산화·환원 반응을 이용하여 금속 표면의 오염층을 선택적으로 제거할 수 있는 기술로, 공정 제어가 용이하다는 장점을 가진다. 특히 전해질의 종류와 농도, 인가 전압 등의 조건을 조절함으로써 제염 효율과 표면 균일도를 정밀하게 제어할 수 있어, 최근 핵폐기물 처리 및 금속 재활용 분야에서 주목받고 있다. 그러나 기존에 널리 사용되어 온 산성 전해질 기반 제염 공정은 2차 폐기물 처리의 안전성 및 비용 문제로 우려가 제기되어 왔으며, 이에 따라 중성 전해질을 활용한 제염 공정에 대한 관심이 높아지고 있다. 본 연구에서는 중성 용액을 활용하여 스테인리스강 합금을 대상으로 전해 제염 실험을 수행하고, 제염용액의 재사용 가능성을 평가함으로써 전해 제염 공정의 경제성과 지속 가능성 향상을 위한 기초 데이터를 확보하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 시편은 원자로 내부 구조물 및 배관 재질로 사용되는 스테인리스강 합금이며, 시편의 화학적 조성은 Table 1과 같다. 시편을 중성 용액에 침지하고 전해 제염 실험을 수행하였으며, 동일 전해 용액을 이용한 제염용액 재사용 실험을 통해 용액의 pH, 모재 제거 효율 및 제염 성능 변화를 분석함으로써 전해질의 재사용 가능성을 평가하였다.

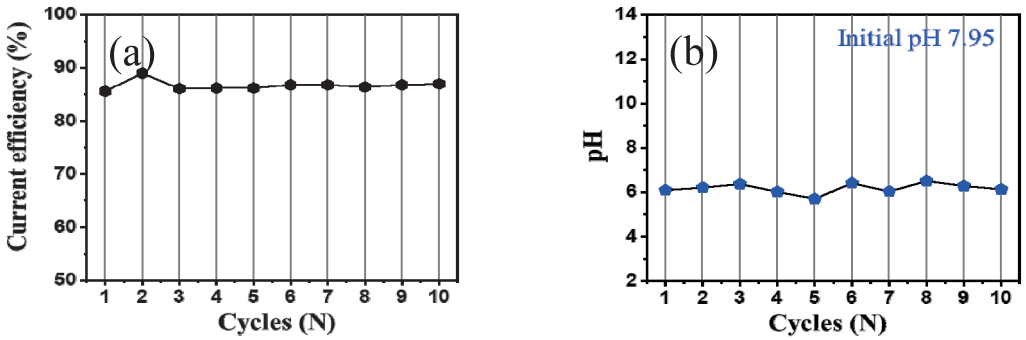
Table 1. Chemical composition of the STS 304 specimen

원소	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
함량(wt%)	0.08	0.50	1.00	0.04	0.03	18.50	9.00	70.85

결과 및 고찰

중성 용액을 이용한 전해 제염 실험 결과, 50 μm이상의 제염이 가능하였으며 전류 효율과 두께 균일도 또한 우수한 수준을 보였다. 동일 전해 용액을 이용하여 다회에 걸쳐 제염 실험을 반복한 결과(Fig. 1 참조), 반복 횟수가 증가함에 따라 전류 효율 및 용액의 pH 변화 경향을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 전해질의 재사용 가능성을 평가하였다.

*Corresponding author : 유병욱 / buyoo@kims.re.kr



(a) 전류 효율 변화 (b) pH 변화

Fig. 1. Changes in current efficiency and pH with repeated electrolytic decontamination

결론

스테인리스강 합금을 대상으로 중성 용액 내에서 전해 제염 실험을 수행한 결과, 우수한 전류 효율과 두께 균일도를 확인하였다. 또한 동일 전해 용액을 이용한 재사용 실험을 통해 전해질의 재사용 가능성을 평가함으로써, 전해 제염 공정의 경제성과 지속 가능성 향상을 위한 기초 데이터를 확보하였다.

E-03

미생물연료전지를 이용한 NCM523양극재스크랩으로부터 유가금속 회수 및 에너지 생산

Recovery of Valuable Metals and Energy Production from NCM523 Cathode Scrap Using the Principle of Microbial Fuel Cell

장연서[1], 손성훈[2], 정해성[1,2*]

[1]국립창원대학교 이차전지화학공학, [2]국립창원대학교 G-lamp사업단

초록

폐리튬이온배터리 발생 증가에 따라 공정 에너지와 화학물질 사용을 줄일 수 있는 재활용 기술이 필요하다. 바이오리칭은 미생물 대사활동을 이용한 친환경 금속 침출 방법이지만, 금속과의 직접 접촉에 따른 미생물 활성 저하와 긴 반응시간이라는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)를 이용한 바이오리칭을 수행하고자 한다. Al호일에 코팅되어 있는 상태의 NCM523 양극재 스크랩을 파·분쇄 없이 MFC의 양극으로 직접 적용하였으며, MFC 운전은 Li, Ni, Co, Mn 침출을 향상시켰다. 용액 내 과포화를 완화하여 2차 광물화를 억제함으로써 추가적인 금속 침출을 촉진하였다. 동시에 전력 생산도 가능하였다.

주제어 : NCM양극재 스크랩, 미생물연료전지, 유가금속 침출, 에너지 생산

서론

전기자동차와 에너지저장장치의 보급 확대에 따라 폐리튬이온배터리(LIB) 발생량이 증가하면서 유가금속 회수 기술의 중요성이 커지고 있다. 기존 건식 및 습식 제련 공정은 높은 에너지 소비와 강산·환원제 사용, 파·분쇄 등의 전처리가 요구된다. 이에 대한 대안으로 바이오리칭이 제안되고 있으나, 중금속과의 직접 접촉에 따른 미생물 활성 저하와 긴 반응시간이라는 한계가 있다. 본 연구에서는 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC)의 개념을 이용하여 미생물 반응과 금속 침출을 공간적으로 분리함으로써 기존 바이오리칭의 미생물 활성 저하 한계를 보완하였다. 미생물 대사과정에서 생성된 전자는 외부회로를 통해 폐NCM523 양극재로 전달되어 금속의 환원적 침출을 촉진하였으며, 이 과정에서 동시에 전력을 생산하였다. 본 연구에서는 NCM523 양극재 스크랩을 파·분쇄 과정 없이 MFC 전극으로 직접 사용하여 중성 조건에서 유가금속 침출과 에너지 생산을 동시에 수행할 수 있음을 확인하였다.

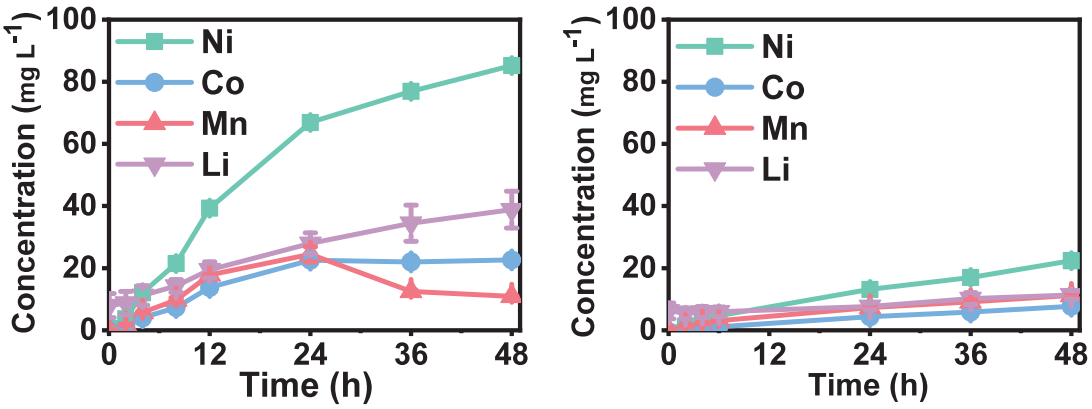
재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 Dual-chamber H-type MFC는 anode와 cathode chamber로 구분되고 Nafion 117 membrane으로 분리하였다. Anode에는 carbon felt(3 × 4 cm), cathode에는 파·분쇄 과정을 거치지 않은 Al에 코팅된 NCM523 양극재(3 × 4 cm) 스크랩을 직접 사용하였다. MFC는 혐기성 조건에서 운전하였으며, Li, Ni, Co 및 Mn의 정량적 농도 분석을 위해 ICP-OES를 활용하였다.

결과 및 고찰

본 연구는 중성 조건(pH 7.6)에서 MFC 운전 시 Ni, Co, Mn 및 Li 농도는 각각 최대 85.2, 22.64, 24.44 및 38.84 mg L^{-1}에 도달하였다(그림 1 (a) 참조). 반면 non-MFC 조건에서는 각각 22.40, 7.73, 11.21 및 11.40 mg L^{-1}로 나타났다(그림 1 (b) 참조). 따라서 MFC를 통한 전자 전달은 Ni, Co, Mn 및 Li 침출을 각각 약 3.80, 2.93, 2.18 및 3.41배 향상시켰다.

*Corresponding author : 정해성 / haesung.jung@changwon.ac.kr



(a) MFC condition (electrically connected) (b) non-MFC condition (electrically disconnected)

Fig. 1. Concentrations of leached metals from the spent NCM523

반복 MFC 운전 간 NCM523 양극 표면에 흰색의 2차 광물이 점차 형성되면서 금속 침출이 감소하였다. 침전물에 대한 SEM-EDS 분석 결과 P와 Mn이 각각 51.35 및 27.52 at%로 높은 비율을 나타냈으며, XRD에서도 Mn-, Ni- 및 Co-phosphate 관련 결정상이 확인되었다. 이에 따라 2차 광물화가 추가적인 금속 침출을 저해했음을 나타낸다. 2차 광물화로 이어지는 침출된 금속 이온의 과포화를 감소시켜 결과, Ni, Co, Mn 및 Li 농도는 각각 233.42, 80.66, 84.08 및 122.16 mg L^{-1}에 도달하였다. 또한 이때 최대 전력밀도는 202.78 mW m^{-2}로 계산되었다. 용액 내 금속 이온의 축적과 2차 광물화를 억제하여 금속 침출을 증가시켰다.

결론

Al호일에 코팅되어 있는 NCM523 양극재 스크랩을 파·분쇄 없이 MFC cathode로 직접 사용하여 중성 조건에서 유가금속 침출과 전력 생산을 동시에 수행하였다. 반복 운전 중 발생한 Mn-rich phosphate계 2차 광물화를 억제함으로써 금속 침출을 더욱 촉진하였다. 연구결과를 통해 MFC의 개념을 접목시킨 바이오리칭 기술이 기존 기술의 한계점이었던 미생물의 활성도 감소를 완화시키면서, 금속의 용출을 발생시킬 수 있음을 확인하였으며, 과정 간에 전력 생산과 폐수처리가 동시에 가능한 지속가능 순환자원 기술이 될 수 있음을 확인하였다.

E-04

EoL LIB 황산 침출액 중 유가금속의 일괄 전해 기초 연구

Fundamental study for the collective recovery of precious metals from LIB leaching solution by electrolytic reduction

하륜[1], 신한균[1], 강영조[1*], 류지훈[2]
[1]동아대학교, [2]에바싸이클

초록

전기 자동차 시장의 폭발적인 성장으로 리튬 이온 배터리 (LIB) 의 생산량이 크게 증가하면서 공정 스크랩이나 End-of-Life (EoL) 배터리에서 유가금속을 효과적으로 회수하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 폐 LIB의 황산 침출 후 침출액 내 Ni, Co, Mn 등 유가금속을 용매추출을 통해 분리할 수 있는데, 각 원소에 적합한 용매가 개별적으로 사용해야하므로 공정 단계가 복잡하고 다량의 폐수가 발생한다. 이에 본 연구는 황산 침출액 내 유가금속을 전해환원 방식으로 회수하고자 하였다. 특히 전해환원 과정에서 형성되는 금속 증착물이 다양한 형태로 회수될 수 있는데, 이러한 물리적 형태 차이는 음극판으로부터의 탈착 공정을 단순화할 수 있을 뿐만 아니라 후속 황산 재용해 공정에서의 금속 용해 효율과 선택적 분리 가능성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공정 조건에 따라 증착물의 구조적 특성과 물리적 형태를 제어하고, 이를 통해 합금 회수 효율과 재용해 효율을 동시에 극대화할 수 있는 공정을 최적화하고자 하였다.

주제어 : 리튬이온배터리, 폐배터리 재활용, 유가금속 회수, 황산침출, 전해환원

서론

전기자동차 시장의 폭발적인 성장과 에너지 저장장치(ESS)의 수요 증가에 따라 리튬이온배터리(LIB)의 생산 및 소비량이 지속적으로 증가한다. 이에 따라 공정 스크랩과 수명이 종료된 End-of-Life(EoL) 배터리의 자원화 문제가 핵심 이슈로 대두한다. 폐 LIB는 니켈(Ni), 코발트(Co), 망간(Mn) 등 고부가가치 금속을 포함하며, 이를 전량 수입에 의존하는 산업 구조상 자원 회수 기술의 중요성이 매우 크다. 현재 상용화한 재활용 공정은 습식 제련 기반의 용매추출 방식을 주로 활용하지만, 각 원소에 적합한 추출제를 개별적으로 사용해야 하므로 공정 단계가 복잡하고 다량의 폐수를 발생시킨다. 이에 본 연구는 황산 침출액 내 유가금속을 전해환원 방식으로 회수하는 대안 공정을 제안한다. 특히 전해환원 과정에서 석출하는 금속 증착물의 다양한 물리적 형태에 주목한다. 이러한 형태 제어는 음극판으로부터의 물리적 탈착 공정을 단순화할 뿐만 아니라, 후속 황산 재용해 공정에서의 금속 용해 효율과 선택적 분리 가능성에 지대한 영향을 미친다. 따라서 본 연구는 공정 조건에 따른 증착물의 구조적 특성과 물리적 형태를 제어하고, 합금 회수 및 재용해 효율을 동시에 극대화하는 최적 공정을 도출하고자 한다.

재료 및 실험방법

폐 LIB 황산 침출액 내 유가금속 회수 공정을 모사하기 위해 황산니켈, 황산코발트, 황산망간을 혼합하여 전해액을 제조하였다. 양극으로는 백금 메쉬(Pt mesh), 음극으로는 STS 기판(STS plate)을 활용해 전해 셀을 구성하였다. 전해환원 실험은 연속 환원 공정과 대비하여 전류를 인가하고 교반을 반복하는 '단속 환원(Intermittent reduction)' 공정을 설계하여 진행하였다. 각 조건에서 도출한 증착물의 물리적 탈각 거동을 관찰하였으며, 회수한 금속 합금은 SEM-EDS 및 XRD를 활용해 표면 형상, 조성을 분석하고 결정 구조를 확인하였다. 또한 박막 및 분말과 같은 증착물의 물리적 형태가 황산 재용해 공정에 미치는 영향을 평가하기 위해 형태별 용해 거동을 비교 분석하였다.

*Corresponding author : 강영조 / youngjok@dau.ac.kr

결과 및 고찰

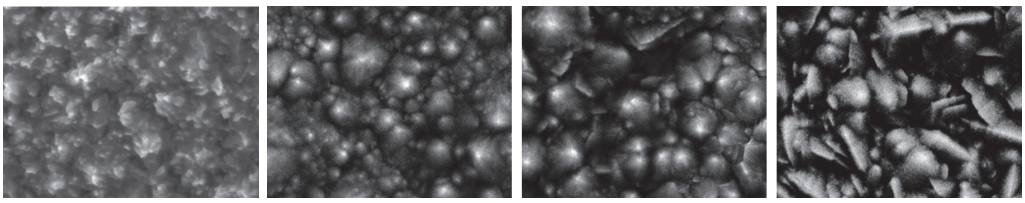


Fig.1. SEM Images of electroplated film surface

Table 1. EDS analysis of electroplated film : (a) Initial Layer, (b) Final Layer

		Ni	Co	Mn	O
0.4A	**10m**	51.11	47.44	0.13	1.32
	60m	24.52	74.24	0.14	1.10
1.2A	**10m**	51.57	44.67	0.62	3.15
	60m	23.03	73.90	0.71	2.37

(a)

		Ni	Co	Mn	O
0.4A	**10m**	17.14	82.04	0.74	0.08
	60m	18.29	74.23	0.83	6.64
1.2A	**10m**	17.56	81.24	0.28	0.92
	60m	21.10	66.32	2.36	10.22

(b)

전해환원 후 회수한 고상산물을 분석하여, 음극 박막은 Ni / Co 금속 형태로, 양극 잔사 분말은 Mn 산화물 형태로 회수됨을 입증하였다. 특히 도금 박막의 단면을 분석한 결과, 음극 계면부는 Ni이, 용액과 맞닿은 표면부는 Co가 주를 이루는 층상 구조를 확인하였다. 이는 표준환원전위가 상대적으로 높은 Ni(-0.25V)이 계면에서 우선 환원되고, 점차 확산층 내 Ni 이온이 고갈됨에 따라 Co(-0.28V)의 환원이 가속화되는 열 및 동역학적 메커니즘에 기인한다. 또한, 단속 환원 공정을 적용하여 물리적 스크래핑 과정 없이 '자발적 박막 탈각'을 유도함을 확인하였다. 다만 동일한 STS 음극판을 재사용할 경우 자발적 탈각의 한계가 존재함을 파악하였다. 이는 강산성 환경과 반복적인 분극 현상으로 인해 음극판 표면의 크롬 부동태 산화막이 열화하여 기판과 박막 간의 계면 접착력을 과도하게 증가시킨 것으로 보인다.

결론

본 연구는 폐 LIB 황산 침출액에서 전해환원 방식을 통해 유가금속을 회수하고, 증착 형태를 제어하는 공정 조건을 성공적으로 확립하였다. 단속 환원 공정을 적용하여 음극에서는 자발적 박막 탈각을 통해 Ni-Co 합금의 후처리 공정을 단순화하였고, 양극에서는 Mn을 산화물 형태로 선택적 분리하였다. 전류 밀도, 환원 시간, 공정 사이클 등 주요 변수가 증착물의 형상과 합금 조성에 미치는 영향을 규명하였으며, 이를 바탕으로 후속 황산 재용해 공정에서 금속 용해 효율을 극대화할 수 있는 물리적 형태 특성을 도출하였다. 결과적으로 전해환원 공정 내 증착물 형태 제어가 회수-재용해 공정을 유기적으로 연계하고 폐배터리 자원순환의 경제성을 높이는 핵심 전략임을 입증하였다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

구두

건식제련



The Korean Institute of Resources Recycling

P-01

압력 및 온도 조건에 따른 니켈 카보닐화 반응속도론과 반응 메커니즘 규명

Effects of Pressure and Temperature on the Kinetics and Mechanisms of Nickel Carbonylation

배성욱[1,2], 박경태[1], 박주현[2], 신재홍[1*]

[1]한국생산기술연구원 국가희소금속센터, [2]한양대학교 재료화학공학과

초록

니켈 카보닐화는 습식공정을 제외한 고순도 니켈 분말을 제조할 수 있는 유일한 건식정련 공정이며, 니켈과 일산화탄소가 반응하여 휘발성 니켈카보닐을 형성한 후 이를 다시 분해하여 순수한 니켈을 추출하는 공정이다. 그러나 실제 공정 반응 조건에서 온도와 압력이 반응 속도에 미치는 영향, 그리고 반응이 진행되는 동안 입자 구조 변화에 따른 속도 거동의 영향은 충분히 보고되지 않았다. 본 연구에서는 폐쇄형 반응기를 이용하여 고순도 니켈 분말을 150-250 ℃ 및 20-70 atm 조건에서 카보닐화하였고, 질량 감소, 입도 분포 변화, 전자현미경 분석을 통해 반응 거동을 체계적으로 평가하였다.

실험 결과 카보닐화는 화학퍼텐셜이 상대적으로 큰 미세 입자에서 먼저 시작되어 입자 내부 기공 형성과 입자 팽윤이 동반되었고, 이후 입자 붕괴와 수축이 발생하면서 유효 반응 면적이 증가하여 반응이 진행될수록 전체 반응 속도가 오히려 가속되는 거동을 확인하였다. kinetic-diffusion 모델 기반 속도론 해석 결과 반응은 온도와 압력의 영향을 동시에 받으며, 두 인자를 증가시킬수록 겉보기 속도상수와 반응차수가 증가하였다. 최종적으로 250 ℃ 및 70 atm에서 1 h 반응 시 카보닐화율 94%를 달성하였다.

주제어 : High-pressure gas-solid reaction, Particle microstructure evolution, Closed reaction system, Kinetic–diffusion model, Carbonyl refining process

서론

니켈은 스테인리스강과 내열강을 중심으로 소비되는 주요 산업금속이며, 최근 전기자동차와 NCM811·NCM955 등 하이니켈 양극재의 확산으로 배터리용 니켈 수요가 코발트나 리튬보다 빠르게 증가할 것으로 전망되어 니켈 합금뿐 아니라 고순도 니켈 금속 분말의 생산 필요성이 커지고 있다. 황화광은 매트 제련 후 습식정련, 산화광은 고압산침출(HPAL)로 처리되는데, 이러한 습식 공정은 고온·고압에서 강산을 사용하므로 에너지 소비가 크고 유해 폐수가 발생한다. 건식 제련으로는 스테인리스용 페로니켈이 생산되지만, Ni, Fe, Cu, Co의 물리화학적 성질이 유사하여 물리적 분리가 어렵기 때문에 고순도 니켈 분말은 니켈카보닐의 가역적 휘발·분해를 이용한 카보닐 공정으로만 얻을 수 있다. 카보닐 공정은 1890년대 Mond 공정 이래 니켈 정련에 적용되어 왔으나, 상압에서는 카보닐화 온도 창이 좁아 반응 속도와 전환율이 낮으며, 이를 극복하기 위해 가압 조건에서 입도, 촉매(황), 전처리(H_2S) 등의 영향을 평가한 연구가 지속되어 왔다.

그러나 기존 연구는 대부분 CO를 연속 공급하는 개방형 반응계에서 전환율을 공정 변수의 함수로 해석하였고, 반응 중 결함 형성, 균열 발생, 신규 반응면적 생성과 같은 입자 미세구조의 동적 변화가 카보닐화 속도론에 미치는 영향은 정량적으로 조사되지 않았다. 이에 따라 속도 지배 단계의 전이, 지배 반응 메커니즘, 물질전달 기여도와 같은 구조 의존적 속도 거동에 대한 이해는 산업 조건에 해당하는 고압 영역에서 특히 부족하다. 또한 개방형 반응계는 대량의 CO 연속 공급과 가열이 필요하여 에너지 소비와 공정 비용이 크다. 본 연구에서는 공정 효율과 운전 안정성을 높일 수 있는 폐쇄형 반응계를 채택하여 온도와 압력이 니켈 입자의 미세구조 변화와 반응 거동에 미치는 영향을 속도론적 관점에서 분석하고, 반응차수와 겉보기 속도상수를 도출하여 속도 지배 단계와 반응 메커니즘을 규명하고자 하였다.

*Corresponding author : 신재홍 / shinclusion@kitech.re.kr

재료 및 실험방법

고순도 니켈 분말(99.99%, D50 약 10 μm) 약 5 g을 알루미나 보트에 장입하고, 10% H_2-Ar 분위기(0.5 L/min)에서 400 ℃, 1 h 환원 전처리하여 표면 산화물을 제거하였다. 카보닐화는 수평 관상로 내 SUS316 고압 반응 챔버(폐쇄형, back pressure regulator로 압력 제어)에서 (i) 150 ℃·20 atm, (ii) 200 ℃·50 atm, (iii) 250 ℃·70 atm 조건으로 10-60 min 동안 수행하였다. 반응 전후 질량으로 카보닐화율을 산출하고, 입도 분석기(Zetasizer Nano S)로 D10·D50·D90 변화를, FE-SEM(JSM-7100F)으로 형상을 관찰하였으며, 반응열과 P-T 평형 경계는 FactSage 8.0으로, 입도에 따른 화학퍼텐셜은 Gibbs–Thomson 식으로 계산하였다.

결과 및 고찰

Gibbs–Thomson 식으로 계산한 니켈의 화학퍼텐셜은 약 3 μm 이하에서 급격히 증가하여 미세 입자에서 카보닐화 구동력이 커짐을 보였다. 실험에서도 반응 진행에 따라 D10은 감소하고 D50·D90은 증가하여 미세 입자가 우선 반응함이 확인되었다. 60 min 카보닐화율은 150 ℃·20 atm에서 9.7%, 200 ℃·50 atm에서 73.91%, 250 ℃·70 atm에서 94%로 온도와 압력이 높아질수록 크게 증가하였다. 다만 200 ℃·50 atm의 40-50 min, 250 ℃·70 atm의 30-40 min 구간에서 반응 정체와 입도 최대값이 함께 나타났고, 정체 이후 입도가 급감하면서 카보닐화율이 다시 상승하였다.

FE-SEM에서 기공 형성, 재증착 니켈에 의한 표면 거칠기 증가, 250 ℃·70 atm에서의 국부적 입자 붕괴가 관찰되었다. FactSage 계산 결과 모든 조건에서 반응열이 음(-)의 값(250 ℃·70 atm 종료 시 -14.04 kJ)으로 발열반응임이 확인되었으며, 조밀한 분말층 내 국부 발열로 미세 입자 주변에서 생성된 $Ni(CO)_4$가 큰 입자 표면으로 확산·재분해되어 재증착됨으로써 입자가 외형적으로 성장하고 내부에 다공 구조가 발달하는 것으로 해석된다. 골격 니켈이 소모되면 다공 구조가 붕괴·파편화되어 유효 반응 면적이 급증하고 속도가 재가속된다. 질량 감소와 입도 변화를 반영한 경험적 니켈 소모 속도는 초기 정체 후 증가하였고, kinetic-diffusion 모델로 구한 반응차수 n과 ln k는 각각 −2.68/12.74, -5.88/37.52, -8.36/57.37(조건 순)로, 온도와 압력이 높을수록 표면 반응의 기여가 커지나 저온·저압에서는 물질전달 제한이 남아 있음을 시사한다. 따라서 $Ni(CO)_4$의 국부 축적과 재증착을 억제하기 위한 교반 또는 물질전달 강화가 필요하다.

결론

폐쇄형 고압 반응계에서 니켈 카보닐화는 약 3 μm 이하 미세 입자에서 우선 개시되고, 발열에 따른 $Ni(CO)_4$ 재분해·재증착과 기공 발달로 입자가 성장하며 일시 정체된 뒤 입자 붕괴로 재가속되는 동적 반응 거동을 보였다. 반응은 온도와 압력의 영향을 동시에 받아 250 ℃·70 atm에서 1 h 반응 시 카보닐화율 94%를 달성하였으며, 이러한 미세구조-속도론 연계 해석은 고효율·저에너지 니켈 정제 공정 설계의 근거를 제공한다.

P-02

조갈륨의 진공증류를 통한 고순도화 기초 연구

A Fundamental Study on the High-Purity Purification of Crude Gallium via Vacuum Distillation

김기현[1], 홍명환[1], 박경수[1*]
[1]고등기술연구원 융합소재연구센터

초록

갈륨(Ga)은 화합물 반도체 및 광전자 소재 제조에 사용되는 핵심 원료로서, 고순도 소재 제조를 위해서는 원료 갈륨에 함유된 금속 불순물의 효과적인 제거가 요구된다. 본 연구에서는 조갈륨의 진공증류를 통한 고순도화 가능성을 기초적으로 검토하기 위하여, 주요 불순물의 열역학적 휘발 특성을 분석하고 온도에 따른 증발 및 정제 거동을 평가하였다. Ga 및 In, Pb, Zn, Mg, Sn, Cu의 포화증기압을 비교하고, Ga-불순물 이원계의 활동도, 활동도계수, 기-액 평형 및 분리계수를 계산하여 불순물별 진공 분리 가능성을 검토하였다. 계산 결과, 각 원소는 Ga과 다른 증기압 및 분리계수 특성을 나타내었으며, 이는 온도와 조성이 진공증류 시 선택적 분리 거동을 결정하는 주요 인자임을 보여준다.

진공 정련 실험에서는 1123—1273 K 범위에서 온도 변화에 따른 시료의 질량 감소 거동을 조사하였으며, 대체로 온도가 증가함에 따라 증발량이 증가하는 경향을 확인하였다. ICP 분석 결과, 초기 조갈륨의 Ga 함량은 약 97.14 wt%였으며, 1173 K 조건에서 99.39 wt%까지 증가하였다. 같은 조건에서 계산된 총 불순물량은 초기 대비 약 82.1% 감소하였고, Ga 손실률은 약 2.30%로 나타났다. 또한 Pb, Zn 및 Mg와 같은 일부 불순물은 온도 증가에 따라 현저히 감소하는 경향을 보였다.

이러한 결과는 진공증류가 조갈륨의 고순도화를 위한 유효한 정제 수단이 될 수 있음을 시사하며, 향후 진공도, 온도, 유지 시간 및 증발 조건에 따른 분리 거동을 체계적으로 검토하기 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어 : 조갈륨, 진공증류, 증기압, 분리계수, 기-액 평형

서론

갈륨(Ga)은 GaAs, GaN 등 화합물 반도체 제조에 사용되는 핵심 금속으로, 광전자소자, 레이저, 포토다이오드 및 태양전지 등 다양한 첨단산업에 활용되고 있다. 특히 반도체용 소재 제조에는 고순도 갈륨이 요구되기 때문에, 조갈륨에 함유된 미량 금속 불순물을 효과적으로 제거하는 정제 기술의 확보가 중요하다. 기존에는 전해정련, 재결정, 습식정제, zone refining 및 진공 정련 등이 갈륨의 고순도화 방법으로 연구됐다.

이 중 진공증류는 갈륨과 불순물 간의 증기압 차이를 이용하여 상대적으로 휘발성이 높은 성분을 선택적으로 증발·분리하는 방법이다. 진공도가 증가하면 금속의 유효 휘발 온도가 낮아지므로, 대기압에 비해 낮은 온도에서 불순물의 선택적 제거가 가능하다.

다만 실제 진공증류 거동은 각 성분의 포화증기압뿐 아니라 조성, 활동도 및 Ga-불순물 간 상대 휘발성의 영향을 받는다. 선행 연구에서는 이러한 분리 가능성을 평가하기 위해 포화증기압, 분리계수 및 기-액 평형이 활용되었으며, 분리계수가 1에서 벗어날수록 두 성분 간 선택적 분리가 쉬운 것으로 해석된다.

따라서 본 연구에서는 조갈륨의 진공증류 고순도화를 위한 기초자료 확보를 목적으로, 주요 불순물의 온도별 포화증기압과 Ga-불순물 이원계의 분리계수를 검토하고, 진공도 및 온도 변화에 따른 불순물의 휘발·분리 특성을 분석하였다. 이를 통해 조갈륨의 선택적 정제 가능성을 평가하고, 향후 고순도 갈륨 제조를 위한 진공증류 조건 설정의 기초자료를 제시하고자 하였다.

*Corresponding author : 박경수 / kspark@iae.re.kr

재료 및 실험방법

본 연구에서는 조갈륨 시료를 제조하여 진공증류에 따른 불순물의 분리 거동을 조사하였다. 모사 시료 제조는 Ga (99.99%, Thermo Fisher Scientific), In (≥99.9%, Sigma-Aldrich), Pb (99.9%, Sigma-Aldrich), Zn (≥99.0%, Daejung), Mg (≥98%, Junsei), Sn (≥99.5%, Sigma-Aldrich), 및 Cu (99.999%, Alfa Aesar)을 사용하였다. 모사 시료의 조성은 실제 Zn refining residue 조성을 기반으로 설계하였으며, 각 시약은 목표 조성에 맞게 무게를 재 혼합한 후, 대기압, Ar 분위기에서 1173 K에서 1시간 동안 용융하여 제조하였고, 조성 분석 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of pre-experimental Ga sample analyzed by ICP-OES

원소	Ga	In	Pb	Zn	Mg	Sn	Cu
함량 (wt%)	97.14	0.39	0.21	2.13	0.004	0.049	0.08

진공증류 실험은 진공 유도가열로를 이용하여 수행하였다. 시스템 압력은 1 Pa로 유지하였으며, 증류 온도는 1123─1273 K 범위에서 변화시켜 온도에 따른 Ga 및 주요 불순물의 휘발·분리 거동을 평가하였다. 실험 분위기 제어를 위해 Ar(99.999%)을 사용하였다. 각 온도 조건에서 진공증류를 수행한 후 잔류 시료를 회수하여 처리 전·후 질량 및 조성 변화를 비교함으로써 각 불순물의 제거 거동을 평가하였다.

진공증류에 의한 성분별 분리 가능성을 사전에 평가하기 위하여 FactSage를 이용한 열역학 계산을 시행하였다. 주요 구성 원소의 온도에 따른 증기압과 Ga-불순물계의 열역학적 분리 특성을 검토하고, 이를 실험 결과와 비교하였다. 증류 후 시료의 정량 조성 분석에는 ICP-OES(iCAP Pro XP, Themo Fisher Scientific)를 사용하였으며, 분석 결과를 초기 모사 시료 조성과 비교하여 각 원소의 진공증류 거동을 평가하였다.

사사

본 연구는 산업통상부 재원으로 한국산업기술기획평가원 소재부품기술개발사업(국내 갈륨 함유 소재 공급망 활용 고순도 갈륨 중간재 제조 기술개발) 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: RS-2026-25542682)

P-03

바이오차 적용에 따른 철강부산물 내 Cr 환원 거동

Reduction behavior of Cr from steel byproduct with biochar

박종형[1], 김선중[1*]

[1]조선대학교 신소재공학과

서론

스테인리스강 더스트는 Fe, Ni 및 Cr 등의 유가금속을 함유해 자원 재활용 가치가 높다. 특히 Cr은 산소와의 친화력이 높아 안정한 산화물로 존재하므로 효과적인 환원 및 회수 공정이 요구된다. 금속산화물 환원에는 주로 코크스와 같은 화석계 탄소원이 사용되지만, CO_2배출 저감을 위해 대체 환원제의 적용이 필요하다. 바이오매스 유래 바이오차는 화석계 탄소원을 대체할 수 있는 재생 가능한 탄소원으로 제안되고 있으며 [1], 케나프는 빠른 생장과 높은 탄소함량을 갖는다. 본 연구에서는 케나프 바이오차와 분코크스를 환원제로 사용하여 반응온도에 따른 스테인리스강 더스트 내 Cr의 환원 거동을 비교하였다.

실험방법

케나프는 불활성 분위기에서 573-1073K로 열처리하여 바이오차를 제조하고, 열분해 과정에서 질량변화와 발생 가스를 측정하였다. 제조된 바이오차는 탄소 및 산소 분석과 공업분석을 통해 특성을 평가하였다. 이후 Cr 및 Ni 함량이 다른 두 종류의 스테인리스강 더스트와 Kenaf-char와 분코크스를 각각 혼합하여 펠렛을 제조하였다. 제조된 시료는 불활성 분위기에서 1523-1723K로 가열된 반응로에 장입하여 환원 실험을 수행하였다. 환원 후 시료는 파쇄 및 자성분리를 통해 금속상과 슬래그상으로 분리하였으며, 탄소 및 산소 분석, ICP-OES 및 EPMA 분석을 통해 조성 및 금속 회수 특성을 비교하였다.

결과 및 고찰

케나프의 열분해 결과, 573K에서 제조한 Kenaf-char는 질량수율과 에너지 수율이 상대적으로 높아 환원제 적용에 적합한 조건으로 판단되었다. 그림 1은 반응 온도에 따른 금속상 내 Cr의 활동도계수를 나타낸다. 모든 조건에서 반응 온도가 증가할수록 γ_{Cr}은 감소하는 경향을 나타냈으며, 동일한 더스트에서는 Kenaf-char 조건이 분코크스 조건보다 전반적으로 낮은 값을 보였다. 이러한 차이는 반응 온도와 환원 후 금속상 조성 변화에 따른 것으로 판단된다. Cr의 환원 거동은 금속상뿐만 아니라 슬래그 조성과 금속-슬래그 간 분배 특성의 영향을 함께 받으므로, 이에 따라 Cr 분배비 계산을 통한 추가적인 고찰을 진행한다.

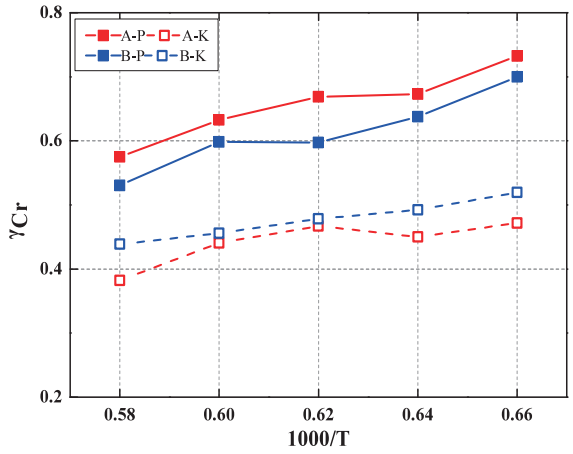


Fig. 1. Variation of γ_{Cr} with 1000/T for Dust A and B

*Corresponding author : 김선중 / Ksjoong@chosun.ac.kr

결론

본 연구에서는 Kenaf-char와 분코크스를 환원제로 사용하여 반응온도에 따른 스테인리스강 더스트 내 Cr의 환원 및 회수 거동을 비교하고, Kenaf-char의 적용 가능성을 평가하였다. 케나프차의 열분해 특성과 케나프의 열분해 결과, 573K에서 제조한 Kenaf-char가 에너지 수율 측면에서 환원제 적용에 적합한 것으로 판단되었다. 이를 스테인리스강 더스트 환원에 적용한 결과, Kenaf-char 조건에서도 Fe-Ni-Cr 금속상 형성이 가능하였고 분코크스와 유사한 Cr 회수 거동이 나타났다.

[1] Suopajärvi, H., Kemppainen, A., Haapakangas, J., & Fabritius, T. (2017). Journal of Cleaner Production, 148, 709-734.

P-04

신경망을 이용한 다성분 용융 슬래그의 전기전도도 예측

Estimation of Electrical Conductivity of Multicomponent Molten Slags Using Neural Networks

임성록[1,2*], Yuki Nobe[1], Masashi Nakamoto[1], Kiyoshi Fuji-ta[1], Toshihiro Tanaka[1]
[1]오사카대학교 재료공학과, [2]서울대학교 에너지자원공학과

초록

고온 용융 산화물의 전기전도도는 전기제련로의 모델링 및 조업과 금속공정의 최적화에 중요한 물성이다. 특히, 용융산화물 전해(Molten Oxide Electrolysis, MOE) 공정에서는 전해질의 전기전도도가 전류 및 전기화학 반응에 영향을 미치므로, 공정의 생산성과 에너지 효율을 평가하는 데 중요한 인자로 작용한다. 본 연구에서는 SiO_2-CaO-Al_2O_3-MgO-FeO-TiO_2-Na_2O계 다성분 슬래그의 전기전도도 예측을 위한 신경망 모델을 구축하였다. 총 2,803개의 문헌 데이터를 이용하고 Bayesian optimization으로 신경망의 hyperparameter를 결정하였다. training data와 test data의 결정계수(R^2)는 각각 0.9302와 0.9068 이었으며, 구축된 모델을 이용하여 조성 및 온도에 따른 전기전도도 변화를 검토하였다.

주제어 : 다성분 슬래그, 전기전도도, 신경망 계산, 용융산화물전해, 베이지안 최적화

서론

MOE 공정은 용융 산화물을 전해질로 이용하여 금속 산화물을 전기화학적으로 환원하는 고온 전해 공정으로, 전해가 진행됨에 따라 전해질 내 환원 대상 산화물의 농도가 감소하고 전해질의 조성 및 물성이 시간에 따라 변화할 수 있다. 특히 전기전도도는 전해질 저항, 전압 손실 및 Joule heating을 좌우하는 주요 물성이므로, MOE 공정의 에너지 효율 향상과 운전 조건 최적화를 위해서는 다양한 조성 및 온도 조건에서의 전기전도도 정보가 필요하다.

그러나 기존에 보고된 용융 슬래그의 전기전도도 데이터와 예측 모델은 대체로 제한된 조성계 및 조성 범위를 대상으로 하므로, 실제 고온 전해 공정에서 나타날 수 있는 다성분 용융 산화물의 전기전도도 변화를 평가하는 데에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 문헌으로부터 수집한 전기전도도 데이터를 기반으로 SiO_2-CaO-Al_2O_3-MgO-FeO-TiO2-Na_2O계 다성분 용융 슬래그의 전기전도도를 예측하기 위한 인공신경망 모델을 구축하였다. 또한 구축된 모델을 이용하여 조성 및 온도 변화에 따른 전기전도도 거동을 검토하였다.

계산 방법

표 1에 나타난 바와 같이, 문헌으로부터 수집한 총 2,803개의 전기전도도 데이터를 이용하여 신경망 계산을 수행하였다. 이 중 2,243개(80%)를 training data, 560개(20%)를 test data로 사용하였으며, SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO, FeO, TiO_2 및 Na_2O의 조성과 온도를 입력 변수로 설정하였다.

신경망 구조로는 다층 신경망(multilayer neural network)을 사용하였다. 신경망 계산에는 ReLU (Rectified Linear Unit) 활성화 함수와 ADAM을 적용하였고, L_2 regularization을 이용하여 과적합을 억제하였다. 은닉층 수, unit 수, epochs 및 batch size는 Bayesian optimization을 통해 최적화하였다.

*Corresponding author : 임성록 / limsunglock@snu.ac.kr

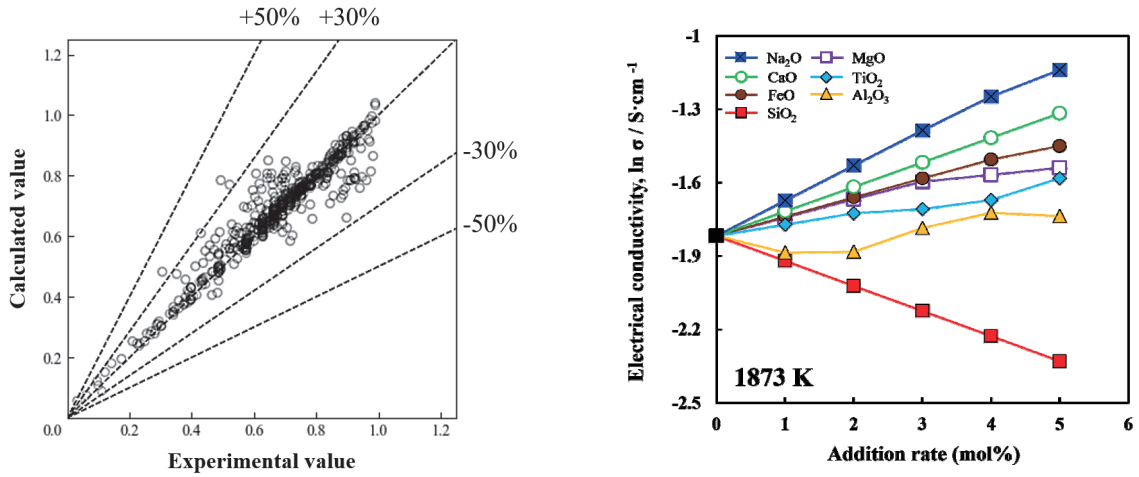
Table 1. Composition systems of literature data used for neural network modeling

System type	System	Temp. (K)
Binary	SiO_2–CaO, SiO_2–MgO, SiO_2–FeO, SiO_2–Na_2O	1372–2051
Ternary	SiO_2–MgO–CaO, SiO_2–MgO–Al_2O_3, SiO_2–CaO–Al_2O_3, SiO_2–FeO–CaO, SiO_2-FeO–MgO, SiO_2–Na_2O–MgO, SiO_2–Na_2O–CaO, SiO_2–Na_2O–FeO, SiO_2–TiO_2–FeO, SiO_2–TiO_2–Na_2O, SiO_2–TiO_2–CaO	1033–2073
Quaternary	SiO_2–MgO–CaO–Al_2O_3, SiO_2–FeO–CaO–Al_2O_3, SiO_2-TiO_2–Al_2O_3–Na_2O, SiO_2–TiO_2–Al_2O_3–CaO	1250–1893
Quinary	SiO_2–FeO–CaO–Al_2O_3–MgO	1673–1873

결과 및 고찰

Bayesian optimization을 이용하여 신경망 구조와 학습 조건을 최적화한 결과, 8개의 은닉층에서 목적함수 (L)이 최소값을 나타냈다. 또한 학습 과정에서 목적함수와 test data의 RMSE (Root Mean Squared Error)가 안정적으로 수렴하였다. training data와 test data의 결정계수 (R^2)는 각각 0.9302와 0.9068로 나타나, 학습에 사용되지 않은 데이터에서도 양호한 예측 성능을 확인하였다. 그림 1(a)에 제시된 바와 같이, 대부분의 예측값은 실험값과 ±30% 이내에서 일치하였으며, 이는 실험 오차 범위 내에 있는 것으로 간주할 수 있다.

그림 1(b)는 구축된 모델을 이용하여 계산한 결과의 한 예를 보여준다. 조성 및 온도 변화에 따른 전기전도도를 계산한 결과, Na_2O, CaO, FeO 및 MgO 첨가는 전기전도도를 증가시키는 반면 SiO_2 첨가는 감소시키는 경향을 나타냈다. Al_2O_3와 TiO_2의 영향은 조성 및 온도 조건에 따라 달라졌으며, 이는 각 산화물이 전하 운반체의 수와 이동성 및 silicate network 구조에 미치는 영향과 관련되는 것으로 해석하였다.



(a) Test data validation (b) Seven-component slag estimation

Fig. 1. Neural network estimation of electrical conductivity for multicomponent molten slag.

결론

본 연구에서는 문헌 데이터를 기반으로 다성분 용융 슬래그의 전기전도도를 예측할 수 있는 신경망 모델을 구축하였다. 구축된 모델은 학습에 사용되지 않은 데이터에 대해서도 높은 예측 성능을 나타냈으며, 조성 및 온도 변화에 따른 전기전도도의 변화를 표현할 수 있었다. 따라서 본 모델은 조성이 변화하는 다성분 용융 산화물계의 전기전도도 정보를 예측·보완하는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

P-05

철강슬래그 기반 재활용 무기섬유의 기계적 특성 및 자동차용 복합부직포 적용 가능성 연구

Mechanical Properties of Recycled Inorganic Fibers Derived from Steel Slag and Their Applicability to Automotive Composite Nonwovens

박종빈[1*]

[1]한국섬유기계융합연구원

초록

철강산업에서 발생하는 슬래그는 국내에서 매년 대량으로 발생하고 있으며, 대부분 시멘트 원료, 골재 및 토목용 소재 등 상대적으로 저부가가치 분야에 활용되고 있어 고부가가치 자원순환 소재로의 전환을 위한 기술개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 철강산업 부산물의 고부가가치 자원순환 및 자동차용 친환경 복합부직포 소재로의 적용 가능성을 검토하기 위하여 슬래그 기반 무기섬유를 제조하고 기계적 특성을 평가하였다. 슬래그 원료의 조성 및 용융거동을 검토하고 고온 용융 및 방사공정을 통해 슬래그섬유를 제조하였으며, 방사조건에 따른 섬유 직경 변화와 단일 필라멘트의 인장특성을 분석하였다. 방사속도 증가에 따라 섬유 직경이 감소하는 경향이 확인되었으며, 제조된 슬래그섬유의 단섬유 인장시험 결과 인장강도는 약 500~865 MPa 범위, 평균 약 656 MPa로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 슬래그섬유를 재활용 PET 섬유와 복합화하여 자동차 엔진커버용 복합부직포는 표면 및 이면의 캐미컬본딩 부직포와 중간층의 슬래그섬유로 구성되는 다층구조를 기반으로 하며, 향후 니들펀칭 및 캐미컬본딩 공정 최적화를 통해 기계적 특성, 내열성 및 NVH 성능을 동시에 확보하는 것을 목표로 한다.

주제어 : 강슬래그, 슬래그섬유, 재활용 PET, 복합부직포, 자동차 내장재

서론

최근 탄소중립 및 순환경제 정책의 확산에 따라 철강산업 부산물의 고부가가치 활용기술에 대한 관심이 증가하고 있다. 국내에서는 매년 약 2,000만 톤 이상의 철강슬래그가 발생하지만 대부분 시멘트 원료, 골재 및 토목재료 등 저부가가치 분야에 활용되고 있어 자원순환 측면에서 새로운 활용기술이 요구된다. 철강슬래그는 SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO 및 Fe계 산화물로 구성되어 유리섬유 및 현무암섬유와 유사한 화학조성을 가지며, 우수한 내열성·내화학성 및 기계적 특성을 확보할 수 있는 잠재력을 가진다. 또한 열가소성 수지와의 복합화가 가능하여 재활용 PET와 결합한 친환경 복합소재 개발에 적합한 순환자원으로 평가된다. 본 연구에서는 철강슬래그 기반 무기섬유를 제조하고 단섬유 기계적 특성을 평가하였으며, 재활용 PET와의 복합화를 통해 자동차 엔진커버용 복합부직포 소재로의 적용 가능성을 검토하였다. 이는 기존 PU 폼 및 그라스울 내장재를 대체할 수 있는 친환경 자동차 소재 개발을 목표로 한다.

본론

철강슬래그는 분쇄-용융-방사-사이징-권취 공정을 거쳐 연속 무기장섬유로 제조된다. 원료는 약 1,500℃에서 용융되며, 용융 점도와 방사속도를 제어하여 섬유 직경과 균일성을 확보하였다. 이러한 제조공정은 산업용 장섬유 생산이 가능한 연속 방사 시스템으로 구성된다.(Fig.1)

*Corresponding author : 박종빈 / jvpark@kotmi.re.kr

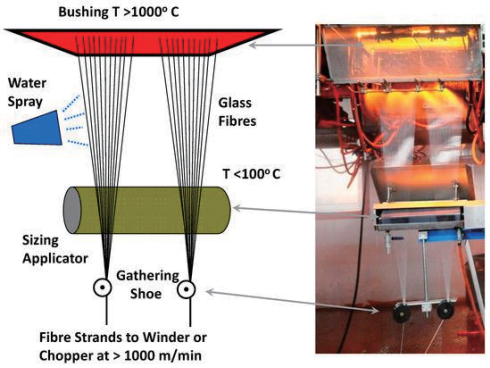


Fig. 1. 철강슬래그 기반 무기장섬유 제조 공정(용융–방사–사이징–권취)

슬래그섬유의 기계적 특성은 ASTM 기반 단섬유 인장시험으로 평가하였다. 시험 결과 슬래그섬유의 인장강도는 500~865 MPa, 평균 656 MPa로 나타났으며, 방사조건에 따라 기계적 특성이 변화하는 것을 확인하였다. 특히 방사속도가 증가할수록 섬유 직경이 감소하여 미세섬유 형성이 가능하였으며, 이는 복합소재의 보강효과 향상에 유리한 조건으로 판단된다.
상우하이텍에서 개발 중인 엔진커버 내장재는 3-Layer 복합구조로 설계하였다. 표면과 이면은 캐미컬본딩 PET 부직포를 적용하고, 중간층에는 슬래그섬유를 배치하여 내열성과 NVH 성능을 동시에 확보하도록 설계하였다. 이후 니들펀칭 및 캐미컬본딩 공정을 통해 구조 안정성과 성형성을 향상시키며, 열프레스 성형을 통해 차량 엔진커버로 제작하기 위한 테스트를 수행 중이다.

항목	기존 PU Foam	슬래그섬유 복합부직포
내열성	200~300℃	1,000℃ 이상
화재안전성	유독가스 발생	불연성·저연성
재활용성	어려움	재활용 PET 기반 순환 가능
적용성	내연기관 중심	EV·수소차 확대 가능

결론

본 연구에서는 철강산업 부산물인 슬래그를 활용하여 연속 무기섬유를 제조하고 단섬유 인장특성을 평가하였다. 제조된 슬래그섬유는 평균 약 656 MPa의 인장강도를 나타내어 자동차용 복합부직포의 보강섬유로 활용 가능한 기계적 특성을 확보하였다. 또한 방사조건 제어를 통해 섬유 직경을 미세화할 수 있음을 확인하여 향후 복합소재 성능 향상의 가능성을 제시하였다. 재활용 PET와 슬래그섬유를 복합화한 3-Layer 부직포 구조는 기존 PU 폼 및 그라스울을 대체할 수 있는 친환경 자동차 내장재로 적용 가능하며, 내열성, 화재안전성 및 재활용성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 사이징 처리에 따른 계면접착 특성, 니들펀칭 공정 최적화, NVH 및 내환경 신뢰성 평가를 수행하여 양산형 차량 엔진커버 소재로의 상용화를 추진할 예정이다.

후기

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역혁신선도기업육성(R&D), (S3458113)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

P-06

DRI 기반 전기로 공정 내 이차정련 슬래그 재활용성 평가

Assessment of Secondary Refining Slag Recycling in a DRI-based Electric Arc Furnace

김유리[1], 이상범[2], 김기범[3*], 손일[1†]

[1]연세대학교 신소재공학과, [2]포스코 미래철강연구소, [3]연세대학교 중소기업산학협력센터

초록

직접환원철(Direct Reduced Iron, DRI)의 전기로 장입 비율이 증가함에 따라 DRI에 수반되는 저염기도 맥석 성분의 유입량이 증가하며, 이는 슬래그 발생량과 CaO 및 MgO계 부원료 요구량의 증가로 이어질 수 있다[1, 2]. 이차정련 공정에서 발생하는 LF 슬래그는 CaO와 MgO를 함유하고 있어 전기로용 생석회 및 돌로마이트의 대체원으로 활용할 수 있다[3]. 본 연구에서는 1,000 kg의 스크랩 및 DRI 혼합 금속장입물을 기준으로 물질수지를 수립하고, LF 슬래그 재활용에 따른 슬래그 조성, 신규 부원료 투입량, 총 부원료 비용 및 이론적 철 수율의 변화를 평가하였다. DRI 혼합비는 0-30%, 목표 CaO/SiO_2는 1.5-2.5, 목표 FeO 농도는 10-40 mass%로 설정하였으며, 목표 MgO 농도는 CaO/SiO_2에 따라 6-10 mass%를 적용하였다. LF 슬래그 재활용 조건에서 산정된 투입 가능량은 4.15-66.43 kg/1,000 kg metallic charge였으며, LF 슬래그를 적용하지 않은 동일 스크랩 조건과 비교하여 생석회 및 돌로마이트 투입량이 평균 9.35 kg, 약 68.0% 감소하였다. 평균 총 부원료 비용은 Scrap A, Scrap B 및 Scrap A와 LF 슬래그를 적용한 조건에서 각각 2.53, 1.58 및 1.14 USD/1,000 kg metallic charge로 산정되었다. 반면 LF 슬래그 재활용 조건의 최종 슬래그량은 동일한 Scrap A 조건보다 평균 19.46 kg 증가하였으며, 이론적 철 수율은 95.32-99.89%로 나타났다. 이상의 결과로부터 LF 슬래그가 DRI 기반 전기로 공정에서 신규 CaO 및 MgO계 부원료를 대체할 수 있는 순환자원으로 활용 가능함을 확인하였다. 다만, LF 슬래그 투입에 따른 슬래그량 증가에 따른 철 손실을 고려할 때, 실제 공정 적용을 위해서는 LF 슬래그의 최대 투입량을 적용하기보다 비용 절감 효과와 철 수율을 종합적으로 고려한 적정 투입량의 설정이 요구된다.

주제어 : 직접환원철, 전기로, 이차정련 슬래그, LF 슬래그, 슬래그 재활용.

서론

DRI에는 금속 철 및 산화철과 함께 SiO_2, Al_2O_3, CaO 및 MgO 등의 맥석 성분이 포함되어 있으나, 이에 따라 자연 발생하는 저염기도 슬래그로 인해 DRI 혼합비 증가에 따른 전기로 부원료 요구량과 슬래그 발생량이 변화한다. LF 슬래그는 이차정련 과정에서 발생하는 제강 부산물로서 CaO와 MgO를 다량 함유하므로 생석회와 돌로마이트의 일부를 대체할 수 있다. 이에 본 연구에서는 DRI 기반 전기로 공정에서 LF 슬래그의 재활용 가능량을 산정하고, 부원료 사용량, 비용 및 철 수율에 미치는 영향을 평가하였다.

재료 및 실험방법

스크랩과 DRI의 합계 1,000 kg을 금속장입 기준으로 설정하였으며, DRI 혼합비는 0, 10, 20 및 30 mass%로 구분하였다. Case 1은 Scrap A, DRI, 생석회 및 돌로마이트, Case 2는 Scrap B, DRI, 생석회 및 돌로마이트, Case 3은 Scrap A, DRI, 생석회, 돌로마이트 및 LF 슬래그로 구성하였다. Case 3에서는 목표 슬래그 조성을 만족하고 생석회와 돌로마이트 투입량이 음수가 되지 않는 범위에서 LF 슬래그 투입량을 최대화하였다.

경제성 평가에는 생석회 184.4 USD/t, 돌로마이트 187.4 USD/t 및 LF 슬래그 처리비용 15 USD/t를 적용하였다. 철 수율은 전체 투입 철량에 대한 용강 중 회수 철량의 비율로 정의하였으며, 슬래그 중 FeO에 포함된 철을 손실로 반영하였다.

*Corresponding author : 김기범 / ggbeom@yonsei.ac.kr

† Corresponding author : 손일 / ilsohn@yonsei.ac.kr

결과 및 고찰

Case 3에서 산정된 LF 슬래그 재활용 가능량은 4.15-66.43 kg/1,000 kg metallic charge였으며, 평균 투입량은 22.79 kg이었다. 동일한 Scrap A를 적용한 Case 1과 비교할 때, Case 3의 신규 생석회 및 돌로마이트 투입량은 평균 9.35 kg, 약 68.0% 감소하였다.

평균 부원료 비용은 Case 1, Case 2 및 Case 3에서 각각 2.53, 1.58 및 1.14 USD/1,000 kg metallic charge로 산정되었다. DRI가 장입되지 않은 조건에서는 Case 2의 비용이 가장 낮았으나, DRI 혼합비 10-30%에서는 Case 3이 Case 2보다 낮은 평균 비용을 나타냈다. 이는 DRI 혼합비 증가에 따라 확대되는 CaO 및 MgO 요구량을 LF 슬래그가 부분적으로 대체하였기 때문으로 판단된다.

그러나 Case 3의 최종 슬래그량은 Case 1보다 평균 19.46 kg 증가하였다. 이론적 철 수율은 Case 1, Case 2 및 Case 3에서 각각 97.61-99.92%, 98.11-99.99% 및 95.32-99.89%로 산정되었으며, Case 3의 최저 철 수율은 DRI 30%, CaO/SiO_2 2.5 및 FeO 40 mass% 조건에서 나타났다. 따라서 LF 슬래그 재활용에 따른 신규 부원료 및 비용 절감 효과는 최종 슬래그량과 FeO에 의한 철 손실을 함께 고려하여 평가할 필요가 있다.

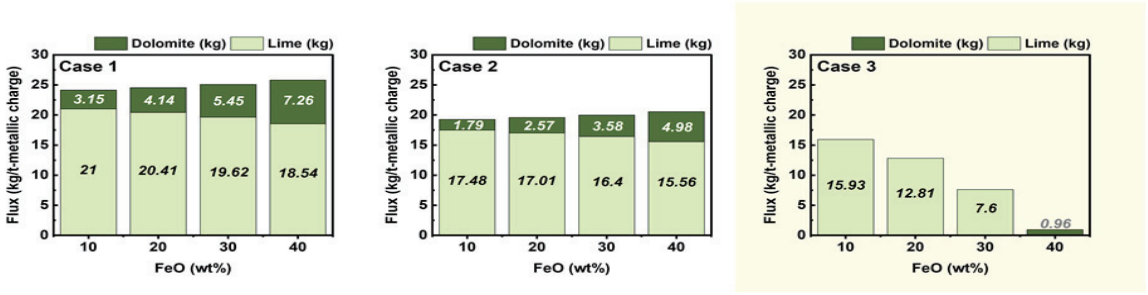


Fig. 1. Flux addition required to reach the target basicity/FeO window at a 30% DRI charge ratio, compared across Case 1-3.

결론

DRI 기반 전기로 공정에서 LF 슬래그를 재활용함으로써 신규 생석회 및 돌로마이트 투입량을 평균 약 68.0% 저감할 수 있었으며, 검토된 전체 조건에서 평균 부원료 비용 또한 감소하였다. 그러나 LF 슬래그 재활용 조건에서는 최종 슬래그량이 증가하였으며, 이에 따라 철 수율의 하한이 신규 부원료 투입 조건보다 낮게 산정되었다. 따라서 LF 슬래그는 DRI 기반 전기로 공정에서 CaO 및 MgO계 부원료를 대체할 수 있는 유효한 순환자원이나, 재활용량의 결정 시 부원료 비용뿐만 아니라 최종 슬래그량과 철 손실을 함께 고려해야 한다. 향후 실제 조업 적용을 위해서는 LF 슬래그의 조성 변동성과 전처리 조건을 반영한 적정 투입량의 도출이 필요하다.

참고문헌

[1] M. Kirschen, T. Hay, and T. Echterhof, “Process Improvements for Direct Reduced Iron Melting in the Electric Arc Furnace with Emphasis on Slag Operation,” Processes 9, no. 2 (2021): 1−10. https://doi.org/10.3390/pr9020402.

[2] S. Alameddine and B. Bowman, “Particularities of Melting DRI in AC and DC Arc Furnaces,” Archives of Metallurgy and Materials 53, no. 2 (2008).

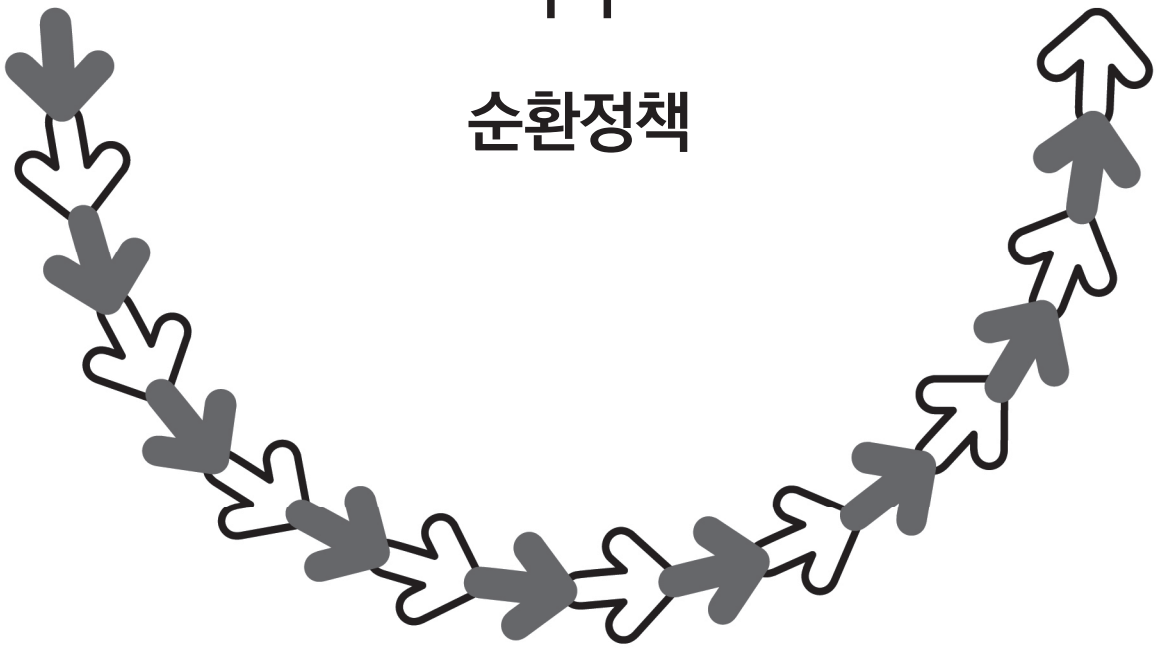
[3] M. Shamsuddin, Physical Chemistry of Metallurgical Processes, 2nd ed. (Cham: Springer, 2021). https://doi.org/10.1007/978-3-030-58069-8.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

구두

순환정책



The Korean Institute of Resources Recycling

C-01

전해박리를 이용한 폐은스크랩 재자원화의 에너지 효율 및 환경성 평가

Energy Efficiency and Environmental Assessment of Waste Silver Scrap Recycling Using Electrolytic Stripping

강청민[1], 강기현[2], 김춘산[1], 김수현[1], 이규림[1], 황용우[3*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2](주)에스지금속, [3]인하대학교 환경공학과

초록

본 연구는 폐은스크랩 전해박리 공정의 에너지 효율과 환경성을 기존 습식공정과 비교하였다. 기능단위는 재생 은 1 kg, 시스템 경계는 Gate-to-Gate로 설정하고 EF 3.1과 ISO 14067을 적용하였다. 전해박리는 전력 사용량을 5.555에서 0.333 kWh/kg Ag로 94.0%, 폐수 발생량을 3.0에서 0.5 kg/kg Ag로 83.3% 줄였다. 탄소발자국은 5.585에서 0.657 kg CO_2-eq/kg Ag로 88.2% 감소하였고, 6개 환경영향 범주에서도 81~93%의 저감 효과를 보였다.

(국문) 본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2026-25536152)

주제어 : 폐은스크랩, 전해박리, 재자원화, 에너지 효율, 환경성 평가

서론

은은 우수한 전기전도성과 화학적 안정성으로 인해 전기·전자, 태양광 및 도금 산업에서 널리 사용되는 핵심 소재이다. 관련 산업의 성장과 함께 은이 함유된 공정 스크랩과 폐제품의 발생량도 증가하고 있어, 이를 안정적으로 회수하여 산업 원료로 재투입하는 재자원화 기술의 중요성이 커지고 있다.

기존의 은 회수공정은 고온 용융이나 산 침출에 의존하는 경우가 많아 에너지 소비, 시약 사용 및 폐수 발생에 따른 환경부담이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 은 함유층을 기판으로부터 선택적으로 분리할 수 있는 전해박리 공정을 적용하고, 공정의 에너지 효율과 환경적 특성을 종합적으로 평가하였다.

재료 및 실험방법

기능단위는 재생 은(Ag granule) 1 kg 생산으로 설정하고, 폐은스크랩 투입부터 은 제품 생산까지의 Gate-to-Gate 범위를 적용하였다. 현장 운영자료를 기준으로 기존 질황산 습식공정(3 ton Ag/배치, 15일)과 전해박리 공정(10 ton Ag/배치, 3일)의 투입·산출량을 기능단위로 환산하였다. 목록분석에는 Ecoinvent 3.12와 국내 전력배출계수 자료를 적용하였으며, EF 3.1의 6개 영향범주와 ISO 14067(IPCC AR6 GWP100)에 따라 환경영향 및 탄소발자국을 산정하였다.

Table 1. 습식공정과 전해박리 공정의 에너지·환경 성과 비교(기능단위: 재생 은 1 kg)

평가항목	습식공정	전해박리	개선 효과
전력 사용량 (kWh/kg Ag)	5.555	0.333	94.0% 감소
폐수 발생량 (kg/kg Ag)	3.0	0.5	83.3% 감소
탄소발자국 (kg CO_2-eq/kg Ag)	5.585	0.657	88.2% 감소
처리기간 (일/배치)	15	3	80.0% 단축
배치 산출량 (ton Ag/배치)	3	10	3.33배 증가
제품 순도 (%)	99.90	99.99	0.09%p 향상

*Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac.kr

결과 및 고찰

전해박리 공정의 전력 사용량은 0.333 kWh/kg Ag로 습식공정의 5.555 kWh/kg Ag보다 94.0% 낮았다. 폐수 발생량은 3.0에서 0.5 kg/kg Ag로 83.3% 감소하였고, 처리기간은 배치당 15일에서 3일로 80.0% 단축되었다. 동시에 배치당 은 산출량은 3 ton에서 10 ton으로 3.33배 증가하고, 제품 순도는 99.90%에서 99.99%로 향상되었다.
ISO 14067 기준 탄소발자국은 습식공정 5.585 kg CO_2-eq/kg Ag에서 전해박리 0.657 kg CO_2-eq/kg Ag로 감소하여 88.2%의 온실가스 감축률을 나타냈다. EF 3.1 평가에서도 기후변화, 산성화, 담수·해수 부영양화, 입자상물질 및 화석자원 사용의 6개 영향범주가 모두 81~93% 감소하였다. 전해박리 공정의 주요 환경 핫스팟은 전력 사용과 폐수처리로 분석되었다.

결론

전해박리는 기존 습식공정 대비 전력 사용량 94.0%, 폐수 발생량 83.3%, 탄소발자국 88.2%를 줄이면서 처리기간을 80.0% 단축하고 생산규모와 제품 순도를 높였다. 따라서 폐은스크랩 재자원화의 에너지 효율과 환경성을 동시에 개선할 수 있는 공정으로 판단된다. 다만 본 평가는 Gate-to-Gate 범위와 현장 배치자료에 기반하므로 향후 배치 간 변동성, 전해액 장기 사용, 부산물 할당 및 제3자 검증을 포함한 후속 연구가 필요하다.

C-02

폴리에스터 함유 폐의류의 자원순환 및 관리체계 분석: 국내외 제도와 관리현황을 중심으로

An Analysis of Circular Management Systems for Polyester-Containing Textile Waste: A Comparative Review of Domestic and International Policies and Management Practices

김수현[1], 차민교[1], 황용우[2*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2]인하대학교 환경공학과

초록

패스트패션의 확산과 의류 소비주기 단축으로 폐의류 발생이 증가하면서 자원순환 관리의 중요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 국내 폐의류의 발생, 수거, 재사용, 재활용 및 수출 현황을 분석하고, EU, 프랑스, 일본 및 미국의 섬유폐기물 관리제도를 비교하였다. 분석 결과, 국내는 일반폐기물과의 혼합배출, 민간 중심의 수거체계, 수거 이후 처리경로와 섬유조성 정보의 연계 부족이 주요 한계로 나타났다. 특히 폴리에스터 폐의류는 재활용 가능성이 높으나 혼방섬유 선별과 안정적인 원료 확보에 제약이 있었다. 향후 제품군별 섬유조성, 수거량, 선별수율 및 재활용량에 대한 통계체계를 구축하고, 이를 기반으로 재질 수준의 물질흐름분석을 수행할 필요가 있다.

주제어 : 폴리에스터, PET, 폐의류, 섬유폐기물, 자원순환

서론

패스트패션의 확산은 의류의 생산 및 소비주기를 단축시키고 소비 후 폐의류 발생량을 증가시키는 주요 요인으로 작용하고 있다. 국회입법조사처에 따르면, 국내 섬유폐기물이 생활계에서 연간 약 20~30만 톤, 산업계에서 10만 톤 이상 발생하며, 상당량이 해외 수출이나 저부가가치 재활용, 소각 및 매립 등을 통해 처리되고 있다. 특히 폴리에스터는 의류산업에서 광범위하게 사용되는 대표적인 합성섬유로서 PET를 주원료로 한다. PET는 용기 분야에서 비교적 체계적인 분리배출과 재활용체계가 구축되어 있는 반면, 의류 분야에서는 혼방섬유, 부자재, 염색 및 가공 등의 영향으로 재질별 회수 및 선별이 어렵다. 한국환경연구원은 폐의류의 재활용 기술수준은 향상되고 있으나, 폴리에스터 폐의류의 별도 회수체계와 자동선별·전처리체계 부족으로 원료 확보가 어렵다는 점을 지적하였다.

이에 본 연구는 국내외 폐의류 관리제도 및 처리현황을 비교하여 폴리에스터 함유 폐의류의 자원순환 관리상 문제점을 분석하고, 향후 국내 관리체계 구축 및 물질흐름분석을 위한 기초방향을 제시하고자 하였다.

방법론과 연구내용

본 연구는 문헌 및 제도 비교를 기반으로 수행하였다. 국내의 경우 폐의류 발생 및 처리 흐름, 수거, 재사용, 재활용 현황, EPR 및 Pre-EPR 도입 논의를 검토하였으며, 주요 자료로 한국환경연구원과 국회입법조사처 보고서를 활용하였다. 국외의 경우 EU, 프랑스, 일본 및 미국 등의 섬유폐기물 관리제도를 검토하였으며, 비교항목은 다음과 같이 설정하였다.

*Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac.kr

Table 1. Comparison criteria for textile waste management systems

Category	Comparison Criteria
Producer Responsibility	EPR implementation or producer financial responsibility
Collection System	Separate collection and responsible collection entities
Sorting System	Sorting for reuse and recycling, including automated sorting
Data Management	Reporting of products placed on the market, collection, and treatment quantities
Material Circularity	Fibre-to-fibre recycling and use of recycled materials
Export Management	Tracking of used clothing and textile waste after export

결과 및 고찰

국내 폐의류 발생량은 통계 범위와 시스템 경계에 따라 차이를 보였다. 한국환경연구원은 2023년 폐의류·폐섬유류 발생량을 약 80만 톤으로 추정하고, 이 중 51%가 혼합배출, 25.7%가 수출 후 재사용, 4.7%가 물질재활용되는 것으로 분석하였다. 반면, 국회입법조사처는 생활계와 산업계를 합해 약 30~40만 톤 수준으로 제시하였으며, 이러한 차이는 폐의류 및 폐섬유류의 포함 범위와 혼합배출 및 수출량 반영 여부 등 산정경계의 차이에 따른 것으로 판단된다.

폴리에스터의 경우, 재활용기술 자체보다 안정적인 원료 회수가 주요 제약으로 나타났다. 이에 한국환경연구원은 폴리에스터 함량 70% 이상 의류와 근무복·교복·병원복 등 발생원을 파악하기 쉬운 품목부터 별도 회수 및 Pre-EPR을 적용하는 방안을 제안하였다. 국외에서는 EPR, 별도수거, 선별 및 재활용을 연계하는 방향으로 제도가 확대되고 있으며, EU와 프랑스는 제품정보 관리와 생산자 분담금을 활용해 관련 인프라를 지원하고 있다.

결론

본 연구를 통해 국내 폐의류 관리체계는 수거·재사용 및 일부 재활용이 이루어지고 있으나, 단계별 자료와 섬유조성 정보가 통합적으로 연계되지 않아 폴리에스터를 포함한 재질별 자원순환성을 평가하는 데 한계가 있는 것으로 나타났다. 폴리에스터 함유 폐의류의 순환관리 확대를 위해서는 폴리에스터 함량이 높은 제품군을 우선 대상으로 회수 및 선별체계를 구축하고, EPR과 재활용기술을 단계적으로 연계할 필요가 있다. 또한 향후 제품 공급량, 사용 및 축적량, 폐기발생량, 수거량, 선별수율 및 재활용량을 연계하는 PET계 폐의류 물질흐름분석을 통해 관리체계의 성과 및 정책 기대효과를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

사사

이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

C-03

리튬이온 배터리 재활용 중간생성물 용어 표준화: black mass, black powder, black alloy 제대로 파헤치기

Demystifying Black Mass, Black Powder, and Black Alloy: Toward Standardized Terminology for Li-Ion Battery Recycling Intermediates

노원규[1], 강진모[1], 김원우[1], 손지수[1], 박준혁[1], 권경중[1*]
[1]세종대학교 에너지자원공학과

초록

리튬이온전지(Li-ion battery, LIB) 시장의 급성장에 따라 폐전지 발생량이 빠르게 증가하고 있으며, 폐전지 파쇄 후 얻어지는 입자상 중간생성물의 재활용 필요성이 커지고 있다. 그러나 이러한 중간생성물을 지칭하는 black mass, black powder, black alloy 등의 용어는 조성 및 처리 이력에 대한 명확한 정의 없이 문헌 및 산업 현장에서 혼용되고 있어, 연구 간 비교와 국제 거래·규제 분류에 혼선을 초래하고 있다. 본 연구에서는 문헌에 보고된 잔존 성분 프로파일을 기준으로 black mass와 black powder를 6개 유형(Type I–VI)으로 체계적으로 분류하고, 이와 형성 경로가 근본적으로 다른 black alloy를 별도로 정의하였다. 아울러 397편의 학술문헌을 대상으로 한 계량서지학적 분석을 통해 용어 사용 빈도, 연도별 변화 추이, 국가별 분포를 정량적으로 제시하였다. 이를 바탕으로 잔존 성분 조성 및 공정 이력에 근거한 일관된 명명 체계를 제안함으로써, 연구 간 비교 가능성을 높이고 향후 LIB 재활용 중간생성물의 국제 표준화 논의에 과학적 근거를 제공하고자 한다.

주제어 : 리튬이온전지 재활용, black mass, black powder, black alloy, 용어 표준화

서론

EV·ESS 시장 확대로 LIB 수요가 급증하면서 폐전지 발생량도 크게 늘고 있다. 폐LIB는 리튬, 니켈, 코발트 등 핵심 금속의 유력한 2차 자원으로, 전처리 과정에서 생성되는 입자상 중간생성물은 재활용 공정의 원료이자 국제 거래 상품으로서 이중적 중요성을 갖는다. 그러나 이를 지칭하는 black mass · black powder · black alloy 용어는 형성 경로와 조성이 서로 다름에도 명확한 기준 없이 혼용되어, 연구 결과 비교와 국가별 규제 분류에 불확실성을 야기하고 있다. 이에 본 연구는 문헌상 용례를 체계적으로 검토하고 정량 분석을 통해 국제적으로 통용 가능한 명명 체계 수립의 근거를 마련하고자 한다.

분류체계 및 방법론

문헌에 보고된 black mass 및 black powder 소재를 잔존 성분 프로파일에 따라 6개 유형으로 분류하였다. 모든 성분이 잔존하는 Type I부터 집전체가 제거된 Type II, 열처리로 유기물이 저감된 Type III까지를 양극-음극 혼합 분획군으로, 음극 성분이 실질적으로 제거된 Type IV–VI를 양극 지향 분획군으로 구분하였다. black alloy는 별도로 형성 경로(고온 환원·용융)와 원소 분배 거동을 기준으로 분석하였다. 용어 사용 실태 규명을 위해 Web of Science에서 관련 검색식으로 문헌을 수집·스크리닝하여 최종 397편을 계량서지학적 분석 대상으로 확정하고, 용어 사용 조합에 따라 5개 범주로 분류한 뒤 연도별·국가별 분포를 분석하였다.

주요 결과

잔존 성분 기반 분류 결과, black mass는 Type I–III에 걸쳐 비교적 뚜렷한 조성적 구분을 보인 반면, black powder는 혼합 분획(Type I–II)에서 일관되지 않게 사용되었다. 계량서지학적 분석 결과, 전체 397편 중 black mass 단독 사용이 327편(82.4%)으

* Corresponding author : 권경중 / kjkwon@sejong.ac.kr

로 압도적 다수를 차지하였으며, 특히 2023년 이후 EU 위임규정 및 중국 국가표준 반영과 함께 급격히 증가하였다. black powder(35편, 8.8%)는 완만히 증가하였고, 지역적으로는 중국·한국 등 일부 국가에 집중되는 경향을 보였다.

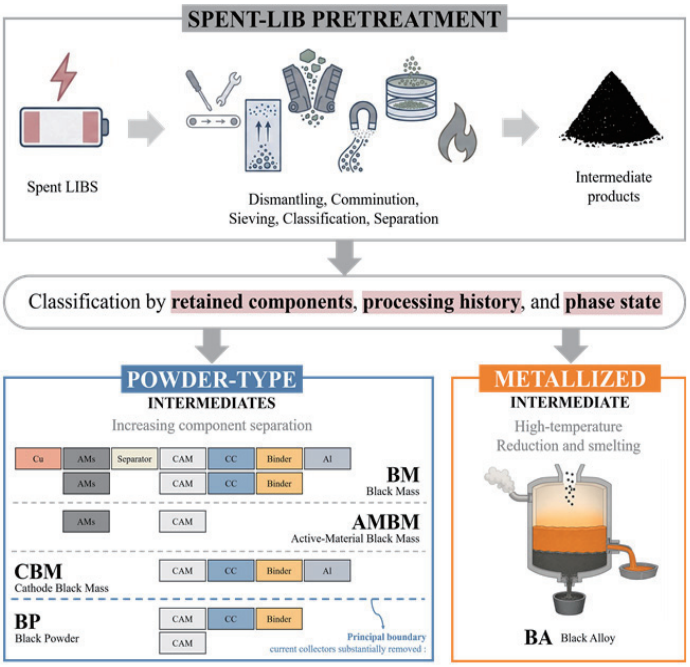


Fig. 1. 폐LIB 전처리 및 잔존 성분 기반 중간생성물 명명체계 (BM, AMBM, CBM, BP, BA)

결론

본 연구는 잔존 성분 프로파일에 근거하여 Type I–II를 black mass(BM), Type III을 active-material black mass(AMBM), Type IV를 cathode black mass(CBM), Type V–VI를 black powder(BP)로 재정의하는 명명 체계를 제안하였으며, black alloy는 별도의 금속상 중간생성물로 구분할 것을 제안하였다. 이는 연구 간 비교 가능성을 높이고, 향후 LIB 재활용 중간생성물의 국제 표준화 논의에 과학적 기반을 제공할 것으로 기대된다.

사사

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1A6A1A03038540).

C-04

플라즈마 기반 수소 생산기술의 전과정 온실가스 배출량 분석

Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Analysis of Plasma-Based Hydrogen Production Technology

이규림[1], 김수현[1], 서홍석[2], 황용우[3*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2]한국화학융합시험연구원, [3]인하대학교 환경공학과

초록

본 연구에서는 바이오가스 기반 플라즈마 수소 생산공정을 대상으로 플라즈마 출력에 따른 전과정 온실가스 배출량을 평가하였다. 동일한 원료 투입 조건에서 세 가지 출력 조건을 설정하고, 생성 수소 1 kg을 기준으로 투입·산출물과 에너지 사용량을 산정하였다. 평가 결과, 출력 조건에 따라 수소 생산량과 온실가스 배출 특성에 차이가 나타났으며, 본 연구 범위에서 산정된 결과는 국내 청정수소 기준을 충족하는 것으로 나타났다. 또한 전력 사용과 공정에서 발생하는 카본블랙의 관리가 향후 공정 개선 및 환경영향 평가에서 주요하게 고려되어야 할 항목으로 분석되었다.

주제어 : 청록수소, 플라즈마 열분해, 전과정평가, 청정수소 인증

서론

플라즈마 기반 청록수소 생산기술은 메탄을 수소와 고체탄소로 분해하여 수소를 생산하는 기술이다. 바이오가스를 원료로 이용하는 경우, 전처리를 거쳐 메탄 농도를 높인 후 플라즈마 반응기에 공급하며, 반응과정에서 생성된 고체탄소는 후단 설비에서 회수된다.

청록수소 생산은 주반응인 메탄 열분해 과정에서 이산화탄소가 발생하지 않으나, 공정의 전과정 환경영향은 플라즈마 및 보조설비의 전력 사용, 원료와 보조물질의 공급, 미반응가스의 배출 등에 따라 달라질 수 있다. 따라서 공정의 환경성을 평가하기 위해서는 수소 생산량뿐 아니라 공정 전반의 투입·산출물과 에너지 사용을 포함한 전과정평가가 필요하다.

국내 청정수소 인증기준은 수소 1 kg당 온실가스 배출량 4.00 kg CO_2-eq 이하로 설정되어 있다. 이에 본 연구에서는 바이오가스 기반 플라즈마 수소 생산공정을 대상으로 플라즈마 출력을 비교조건으로 설정하여 전과정 온실가스 배출량을 분석하고, 청정수소 생산을 위한 공정 개선 방향을 검토하였다.

재료 및 실험방법

분석 대상은 바이오가스 전처리, 플라즈마 열분해 및 고체탄소 회수로 구성된 파일럿 설비이다. 동일한 원료 투입 조건에서 플라즈마 출력을 비교변수로 설정하고, 출력 수준에 따라 A, B, C의 세 가지 운전 시나리오를 구성하였다. 시나리오별 투입·산출물 및 에너지 사용량은 수소 1 kg 생산을 기능단위로 설정하여 실제 운영자료를 기반으로 비교하였다.

플라즈마 기반 청록수소 생산공정의 전과정평가는 ecoinvent v3.12를 기반으로 수행하였으며, 기후변화 영향은 EF v3.1 방법론을 적용하여 산정하였다. 공정에서 발생하는 카본블랙에는 Cut-off를 적용하여 별도의 환경편익을 반영하지 않았으며, 출력 조건별 수소 1 kg 생산에 따른 온실가스 배출량을 비교하였다.

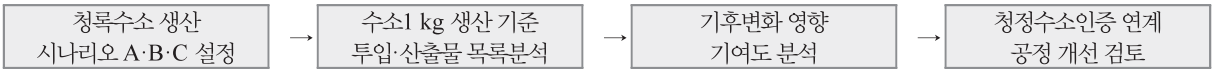


Fig. 1. LCA framework for plasma-based hydrogen production

*Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac.kr

결과 및 고찰

동일한 원료 투입 조건에서 플라즈마 출력을 변화시킨 결과, 출력 증가에 따라 수소 생성량이 증가하였다. 이에 따라 각 시나리오의 전력 사용, 원료 및 보조물질 공급, 직접배출을 반영하여 수소 1 kg 생산에 대한 온실가스 배출량을 산정하였다.

평가 결과, 세 출력 조건에서 산정된 온실가스 배출량은 국내 청정수소 기준인 4.00 kg CO_2-eq/kg H_2 이하로 나타났다. 출력 증가에 따라 수소 생산량과 에너지 사용량이 함께 변화하였으며, 이에 따라 출력 조건별 환경영향은 수소 1 kg 생산 기능단위당 온실가스 배출량을 기준으로 비교하였다.

기여도 분석 결과, 플라즈마 및 보조설비의 전력 사용이 공정의 주요 환경영향 기여항목으로 나타나 전력사용 효율이 공정의 온실가스 배출량을 결정하는 주요 요인으로 확인되었다. 또한 공정에서 발생하는 미반응가스와 카본블랙은 발생량과 처리·활용경로에 대한 관리가 필요한 것으로 나타났다. 카본블랙은 본 연구에서 Cut-off 방식을 적용하여 환경편익을 반영하지 않았으나, 향후 실제 회수량과 활용경로를 고려하여 자원화에 따른 환경편익을 추가로 검토할 필요가 있다.

결론

본 연구에서는 바이오가스 기반 플라즈마 수소 생산공정을 대상으로 플라즈마 출력에 따른 전과정 기후변화 영향을 분석하였다. 동일한 원료 투입 조건에서도 출력에 따라 수소 생산량과 단위 수소당 환경영향에 차이가 나타났으며, 전력 사용이 주요 환경영향 기여항목으로 분석되었다.

본 연구 범위에서 산정된 온실가스 배출량은 국내 청정수소 인증 기준을 충족하는 수준으로 나타났다. 향후 청록수소 생산을 통한 안정적인 청정수소 공급체계 구축을 위해서는 플라즈마 및 보조설비의 전력사용 효율을 개선하고, 미반응가스와 카본블랙의 발생량 및 처리·활용경로를 지속적으로 관리할 필요가 있다. 특히 카본블랙의 실제 회수량과 활용방안을 반영하여 자원화에 따른 환경적 효과를 추가로 검토할 필요가 있다. 또한 청록수소 생산공정의 지속적인 환경성 평가 및 개선 과정에서 청정수소 인증 기준을 함께 고려할 필요가 있다.

사사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2025-02303377).

C-05

LCA 기반 K-pop 앨범의 에코디자인 시나리오별 탄소배출 저감 효과 분석

Analysis of Carbon Emission Reductions from Ecodesign Scenarios for K-pop Albums Using Life Cycle Assessment

김우진[1], 김선빈[1], 박가영[1], 황용우[2*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2]인하대학교 환경공학과

초록

본 연구는 K-pop 앨범의 구성품별 온실가스 배출 특성을 규명하고, 에코디자인 시나리오에 따른 감축 효과를 정량적으로 분석하였다. 동일 앨범의 두 버전을 대상으로 12종 구성품의 중량을 측정하고, 구성품별 평균 중량을 적용한 앨범 1개를 기능단위로 설정하였다. 시스템 경계는 원료 및 에너지 공급부터 구성품 제조·가공까지의 Cradle-to-gate 범위로 설정하였으며, 전과정목록분석에는 선행연구, 공개자료, 국가 LCI DB 및 ecoinvent 3.12를 활용하였다. 시나리오는 기존 투입구조를 반영한 기준 시나리오(S1), 현재 확인되는 산업계 에코디자인 사례를 적용한 시나리오(S2), 2040년 국제 규제 대응 조건을 반영한 시나리오(S3)로 구분하였다. 기후변화 영향은 S1 1.407 kg CO_2-eq, S2 1.263 kg CO_2-eq, S3 1.212 kg CO_2-eq로 산정되었다. S1과 비교한 감축률은 S2 10.2%, S3 13.9%였다. 기준 시나리오에서는 포토북의 기여도가 56.8%로 가장 높았으며, CD-R, PVC 커버 및 CD 케이스가 뒤를 이었다. 중량과 환경영향 기여도를 함께 검토한 결과, 포토북은 우선적인 개선 대상이었으며 CD-R과 CD 케이스는 중량에 비해 환경영향 기여도가 큰 구성품으로 나타났다. 본 연구는 K-pop 앨범의 에코디자인 전략을 구성품별 정량 자료에 근거하여 수립할 필요가 있음을 제시한다.

주제어 : K-pop 앨범, 전과정평가, 에코디자인, 온실가스 배출량

서론

탄소중립 이행이 제품 설계와 공급망 관리로 확대되면서 문화콘텐츠 산업의 실물 제품도 생산단계의 환경영향을 정량적으로 검토할 필요가 있다. K-pop 앨범은 CD-R뿐만 아니라 포토북, 포토카드, 포스터, 스티커 및 포장 구성품을 포함하지만, 관련 연구는 소비문화와 디자인 사례에 집중되어 구성품별 환경영향과 개선 효과를 비교한 연구가 부족하다. 또한 앨범마다 구성과 중량이 달라 결과를 산업 전체로 일반화하기 어렵다. 이에 본 연구는 단일 K-pop 앨범을 대상으로 구성품별 온실가스 배출 기여도를 규명하고, 현행 산업계 사례와 국제 규제에 근거한 에코디자인 시나리오의 저감 효과 및 우선적인 개선 대상을 제시하고자 하였다.

본론

기능단위는 K-pop 앨범 1개, 시스템 경계는 원료 및 에너지 공급부터 구성품 제조·가공까지의 Cradle-to-gate로 설정하였으며, 두 버전의 구성품별 평균 중량을 기준흐름에 적용하였다. 선행연구, 공개자료, 국가 LCI DB 및 ecoinvent 3.12를 이용하여 전과정목록분석과 기후변화 영향평가를 수행하였고, 시나리오 간 구성품 종류와 중량은 동일하게 유지하였다(Table 1).

Table 1. Definition of eco-design scenarios

Scenario	Definition	Main application
S1	Baseline	Current input composition
S2	Current industry best-practice	100% recycled graphic paper and biodegradable starch-based films
S3	2040 regulatory response	S2 recycled paper and 65% PCR for three plastic packaging components

*Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac..kr

결과 및 고찰

S1의 온실가스 배출량은 1.407 kg CO_2-eq였으며, 포토북(56.8%), CD-R(13.5%), PVC 커버(9.2%) 및 CD 케이스(8.9%)가 전체 배출량의 88.3%를 차지하였다. S2와 S3의 배출량은 S1보다 각각 10.2%와 13.9% 감소하였으며, S3에서의 추가 감축은 주로 PVC 커버의 PCR 적용에서 발생하였다. 포토북은 중량과 배출 기여도가 모두 높았지만 CD-R과 CD 케이스는 중량 비중보다 배출 기여도가 크게 나타나, 구성품의 중량만으로 개선 우선순위를 결정하기 어렵다는 점이 확인되었다.

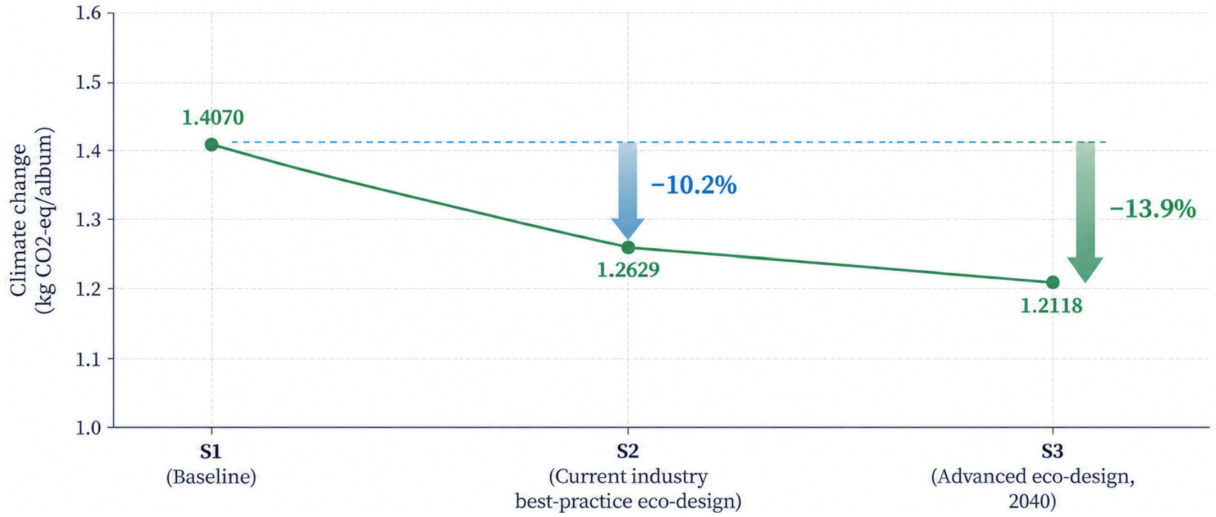


Fig. 1. Climate change impacts of K-pop album under eco-design scenarios.

결론

본 연구는 K-pop 앨범의 온실가스 저감을 위해 모든 구성품에 동일한 개선을 적용하기보다 포토북과 PVC 커버 등 배출 기여도와 감축잠재력이 큰 구성품을 우선 개선할 필요가 있음을 보여주었으나, 단일 앨범의 중량 측정과 문헌·LCI DB에 근거한 결과이므로 향후 제조사 현장자료를 활용한 검증이 필요하다.

사사

이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.
본 논문은 현대차 정몽구 재단 장학생으로서 지원을 받아 수행된 연구입니다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

포스터

습식제련

The Korean Institute of Resources Recycling

PH-01

폐리튬이온전지 침출액으로부터 고순도 탄산리튬 회수를 위한 다단계 습식 정제 공정의 설계 및 최적화

Design and optimization of a multi-step hydrometallurgical process for high-purity lithium from spent lithium-ion battery

주우현[1,2], 신현호[1,2], 권현석[1,2], 조용수[1*], 이철경[2†]

[1]아이에스에코솔루션,[2]금오공과대학교

초록

LFP 폐배터리 침출액에는 인(P), 칼슘(Ca), 나트륨(Na), 황(S) 등의 불순물이 고농도로 존재하여 배터리 등급(순도 99.5% 이상)의 탄산리튬(Li_2CO_3)을 제조하는데 큰 저해 요인이 된다. 기존 연구는 개별 불순물의 단일 제거 공정에 치중되어 전 공정 물질수지 관점의 최적화가 미흡했고, 인·칼슘 동시 침전 시도 시 탄산이온과 인산이온 간 경쟁반응으로 인의 제거율이 28~29% 수준에 머무는 한계가 있었다. 본 연구는 $Ca(OH)_2$와 Na_2CO_3를 이용한 단계적 침전 공정으로 불순물 간 화학적 간섭을 차단하고, 탄산리튬의 역용해도 특성을 응용한 고온 수세·재순환 전략을 통해 불순물 제거를 극대화하면서 리튬의 손실을 최소화하는 4단계 습식 정제 공정 개발 및 최적화가 목적이었다. 전 공정 물질수지 최적화를 달성함으로써, 폐배터리 재자원화 공정을 리튬 회수 효율과 경제성 관점에서 동시에 개선할 수 있음을 확인하였다.

서론

전기자동차 및 에너지 저장 장치(ESS) 시장의 급격한 성장에 따라 리튬이온전지의 수요가 폭발적으로 증가하고 있으며, 이에 수반되는 폐리튬이온전지의 친환경 리사이클링 및 핵심 유가금속 회수 기술은 자원 안보와 순환경제 관점에서 핵심적인 과제로 대두되고 있다. 특히 최근 시장 점유율이 확대되고 있는 리튬인산철(LFP) 배터리는 침출 및 용매추출 후 회수된 수용액 내에 다량의 인(P), 칼슘(Ca), 나트륨(Na), 황(S) 등 다양한 불순물이 고농도로 혼재되어 있어 최종 제품인 탄산리튬(Li_2CO_3)의 배터리 등급(순도 99.5% 이상) 규격 충족을 저해하는 주된 원인이 된다. 기존의 습식 정제 연구들은 주로 인(P)이나 칼슘(Ca)을 개별적으로 침전 제거하는 단일 공정의 효율성에만 치중되어 있어, 전 공정을 관통하는 물질수지(Mass Balance) 관점의 분석과 정제 단계별 리튬 손실 억제 전략이 미흡하였다. 특히 공정 단순화를 위해 인과 칼슘을 동시에 침전 제거하려는 시도는 투입된 탄산 이온($CO3^{2-}$)과 인산 이온($PO4^{3-}$) 간의 경쟁 반응으로 인해 인 제거율이 28~29% 수준에 머무르는 심각한 한계를 노출하였다. 또한 통상적인 수세 공정에서는 탄산리튬의 재용해로 인한 손실이 발생함에도 불구하고 이를 체계적으로 제어하는 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 $Ca(OH)_2$와 Na_2CO_3를 활용한 단계적 침전 공정을 설계하여 불순물 동시 제거 시 발생하는 화학적 간섭을 원천 차단하고, 각 단계별 최적 투입량 및 반응 메커니즘을 정량적으로 규명하였다. 아울러 탄산리튬의 역용해도(Inverse Solubility) 특성을 응용한 90°C 고온 수세 및 수세액 재순환 시스템을 도입하여 리튬 손실을 5% 미만으로 최소화하는 배터리 등급 탄산리튬 제조 공정을 확립하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 폐리튬이온전지 침출액은 유가금속 분리 후 얻어진 리튬 함유 수용액으로, 초기 원액 내 화학적 조성은 Table 1과 같다

*Corresponding author : 조용수 / ys_jo@isecosolution.com

† Corresponding author : 이철경 / cklee@kumoh.ac.kr

Table 1. Chemical composition of raw leach solution from spent Li-ion battery

성분	Li	P	Ca	Na	S
함량(ppm)	5,380	3,652	35	5,079	11,539

Step 1 (인 제거) : 초기 침출액에 수산화칼슘$Ca(OH)_2$을 투입하고 pH를 10～12 영역으로 제어하여 인산칼슘($Ca_3(PO4)_2$) 및 하이드록시아파타이트($Ca_5(PO4)_3OH$) 침전을 유도하였다.
Step 2 (칼슘 제거) : 인이 제거된 여액에 탄산나트륨(Na_2CO_3)을 투입하며 잉여 칼슘을 탄산칼슘($CaCO_3$) 형태로 침전 분리하였다.
Step 3 (탄산리튬 결정화) : 정제된 리튬 용액에 Na_2CO_3를 첨가하여 고체 Li_2CO_3 결정을 침전 형성시켰다.
Step 4 (수세 및 잔류 리튬 회수) : 회수된 고체 잔사는 90°C로 유지된 포화 탄산리튬 수세액을 이용하여 20~50분간 세척을 진행하였으며, 분리된 반응 여액(여액 내 Li 1,905 ppm)은 90°C 조건에서 중회(Dense Soda Ash) 2.5몰을 재투입하여 잔류 리튬을 추가 침전 회수하였다.

각 단계별 상등액 및 고체 시료는 유도결합 플라즈마 분광분석기(ICP-OES)를 통해 원소 농도를 분석하였으며, 수세 전후의 탄산리튬 결정 구조와 순도는 X선 회절 분석기(XRD)를 통해 상 조성을 규명하였다.

결과 및 고찰

수세 전후 XRD 분석 결과, 세척 전 존재하던 $LiOH\text{-}H_2O$(13.1%), NaCl(7.1%), KCl(0.3%) 등의 불순물 피크가 수세 후 완전히 소멸하고 순도 99.5% 이상의 단일 Li_2CO_3 결정상으로 전환됨을 확인하였다. 또한 1,905 ppm의 리튬이 잔류하는 여액에 90°C에서 중회 2.5몰을 재투입하여 57~60%의 추가 회수율을 확보하였다.

결론

본 연구에서는 폐리튬이온전지 침출액으로부터 고순도 탄산리튬을 회수하기 위한 4단계 습식 정제 공정을 설계하고 최적화하였다. $Ca(OH)_2$ 1.5 M 투입을 통해 CO_2 완충 한계를 극복하고 pH 10~12를 달성하여 인(P) 제거율 100%를 달성하였다. Na_2CO_3 3.0 M 투입을 통해 리튬 손실을 2.2%로 억제하며 칼슘(Ca)을 93% 이상 선택적으로 제거하였으며, 동시 처리 시의 경쟁 반응을 규명하여 단계적 처리의 화학적 필연성을 입증하였다. 탄산리튬의 역용해도 특성을 응용한 90°C 고온 수세 및 포화 수세액 재순환 공정을 확립하여 리튬 손실률을 0.85%로 억제하고 나트륨 제거율 97% 이상을 달성하였다. 최종 회수된 탄산리튬은 배터리 등급 기준인 99.5% 이상의 결정학적 순도를 만족하였으며, 여액 내 잔류 리튬을 60% 수준으로 재회수하는 전 과정 물질수지 최적화를 달성하였다.

PH-02

Black Mass 내 불소 제거에 따른 리튬의 선택적 회수 특성 연구

Study on Selective Lithium Recovery from Black Mass with Fluorine Removal

신현호[1,2], 주우현[1,2], 권현석[1,2], 조용수[1*], 이철경[2†]

[1]아이에스에코솔루션, [2]국립금오공과대학교

초록

전기자동차 및 에너지저장장치의 보급 확대와 재생원료 사용 의무에 따라 폐리튬이온전지의 발생량이 증가하면서, 블랙매스로부터 Li, Ni, Co 및 Mn 등의 유가금속을 효율적으로 회수하기 위한 기술의 중요성이 증가하고 있다. 폐배터리 전처리 과정에서 발생하는 블랙매스에는 양극 및 음극 활물질과 함께 PVDF계 바인더, $LiPF_6$ 및 전해질염 등의 유기물과 불소계 성분이 함유되어 있어, 후속 유가금속 회수공정에 앞서 이를 제거하기 위한 열처리가 요구된다.

선행 연구를 통해 반드시 수행해야 하는 유기물 제거 열처리 공정을 이용하여 블랙매스 내 Li을 선택적으로 수용성 화합물로 전환하고, 수침출을 통해 우선 회수하는 기술을 개발하였다. 열처리 과정에서 양극활물질을 열분해한 후 CO_2를 공급하여 Li의 탄산화 반응을 촉진함으로써 Li_2CO_3로 전환하였으며, 물에 용해되지 않는 Ni, Co 및 Mn 산화물과 분리하였다. 이를 통해 후속 용매추출 공정에 앞서 Li을 선택적으로 회수하고, 각 유가금속 회수단계에서 발생할 수 있는 Li의 손실과 제품 순도 저하를 방지하고자 하였다.

그러나 열처리 과정에서 불소계 성분으로부터 전환된 F가 Li과 반응하여 난용성 물질인 LiF를 형성하며, 이는 수침출 공정에서의 Li 회수율을 저하시키는 요인으로 작용한다. 본 연구에서는 LiF 형성을 억제하기 위해 CaO를 블랙매스 열처리 공정에 투입하여 F를 CaF_2로 전환하고, 형성된 CaF_2를 블랙매스와의 입도 차이를 이용하여 물리적으로 분리하고자 하였다. CaO의 적용은 Li 수용액으로의 Ca 혼입을 방지하는 동시에, Li 회수 후 Ni, Co 및 Mn이 잔류하는 블랙매스에 Ca가 불순물로 혼입되는 것을 최소화하기 위한 것이다.

실험 결과, CaO 첨가 유무에 따라 수침출액의 Li 농도는 무첨가 조건보다 약 10.8% 증가하였으며, 블랙매스의 F 농도는 약 40.7% 감소하였다. 또한 열처리 후 입도 차이를 이용한 물리적 선별을 통해 CaO를 분리하였으며, 회수된 Li 수용액의 평균 Ca 농도는 무첨가 조건과 유사하게 나타났다. 이를 통해 CaO 첨가가 LiF 형성을 억제하고 Li의 선택적 회수를 향상시키는 동시에, CaO의 물리적 분리가 가능한 전처리 공정으로 적용될 수 있음을 확인하였다. 본 공정은 Li의 선택적 회수와 함께 후속 Ni, Co 및 Mn 용매추출 공정에서 불소 및 Ca 불순물의 영향을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 블랙매스, Ca계 첨가제, 리튬 선회수, 불소 제어

*Corresponding author : 조용수 / ys_jo@isecosoultion.com,

† Corresponding author : 이철경 / cklee@kumoh.ac.kr

PH-03

폐 Ti/MMO 전극 코팅 내 루테늄 및 이리듐 산화물의 침출 제고 방안

Strategies for Enhanced Leaching of Ruthenium and Iridium Oxides from Spent Ti/MMO Electrode Coatings: A Review

이현서†, 윤수연, 하지윤, 이상훈†*
계명대학교 환경공학과

Abstract

Spent Ti-based mixed metal oxide (MMO) electrodes are valuable secondary resources of Ru and Ir, but their hydrometallurgical recycling remains less developed than that of automotive catalysts or PEM electrodes. In Ti/MMO electrodes, RuO_2 and IrO_2 are embedded in a mixed oxide coating on a Ti substrate, which restricts direct contact with leachants. This review summarizes chloride-based oxidative leaching chemistry and key factors controlling Ru/Ir dissolution, including structural accessibility, chloride concentration, oxidizing condition, temperature, and pretreatment. Ru may dissolve from exposed or highly dispersed phases under concentrated HCl with moderate oxidants, whereas Ir generally requires harsher chloride–oxidant conditions or prior chemical/thermal conversion. For Ti-MMO coatings, physical or chemical pretreatment is therefore critical to expose Ru/Ir-bearing domains before leaching. Integrated process design combining characterization, pretreatment, chloride leaching, and selective recovery is suggested for practical Ru and Ir recycling from spent Ti/MMO electrodes.

Keywords : spent Ti electrode; MMO (Mixed Metal Oxide) coating; ruthenium (Ru); iridium (Ir); leaching.

초록

폐 Ti 기반 혼합금속산화물(MMO) 전극은 Ru 및 Ir의 유용한 이차자원이지만, 이들의 습식제련 재활용 연구는 자동차 촉매나 PEM 전극에 비해 아직 충분히 발전하지 못하였다. Ti/MMO 전극에서는 RuO_2와 IrO_2 가 Ti 기재 위 혼합 산화물 코팅층에 매립되어 있어 침출제와의 직접 접촉이 제한된다. 본 총설은 염화물계 산화 침출 화학과 Ru/Ir 용해를 지배하는 주요 인자, 즉 구조적 접근성, 염화물 농도, 산화 조건, 온도 및 전처리를 정리하였다. Ru는 노출되었거나 고분산된 상에서 농염산과 적정 산화제 조건으로 용해될 수 있으나, Ir은 일반적으로 더 강한 염화물–산화제 조건 또는 사전 화학적·열적 전환을 필요로 한다. 따라서 Ti/MMO 코팅에서는 침출 전 Ru/Ir 함유 영역을 노출시키기 위한 물리적 또는 화학적 전처리가 중요하다. 폐 Ti/MMO 전극으로부터 Ru 및 Ir을 실용적으로 재활용하기 위해서는 특성분석, 전처리, 염화물 침출 및 선택적 회수를 결합한 통합 공정 설계가 요구된다.

Keywords: 폐Ti 전극; MMO (Mixed Metal Oxide) 코팅; 루테늄 (Ru); 이리듐 (Ir); 침출.

* Corresponding author : Sang-hun Lee / shlee73@kmu.ac.kr
† These authors contributed equally to this work.

PH-04

수산화리튬 제조 공정 발생 저농도 리튬 함유 폐액의 재이용

Re-circulation of waste water containing low-concentration of lithium ion generated from lithium hydroxide production

유가연[1,2], 조형준[1,2], 이재원[2], 장한권[1], 류태공[1*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]충남대학교 응용화학공학과

초록

본 연구에서는 탄산리튬으로부터 수산화리튬 제조 공정에서 발생하는 저농도 리튬 함유 폐액의 재이용 가능성을 확인하였다. 탄산칼슘 슬러지 수세액의 원료수 활용 가능성을 검토하기 위해 공정수 초기 Li 농도에 따른 후속 수산화반응을 진행하였으며, 목표 Li 농도 10,000 ppm 조건에서 99% 이상의 Li 회수율을 확인하였다. 또한 수세액 내 리튬의 회수·농축을 위해 리튬 함유 용액에 막 축전식 탈염 공정(MCDI)을 적용하였으며, 반복적인 흡·탈착 반응을 통해 탈착액의 Li 농도가 증가하는 것을 확인하였다. 본 연구 결과는 수산화반응에서 발생하는 저농도 리튬성분을 함유한 폐액을 대상으로 후속 수산화반응의 원료수로의 재이용을 연계하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 수산화리튬, 공정수 재이용, 리튬 회수, MCDI, 농축

서론

수산화리튬은 리튬 이차전지용 양극재 제조의 주요 원료로, 제조 과정에서 리튬 손실을 줄이고 용수 이용 효율을 높이는 것이 중요하다. 특히 공정 중 발생하는 리튬 함유 폐액 배출량 절감을 위한 저농도 리튬 폐액의 재이용은 자원의 효율적인 활용 측면에서 해결해야 할 중요한 요소이다

탄산리튬과 수산화칼슘의 슬러리 반응을 이용한 습식전환 공정에서는 수산화리튬 용액과 함께 탄산칼슘 슬러지가 생성되며 유해성을 저감시키기 위해 수산화리튬을 함유한 슬러지의 수세가 동반되며 농도가 낮은 리튬 이온이 함유된 폐액이 발생된다. 이를 해결하기 위해 수세과정에서 발생하는 저농도 리튬이온을 함유한 폐액의 배출량을 절감시키고 공정 내에서 재이용하기 위한 검토가 요구된다.

본 연구에서는 슬러지의 단계적 수세에 따른 리튬이온 농도 분포를 확인하고, 탄산리튬-수산화리튬 전환 공정에 사용되는 원료수 함유 내 Li 농도를 달리하여 수산화반응 원료수로의 활용 가능성을 평가하였다. 또한 MCDI 공정을 적용하여 수세액의 반복적인 흡·탈착에 따른 리튬이온 농축 특성을 분석하였다. 이를 통해 수산화리튬 제조 공정에서 발생하는 저농도 리튬이온 함유 수세액의 공정 내 순환 가능성을 검토하고자 하였다.

재료 및 실험방법

산업용 탄산리튬 분말과 수산화칼슘을 사용하여 습식전환 반응을 진행하였다. 수산화반응 종료 후 분리된 슬러지에 일정량의 증류수를 첨가하여 단계적으로 수세하였다. 초기 Li 농도를 약 1,000~5,000 ppm으로 조절한 수산화리튬 용액을 원료수로 하여 수산화반응을 진행하였다. 저농도 리튬 함유 수세액의 농축을 위해 MCDI 공정을 적용하였다. MCDI 모듈은 활성탄소 전극, 음이온교환막, 스페이서 및 양이온교환막으로 구성된 단위 셀 200개를 조립하여 사용하였고, 흡착 및 탈착 과정을 반복하여 Li 농축 특성을 평가하였다.

결과 및 고찰

수산화반응 후 생성된 탄산칼슘 슬러지를 단계적으로 수세한 결과, 최초 수산화반응에서 회수된 용액의 Li 농도는 약 9,512

* Corresponding author : 류태공 / tgryu@kigam.re.kr

ppm이었으며, 1차 및 2차 수세액의 Li 농도는 각각 약 1,832 및 159 ppm으로 나타났다. 후속 수세 공정을 통해 슬러지에 잔류하는 리튬을 추가 회수할 수 있었으며, 회수된 리튬 함유 용액의 원료수 활용 가능성을 검토하였다.

원료수에 함유된 초기 Li 농도를 약 1,000~5,000 ppm으로 설정하고 탄산리튬과 수산화칼슘을 투입하여 수산화반응을 진행한 결과, 목표 Li 농도 10,000 ppm 조건에서 반응 후 Li 회수율이 99% 이상으로 나타났다(Table 1). 이는 습식전환 공정의 리튬 함유 수세액을 후속 수산화반응 원료수로 재활용할 수 있음을 보여준다.

공정 폐수 처리 부담을 줄이기 위해 저농도 리튬 함유 수세액 대상으로 MCDI 공정을 적용하였다. Li 농도가 약 1,032 ppm인 용액을 공급액으로 하여 MCDI 반복 운전을 진행하였다. 반복 횟수가 증가함에 따라 공급액의 Li 농도는 감소하고 탈착액의 Li 농도는 증가하였으며, 최종 농축액의 Li 농도는 약 3,022 ppm에 도달하였다(Fig. 1).

Table 1. Effect of initial Li concentration on final Li concentration and Li conversion efficiency at a target Li concentration of 10,000 ppm.

Target Li conc. (ppm)	initial Li conc. (ppm)	final Li conc. (ppm)	Li conversion (%)
10000	1097.33	10058.79	99.64
	2140.59	10119.73	99.81
	3169.75	10130.89	99.63
	4121.04	10112.60	99.92
	5119.43	10108.81	99.89

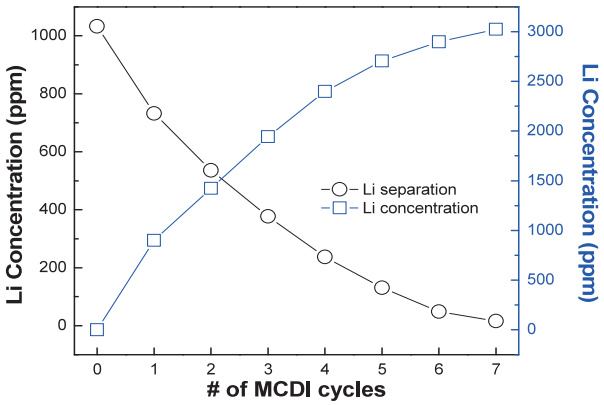


Fig. 1. Changes in Li concentrations in the feed and concentrate solutions during repeated MCDI cycles.

결론

탄산리튬-수산화리튬 제조 공정에서 발생한 슬러지의 수세과정에서 발행하는 저농도 리튬이온 함유 폐수의 원료수 재이용 가능성을 평가하였다. 초기 Li 농도 약 1,000-5,000 ppm의 용액을 사용하여 후속 수산화반응을 진행한 결과 목표 Li 농도 10,000 ppm 조건에서 99% 이상의 Li 회수율을 나타냈다. 또한 MCDI 반복 운전을 통해 초기 공급액 대비 Li 농도가 약 2.9배인 농축액을 확보하였다. 이러한 결과는 탄산리튬-수산화리튬 제조 공정에서 발생하는 리튬 함유 폐수의 농축 및 후속 수산화반응 원료수로의 활용 가능성을 보여주었다. 또한 탄산칼슘 기반 슬러지의 알칼리성 완화 및 폐수 배출량 저감에 기여할 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 산업통상부 지원(저급 염호로부터 고효율 리튬회수 및 유해물질 무배출형 친환경 리튬추출 실증화기술 개발)을 받아 수행한 과제입니다 (RS-2024-00420434).

PH-05

심층공융용매를 이용한 NCM 양극재의 침출 및 선택적 니켈 회수를 통한 황산니켈 제조

Leaching of NCM Cathode Materials Using a Deep Eutectic Solvent and Production of Nickel Sulfate via Selective Nickel Recovery

이지현[1], 홍현선[2*]

[1]성신여자대학교 미래응용과학학과, [2]성신여자대학교 청정신소재공학과

Abstract

A choline chloride-oxalic acid (ChCl-OxA) deep eutectic solvent (DES) was used to leach NCM811 and selectively recover nickel. During leaching, nickel precipitated as $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$, whereas Co and Mn mainly remained in solution. Dimethyl sulfoxide (DMSO) was added to reduce the DES viscosity and facilitate solid-liquid separation. The recovered nickel oxalate was converted into NiO and subsequently crystallized as $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ after dissolution in sulfuric acid. These results demonstrate the feasibility of integrating DES leaching with selective nickel recovery and nickel sulfate production.

Keywords : Deep eutectic solvent, Selective nickel recovery, Nickel sulfate

Introduction

The increasing demand for lithium-ion batteries has emphasized the need to recover valuable metals from end-of-life batteries. Conventional hydrometallurgical processes achieve high leaching efficiencies but generally require inorganic acids, reducing agents, and additional separation steps. Deep eutectic solvents have attracted attention as alternative leaching media because of their low volatility and metal-coordination ability. In ChCl-OxA DES, OxA functions as both a leaching component and an oxalate source, allowing nickel to be recovered as a sparingly soluble oxalate. As nickel sulfate is an important precursor for Ni-based cathode materials, this study investigated the selective recovery of nickel from NCM811 and its conversion into $NiSO_4 \cdot 6H_2O$.

Materials and Methods

Commercial NCM811 powder was used as the model cathode material. ChCl and $OxA \cdot 2H_2O$ were mixed at a 1:1 molar ratio and stirred at 60℃ and 300 rpm for 30 min. The effects of reaction time, temperature, stirring speed, and solid loading on metal leaching were investigated. After leaching, DMSO was added to reduce the DES viscosity, followed by solid–liquid separation. The recovered precipitate was washed twice with ethanol and dried. The solid products and liquid phases were analyzed by XRD, FE-SEM, ICP-OES, and UV-Vis spectroscopy. The recovered $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$ was calcined at 500°C for 2 h to produce NiO. After dissolution in sulfuric acid, $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ was crystallized using acetone at an O/A ratio of 4 and an addition rate of 5 mL/min.

Results and Discussion

The highest Co and Mn leaching efficiencies were obtained at a reaction time of 60 min and a solid loading of 17 g/L. Leaching was enhanced by increasing the stirring speed and temperature, and nearly complete extraction was achieved at ≥ 400 rpm and 110–120℃. Nickel precipitated as $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$ during leaching, whereas Co and Mn remained predominantly in solution. DMSO reduced the DES viscosity and improved separation of the nickel oxalate precipitate. UV-Vis analysis

*Corresponding author : 홍현선 / hshong@sungshin.ac.kr

showed that Co-Cl complexes were retained in the DMSO-diluted liquid phase. The recovered $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$ was converted into NiO by calcination. Subsequent sulfuric acid dissolution and acetone antisolvent crystallization produced $NiSO_4 \cdot 6H_2O$.

Conclusions

ChCl-OxA DES enabled the selective recovery of nickel from NCM811 as $NiC_2O_4 \cdot 2H_2O$, while Co and Mn mainly remained in solution. DMSO facilitated solid-liquid separation by reducing the DES viscosity. The recovered nickel oxalate was successfully converted into $NiSO_4 \cdot 6H_2O$ through calcination, sulfuric acid dissolution, and acetone antisolvent crystallization. This process provides a potential route for recovering nickel from NCM cathode materials as a reusable battery precursor.

PH-06

NCM811 블랙매스의 침출 거동에 미치는 환원배소의 영향

Effect of Reduction Roasting on the Leaching Behavior of NCM811 Black Mass

김진혁[1], 최상훈[1], 김연우[1], 김지영[1], 박은수[1], 서상윤[1*]
[1]전남대학교 에너지자원공학과

Abstract

The effect of reduction roasting on the sulfuric acid leaching behavior of NCM811 black mass was investigated. Reduction roasting was performed at 300–600 °C for 3 h under an inert (Ar) atmosphere to utilise residual carbon in the black mass as a reductant. X-ray diffraction (XRD) analysis showed that NiO became the dominant Ni-containing phase at 400 °C, whereas metallic Ni formed at temperatures above 500 °C. The product roasted at 400 °C showed the most favorable leaching behavior, with more than 99% of Ni, Co, Mn, and Li leached in 2 M H_2SO_4 at 80 °C within 2 h. These results demonstrate that controlling the roasting temperature is important for enhancing the acid leachability of NCM811 black mass.

Keywords : NCM811 black mass, reduction roasting, sulfuric acid leaching, phase transformation, leaching behavior

Introduction

Spent NCM811 black mass contains Ni, Co, Mn, and Li, but their acid leachability depends on the phase composition of the cathode material. Reduction roasting can convert complex NCM oxides into simpler oxide phases favorable for leaching, whereas excessive reduction produces metallic phases with lower leachability. This study examined how reduction roasting temperature controls phase transformation and subsequent sulfuric acid leaching.

Experimental Procedure

NCM811 black mass generated from a spent lithium-ion battery recycling process was used as the feedstock. Reduction roasting was performed in a muffle furnace at 300, 400, 500, and 600 °C for 3h under inert atmosphere to utilise the residual carbon in the black mass as a reductant. Phase transformations during roasting were predicted by thermodynamic modelling and confirmed by XRD analysis. The roasted products were subsequently leached in 2 M H_2SO_4 at 25, 50, and 80 °C with a pulp density of 10 wt% for up to 4 h. The effects of roasting and leaching temperatures on the dissolution behavior of Ni, Co, Mn, and Li were evaluated.

Results and Discussion

Roasting temperature controlled the phase transformation of NCM811 black mass. At 300 °C, unreacted NCM811 and graphite remained, indicating insufficient conversion. Roasting at 400 °C decomposed the NCM811 phase and produced NiO as the dominant Ni-containing phase, facilitating subsequent acid leaching. XRD analysis confirmed metallic Ni formation at 500 °C and its greater prominence at 600 °C. The product roasted at 400 °C exhibited the highest leachability, with Ni, Co, Mn, and Li showing leaching efficiencies above 99% in 2 M H_2SO_4 at 80 °C within 2 h.

* Corresponding author : 서상윤 / sangyun.seo@jnu.ac.kr

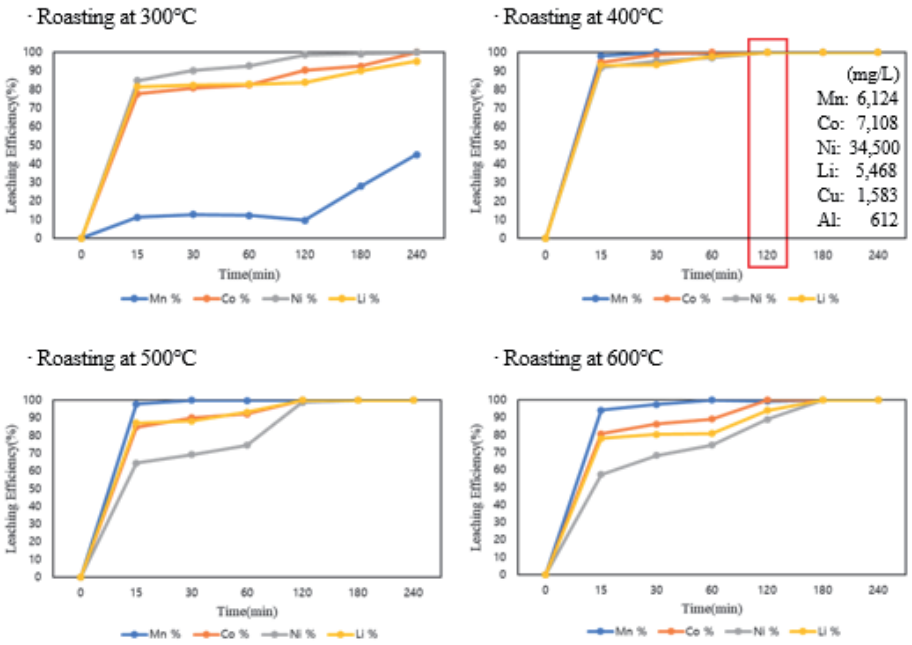


Fig. 1. Leaching behavior of Ni, Co, Mn, and Li from NCM811 black mass roasted at different temperatures.

In contrast, roasting at 500 °C and above decreased the leaching performance of some metals because excessive reduction promoted metallic phase formation. Therefore, 400 °C for 3 h was identified as the appropriate reduction roasting condition for subsequent sulfuric acid leaching.

Conclusions

Diffraction partterns and leaching results demonstrated that phase control during reduction roasting governs the acid leachability of NCM811 black mass. Roasting at 400 °C promoted acid-leachable oxide phases while suppressing excessive metallic Ni formation, enabling more than 99% leaching of Ni, Co, Mn, and Li in 2 M H_2SO_4 at 80 °C within 2 h. These results confirm that 400 °C for 3 h is the effective reduction roasting condition for enhancing the sulfuric acid leachability of NCM811 black mass.

Acknowledgements

This work was supported by R&D Project of the Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation in 2026. (2026-0610-01)

PH-07

망초(Na_2SO_4)자원화를 위한 바이폴라막 전기투석 공정의 2액실 및 3액실 운전 특성 비교

Comparison of Two- and Three-Compartment BMED for Sodium Sulfate Valorization

김준희, 장재혁, 김주희, 박혜인, 안재우*

대진대학교 신소재공학과

최근 탄소중립 및 순환경제 정책이 강화되면서 산업 공정에서 발생하는 폐수와 부산물의 단순 처리보다는 저에너지·고효율 방식의 자원화 기술이 중요해지고 있다. 특히 고농도의 황산나트륨(Na_2SO_4)을 함유한 망초 폐수는 다양한 산업 및 재활용 공정에서 발생하며, 높은 염 농도로 인해 처리 과정에서 상당한 에너지와 비용이 요구될 수 있다. 기존의 증발 농축 및 결정화 공정은 비교적 단순한 공정 구성으로 적용이 가능하지만, 열에너지 소비가 크고 회수된 염의 재활용에도 한계가 있다. 이에 따라 폐수 중 무기염을 직접 유용한 화학물질로 전환할 수 있는 전기화학적 분리 기술이 대안으로 주목받고 있다. 바이폴라막 전기투석(Bipolar Membrane Electrodialysis, BMED)은 바이폴라막에서의 물 해리와 이온교환막을 통한 선택적 이온 이동을 이용하여 황산나트륨으로부터 산과 염기를 생산할 수 있어 망초 폐수의 자원화에 적합한 기술로 평가된다. 또한 BMED는 막의 배열에 따라 2액실 및 3액실 구조로 운전할 수 있으며, 각 시스템은 생성물 농도, 이온 전달 및 에너지 소비 측면에서 서로 다른 특성을 나타낼 수 있다. 따라서 본 연구에서는 망초 자원화를 위한 2액실 및 3액실 BMED 공정을 적용하고, 각 시스템의 운전 특성과 산·염기 생성 성능을 비교하여 효율적인 공정 구성의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

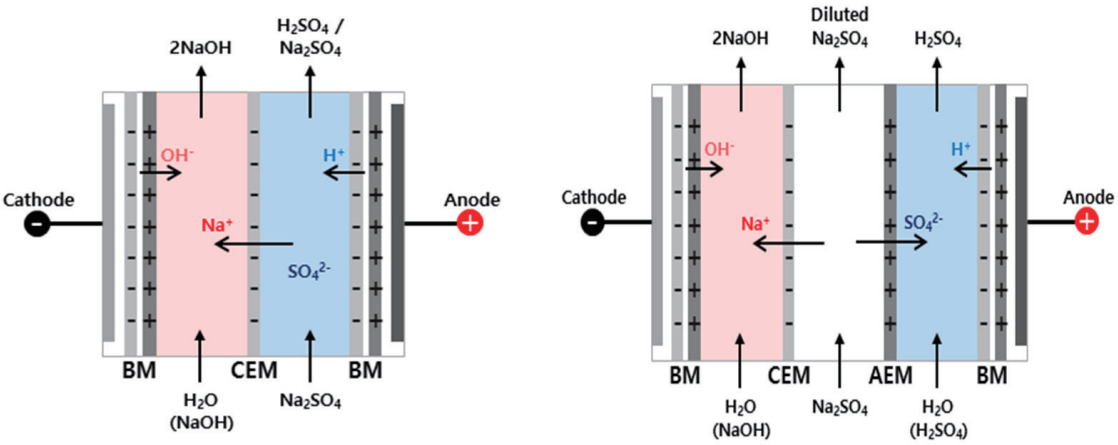


Figure 1. Schematic diagrams of two- and three-compartment BMED configurations.

*Corresponding author : 안재우 / jwahn@daejin.ac.kr

PH-08

아연 옥살산염으로부터 열처리에 따른 결정상 변화에 관한 연구

Study on the Crystalline Phase Changes of Zinc Oxalate according to Heat Treatment

김희선[1], 김대원[1*], 진연호[1]

[1]고등기술연구원 소재부품연구본부

초록

아연 소광 분진(Zinc Fuming Dust)에는 다량의 아연 성분이 함유되어 있어 이로부터 아연을 회수하고 재자원화하는 연구가 진행되고 있다. 이러한 아연 소광 분진에는 ZnO, $ZnFe_2O_4$, Zn_2SiO_4 등의 아연 화합물로 구성되어 있으며, 이로부터 선택적으로 아연을 회수하고자 하였다.

특히 재자원화를 통해 원료로 재사용 될 때, 재자원화 공정이 다량의 폐산, 폐수 또는 유해 가스 등이 발생한다면 환경에 악영향을 초래하므로 환경 부담이 낮은 공정에 관한 기술 개발이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 무기산에 비해 환경 오염이 낮으며, 타 유기산에 비해 경제성이 높은 옥살산을 이용하여 아연을 선택적으로 회수하였다.

회수된 아연 화합물의 경우 XRD 분석 결과 $ZnC_2O_4*2H_2O$ 결정상이었으며, 반응 온도가 증가할수록 회수된 아연 화합물은 짙은 갈색 분말에서 백색에 가까워지는 것으로 확인되었다. 이후 열처리를 통해 산화아연으로 회수하기 위하여 TGA 및 고온 in-situ XRD를 통해 열중량 및 결정상 분석을 진행하였고, in-situ XRD 분석 결과 약 300℃부터 ZnO 결정상이 생성되었고 약 500℃ 이상에서부터 ZnO 단일 결정상으로 상변화 함을 확인할 수 있었다. 특히 $ZnC_2O_4*2H_2O$ 결정상에서 ZnO 결정상으로 변화할 때 중간상이 관측되었으며, 이는 결정수가 탈수된 ZnC_2O_4 결정상으로 판단되었다. 이는 TGA 분석 결과에서 초기 약 200℃ 부근에서 열중량 감소와 DTA 흡열 피크가 관측된 것과 더불어 결정수가 탈수된 것으로 판단하였다. 이후 약 500℃ 부근의 열중량 감소와 DTA 발열 피크가 관측되어 열분해를 통해 결정상이 변화하였음을 확인할 수 있었다. 향후 회수된 산화아연은 분말 특성 평가를 통해 그 순도와 결정성 등을 확인하고자 하였다.

주제어 : 아연 옥살산염, 아연 회수, 고온 in-situ XRD, 결정상

감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 패키지형 RS-2024-0044834).

*Corresponding author : 김대원 / mdsimul@naver.com

PH-09

HF 사용량을 줄인 고순도 흑연 제조를 위한 EDDS 보조 H_2SO_4-HF 공정의 새로운 접근법

Novel approach of EDDS-Assisted H_2SO_4-HF Process for High-Purity Graphite with Reduced HF Consumption

Serin Kang[1,2], Donghyun Kim[1], Jaemin Ahn[1], Sunghyun Bae[1,3], Seungwook Shin[4], Haesung Jeong[2], Yosep Han[1,3*]

[1]Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM),
[2]Department of Chemical Engineering, Changwon National University,
[3]Resources Engineering, University of Science and Technology (UST),
[4]Mineral Resources Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)

Abstract

Graphite is a critical raw material for lithium-ion battery anodes, and battery-grade applications require mineral impurities to be removed from graphite concentrates. Conventional wet purification processes typically employ sulfuric acid (H_2SO_4) and hydrofluoric acid (HF) to dissolve metal oxides and silicate minerals. However, HF is highly toxic and corrosive, raising significant safety and environmental concerns and highlighting the need to reduce its use. This study incorporated ethylenediamine-N,N′-disuccinic acid (EDDS), a biodegradable chelating agent, into an H_2SO_4-HF wet purification process to improve graphite purification and reduce HF use. Purification tests were conducted using H_2SO_4 alone, HF alone, sequential H_2SO_4 and HF treatment, and an EDDS-assisted H_2SO_4-HF process. The carbon purity of the treated graphite was evaluated by thermogravimetric analysis. Sequential H_2SO_4-HF treatment produced a higher level of carbon purity than the individual acid treatments did, whereas the EDDS-assisted process yielded the highest level of carbon purity of all the tested conditions. This improved performance was attributed to enhanced mineral impurity removal through acid dissolution and EDDS-mediated chelation. These results suggest that EDDS-assisted purification could be an effective method for producing high-purity graphite, reducing HF consumption, and improving the environmental compatibility of conventional chemical purification processes.

Keywords : High-purity Graphite; purification; EDDS; green chelating agent; HF consumption

Introduction

Natural graphite requires the removal of metal-bearing and silicate impurities for use in lithium-ion battery anodes. Conventional H_2SO_4–HF purification is effective but relies on highly toxic and corrosive HF. This study incorporated the biodegradable chelating agent EDDS into the conventional process and compared total carbon contents under different treatment conditions to assess its potential to improve purification efficiency and reduce HF use.

Materials and Methods

Natural graphite concentrate from Gyeongsangbuk-do was produced by crushing and multistage flotation and contained 74.96% total carbon based on TGA. Purification was conducted using 10 g of graphite in 200 mL of solution at 80 ℃ and 550 rpm for 2 h per step. The reagents were 5 M H_2SO_4, 1 M HF, and 0.246 M trisodium EDDS. Five processes were compared: HF (P1), H_2SO_4–HF (P2), EDDS–HF (P3), H_2SO_4–EDDS–HF (P4), and EDDS–H_2SO_4–HF (P5). After each step, the samples

*Corresponding author : Yosep Han / yosep@kigam.re.kr

were filtered, washed, and dried, and their total carbon contents were measured by TGA.

Results and Discussion

As shown in Fig. 1, the total carbon contents were 93.16% for P1, 95.60% for P2, 94.25% for P3, 96.69% for P4, and 96.19% for P5. P4 (H_2SO_4–EDDS–HF) achieved the highest value, indicating that EDDS treatment following H_2SO_4 can improve natural graphite purification. Further optimization of the HF and EDDS concentrations is required to assess the potential for reducing HF use.

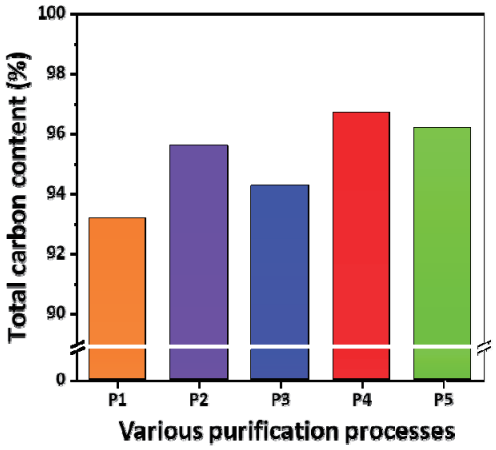


Fig. 1. Total carbon content of graphite obtained from different purification processes: P1, HF process; P2, H_2SO_4–HF process; P3, EDDS–HF process; P4, H_2SO_4–EDDS–HF process; and P5, EDDS–H_2SO_4–HF process.

Conclusions

In this study, the biodegradable chelating agent EDDS was incorporated into a wet purification process for natural graphite, and the total carbon contents obtained from different purification processes were compared. The total carbon content was 93.16% after HF treatment alone and increased to 95.60% after H_2SO_4–HF treatment. The EDDS-assisted H_2SO_4–EDDS–HF process achieved the highest total carbon content of 96.69%. These results confirmed that EDDS can contribute to improving the purification efficiency of natural graphite. Further optimization of the HF and EDDS concentrations is required to establish process conditions that reduce HF consumption while maintaining purification performance.

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) under Grant No. RS-2022-KP002763 (20227A10100040), and by the Basic Research Project of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (GP2025-031, 26-3222).

PH-10

저농도 리튬 함유 폐액으로부터 불화리튬 회수를 위한 반응 특성 연구

Reaction Characteristics of Lithium Fluoride Recovery from Low-Concentration Lithium-Containing Wastewater

임정현[1], 한수진[1], 이창제[1], 우재현[1], 신준호[1], 류태공[2], 유재춘[1*]

[1]㈜세중이에스, [2]한국지질자원연구원

초록

이차전지 제조 및 재활용 과정에서 발생하는 저농도 리튬 함유 폐액을 전해질 원료로 자원화하기 위해서는 불화리튬 회수 및 고순도화 기술이 필요하다. 기존 탄산리튬 침전법은 저농도 용액에서 사전 농축이 요구될 수 있어 공정 부담이 발생한다.
이에 불화리튬 회수를 위한 반응 몰비 및 pH에 따른 침전 특성을 평가하였다. F 몰비 증가에 따라 Li 회수율은 향상되었으나 잔류 F 농도도 증가하였으며, 중성에서 약알칼리성 영역에서 Li 회수율이 높게 나타났다. 따라서 리튬 회수율과 잔류 불소를 함께 고려한 몰비 및 pH 설정이 필요하다.

주제어 : 리튬폐액, 불화리튬, 침전, 반응조건, 자원화

서론

이차전지 제조 및 재활용 과정에서 발생하는 저농도 리튬 함유 폐액의 자원화는 유가자원의 손실을 줄이고 소재 원료의 공급원을 확대한다는 점에서 중요하다. 기존 탄산리튬 침전법은 저농도 용액에서 회수 효율을 확보하기 위해 농축 공정이 요구되므로 저농도 폐액에 적용 가능한 대체 회수공정의 검토가 필요하다.
불화리튬(LiF)은 이차전지 전해질인 $LiPF_6$의 제조 원료로 활용되어, 폐액 내 리튬을 불화리튬으로 회수하는 것은 폐액 처리와 소재 생산을 연계하는 자원화 방안이 될 수 있다. 다만 전해질 원료로 활용하기 위해서는 침전 회수조건의 확립과 후속 불순물 제어 및 고순도화가 필요하다. 이에 본 연구에서는 저농도 리튬 함유 폐액을 대상으로 F 몰비와 반응 pH에 따른 침전 특성을 평가하고, 여액의 Li 및 F 농도 변화를 비교하여 불화리튬 회수공정 개발을 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 저농도 리튬 함유 폐액과 불산 용액을 사용하여 불화리튬 침전실험을 수행하였다. 원료 및 주요 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 모든 실험에는 동일한 리튬 함유 폐액을 사용하였으며, 상온에서 200 rpm으로 3시간 동안 교반하였다. pH 조절에는 25% NaOH 수용액을 사용하였다.
몰비의 영향을 평가하기 위하여 F/Li 몰비를 0.6-1.2 범위에서 변화시켰으며, 각 조건의 최종 pH는 6.05-6.11이었다. pH의 영향은 F/Li 몰비를 1.0:1.0으로 고정하고 목표 pH를 6-11 범위에서 평가하였다. 반응 후 고액분리한 여액의 F와 Li 농도를 각각 이온크로마토그래피(IC)와 유도결합플라스마 분석법(ICP-OES)으로 분석하고, 조건별 회수율 및 잔류 농도를 비교하였다.

*Corresponding author : 유재춘 / jcryu@sejoonges.co.kr

Table 1. Raw materials and experimental conditions for lithium fluoride precipitation.

Parameter	Material or Condition
Lithium source	Li : 2,170 mg/L, Li-containing wastewater
Fluorine source	F : 60,820 mg/L, Hydrofluoric acid solution
pH-adjusting reagent	25% NaOH solution
Reaction temperature	25 ℃
Reaction time	3 h
Stirring speed	200 rpm

결과 및 고찰

F/Li 몰비 및 반응 pH에 따른 Li 제거율과 잔류 F 농도를 Fig. 1에 나타내었다. F/Li 몰비가 0.6에서 1.0으로 증가함에 따라 Li 제거율은 57.9%에서 77.6%로 증가하였으나, 몰비 1.2에서는 79.4%로 나타나 당량 이상에서 추가 투입에 따른 증가 폭이 감소하였다. 반면 잔류 F 농도는 몰비 1.0에서 1,957 ppm, 몰비 1.2에서 2,743 ppm으로 증가하였다. 이는 불소 투입량을 증가시키는 것만으로는 Li 제거율을 크게 개선하기 어려우며, 잔류 불소의 후속 처리부하를 함께 고려하여 투입 몰비를 선정할 필요가 있음을 보여준다.

F 몰비를 1.0으로 고정한 pH 실험에서는 목표 pH 7-9에서 80.9–81.9%의 Li 제거율을 나타냈다. 목표 pH 7 조건에서 Li 제거율이 가장 높았으며, 잔류 Li와 F 농도는 각각 350 ppm과 1,691 ppm으로 실험조건 중 가장 낮았다. 반면 목표 pH 10–11에서는 Li 제거율이 76.44–76.68%로 감소하여, pH 증가가 Li 제거율 향상으로 이어지지는 않았다. 따라서 본 실험 범위에서는 pH 7-9 영역이 불화리튬 회수에 유리한 것으로 판단된다.

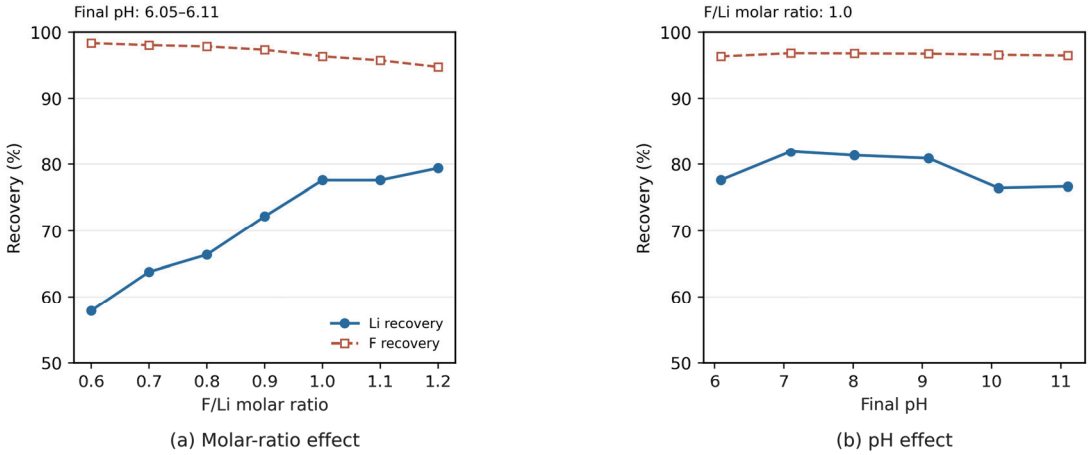


Fig. 1. Effects of (a) F/Li molar ratio and (b) final pH on Li removal efficiency and residual F concentration. Final pH in (a): 6.05–6.11; F/Li molar ratio in (b): 1.0.

결론

저농도 리튬 함유 폐액으로부터 불화리튬을 회수하기 위하여 F:Li 몰비 및 반응 pH에 따른 침전 특성을 평가하고, 반응조건에 따른 Li 및 F 회수율을 비교하여 불화리튬 회수공정 개발을 위한 기초자료를 확보하였다.

PH-11

아연 함유 2차 자원의 습식 침출 반응 속도론 연구 동향

Study on the Hydrometallurgical Leaching Kinetics of Zinc-Bearing Secondary Resources

김대원[1*], 김희선[1]

[1]고등기술연구원 소재부품본부

초록

아연 함유 산업부산물은 전기로 분진, 아연 소광 분진, 아연 제련 잔사 등 다양한 형태로 발생하며, 아연과 철이 복합 상으로 공존하여 습식 침출 거동이 복잡하게 나타난다. 특히 자유 산화아연은 비교적 빠르게 용해되는 반면, 아연페라이트는 대표적인 난침출 상으로 작용하여 전체 반응속도와 지배 단계를 결정하는 핵심 인자이다.

본 논문은 아연 함유 산업부산물의 습식 침출 반응속도론 연구를 대상으로, 시료 특성, 용액계, 반응 메커니즘, 수축핵 모델 및 확장 모델의 적용 사례를 체계적으로 정리하고, 활성화에너지와 반응차수 해석의 한계를 비판적으로 고찰하였다. 문헌 분석 결과, 산성 침출계에서는 표면 화학 반응 지배, 생성층 확산 지배, 혼합 지배가 모두 보고되었으며, 이는 시료 내 산화아연과 아연페라이트의 상대적 분율, 철의 재침전, 생성층 형성 여부에 크게 좌우되었다. 알칼리 침출계는 자유 산화아연의 선택적 용출에 유리하지만 페라이트 우세 분율이 잔류하여 전체 반응이 조기에 정체되는 경우가 많았고, 최근에는 유기산, 초음파, 전처리 연계 공정을 포함한 복합 시스템에서 혼합 지배 해석이 증가하는 경향을 보였다. 또한 산업부산물은 다상성, 다공성, 응집성 및 입도 분포의 비이상성 때문에 단일 수축핵 모델식만으로 해석하기 어려우며, 비선형 회귀, 잔차 분석, 상 분석, 시간 분해 잔사 분석을 결합한 다면적 접근이 필요함을 확인하였다.

주제어 : 아연 함유 2차 자원, 아연페라이트, 습식 침출, 반응 속도론, 활성화 에너지

참고 문헌

[1] Kim, D.W., Jin, Y.H., Kim, H.S., et al., 2026 : Review on recent research trends in zinc leaching and iron separation from zinc-containing industrial by-products using wet leaching processes, Resour. Recycl., 35, pp.3-21.

[2] Kim, H.S., Jin, Y.H., Kim, S.W., et al., 2026 : A Study on the Complex Formation and Selective Separation of Zinc and Ironaccording to Oxalic Acid Concentration from Zinc Fuming Dust, Resour. Clean Technol., 32, pp.137-145.

감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 패키지형 RS-2024-0044834)

*Corresponding author : 김대원 / mdsimul@naver.com

PH-12

NCM 블랙매스 메탄설폰산 침출액의 반용매 결정화 거동에 대한 용액 조성의 영향

Effect of Solution Composition on Antisolvent Crystallization Behavior of Methanesulfonic Acid Leachates from NCM Black Mass

박은지[1], 박현수[1], 김현중[1*]
[1]한양대학교 자원환경공학과

Abstract

Methanesulfonic acid (MSA) has been investigated as an alternative lixiviant for the recycling of spent lithium-ion batteries (LIBs). However, metal recovery from MSA leachates has not been extensively studied. In this study, antisolvent crystallization was applied to MSA leachates from NCM black mass to recover valuable metals. Because antisolvent crystallization is induced by a decrease in the solubility of the solute upon antisolvent addition, the solution composition prior to antisolvent addition may affect the crystallization behavior. Therefore, this study investigated the antisolvent crystallization behavior of Ni, Co, and Mn, with particular focus on the effect of solution composition.

Leachates of different compositions were prepared by varying the MSA concentration and solid-to-liquid (S/L) ratio, followed by evaporative concentration prior to antisolvent crystallization. As shown in Fig. 1, no crystallization of Mn was observed for any leachate, whereas Ni and Co showed relatively high metal recovery. Metal recovery increased with increasing S/L ratio and was further enhanced by evaporative concentration for the 0.5 M MSA leachates. However, different crystallization behaviors were observed depending on the MSA concentration. At an S/L ratio of 100 g/L, the 1 M and 2 M MSA leachates had comparable metal concentrations but substantially different metal recovery. The differences in their Raman spectra may reflect differences in solution speciation and help explain the observed crystallization behavior. These results suggest that changes in solution chemistry, in addition to total metal concentration, may contribute to the observed antisolvent crystallization behavior.

Keywords : Spent LIBs, Leaching, Antisolvent crystallization, Methanesulfonic acid, Solution composition

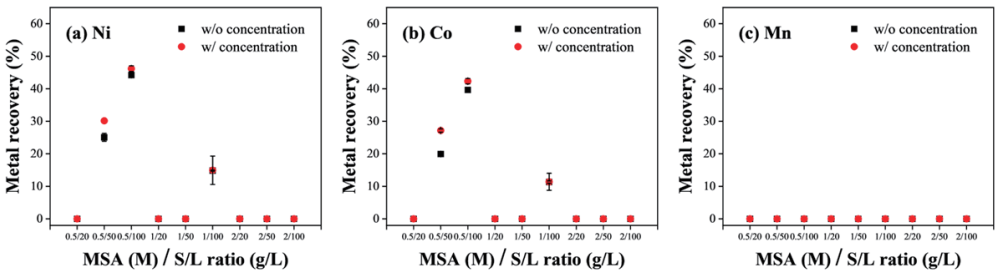


Fig. 1. Metal recovery of (a) Ni, (b) Co, and (c) Mn as a function of solution composition.

Acknowledgments

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00406500 and RS-2024-00458682).

*Corresponding author : 김현중 / kshjkim@hanyang.ac.kr

PH-13

열분해 조건에 따른 NCM계 블랙매스의 금속 침출 거동

Effect of Pyrolysis Conditions on Metal Leaching Behavior of NCM-Type Black Mass

박소휘[1], 김현중[1*]

[1]한양대학교 자원환경공학과

Abstract

With the rapid growth of electric vehicles, the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries (LIBs) has become increasingly important. In hydrometallurgical recycling, polyvinylidene fluoride (PVDF) poses a challenge because it can hinder metal leaching. High-temperature pyrolysis is effective for PVDF removal but increases energy consumption and off-gas treatment burdens. Therefore, the effect of residual PVDF after low-temperature pyrolysis needs to be understood. This study evaluated changes in residual PVDF and sample characteristics with pyrolysis temperature and investigated the leaching behavior of Ni, Co, and Mn. The raw and 300 °C pyrolyzed samples showed similar PVDF content, specific surface area, and mesopore volume, as well as similar leaching efficiencies without the addition of H_2O_2. However, when 2 vol% H_2O_2 was added, the 300 °C pyrolyzed sample showed higher leaching efficiency than the raw sample. In contrast, the 500 °C pyrolyzed sample showed lower PVDF content, higher specific surface area and mesopore volume, and higher leaching efficiency than the raw and 300 °C pyrolyzed samples under most conditions. However, with the addition of 8 vol% H_2O_2, the differences in leaching efficiency among the samples decreased. These results indicate that residual PVDF and sample characteristics vary with pyrolysis temperature, and their effects on metal leaching depend on the leaching conditions.

Keywords : Lithium-ion battery recycling, NCM, leaching, pyrolysis, polyvinylidene fluoride

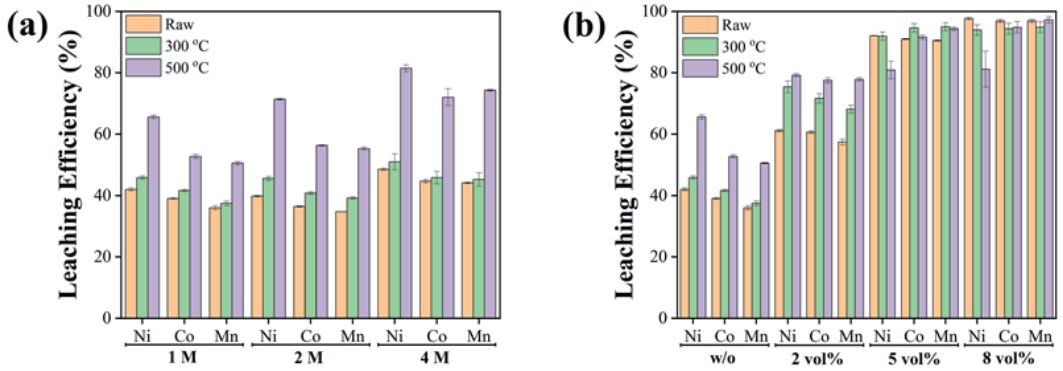


Fig. 1. Leaching efficiencies of Ni, Co, and Mn from black mass under different pyrolysis conditions at varying concentrations of (a) H_2SO_4 without H_2O_2 addition and (b) H_2O_2 in 1 M H_2SO_4.

Acknowledgements

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00458682) and the Basic Science Research Program through the NRF grant funded by the Ministry of Education (RS-2025-25424067).

*Corresponding author : 김현중 / kshjkim@hanyang.ac.kr

PH-14

Cu 및 Zn 제련 부산물로부터 Te 회수 및 scorodite 형성을 통한 As 안정화 사례 연구

A literature review on tellurium recovery and arsenic stabilization as scorodite from copper and zinc smelting by-product

안준모*, 김현주, 임채린, 박찬희, 원정환
전북대학교 자원에너지공학과

초록

본 연구는 Cu 및 Zn 제련 부산물에서 Te를 회수하고 As를 scorodite 형태로 안정화하는 사례를 문헌 기반으로 검토하였다. 제련 부산물은 Te, Se, Ag 등 유가금속을 포함하지만 유해원소인 As가 함께 존재해 자원 회수와 환경 관리를 동시에 고려해야 한다. Te(IV)는 대체로 HCl 침출액으로부터 용매추출이 진행되었으며, TTC, N-n-OCA, TBP, TIOA 등 추출제를 이용하여 약 99% 이상의 회수율을 보였다. 또한, 산 농도와 탈거 조건이 선택적 분리에 중요하였다. As는 pH, 온도, 압력, Fe/As 몰비 조절을 통해 scorodite로 고형화되었으며, 강산성 조건에서 96.77-98.5%의 침전율과 낮은 TCLP 용출 농도를 나타냈다. 이는 Te 회수와 As 안정화를 연계한 공정이 제련 부산물의 자원화와 환경 위해성 저감에 효과적임을 시사한다.

주제어 : Cu and Zn smelting by-products, Tellurium recovery, Arsenic stabilization, Scorodite, Solvent extraction

서론

동 및 아연 제련 부산물에 함유된 텔루륨(Te), 셀레늄(Se), 은(Ag) 등의 유가금속은 반도체·태양전지·촉매 산업에서 수요가 급증하는 핵심 소재로서, 안정적인 원료 확보를 위한 회수가 필수적으로 요구된다. 그러나, 부산물 내 유가금속의 품위는 낮은 반면, 유독성 원소인 비소(As)가 다량 공존한다. 따라서, 텔루륨 회수와 비소의 안정화의 연계를 위한 통합적 접근이 요구된다. 본 연구에서는 Te를 선택적으로 회수하는 용매추출 공정과 As를 안정한 scorodite ($FeAsO_4 \cdot 2H_2O$) 형태로 고형화하는 문헌 사례를 종합적으로 검토하였다.

문헌연구 결과 및 고찰

Te 용매추출 사례를 조사하였으며, 이에 대한 결과는 Table 1에 제시되어있다. Te 용매추출 시 대체로 HCl 침출액 대상 추출연구가 진행되었다. TTC(2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride), N-n-OCA(N-n-octylcyclohexylamine), TBP(Tri-n-butyl phosphate) 및 TIOA(Tri-iso-octylamine)를 사용하여 Te 추출률 약 99%를 달성하였다. 특히 HCl 농도 조절을 통해 Se와 Te의 선택적 분리가 가능하였다. 추출 후에는 물, NH_4Cl 및 HCl 등을 이용해 Te를 약 99%이상으로 탈거하였다. 따라서, 대체로 Te 용매추출을 통한 회수는 염산기반 침출액에서 수행되었고, 추출제의 종류와 침출액 내 HCl 농도에 따라 Te 추출 개선 및 Te/Se 분리가 가능하였다.

비소의 Scorodite 침전 사례 비교 결과를 Table 2에 제시하였다. 반응 조건(온도, pH, 압력, Fe/As 몰비)에 따라 비소 침전율과 TCLP(Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 용출 농도가 유의미한 차이를 보였다. As_2O_3, 구리제련분진(CSD, Copper Smelting Dust)+황화비소잔사(ASR, Arsenic Sulfide Residue), Lead slime 등은 강산성(pH 0.5~1.0)과 Fe/As 몰비 1.0~1.3 조건에서 96.77~98.5%의 높은 침전율과 0.5mg/L 이하의 낮은 TCLP 용출을 달성했다. 반면 온화한 조건(pH 3.0~4.0, Fe/As 1.5)의 Anode slime계 원료는 78~88.5%의 침전율과 2.0mg/L 이하의 잔류 농도를 나타내어, pH와 압력 제어가 비소 고형화 성능 및 용출 안정성을 결정하는 핵심 변수임을 확인했다.

*Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

Table 1.추출제별 Te(IV)의 용매추출 및 탈거 조건 비교

추출제	희석제	침출액 조성	추출조건	추출률	탈거	Ref
0.2%(w/v%) 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride (TTC)	Kerosene	Te(IV): 10 mg/L, Se(IV): 10 mg/L in 2 M KBr, 1M H_2SO_4,	O/A=1 single-stage extraction	Te(IV): 99.4% co-extraction: Hg(II): 92.3%, Sb(III): 50.5%, As(III): 45.4%	Te: 99.4% in DI water Se: 99.2% in Sodium hypobromite	Ramesh and Subramanian, 1998
0.05 M N-n-octylcyclohexylamine (N-n-OCA)	Dichloromethane (DCM)-Xylene (1:4)	Se(IV): 16mg/L, Te(IV): 2mg/L, Se: 0.6 M HCl Te: 7.0 M HCl	O/A=0.4 single-stage extraction	Se(IV), Te(IV): >99%	7M ammonia Te: 99.6% Se: 99.7%	Jagatap et al., 2013
30 vol%(v/v)Tri-n-butyl phosphate (TBP)	Kerosene	Te(IV): 0.5 g/L, 4.5 M HCl	O/A=1 상온 three-stage extraction	Te(IV): 99.5%	20%(W/v) NH^4Cl Te: 99.56%	Li et al., 2014
33.9x10.$_3$ M Tri-iso-octylamine (TIOA)	Xylene	Te(IV):0.078 mmol/L 2.5 M HCl	O/A=1 30°C single-stage extraction	Te(IV): 99.5%	0.1M HCl Te: 99.5%	Mandal et al., 2004

Table 2. 원료별 Scorodite 침전 반응 조건 및 고형화 제거 성능 비교

원료 (비소 함량)	반응 온도 (℃)	반응 시간 (h)	반응 압력	침전 pH	Fe/As 몰비	침전율 (%)	TCLP tests (As 용출률)	Ref
As_2O_3(비소 화합물) (74.92 g/L (1.0M))	80	6	상압	0.5	1.0	98	-	Ahn et al., (2022)
CSD/ASR (15.26/25.8 wt%) (용액: 11.86 g/L)	150	2	pO_2 1 MPa	0.85	1.1	96.77	0.17 mg/L	Zhang et al., (2023)
Lead slime (33.47 wt%, 용액: 37.18 g/L)	160	2	2.5 MPa	1.0	1.3	98.5	< 0.5 mg/L	Li et al., (2021)
Anode slime 계 (5.62 wt%, 용액: 10~16.5 g/L)	80~95	5	상압 공기	3.0~4.0	1.5	78~88.5	< 2.0 mg/L	Min et al., (2015) / Chen et al., (2018)

결론

사례 연구를 통해 Cu, Zn 제련부산물 내 유가금속 텔루륨의 용매추출 사례와 비소의 안정화를 위한 Scorodite 침전 사례 연구를 수행하였다. 텔루륨 용매추출은 대체로 염산계 침출액으로부터 진행되었으며, 음이온계 추출제를 이용하여, >99%의 Te 추출률을 확보하였다. 또한, 비소의 Scorodite 침전은, 대체로 산 조건(pH<4.0)에서 Fe/As >1.0, >80℃ 고온 조건에서 수행되었다. 이를 토대로, 제련부산물의 무해화와 유가금속 회수 동시 수행을 위해 통합 연계 공정 개발이 중요하다.

사사

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2026-25547331)

PH-15

폐리튬이온전지 음극재 조금속으로부터 고순도 구리 회수를 위한 다전극 전해채취 공정 연구

A Study on the Multi-Electrode Electrowinning Process for Recovering High-Purity Copper from Spent LIB Anode Crude Metal

박성철[1], 한승연[1], 김용환[1], 정찬엽[1,2], 김재환[1,3], 김민서[1,4], 이아름[5], 손성호[1*]

[1]한국생산기술연구원, [2]인하대학교 신소재공학과, [3]고려대학교 신소재공학부, [4]인하대학교 화학공학과, [5]성일하이텍㈜

초록

폐리튬이온전지 음극재를 건식제련공정으로 확보한 조금속 분말로부터 고순도 구리를 회수하기 위하여 음극 3장과 양극 4장으로 구성된 다전극 전해채취 공정을 연구하였다. 조금속 분말을 2 M 황산 용액에 침출하여 98.4 %의 구리 침출률로 전해액을 확보하였으며, 40 ℃, 50 ㎃/㎠ 조건에서 다전극 전해채취를 수행하였다. 그 결과 평균 전류효율 99 % 이상과 음극 3장 모두 99.99 wt.% 이상의 구리 순도를 확보하여 다전극 전해채취 공정의 적용 가능성을 확인하였다.

주제어 : 폐리튬이온전지, 전해채취, 전해정련, 초고순도, 구리

서론

폐리튬이온전지 음극재에는 집전체로 사용된 구리 포일이 다량 함유되어 있으므로 고순도 구리 회수 원료로 활용 가능하다. 건식제련공정으로 확보한 구리 조금속은 흑연과 일부 불순 금속이 제거된 상태이나, 양극재에서 유입된 니켈, 코발트, 철 등이 잔류하므로 조금속을 양극으로 사용하는 전해정련 또는 조금속 분말을 황산 침출한 후 전해채취하는 공정을 통해 고순도화가 요구된다. 이러한 전해 공정을 실제 규모로 확대할 경우 하나의 전해조에 다수의 음극과 양극을 교대로 배치하여 운전하게 되므로, 단일 셀에서 확보한 공정 조건이 다전극 구성에서도 유지되는지 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 건식제련으로 확보한 조금속 분말을 황산 침출한 후 음극 3장과 양극 4장으로 구성된 전해조에서 전해채취를 수행하여, 음극별 전류효율과 구리 순도를 평가하고 다전극 전해채취 공정의 적용 가능성을 검토하였다.

재료 및 실험방법

건식제련으로 확보한 분말을 왕수에 용해한 후 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy)를 이용하여 구리, 니켈, 코발트, 망간, 알루미늄, 철에 대한 농도를 분석하였다. 분말을 2 M 황산 용액에 침출하여 제조한 구리 용액을 전해액으로 사용하였으며, 침출액 내 구리 및 불순금속 농도를 분석하였다. 전해채취는 음극 3장과 양극 4장을 동일한 간격으로 교대로 배치한 전해조에서 40 ℃, 50 ㎃/㎠ 조건으로 수행하였으며, 음극 위치에 따른 전착 특성 차이를 비교하였다. 전해 후 음극별 전착량으로부터 전류효율을 산출하였으며, 전착된 구리의 순도 및 불순금속 함량을 분석하였다.

결과 및 고찰

건식제련으로 확보한 분말은 약 99.5 % 구리와 니켈, 코발트, 철, 알루미늄 등 미량의 불순 금속을 함유하고 있었으며, 2 M 황산 침출 결과 98.4 %의 구리 침출률을 나타내었다. 침출액 내 구리 농도는 약 49.0 g/L이었으며, 니켈, 코발트, 철 등 불순금속은 각각 20 ㎎/L 이하로 낮은 수준을 나타내었다. 음극 3장과 양극 4장을 배치한 전해조에서 전해채취를 수행한 결과, 평균 전류효율은 99 % 이상으로 나타났으며 음극 위치에 따라 전류효율에 다소 차이를 보였다. 전착된 구리의 순도는 음극 3장 모두 99.99 wt.% 이상이었으며, 불순금속은 니켈 최대 0.0068 wt.%, 철 0.002 wt.% 이하, 코발트 0.0002 wt.% 이하로 니켈이 주요 잔류 불순물로 나타났다. 이로부터 단일 셀에서 확보한 전해 조건이 다전극 구성에서도 유지되며, 음극 수를 늘린 경우에도 전류효율과 구리 순도가 목표 수준으로 확보됨을 확인하였다.

*Corresponding author : 손성호 / shson@kitech.re.kr

결론

건식제련으로 확보한 폐리튬이온전지 음극재 조금속 분말을 2 M 황산 용액에 침출하여 98.4 %의 구리 침출률을 확보하였으며, 음극 3장과 양극 4장을 배치한 전해조에서 40 ℃, 50 ㎃/㎠ 조건으로 전해채취를 수행한 결과 평균 전류효율 99 % 이상과 99.99 wt.% 이상의 구리 순도를 확보하였다. 음극 위치에 따라 전류효율에 차이가 나타났으나 모든 음극에서 목표 순도를 만족하여, 단일 셀에서 확보한 전해 조건이 다전극 구성에서도 유효함을 확인하였다.

사사

본 연구는 2026년도 중소벤처기업부의 중소기업기술혁신개발(R&D)사업 지원에 의한 연구임 [RS-2023-00276821]

PH-16

황산배소 및 수침출 기반 폐 반응용기로부터 리튬 회수 효율 평가

Investigation of Lithium Recovery Efficiency from Waste Box Saggar by Sulfation and Water Leaching Method

김혜인[1], 조형준[1,2], 유가연[1,2], 구은주[1], 장한권[1], 류태공[1*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]충남대학교 응용화학공학과

초록

본 연구에서는 양극재 제조공정에서 폐기물로 발생하는 폐 반응용기(Waste Box Saggar, WBS)에 함유된 Li 성분 재활용 방법으로 폐 반응용기 파/분쇄 후 분말을 원료물질로 사용해 황산배소 및 수침출 공정을 적용하여 WBS/황산 용액 비와 황산 농도에 따른 Li 및 Al의 침출 특성을 조사하였다. 그 결과, Li의 침출률은 WBS(g)/황산(L) 용액 비율이 1,000인 조건에서 황산 용액 몰농도가 3M 이상일 때 90% 이상으로 나타났으며 WBS/황산 용액 비율이 높아질수록 Li 침출률이 감소하는 것으로 관찰되었다. Al의 침출 농도는 WBS/황산 용액 비율이 증가할수록 감소하였으나 황산 몰농도가 증가함에 따라 Al 침출 농도가 증가하는 경향을 나타냈다.

주제어 : 리튬, 폐 반응용기, 황산배소, 수침출

서론

최근 전기자동차(EV) 및 에너지저장장치(ESS)의 보급 확대에 따라 리튬이온배터리(LIBs)의 수요가 증가하면서 양극재 생산량 또한 지속적으로 증가하고 있다. 양극재 제조 과정에서 사용되는 반응용기인 Box Saggar는 고온 소성 과정에서 양극재 원료물질인 수산화리튬이 Box Saggar 내부로 침투 및 반응하여 부식되며, 양극재 오염 문제로 인해 일정 기간 사용 후 폐기되고 있는 상황이다. 향후 양극재 생산량 증가에 따라 폐 Box Saggar(WBS)의 발생량도 증가할 것으로 예상되며 Li를 함유한 폐기물인 폐 반응용기(Waste Box Saggar)의 재활용 기술의 중요성이 높아질 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 WBS에 함유된 Li 재활용 방법으로 황산배소 및 수침출 공정을 적용하여, WBS/황산 용액 비와 황산 농도에 따른 Li 및 Al 침출 특성을 조사하고, 2차 열처리 온도에 따른 Al 침출 억제 가능성을 확인하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 양극재 제조공정에서 발생한 WBS를 파/분쇄한 분말(<2mm)을 대상으로 황산배소 및 수침출을 통한 Li 회수 실험을 수행하였다. 황산배소 반응은 WBS/황산 용액 비를 1,000-4,000 g/L 범위로 조절하고, 황산 농도를 변화시켜 수행하였다. 이때 황산배소는 Box furnace를 이용하여 300 ℃에서 1시간 동안 대기 분위기하에 진행하였으며, 승온 속도는 2.5 ℃/min으로 설정하였다. 배소된 시료는 상온에서 고/액비 100 g/L 조건으로 탈이온수와 혼합 후 4시간 동안 교반시켜 수침출 반응을 진행하였으며 반응 후 샘플을 여과하여 여액 내 Li 및 Al의 함량은 ICP-OES로 분석하였다. 또한 Al의 침출을 제어하기 위해 WBS/황산 용액 비 3,000 g/L, 황산 농도 9M 조건에서 황산배소한 시료를 대상으로 25-800 ℃에서 4시간 동안 2차 열처리를 수행하였다. 2차 열처리의 승온 속도는 10 ℃/min으로 설정하였으며, 2차 열처리 후 상온에서 고/액비 100 g/L 조건에서 수침출하였다.

결과 및 고찰

폐 반응용기 분말의 황산배소 및 수침출 결과, WBS/황산 용액 비에 따른 Li 침출률은 전반적으로 90% 이상을 나타냈다.

*Corresponding author : 류태공 / tgryu@kigam.re.kr

WBS/황산 용액 비가 1,000 g/L 조건에서는 황산 농도가 증가함에 따라 Li 침출률이 증가하였으며, 황산 농도 3M 이상에서는 약 99%를 유지하였다. WBS/황산 용액 비가 2,000-4,000 g/L 조건에서도 90% 이상의 Li 침출률이 관찰되었다. Al의 경우, 황산 농도가 증가함에 따라 침출 농도 또한 증가하는 경향을 나타냈으나, WBS/황산 용액 비가 증가할수록 Al 침출 농도는 감소하는 경향이 확인되었다. 2차 열처리 온도에 따른 수침출 결과, Li 침출률은 90% 이상으로 유지되었으며, 열처리 온도가 증가함에 따라 Al의 침출 농도는 700 ℃에서 0.42 mg/L까지 감소하여 Al의 침출을 억제할 수 있었다.

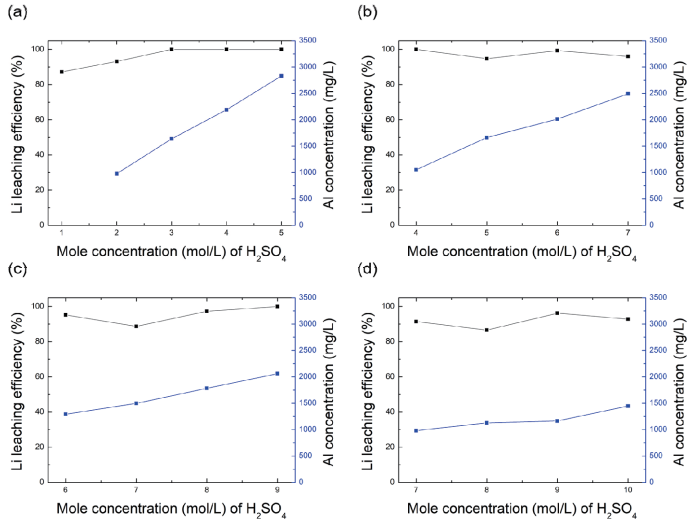


Fig. 1. Effect of H_2SO_4 concentration on Li leaching efficiency and Al concentration at different WBS/H_2SO_4 solution ratios: (a) 1,000 g/L, (b) 2,000 g/L, (c) 3,000 g/L, and (d) 4,000 g/L

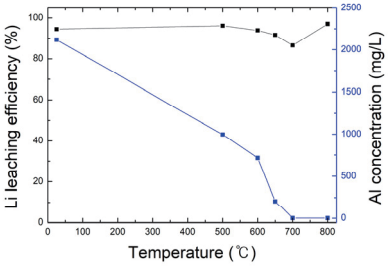


Fig. 2. Effect of secondary heat treatment temperature on Li leaching efficiency and Al concentration

결론

본 연구에서는 WBS로부터 Li를 회수하기 위해 황산배소 및 수침출 공정을 적용하였다. WBS/황산 용액 비와 황산 농도에 따른 Li 및 Al의 침출 특성을 비교한 결과, Li 침출률은 90% 이상으로 나타났으며, WBS/황산 용액 비가 증가함에 따라 Al 침출 농도는 감소하는 경향을 확인하였다. 또한 2차 열처리를 적용한 결과, Li 침출률을 90% 이상 유지하면서 Al 침출 농도를 0.42 mg/L까지 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

사사

본 연구는 산업통상부의 지원(소재부품기술개발사업 패키지형 과제)을 받아 수행한 과제입니다(No.20024238).

PH-17

NCM 조성에 따른 무환원제 황산 침출계에서의 LFP-NCM 혼합 양극재 침출 영향 연구

Effect of NCM Composition on the Synergistic Leaching of Mixed LFP-NCM Cathode Materials in a Reductant-Free Sulfuric Acid System

박찬희[1], 안준모[1]*

전북대학교 자원 · 에너지공학과

초록

폐리튬이온배터리(LIB) 발생량 급증에 따라 LFP와 삼원계(NCM) 혼합 폐배터리의 통합 처리 기술이 요구된다. 본 연구는 NCM 환원 침출에 요구되는 외부 환원제(H_2O_2 등)를 대체하고자, LFP 유래 Fe^{2+}를 내부 환원제로 활용한 무환원제 황산 침출계에서 NCM 조성(NCM111, NCM622) 및 침출 인자(교반 속도, 산 농도, 온도)의 영향을 규명하였다. 침출 실험 결과, NCM111, NCM622 두 조성 모두 4 h에서 Ni·Co 침출률 92% 이상을 달성하였다. NCM111은 0.5 시간 내 Ni, Co 침출률 77.1%, 76.4%로 원활한 시너지 침출을 보였으나, NCM622의 경우 동 시간대 Ni, Co 침출률 40%, 50.5% 기록하였다. 이는 교반 속도를 450 rpm에서, 750 rpm, 산 농도를 0.5 M에서 2.0 M, 온도를 25℃에서 80℃로 증가함에 따라 개선되었다.

주제어 : LFP(LiFePO4), NCM(LiNiCoMnO2), 혼합 양극재, 습식제련, 침출, Sulfuric acid

서론

EV·ESS 시장 확대와 폐배터리 발생량 급증에 따라, LFP와 삼원계(NCM) 양극재가 혼합된 스크랩의 통합 처리 기술이 요구되고 있다. 이들의 재활용을 위한 황산 기반 습식제련에서 NCM 환원 침출은 과산화수소 등 외부 환원제가 필수적이며 비용 및 고온 분해 등의 한계가 존재한다. 반면 LFP와 NCM을 동시 처리할 경우, LFP 유래 Fe^{2+}가 NCM의 고산화 전이금속(Ni^{3+}, Co^{3+}, Mn^{4+})을 환원시켜 외부 환원제 없이 침출이 가능하다. 또한, 다양한 배터리 조성을 하나의 공정에서 처리함으로서, 공정 통합화도 가능할 것으로 기대된다. 하지만, 기존 연구들은 특정 NCM 조성에 국한되어, LFP-NCM 혼합 침출 시 NCM 조성에 따른 침출 영향 비교가 부족하다. 이에 본 연구에서는 NCM 조성(NCM111, NCM622)에 따른 침출 거동, 주요 침출 인자(교반 속도, 산 농도, 온도)의 영향, 그리고 Fe 이온 거동을 통한 시너지 메커니즘을 해석하였다.

재료 및 실험방법

LFP 및 삼원계(NCM111 또는 NCM622) 양극활물질 각 1 g을 혼합한 총 2 g의 시료를 100 mL 황산 수용액에 투입 후 자석 교반기를 이용하여 침출 실험을 수행하였다. 실험의 기본 조건은 황산 농도 0.5 M, 침출 온도 80℃, 교반 속도 450 rpm, 광액 농도(Pulp density) 20 g/L로 설정하였다. 침출 인자에 따른 거동을 확인하기 위해 교반 속도(450-750 rpm), 산 농도(0.5-2.0 M), 온도(25-80℃)를 독립적으로 변화시키며 실험을 진행하였다.

침출액은 0.5, 1, 2, 4 h에 채취하여 ICP-OES(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer)로 원소 농도를 분석 후 침출률을 계산하였다. 또한, 시료 내 Fe^{2+} 농도는 1,10-페난트롤린 발색법(510 nm)을 이용하여 정량하였으며, 총 철(Total Fe) 농도와의 차감을 통해 Fe^{3+} 농도를 산출하였다.

결과 및 고찰

침출 실험 결과, Ni·Co는 NCM 양극활물질 조성별로 뚜렷한 차이를 나타내었다. NCM111은 0.5 h 내에 Ni·Co 침출률이 80% 이상인 반면, NCM622는 0.5 h에 Ni 43.6%, Co 55.8%를 달성하였다. 4 h에 각각 97.4%, 99.4%의 최종 침출률을 기록하였다. 이는 NCM622의 높은 Ni^{3+} 비율로 인해 Fe^{2+}의 환원 반응이 초기 침출의 율속으로 작용한 결과로 사료된다.

* Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

LFP-NCM622 혼합계에서 침출률 개선을 위해, 교반 속도를 450에서 750 rpm으로 증가시킨 결과, 0.5 h Ni 침출률이 약 12%p, Co가 약 11%p 향상되었다. 또한, 산 농도를 0.5에서 2.0 M으로 증가시킨 결과, 0.5 h Ni 침출률은 약 18%p, Co가 약 19%p 증가하였다. 침출 온도는 25℃에서 80℃로 증가시킨 결과, 4 h Ni, Co 침출률이 NCM111은 각각 약 7%p, 8%p, NCM622는 약 43%p, 37%p 향상되었다.

LFP 유래 Fe^{2+} 환원제 사용 여부 확인을 위해 UV-Vis 분석 결과, LFP-NCM111 계는 전 시점에서 Fe^{3+}/Fe^{2+} 비율이 1.1~1.2 수준으로 유지되었다. 반면, LFP-NCM622 계는 Fe^{2+}가 지배적으로 존재하는 경향($Fe^{3+}/Fe^{2+} \approx 0$)이 관찰되었으며, 4 h 시점에서만 Fe^{3+}가 일부 검출되었다. 이는 NCM111의 높은 Co^{3+} 비율로 인해 Fe^{2+}의 환원 반응이 NCM622에 비해 우세하게 작용한 결과로 사료된다.

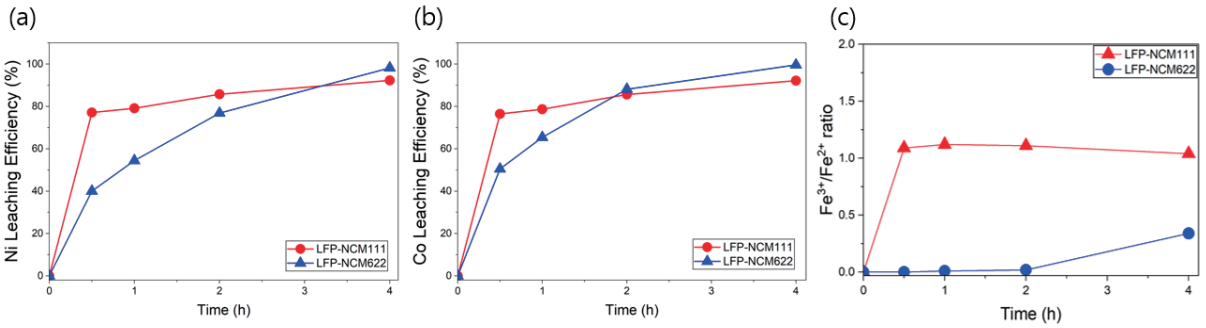


Fig.1 Leaching efficiencies of LFP-NCM mixed systems in 0.5 M H_2SO_4: (a) Ni, (b) Co, and (c) Fe^{3+}/Fe^{2+} ratio (80℃, 450 rpm, pulp density 20 g/L)

결론

LFP–NCM 혼합 양극재의 무환원제 황산 침출에서 NCM 조성은 Ni·Co 침출 거동과 Fe^{3+}/Fe^{2+} 산화·환원에 영향을 미쳤다. LFP-NCM111은 초기부터 원활한 침출 반응을 보였으나, LFP-NCM622는 초기 반응 지연이 관찰되었다. 따라서, 동 조건에서 교반 속도, 황산 농도, 침출 온도 증가를 통해 침출률이 개선되었다. 또한, 외부 환원제 없이 LFP로부터 발생한 Fe^{2+}에 의해 두 조성 모두 Ni·Co 침출률 ~99% 도달이 가능하였다.

사사

이 연구는 2026년도 과학기술정보통신부 및 연구개발특구진흥재단 연구비 지원에 의한 연구임(‘RS-2025-25444020’)

PH-18

국내 극저품위 Ni 함유 광석의 자원화를 위한 FeNi 슬래그 내 Ni 용해 거동의 열역학적 평가

Thermodynamic evaluation of Ni dissolution in FeNi slag for the utilization of domestic ultra-low-grade Ni-containing ore

김동우[1,2], 허정호[1,2*]

[1]한국지질자원연구원(KIGAM) 자원순환연구센터, [2]과학기술연합대학원대학교(UST) 자원공학

초록

본 연구에서는 저품위 니켈(Ni) 광석의 페로니켈 제련 공정 적용 시 발생할 수 있는 슬래그 조성 변화가 슬래그 내 Ni 용해도에 미치는 영향을 평가하였다. CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량 2-6wt%로 변화시킨 결과, 각 성분의 함량 증가에 따라 Ni 분배비(L_{Ni}=(%NiO)/[%Ni])는 증가하고, NiO 활동도 계수(γ_{NiO})는 감소하였다. Initial MgO/SiO_2(M/S)가 0.3→0.7로 증가함에 따라 L_{Ni}는 U-curve를 보였으며, γ_{NiO}는 ∩-shape을 보였다. 따라서 저품위 Ni 광석 활용 시 슬래그 내 불순물 함량과 M/S의 제어가 Ni의 슬래그 손실을 저감하기 위한 주요 인자로 판단된다.

주제어 : 저품위 Ni광석, 불순물, MgO/SiO_2, 니켈 용해도, 열역학

서론

니켈(Ni)은 이차전지 산업의 핵심 원료로서 수요가 지속적으로 증가하고 있으며[1], 이에 따라 안정적인 Ni 공급원 확보를 위해 기존 고품위 원료뿐만 아니라 저품위 Ni 광석의 활용 가능성을 검토할 필요가 있다. 국내 안동 지역에서 발견된 사문석(Serpentine; 약 0.2-0.3%Ni)과 같은 저품위 Ni 광석의 활용 방안 중 하나로써 페로니켈 (FeNi) 제련 공정 내 기존 Ni 원료 대체 재로서 일부 투입하는 방안을 고려할 수 있다. 그러나, 저품위 Ni 광석을 공정에 일부 투입할 경우, 원료 조성 변화에 따라 슬래그 조성이 변하며, 결국 슬래그 내 Ni 용해도에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 저품위 Ni 광석의 활용 가능성 평가를 위해 슬래그 조성 변화가 Ni 용해도에 미치는 영향을 열역학적으로 규명할 필요가 있다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 저품위 Ni 광석 활용에 따른 슬래그 조성 변화를 모사하고자 주요 불순물인 CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량을 2, 4, 6%로 제어하였고, MgO/SiO_2 (Initial M/S)를 0.7, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3으로 조절하였다. 실험은 수퍼 칸탈 수직 저항로를 이용하였으며, MgO 도가니에 Fe-22%Ni 합금 30g과 슬래그 18g을 넣고 이를 로내 장입하였다. M/S 조성비에 따른 실험에서는 M/S=0.7-0.4 조건에서는 MgO 도가니를, M/S=0.3 조건에서 SiO_2 도가니를 사용하였다. 고순도 Ar 분위기 하 1550℃에서 24시간 동안 실험을 진행하였으며, 이후 신속하게 샘플을 급냉하였다. 확보된 샘플들의 조성 및 상을 분석하기 위해 ICP-OES, XRF 및 XRD 분석을 실시하였다. 또한, FactSage™8.3을 활용하여 열역학 계산을 병행하였다.

결과 및 고찰

CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량이 증가함에 따라 Ni 분배비는 증가함을 확인하였으며, 해당 산화물들의 증가에 따라 NiO의 활동도 계수는 (γ_{NiO}) 감소하는 경향을 보였다 (그림 1(a)). 초기 M/S가 0.3→0.7로 증가함에 따라 L_{Ni}은 약 M/S≈0.6-0.7을 기점으로 하여 U-curve를 보였으며, γ_{NiO}는 ∩-shape을 보였다. (그림 1(b)). Cristobalite (SiO_2) 포화 조건 (초기 M/S=0.3)을 제외한 조건들은 실험 후 Olivine ($[Mg, Fe]_2SiO_4$) 포화 조건이며, MgO 도가니로부터 MgO 용출에 의해 M/S≈0.6-0.7 수준으로 수렴하였다. Cristobalite 포화 조건과 Olivine 포화 조건에서의 슬래그 내 Ni의 이온 거동이 다르게 보고되어 있으며[2], 두 조건 모두 $\log L_{Ni}$의 변화는 MgO 활동도($\log a_{MgO}$)에 영향을 받음을 열역학적 상관관계를 통해 확인하였다. 결론적으로 사문석으로부터

*Corresponding author : 허정호 / jungho.heo@kigam.re.kr

CaO, Al_2O_3, 및 Cr_2O_3의 유입을 최소화하고, M/S ≈ 0.6-0.7 수준을 확보하여 슬래그로의 Ni 손실을 최소화하는 것이 중요하다.

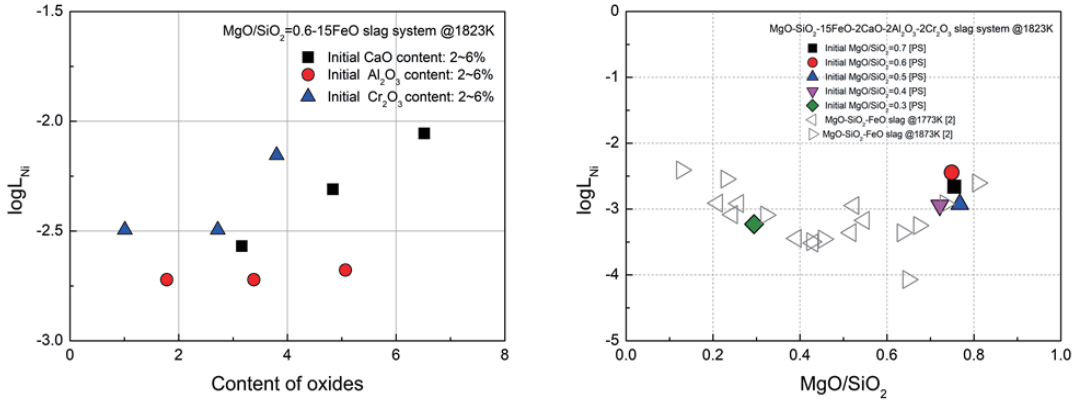


fig 1. (a) Effect of CaO, Al_2O_3, and Cr_2O_3 contents on $logL_{Ni}$ (b) Effect of MgO/SiO_2 ratio on $logL_{Ni}$

결론

저품위 Ni 광석 자원화에 따른 슬래그 조성 변화가 슬래그 내 Ni 용해도에 미치는 영향을 열역학적으로 평가하였다. CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량 및 M/S 변화에 따라 L_{Ni}이 변함을 확인하였으며, 이는 γ_{NiO}와 a_{MgO}와의 열역학적 관계를 바탕으로 이해할 수 있었다. 즉, 저품위 광석으로부터 유입되는 CaO, Al_2O_3 및 Cr_2O_3 함량을 최소화하고, 동시에 M/S를 적절히 제어하는 것이 Ni 손실 저감에 중요할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] E. Urtnasan, A. Kumar, and J.P. Wang: Trans. Indian Inst. Met., 2024, vol. 77, no. 9, pp. 2293−2302.

[2] J.G. Park, H.S. Eom, W.W. Huh, Y.S. Lee, D.J. Min, and I. Sohn: Steel Res. Int., 2011, vol. 82, no. 4, pp. 415−421.

사사

본 연구는 과학기술정보통신부 재원으로 한국지질자원연구원 기본사업(GP2023-004)의 지원을 받아 수행되었습니다.

PH-19

침출제 종류에 따른 IGZO 타겟 공정 부산물 내 금속 침출 거동 비교

Comparison of Metal Leaching Behavior in IGZO Target Process By-products According to Leaching Agent Type

안낙균[1], 김대원[1], 류철희[1], 김하준[1], 이광희[1*]

[1]고등기술연구원 소재부품연구본부

초록

갈륨(Ga)은 디스플레이용 IGZO(Indium-Gallium-Zinc Oxide) 타겟을 비롯하여 반도체 및 광전자 산업에 활용되는 핵심 소재로, 국내 수요의 상당 부분을 해외 공급망에 의존하고 있어 안정적인 원료 확보와 재자원화 기술 개발의 필요성이 증가하고 있다. 특히 IGZO 타겟 제조 공정에서 발생하는 폐타겟 및 공정 부산물에는 Ga와 함께 In, Zn 등의 유가금속이 함유되어 있어, 이를 회수하여 원료로 재투입할 경우 자원순환 및 공급망 안정화 측면에서 높은 활용가치를 갖는다. 따라서 타겟 공정 부산물로부터 유가금속을 효율적으로 회수하기 위해서는 후속 분리·정제 공정에 적합한 침출 조건을 확립하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 IGZO 타겟 제조 공정 부산물을 대상으로 침출제 종류 및 주요 공정 조건에 따른 Ga, In, Zn의 침출 거동을 비교하였다. 침출제로는 염산(HCl), 질산(HNO_3), 황산(H_2SO_4) 및 수산화나트륨(NaOH)을 사용하였으며, 각 침출제의 농도 변화에 따른 금속별 침출 특성을 조사하였다. 또한 HCl 침출계에서는 산 농도뿐만 아니라 반응온도 및 고액비를 변화시켜 공정 조건이 Ga, In, Zn의 침출에 미치는 영향을 평가하였다. 침출 후 용액 내 금속 농도를 분석하여 각 조건에서의 금속 침출률을 산출하고, 침출제 종류와 공정 조건에 따른 금속별 용출 특성 및 선택성을 비교하였다.

이를 통해 IGZO 타겟 공정 부산물에 함유된 유가금속의 침출 거동을 파악하고, Ga 및 In 회수·정제를 위한 적정 침출계 선정과 후속 분리·정제 공정 설계를 위한 기초자료를 확보하고자 하였다. 본 연구 결과는 향후 IGZO 타겟 공정 부산물로부터 Ga 및 In을 회수하여 고순도 소재로 재자원화하는 순환형 공정 구축에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : IGZO target, 갈륨, 인듐, 침출, 자원 재활용

*Corresponding author : 이광희 / ghlee@iae.re.kr

PH-20

황산염 배소산물 중 리튬침출에 미치는 탄산리튬형성의 영향

Effect of Lithium Carbonate Formation on Leaching from Srlfate-Roasted Products

임동연[1], 유경근[1*]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과

초록

리튬이온전지 재활용 공정에서 리튬의 선택적 회수는 공정 효율 및 경제성 확보를 위해 매우 중요하다. 기존 공정에서는 황산(H_2SO_4)과 과산화수소(H_2O_2)를 이용한 침출이 주로 활용되고 있으나, 환원제 대체 및 공정 내 부산물의 재활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 배터리 재활용 과정에서 다량 발생하는 황산소듐(Na_2SO_4)을 황산염 배소 공정에 재활용하여 리튬을 선택적으로 회수하는 기술이 주목받고 있다. 이에 본 연구에서는 사용 전 NCM 811 양극재에 Na_2SO_4와 탄소(흑연)를 첨가하여 황산염 배소를 수행하고, Na_2SO_4 첨가량, 배소 온도, 흑연 투입량 및 배소 분위기가 수침출 과정에서 리튬 침출 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 배소 실험은 Muffle Furnace와 Tube Furnace에서 수행하였으며, 배소 후 수침출을 진행하여 ICP-OES로 침출률을 분석하였다. 또한 배소 산물 및 침출 잔사는 XRD를 이용하여 상 분석을 수행하였다. 수침출은 70 ℃, 60 min, 400 rpm 조건에서 수행하였다. 연구 결과 Na_2SO_4와 흑연을 동시에 첨가한 조건에서 높은 리튬 침출률을 나타냈다. Air 분위기에서는 Na_2SO_4 6당량, 흑연 1 g, 800 ℃ 배소 조건에서 96.04%의 리튬 침출률을 달성하였다. 대부분의 리튬은 침출 15분 이내에 침출되었으며, Ni, Co 및 Mn은 침출되지 않아 리튬의 선택적 회수가 가능함을 확인하였다. XRD 분석 결과 배소 산물에서 $LiNaSO_4$와 Li_2CO_3가 확인되었다. 또한 흑연 투입량이 증가함에 따라 리튬 침출률이 증가하여 흑연 1 g에서 최대값을 나타냈으며, 이후 리튬 침출률이 감소하는 경향을 보였다. Ar 분위기에서는 흑연 투입량이 증가함에 따라 리튬 침출률이 향상되었으며, 흑연 2.5 g을 첨가한 조건에서 최대 98.76%의 리튬 침출률을 나타냈다. 동일한 흑연 투입량에서 Air와 Ar 분위기의 리튬 침출률에 차이가 나타났으며, 이를 통해 탄소 첨가량뿐만 아니라 배소 분위기도 리튬 침출 거동에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 수침출 후 잔사를 $Ca(OH)_2$용액으로 재침출한 결과, 흑연 투입량이 증가함에 따라 잔사로부터 추가적으로 침출되는 리튬의 양이 증가하는 경향을 나타냈다. 이상의 결과로부터 Na_2SO_4를 이용한 NCM 811의 황산염 배소에서 흑연 첨가 및 배소 분위기에 따라 리튬의 침출 거동이 변화하며, 적절한 흑연 투입량과 배소 분위기 조절을 통해 높은 리튬 선택적 침출률을 얻을 수 있음을 확인하였다.

주제어 : NCM, 황산소듐(Na_2SO_4), 흑연(C), 황산염 배소

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업의 지원으로 수행되었습니다. 지원해주신 관계자 분들게 감사드립니다.

* Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr

PH-21

LIB 블랙매스 중 Al 불순물 제거를 위한 세멘테이션 후 자력선별공정개발

Development of Cementation Followed by Magnetic Separation for the Removal of Al Impurities from LIB Black Mass

조민정[1], 유경근[1*]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과

초록

저가 전기차 수요 증가에 따라 리튬인산철($LiFePO_4$, LFP) 배터리 사용량이 급증하면서, 대량으로 발생할 폐배터리에 대응할 재활용 기술 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 폐 LFP 배터리는 방전과 해체, 파분쇄 등의 전처리 과정을 거쳐 LFP 양극재와 흑연 음극재가 섞인 블랙매스로 회수되는데, 이때 양극 집전체로 사용된 알루미늄 포일 조각이 함께 혼입되는 문제가 생긴다. 혼입된 알루미늄은 이후 침출 공정에서 산과 반응해 산 소모를 늘리고 용액 내 불순물로 작용해 Li과 같은 유용 금속 회수 효율을 떨어뜨리므로, 침출 전 단계에서 이를 선택적으로 제거하는 기술이 필요하다. 이에 본 연구에서는 세멘테이션과 자력선별을 연계한 공정으로 블랙매스 내 알루미늄 포일을 선택적으로 제거하는 방법을 검토하였다. Fe^{2+}가 알루미늄과 산화·환원 반응을 일으켜 표면에 철로 환원·석출되면서 비자성이던 알루미늄 포일이 자성을 띠게 되고, 이를 자력선별로 걸러내는 원리이다. $FeCl_2$ 농도(0.1, 0.5, 1 M), pH(2.5~5.5), 반응 시간(30분, 60분), 알루미늄 포일 크기(2×2 mm, 5×5 mm)를 달리해가며 반응 특성을 살펴본 결과 대부분의 조건에서 99% 이상의 알루미늄 회수율을 나타냈고, 그중 0.5 M FeCl2·30분·5×5 mm 조건에서 알루미늄 용해율이 가장 낮게 나타났다. 아울러 세멘테이션 반응을 좌우하는 요인이 Fe^{2+} 농도인지 Cl^- 농도인지를 확인하기 위해 $FeCl_2$와 NaCl을 병행 사용해 두 이온의 농도를 독립적으로 조절하는 실험도 추가로 진행하였다. 이를 통해 세멘테이션 후 자력선별을 LFP 블랙매스에 적용하여 알루미늄 포일을 선택적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 리튬인산철 배터리, 블랙매스, 알루미늄 포일, 세멘테이션, 자력선별

감사의 글

본 과제는 산업통상부(MOTIR)와 한국산업기술기획평가원(KEIT) 과제 '사용 후 배터리로부터 블랙매스의 고효율 회수 및 공정부산물 고부가가치화를 위한 재활용 전처리공정/장비 구축(00432727)' 일환으로 수행되었습니다.

*Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr

PH-22

PC88A를 이용한 Tb 및 Dy의 선택적 용매추출 분리 특성

Selective separation of Tb/Dy by PC88A

이종락[1,2], 신동주[1,2*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]과학기술연합대학원대학교 자원공학

초록

전기자동차(EV) 구동모터 및 풍력발전 터빈 등에 사용되는 Nd-Fe-B 영구자석 제조공정 중 고온의 환경에서 보자력 및 자기적 특성을 향상시키기 위해 중희토류 원소인 테르븀(Tb)과 디스프로슘(Dy)을 첨가하며, 특히 이들 원소를 자석 표면으로부터 확산시키는 결정립계 확산 공정이 활용되고 있다. 이러한 공정에서 Tb, Dy은 단순 혼합물 형태가 아닌 요구되는 특성과 용도에 따라 분리·정제된 원료를 사용하므로, 두 원소를 선택적으로 분리·회수하는 기술의 확보가 중요하다. 그러나 Tb와 Dy는 이온반지름 및 전하밀도 등 화학적 성질이 매우 유사하여 서로 분리하기 어렵기 때문에, 두 원소간 미세한 추출 거동 차이를 통해 효과적인 선택적 분리 공정의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 산성 유기인계 추출제인 PC88A를 이용한 용매추출을 적용하여 Tb와 Dy의 선택적 분리 특성을 조사하였다. PC88A 농도, HCl 농도, O/A 비율, 비누화도 등에 따른 Tb와 Dy의 추출 거동을 비교하고, 분배비, 분리계수를 통해 선택적 분리 가능성을 평가하였다. 또한 McCabe-Thiele diagram을 통해 Tb와 Dy의 선택적 추출을 위한 조건별 이론 단수를 측정하고 최적 O/A 비율을 선정하였다. 선정된 조건에서 batch test를 수행하여 실제 추출 성능을 비교·검증하였다. PC88A 0.2 M, O/A 비 1.2, 비누화 20%, 향류 4단 추출을 진행하였을 때 Tb 31.18%, Dy 70.85% 추출 되었다. 향후에는 Dy의 순도를 향상시키기 위해 공동추출된 Tb를 선택적으로 제거하는 세정 공정을 수행할 예정이다.

주제어 : 테르븀, 디스프로슘, 용매추출, PC88A, 선택적 분리

사사

본 연구는 과학기술정보통신부의 전략연구사업 "희토류 가공 K-플랜트 핵심장비 개발 사업" (과제번호: 2710110522)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding author : 신동주 / skysjd77@kigam.re.kr

PH-23

알칼리 바나듐(V)용액으로부터 $VOSO_4$ 합성을 위한 화학적 환원 및 침전

Chemical Reduction and Precipitation for $VOSO_4$ Synthesis from Alkaline Vanadium(V) Solution

장익제, 이만승*
국립목포대학교 신소재공학과

초록

V(V) 함유 알칼리 용액으로부터 $VOSO_4$를 제조하기 위해 Na_2SO_3를 이용한 환원 및 NaOH에 의한 침전거동을 조사하였다. Na_2SO_3 첨가량, pH 및 반응시간을 변화시켜 V(V)의 효과적인 환원 조건을 선정하였다. 그 결과, 반응시간 8시간 이상에서 V(V)가 효과적으로 V(IV)로 환원되었으며, NaOH를 이용하여 $VO(OH)_2$를 침전 및 회수할 수 있었다. 회수된 침전물을 황산 용액에 용해 및 결정화하여 $VOSO_4$ 고체를 제조할 수 있었다.

주제어 : 바나딜 황산염($VOSO_4$), 바나듐(V), 화학적 환원, 침전, 결정화

서론

바나듐은 다양한 산화상태와 우수한 산화·환원 특성을 지니고 있어, 바나듐 레독스 흐름 배터리(VRFB)의 전해질로 활용되고 있다. 이는 빠른 충전, 높은 비에너지 및 경제성으로 인해 차세대 에너지 저장장치로 주목받고 있으며, 이에 따라 전해액 원료인 바나딜 황산염($VOSO_4$)의 수요도 증가하고 있다. 기존 $VOSO_4$는 고순도 V_2O_5를 고온에서 농황산과 반응시켜 제조하므로 에너지 소비가 크다. 따라서 V(V) 함유 용액으로부터 $VOSO_4$를 직접 제조하는 공정은 에너지 절감 측면에서 유리하다. 이에 본 연구에서는 Na_2SO_3를 환원제로 사용하여 V(V)를 V(IV)로 환원한 후, 결정질 $VOSO_4$를 회수하기 위한 연구를 수행하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 V(V)를 함유한 모사 용액은 NH_4VO_3를 NaOH 용액에 용해하여 제조하였다. V(V)의 환원에는 Na_2SO_3를 사용하였고, 용액의 pH 조절, $VO(OH)_2$ 침전 및 $VOSO_4$ 제조에는 황산과 NaOH를 사용하였다.

결과 및 고찰

Na_2SO_3를 이용한 V(V)의 환원 거동을 조사한 결과를 Fig. 1에 나타냈다. 그 결과, 반응시간이 증가함에 따라 V(V)는 V(IV)로 점차 환원되었으며, 반응시간 8시간 이상에서 효과적인 환원 반응이 나타났다. 또한 Na_2SO_3/V(V) 몰 비와 pH를 변화시킨 결과, 적절한 조건에서 V(V)의 환원이 효과적으로 나타났다. 이후 환원된 V(IV) 용액에 NaOH를 첨가하여 $VO(OH)_2$를 침전 및 회수하였으며, 회수된 침전물은 황산 용액에 용해한 후 결정화하여 $VOSO_4$ 고체로 제조하였다.

* Corresponding author : 이만승 / mslee@mokpo.ac.kr

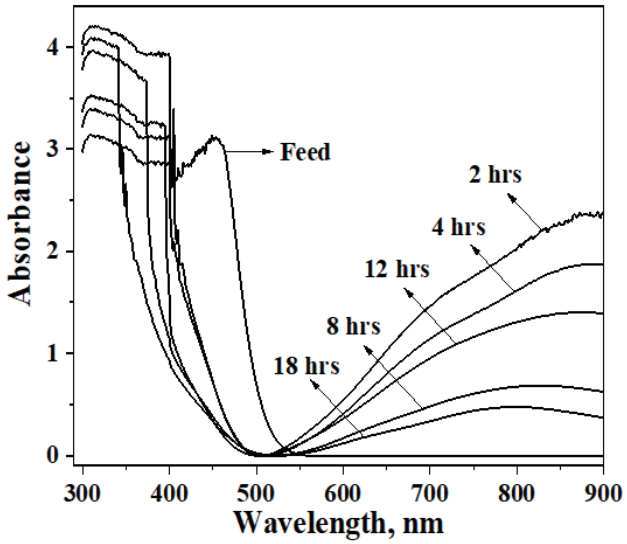


Fig. 1. Effect of reaction time on V(V) reduction using Na_2SO_3.

결론

Na_2SO_3를 이용한 환원과 NaOH에 의한 침전을 통해 V(V)함유 알칼리 용액으로부터 바나듐을 효과적으로 회수할 수 있었다. 또한 회수된 침전물을 황산 용액에 용해 및 결정화함으로써 $VOSO_4$를 제조할 수 있었다.

PH-24

NCM622의 메탄설폰산-말릭산 혼합 유기산 침출액 대상 D2EHPA 기반 용매추출을 통한 유가금속 회수 연구

Recovery of Valuable Metals from Methanesulfonic–Malic Acid Leachate of NCM622 via D2EHPA-Based Solvent Extraction

이진영[1], 하금단[1], 김유진[1], 이소미[1], 변재원[1*]

[1]서울과학기술대학교 신소재공학과

초록

전기차 및 전자기기 시장 확대에 따른 리튬이온배터리(Lithium-ion battery, LIB) 수요 급증은 폐 LIB 발생량의 증가로 이어지고 있다. 폐 LIB에 함유된 핵심광물의 공급 불안정 문제를 해결하고 부적절한 폐기로 말미암은 환경오염 문제를 개선하기 위해 폐배터리 재활용 기술 개발은 필수적이다. 본 연구는 폐 LIB의 습식제련 공정에서 무기산의 환경 문제를 개선하고자 친환경 유기 침출제를 활용하였다. 메탄설폰산(Methanesulfonic acid, MSA)과 말릭산(Malic acid, MA)을 결합한 MSA-MA 혼합 침출액을 대상으로 용매추출을 진행하였다. 이후 D2EHPA를 이용한 용매추출에서 비누화도 0%, 40%에서의 Mn의 추출 효율과 분리계수를 비교하여 Mn 추출을 위한 최적 조건을 도출하였다.

주제어 : 양극재 재활용, 메탄설폰산, 침출, 용매추출, D2EHPA

서론

전기차 및 ESS(Energy Storage System) 산업의 확대로 폐리튬이온배터리(폐LIB) 발생량이 증가함에 따라 핵심 광물의 공급 불안정 문제와 환경오염 문제를 해결하기 위한 폐배터리 재활용이 중요한 과제로 떠오르고 있다. 본 연구에서는 기존 무기산 기반 습식제련 공정의 부식성 및 유해가스 배출 문제를 개선하고자, 낮은 pKa를 갖는 메탄설폰산(methanesulfonic acid, MSA)과 우수한 킬레이션 능력을 지닌 말릭산(malic acid, MA)을 결합한 MSA-MA 혼합 침출액을 활용하여 NCM622 양극재를 침출하였다. 이후 유기인산 추출제 D2EHPA(di(2-ethylhexyl) phosphoric acid)를 이용한 용매추출을 수행하였고, 비누화도에 따른 Mn의 추출 효율과 분리계수($\beta_{Mn/Co}$)를 비교하여 유가금속의 선택적 분리·회수 가능성과 Mn 회수를 위한 최적 조건을 규명하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 MSA-MA 유기산 기반 혼합 침출 시스템을 기반으로 최적 조건(2.4 M MSA, 0.6 M MA, 고액비 80 g/L, 80°C, 1시간)에서 NCM622로부터 유가금속을 침출한 후, D2EHPA 20vol%를 케로신(Kerosene)에 희석한 유기상을 사용하여 용매추출을 수행하였다. 용매추출 전후 수용액 층상 내 금속 농도는 원자흡광분광기(Atomic absorption spectrometer)를 통해 측정하여 pH에 따른 추출 효율을 산출하였다. 이어서 각 pH 조건에서 코발트에 대한 망간의 분리계수를 비교하였다. 또한, 용매추출에서 pH를 안정적으로 유지하고 유가금속 추출 효율을 높이기 위해 비누화를 수행하였다. 비누화도(Saponification degree)는 10(mol/L) NaOH를 이용하여 40%로 조절하였다.

결과 및 고찰

MSA-MA 유기산 기반 침출 용액으로부터 유가금속을 회수하기 위해 D2EHPA를 추출제로 이용한 용매추출을 수행하였다. 비누화를 수행하지 않았을 때의 용매추출 실험 결과, Mn이 86.25% 추출되어 Mn에 대한 우수한 선택성을 보였다. 해당 조건

*Corresponding author : 변재원 / byeonjw@seoultech.ac.kr

의 pH 3.47에서 Mn/Co 분리계수가 103.73으로 최대치를 나타내어 해당 지점이 Mn의 선택적 추출을 위한 최적 pH임을 확인하였다. 비누화도 40% 조건에서 용매추출 실험을 진행했을 때 pH 3.48에서 Mn 95.97% 추출되었다. 해당 pH에서 Mn/Co 분리계수가 58.88로 산출되어 분리계수가 다소 낮은 수치를 보였는데, 이는 Co가 30% 이상 공추출되었기 때문으로 추정된다. 따라서 향후 실험에서 비누화도 40%를 유지하되, 추출제(D2EHPA) 농도, O/A 비율 등을 조정하여 Mn에 대한 선택성을 높이고 추출 효율을 최대화할 수 있는 지점을 찾을 예정이다. 이후 O/A 비율을 1:10에서 10:1 범위로 설정하여 등온추출실험을 진행하고, McCabe-Thiele diagram을 작성하여 Mn 추출을 위한 최적의 이론적 추출 단수를 산출할 예정이다.

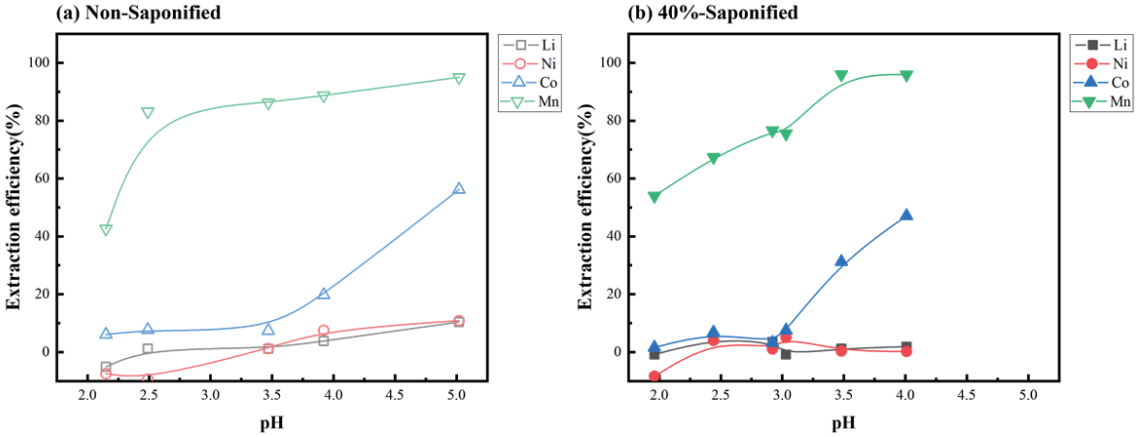


Fig. 1. Effects of pH on Mn extraction efficiency in solvent extraction ([D2EHPA] = 0.6 M, O/A = 1)

결론

유기산인 메탄설폰산과 말릭산을 기반으로 한 침출액을 대상으로 용매추출 실험을 수행하였다. Mn에 대한 선택성이 뛰어난 D2EHPA 추출제를 활용하여 용매추출을 진행했고, 비누화에 따른 용매추출 효율을 비교했다. Mn 추출을 위한 최적 pH는 약 3.5 부근으로 파악되었다. 비누화를 수행하지 않았을 시 해당 pH에서 Mn은 85% 이상 추출되었고, 비누화 40% 조건의 해당 pH에서 Mn은 95% 이상 추출되었다. 이러한 결과는 유기산 침출액에서 Mn의 선택적 분리를 위한 최적 공정 변수 확립의 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 McCabe-Thiele diagram 기반의 최적 단수를 도출함으로써, Mn 선택성을 극대화한 고효율·친환경 용매추출 공정을 완성할 수 있을 것으로 기대된다.

PH-25

PC88A를 이용한 Y-Dy 용매추출 분리에서의 추출거동 및 선택성

Extraction Behavior and Selectivity of Y and Dy in Solvent Extraction Using PC88A

임서영[1,2], 유경근[1*], 신동주[2,3†]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과, [2]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [3]과학기술연합대학원대학교 자원공학

초록

이온흡착광(Ion-Adsorption Clay)에는 Y, Dy, Tb 등의 중희토류 원소가 이온 형태로 흡착되어 존재한다. 특히 Dy와 Y는 산성 수용액에서 주로 3가 양이온으로 존재하며, Y^{3+}와 Dy^{3+}의 이온반경이 각각 89.3 pm와 90.8 pm 유사하여 용매추출 시에 추출거동이 비슷하므로 선택적 분리가 어렵다.

본 연구에서는 산성 유기인계 추출제인 PC88A를 이용하여 Dy와 Y의 용매추출 거동 및 선택적 분리 특성을 조사하였다. 이온흡착광의 조성을 고려하여 Dy 100 ppm, Y 700 ppm를 함유한 염산계 모의용액을 제조하였으며, 추출제의 농도, 비누화도, 수상의 초기 pH, O/A 비 및 추출 단수 등의 주요 공정 변수가 Dy와 Y의 추출 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

0.1 mol/L PC88A를 이용한 pH isotherm 실험 결과, pH가 증가할수록 Dy와 Y의 추출률이 증가하였으며, 평형 pH 1.0-1.2에서 Dy 32.6%, Y 63.9%의 추출률을 나타나 Y가 Dy보다 우선적으로 추출되는 경향을 확인하였다. O/A 변화에 따른 추출 평형 결과를 바탕으로 McCabe-Thiele diagram을 작성하고 다단 추출 조건을 검토하였다. 최종적으로 10% 비누화한 0.1M PC88A, O/A비 1.5 향류 4단 추출 batch 실험 결과 Dy 86.8%, Y 99.8%의 추출률을 나타냈다. 향후 세정 및 탈거 공정을 통해 Dy와 Y의 분리 조건을 검토하고자 한다.

주제어 : 이온흡착광, Dy, Y, PC88A, 용매추출, 다단추출.

사사

본 연구는 과학기술정보통신부의 전략연구사업 "희토류 가공 K-플랜트 핵심장비 개발 사업" (과제번호: 2710110522)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

* Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr

† Corresponding author : 신동주 / skysjd77@kigam.re.kr

PH-26

베타 스포듀민의 리튬 수침출에 미치는 Ca계 첨가제의 영향

Effect of Calcium-Based Additives on Water Leaching of Lithium from Beta-Spodumene

김태웅[1,2], 유경근[1*], 신동주[2,3†]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과, [2]한국지질자원연구원 자원활용연구본부,
[3]과학기술연합대학원대학교 자원공학

초록

리튬은 이차전지 산업의 핵심 원료로서 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 안정적인 자원 확보와 기존 제련 공정의 환경부담을 줄일 수 있는 친환경 제련 공정 개발의 중요성이 높아지고 있다. 대표적인 리튬 광물인 스포듀민은 일반적으로 고온 상전이 후 황산 배소 및 수침출 공정을 통해 처리되지만, 다량의 황산 사용과 후속 과정에서의 황산나트륨(망초) 부산물 발생 등의 환경적 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 기존 공정의 환경부담을 개선하기 위해 베타 스포듀민에 Ca계 첨가제를 적용한 수침출 공정을 검토하였다.

알파 스포듀민 시료를 고온 소성하여 얻어진 베타 스포듀민을 대상으로 스포듀민과 CaO의 질량비, 침출 온도 및 입도에 따른 리튬 침출 거동을 조사하였다. 수침출은 고액비 10%, 교반속도 250 rpm 및 침출 시간 6시간 조건에서 수행하였으며, 침출 잔사를 950℃에서 재소성 후 다시 수침출하는 과정을 총 4회 반복하였다. 또한 CaO 일부 또는 전부를 $CaCl_2$로 치환하여 $CaO/CaCl_2$ 혼합비에 따른 침출 거동을 비교하였다.

실험 결과 CaO 첨가량, 침출 온도 및 베타 스포듀민의 입도에 따라 리튬 침출률이 변화하였으며, 특히 입도가 감소할수록 리튬 침출률이 증가하는 경향을 보였다. 이 중 가장 작은 입도 범위인 −53 +45 μm 조건에서 4회 누적 리튬 침출률이 94.29%로 가장 높게 나타났다. 또한 CaO, $CaCl_2$ 혼합비에 따라 리튬과 Ca, Si 및 Al의 용출 거동에 차이가 나타나 Ca계 첨가제의 종류와 혼합비가 리튬 침출 및 주요 불순물의 용출에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 통해 베타 스포듀민으로부터 황산을 사용하지 않는 Ca계 첨가제 기반 수침출 공정의 적용 가능성을 확인하였다.

주제어 : 리튬, 습식제련, 친환경 수침출, 스포듀민, Ca계 첨가제

사사

본 연구는 과학기술정보통신부의 기본사업 (GP2025-004, 26-3224)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

*Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr
† Corresponding author : 신동주 / skysdj77@kigam.re.kr

PH-27

바스트나사이트 원광, 부유선별 정광 및 광미로부터 희토류 회수를 위한 바이오침출 거동 연구

Bioleaching behavior of rare earth elements from bastnaesite raw ore, flotation concentrate, and tailings

윤선종[1], 손우진[1], 이승은[1], 김시온[2], 정현[2], 황국화[1,2*]

[1]전북대학교 기후환경에너지융합학과, [2]전북대학교 자원 · 에너지공학과

초록

본 연구는 바스트나사이트로부터 희토류를 친환경적으로 회수하기 위한 바이오침출 공정의 적용 가능성을 평가하였다. 바스트나사이트 원광, 부유선별 정광(C-C) 및 광미(C-T)를 대상으로 철산화 박테리아인 *Acidithiobacillus ferrooxidans*(*A. ferrooxidans*)를 이용한 two-step 바이오침출을 수행하였다. 실험 결과, Ce, La 및 Nd의 침출 농도는 24시간 이내에 급격히 증가한 후 완만하게 유지되는 경향을 보였다. C-C에서 가장 높은 침출 농도가 확인되었으며, 최종 침출 농도는 Ce 1035 mg/L, La 25 mg/L 및 Nd 16 mg/L로 나타났다. 초기 함량 대비 침출 효율은 Ce가 약 30%로 가장 높았으나, La 및 Nd는 1% 미만으로 낮게 나타났다. 이는 *A. ferrooxidans* 기반 바이오침출의 전체 희토류 침출 효율은 제한적이었으나, 무배소 조건에서 Ce를 선택적으로 용출할 수 있음을 시사한다. 본 연구 결과는 바스트나사이트로부터 Ce 선택적 회수를 위한 친환경 바이오침출 공정 개발의 기초자료로 활용될 수 있다.

주제어 : 바스트나사이트, 바이오침출, 회토류, 철산화 박테리아, 부유선별

서론

희토류(REE) 원소는 15개의 란탄족 원소와 스칸듐 및 이트륨으로 구성된 17개 원소로, 고유한 물리·화학적 특성으로 인해 첨단 산업 전반에서 필수적으로 활용되고 있다. 산업 생산에 사용되는 주요 희토류 광물로는 바스트나사이트(Bastnaesite), 모나자이트, 제노타임 및 이온흡착형 점토광이 있다. 특히 희토류 불소탄산염($REECO_3F$) 광물인 바스트나사이트는 Ce와 La등 경희토류의 주요 공급원으로, 전 세계 희토류 수요의 약 70%를 차지하는 중요한 광물 자원이다.

산업계에서 바스트나사이트로부터 희토류를 추출하는 주요 방법은 산화배소-HCl 침출-가성소다 전환법(NaOH conversion)이 주로 이용된다. 이러한 공정은 산업적으로 적용되고 있으나, 복잡한 공정, 다량의 산 및 알칼리 소비, 2차 환경오염 문제를 수반한다. 바이오침출(Bioleaching)은 미생물이 생성하는 산 및 Fe^{3+} 등을 이용하여 금속을 용출하는 기술로, 기존 화학적 침출 공정을 대체 또는 보완할 수 있는 방법으로 주목받고 있다. 그러나 바스트나사이트 대상 바이오침출 연구는 국내외적으로 매우 제한적이다.

따라서 본 연구에서는 철산화 박테리아인 *Acidithiobacillus ferrooxidans*(*A. ferrooxidans*)를 이용하여 바스트나사이트 원광, 부유선별 정광(C-C) 및 광미(C-T)의 희토류 바이오침출 거동을 비교하고, 바이오침출 공정의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 바스트나사이트 원광은 베트남 Dong Pao 광산에서 확보하였으며, rougher-cleaner 부유선별 공정을 통해 정광(C-C)과 광미(C-T)로 분리하였다. 각 시료의 물리·화학적 특성은 입도분석, XRD, SEM-EDS 및 XRF를 이용하여 평가하였다. 주요 화학 조성은 표 1에 나타내었다.

미생물은 철산화 박테리아인 *A. ferrooxidans*를 사용하였다. 바이오침출 실험은 균주를 4일간 배양하여 정체기(stationary phase)에 도달한 후 각 바스트나사이트 시료와 황철석(FeS_2)을 투입하는 two-step 방식으로 수행하였다. 바이오침출은 광액농도 10 g/L, 30°C 및 160 rpm에서 9일간 진행되었으며, 실험 기간 동안 pH, Eh 및 Fe^{3+}/Fe^{2+} 변화를 관찰하였다. 침출액 내 희

* Corresponding author : 황국화 / ghhwang@jbnu.ac.kr

토류 농도는 ICP-OES를 통해 분석하였다.

Table 1. Elemental composition of bastnaesite raw ore, flotation concentrate (C-C), and tailings (C-T) determined by XRF

Elements	Chemical composition (%)								
	Ce	La	Nd	Ba	Ca	F	Fe	S	Si
Bastnaesite raw ore	9.67	8.77	2.79	44.67	8.90	4.16	4.72	4.32	3.76
C-C	26.83	27.22	8.12	9.78	4.23	7.63	5.24	1.62	1.64
C-T	17.17	15.47	4.50	23..07	12.92	7.63	4.53	3.09	2.47

결과 및 고찰

바이오침출 실험 결과, Ce, La 및 Nd의 침출 농도는 모든 시료에서 반응 초기에 급격히 증가한 후 완만하게 유지되었다 (그림 1). 부유선별 정광(C-C)에서 가장 높은 희토류 침출 농도가 나타났으며, 최종 농도는 Ce 1035 mg/L, La 24 mg/L 및 Nd 16 mg/L였다. 이는 정광 내 높은 희토류 함량에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 초기 함량 대비 침출 효율은 Ce가 약 30%로 가장 높았으나, La 및 Nd는 1% 미만으로 나타났다. 이는 본 조건에서 전체 희토류 침출 효율은 제한적이었지만 Ce가 La 및 Nd에 비해 선택적으로 용출할 수 있음을 시사한다. 이러한 결과는 무배소 조건에서 Ce 선택적 바이오침출 공정으로의 적용 가능성을 보여준다.

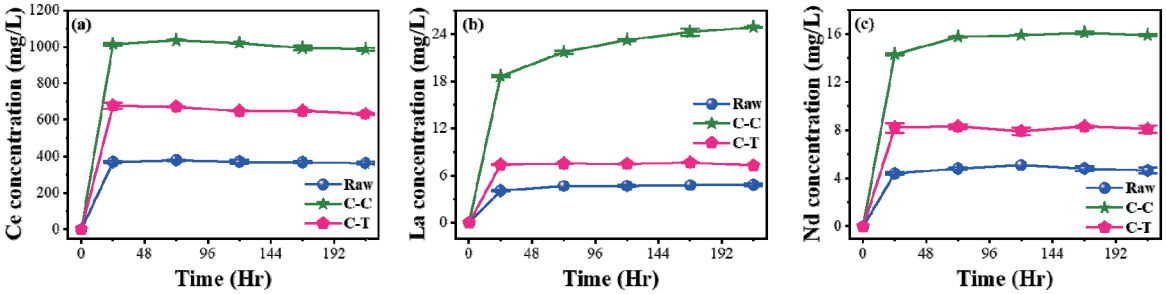


Figure 1. Changes in leached concentrations of rare earth elements during bioleaching of different bastnaesite samples (raw ore, C-C, and C-T): (a) Ce, (b) La, and (c) Nd

결론

본 연구에서는 철산화 박테리아인 *A. ferrooxidans*를 이용하여 바스트나사이트 원광, 부유선별 정광(C-C) 및 광미(C-T)의 희토류 바이오침출 거동을 평가하였다. 그 결과, C-C에서 가장 높은 희토류 침출 농도가 확인되었으며, Ce는 약 30%의 침출 효율을 보인 반면 La 및 Nd는 1% 미만으로 나타났다. 이는 무배소 조건에서 *A. ferrooxidans* 기반 바이오침출을 통한 Ce 선택적 회수 가능성을 보여준다.

사사

본 연구는 산업통상부의 재원으로 한국세라믹기술원 출연사업의 지원을 받아 수행된 연구임. (2410018679, 첨단세라믹 소재 공급망 다변화를 위한 국제협력 및 친환경 재자원화 공정기술 개발 사업)

PH-28

폐 DSA스크랩으로부터 이리듐, 루테늄 농축을 위한 황산 기반 티타늄의 선택적 침출 연구

Selective Leaching of Titanium in Sulfuric Acid System from Spent DSA Scrap for Enrichment of Iridium and Ruthenium

박민서[1,2], 안준모[2*], 윤호상[1], 김인태[1], 공수진[1], 서덕형[1]
[1]성일하이메탈(주), [2]전북대학교 자원에너지공학과

초록

치수안전성전극(DSA) 폐스크랩은 티타늄(Ti) 기재 위에 IrO_2, RuO_2가 코팅된 형태로, Ti가 전체 질량의 약 77.8 wt%를 차지하여 귀금속 회수 공정을 방해한다. 본 연구는 H_2SO_4-H_2O_2, 혼합계를 이용하여 Ti를 선택적으로 침출·제거하는 전처리 공정을 확립하고, 침출 거동 및 반응 속도론을 규명하였다. 최적조건 (3M H_2SO_4, 1M H_2O_2,, 80°C, P/D 5%, 6 h)에서 Ti 침출률 69.5%, Ir 2.18배, Ru 1.3배 농축률을 달성하였다.

주제어 : spent DSA scrap, Sulfuric acid leaching, Selective titanium leaching, Iridium/Ruthenium recovery, Kinetic modeling

서론

치수 안전성 전극(Dimensionally Stable Anode, DSA)은 티타늄(Ti) 기재 위에 IrO_2, RuO_2 등 혼합 금속 산화물을 코팅한 산업용 전극으로, 수전해 및 염소-알칼리 공정 등에 핵심적으로 사용된다. 이리듐(Ir)과 루테늄(Ru)은 지각 내 존재량이 극히 낮은 희소 백금족 금속으로, 공급 편중이 심하여 폐 DSA 전극과 같은 2차 자원으로부터의 회수 필요성이 커지고 있다. 그러나 폐 DSA 스크랩은 Ti 기재가 전체 질량의 약 77.8 wt%를 차지하는 반면 Ir·Ru는 각각 0.38 wt%, 0.17 wt% 수준의 미량 성분에 불과해, 후속 귀금속 회수 공정에서 Ti의 과다한 존재가 심각한 방해 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 후속 귀금속 회수 전처리 단계로서 H_2SO_4-H_2O_2 혼합계를 이용한 Ti의 선택적 침출 공정을 확립하고, 그 침출 거동과 반응 메커니즘을 규명하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 폐 DSA 스크랩은 ICP-OES 분석 결과 Ti 77.8 wt%, Ir 0.38 wt%, Ru 0.17 wt% 등으로 구성되었다. 침출 실험은 100 mL 비커에 H_2SO_4 (1-8 M)와 H_2O_2 (0-5 M)를 목표 농도를 설정하고, 핫플레이트 자석 교반기를 이용하여 25-90°C, P/D(Pulp Density) 5%의 조건에서 최대 6시간 수행하였다. 반응 중 1, 2, 6시간 시점에 시료를 채취하여 ICP-OES로 Ti, Ir, Ru 농도를 정량하였으며, 침출 후 잔사는 XRF로 조성을 분석하였다. 반응차수, Shrinking Core Model(SCM), Arrhenius modeling 식을 이용하여 침출 속도론을 해석하였다.

결과 및 고찰

H_2SO_4 농도별 침출 실험 결과, 3M 조건에서 최대 침출률(62.0%, 2 h)이 관찰되었으며, 5M, 8M 등 고농도 조건에서는 $TiOSO_4$ 등 난용성 염에 의한 표면 패시베이션으로 침출률이 오히려 감소하였다. H_2O_2를 산화제로 첨가한 결과 3M H_2SO_4, 1M H_2O_2 조건에서 6시간 기준 69.5%까지 침출률이 향상되었으나, 과잉 첨가 시에는 자기분해 등으로 인해 효율이 저하되었다. 반면 $NaClO_3$는 산화제로서 효과가 미미하여(최대 5.54%) H_2O_2 대비 부적합한 것으로 확인되었다.

반응차수 분석 결과, 저농도(1→3M) 구간에서는 양의 반응차수($m = 1.32$)를, 고농도(3→8M) 구간에서는 뚜렷한 음의 반응차수($m = -1.16$, $R^2 = 0.95$)를 나타내어 고농도에서 패시베이션 효과가 산 공급 효과를 압도함을 확인하였다. SCM 적용 결과 저온 구간(25-60°C)은 계면 화학반응 제어($Ea = 84.1$ kJ/mol), 고온 구간(80-90°C)은 생성물층 확산 제어($Ea \approx 0$ kJ/mol)로

* Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

반응 메커니즘이 전환되는 이중 거동이 확인되었다.

최적조건(3M H_2SO_4, 1M H_2O_2, 80°C, P/D 5%, 6 h)에서 Ti 침출률 69.5%와 함께 Fe, Ca, Mg, Mn이 완전히 제거되었고, Ir·Ru는 각각 2.18배, 1.3배 농축되어 후속 귀금속 회수 공정에 유리한 잔사 조성을 확보하였다.

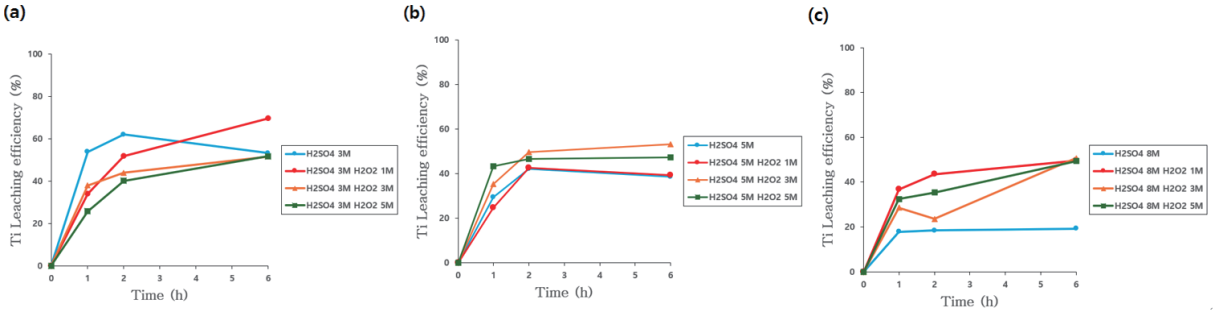


Fig. 1. 과산화수소(H_2O_2) 농도 변화에 따른 티타늄(Ti) 침출률: (a) H_2SO_4 3M (b) H_2SO_4 5M (c) H_2SO_4 8M (H_2O_2 1-5M, 300rpm, 0-6hr, 80°C, P/D 5%)

결론

본 연구는 H_2SO_4–H_2O_2 혼합계를 이용하여 폐 DSA 스크랩으로부터 Ti를 선택적으로 침출·제거하는 전처리 공정을 확립하였다. 최적조건에서 Ti 침출률 69.5%, Ir 2.18배, Ru 1.3배 농축률을 달성하였으며, 반응 메커니즘은 저온에서 계면 화학반응, 고온에서 생성물층 확산 제어로 전환됨을 규명하였다. 본 전처리 공정은 후속 귀금속 회수 공정에서 Ti 기재로 인한 방해를 최소화하고 Ir·Ru을 사전 농축할 수 있는 효과적인 방법으로 확인되었다.

사사

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(‘RS-2024-00435506’)

PH-29

폐 반응용기로부터 회수된 리튬추출액(Li_2SO_4)의 불순물 제어 및 수산화리튬 전환 공정 연구

Impurity Control and Conversion of Lithium Sulfate (Li_2SO_4) Leachate from Spent Box Saggars into Lithium Hydroxide

최민서[1], 왕제필[2*]

[1]국립부경대학교 금속공학과, BB21 Plus Team, [2]국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공

초록

본 연구에서는 양극재 제조 공정에서 발생하는 폐 반응용기로부터 회수된 리튬추출액(Li_2SO_4)으로부터 고순도 수산화리튬(LiOH)을 제조하기 위한 불순물 제어 및 전환 공정을 확립하였다. 리튬추출액에는 금속 불순물과 함께 고농도의 SO_4^{2-} 이온이 포함되어 있어 공정 제어가 요구된다. 본 연구에서는 이온교환수지를 이용한 불순물 제거와 수산화바륨을 이용한 이중 치환 반응을 적용하여 수산화리튬을 제조하였으며, 최적 조건에서 약 97% 이상의 순도와 85% 이상의 전환율을 확보하였다.

주제어 : 폐 반응용기, 리튬추출액(Li_2SO_4), 수산화리튬, 이온교환수지, 수산화바륨

서론

리튬이차전지 수요 증가에 따라 수산화리튬(LiOH)의 사용량이 증가하고 있으며, 양극재 제조 공정에서 발생하는 폐 반응용기의 재자원화 필요성이 증가하고 있다. 폐 반응용기에는 리튬이 황산리튬 형태로 잔존하지만, 불순물 함량이 높아 직접 활용이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 리튬추출액으로부터 고순도 수산화리튬을 제조하기 위한 공정 개발을 수행하였다.

재료 및 실험방법

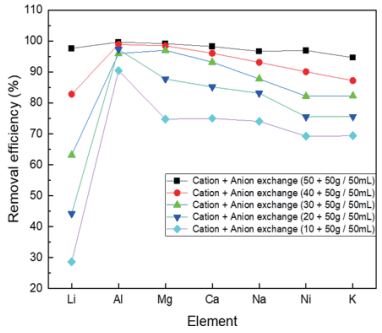
폐 반응용기로부터 회수된 리튬추출액(Li_2SO_4)을 사용하였으며, ICP-OES 분석 결과 Na, Mg, Ca, Al, Ni 등의 금속 불순물과 약 100,000 ppm 수준의 SO_4^{2-} 이온이 확인되었다. 불순물 제거를 위해 양이온 교환수지(MA-10H)와 음이온 교환수지(MA-10OH)를 순차적으로 적용하여 금속 및 음이온 불순물을 제거하고 pH를 중화하였다. 이후 정제된 용액에 수산화바륨($Ba(OH)_2$)을 첨가하여 이중치환 반응을 진행하였다.

반응은 60, 70, 80℃, [OH]/[Li]=1:1, 2:1, 3:1 조건에서 수행하였다. 반응 후 감압여과하여 침전물과 용액을 분리하고 진공-Ar 분위기에서 건조하여 $LiOH·H_2O$ 분말을 제조하였다.

결과 및 고찰

음이온 교환수지는 SO_4^{2-} 제거 및 pH 중화에 효과적이었으며, 양이온 교환수지는 금속 불순물 제거에 효과적이나 리튬 손실이 일부 발생하였다. 양이온 교환수지와 음이온 교환수지를 연속적으로 적용하고 투입 비율을 조절함으로써 불순물 제거와 리튬 손실 간의 균형을 확보할 수 있었다.

* Corresponding author : 왕제필 / jpwang@pknu.ac.kr



Sample	Cation + Anion exchange									
	Cation resin dosage	Anion resin dosage	Sample volume	Li	Al	Mg	Ca	Na	Ni	K	pH
Raw material	-		-	2459.7	4020.6	1121.6	316.89	251.63	172.81	173.63	1
#11	10g			1755.48	384.20	282.81	79.10	65.33	61.33	53.14	6-7
#12	20g			1372.56	109.31	151.51	60.55	50.60	46.92	42.37	4-5
#13	30g	50g	50mL	906.37	62.12	61.69	42.64	37.76	33.48	30.80	3-4
#14	40g			422.47	43.90	46.11	22.14	17.34	17.13	22.23	1
#15	50g			57.56	12.30	39.16	5.62	8.33	5.23	9.23	1

Figure 1. Impurity Removal Results Using Mixed Ion Exchange Resin (Cation + Anion)

수산화리튬 전환 실험 결과, 반응 온도가 증가함에 따라 전환율이 증가하였으며, [OH]/[Li] 비율이 증가할수록 전환율은 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 70℃, [OH]/[Li]=1:1 조건에서 약 97.68%의 순도와 85.50%의 전환율을 확인하였다. XRD 분석 결과, 생성물에서 $LiOH·H_2O$ 상과 $BaSO_4$ 상이 확인되었다.

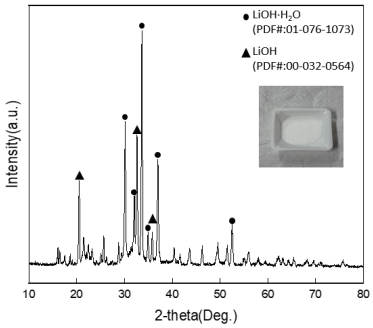


Figure 2. XRD Patterns of Synthesized LiOH

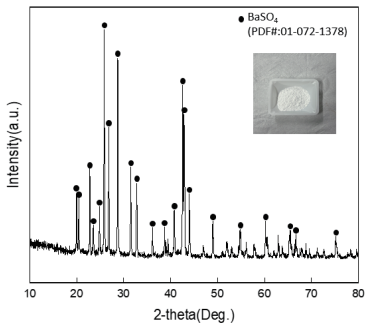


Figure 3. XRD Patterns of Synthesized $BaSO_4$

결론

본 연구에서는 폐 반응용기로부터 회수된 황산리튬 용액을 대상으로 이온교환수지를 이용
한 불순물 제거 공정과 수산화바륨을 이용한 전환 공정을 적용하여 수산화리튬을 제조하였다. 최적 조건에서 약 97% 이상의 순도와 85% 이상의 전환율을 확보하였으며, 이를 통해 폐 반응용기 내 함유된 리튬 자원화 가능성을 확인하였다.

사사

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('20024238')

PH-30

철 세멘테이션 후 자력선별 공정을 이용한 양극재의 선택적 회수

Selective Recovery of Cathode Materials Using Iron Cementation Followed by Magnetic Separation

김지영[1], 유경근[1*]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과

초록

폐리튬이온배터리의 침출 공정에 양극재와 음극재가 함께 투입되면 금속 집전체의 혼입으로 시약 소모를 예측하기 어려워질 수 있으며, 흑연의 재활용을 위한 추가적인 분리·정제 과정이 요구된다. 본 연구에서는 침출 이전 단계에서 양극재를 선택적으로 회수하기 위하여, 집전체의 전기화학적 특성 차이를 이용한 철 세멘테이션 후 자력선별 공정을 검토하였다.

$FeCl_2$용액에서 Al foil 표면에 금속 Fe를 석출시켜 자성을 부여한 후, 비자성 상태의 Cu foil과 분리하였다. Al foil을 이용한 기초 실험에서는 1.0 M $FeCl_2$, 30분 및 초기 pH 3.5 조건에서 약 95%의 자착 회수율을 나타냈으며, 반응 시간을 60분으로 연장하면 시험한 모든 pH 조건에서 100%에 도달하였다. 폐 LFP 전극 0.4 g을 0.5 M $FeCl_2$ 용액 500 mL에서 60분간 처리한 경우에도 초기 pH 2.0-5.0에서 Al 집전체의 자착 회수율은 100%, Cu 집전체의 자착 비율은 0%였다. 이를 통해 양극재가 부착된 Al 집전체의 선택적 회수 가능성을 확인하였다.

주제어 : 폐리튬이온배터리, 양극재, 집전체, 철 세멘테이션, 자력선별

서론

폐리튬이온배터리의 습식 재활용에서는 유가금속의 회수 효율과 함께 전지를 구성하는 소재의 분리 및 재활용 가능성을 고려할 필요가 있다. 기존 공정에서는 폐배터리를 해체한 후 열처리 및 파·분쇄 등의 전처리를 거쳐 블랙매스(Black mass)를 제조하고, 이를 침출하여 금속을 회수한다. 이 과정에서 흑연과 알루미늄·구리 집전체가 혼재한 상태로 침출 공정에 투입될 수 있다. 블랙매스에 포함된 Cu와 Al 등의 불순물은 침출에 사용되는 시약 사용량의 예측과 제어를 어렵게 할 수 있다. 또한 음극재인 흑연은 높은 비표면적과 다공성으로 인하여 시약 소비량의 증가와 영향을 미치며, 침출시 흑연을 고순도로 회수하기 위해서도 잔류 불순물을 제거하는 추가적인 처리가 필요할 수 있다. 따라서 침출 전에 양극재와 음극재를 분리하여 각각의 후속 회수 공정으로 연계하는 방법을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 배터리 집전체인 알루미늄박(Al foil)과 구리박(Cu foil)의 전기화학적 특성 차이에 주목하였다. $FeCl_2$용액에서 Al이 산화되고 Fe^{2+}가 환원되면 Al foil 표면에 금속 Fe가 석출되어 자성이 부여된다. 이때 비자성 상태를 유지하는 Cu foil과의 자성 차이를 이용하여 양극재가 부착된 Al 집전체를 선택적으로 회수하고자 하였다. 이를 위해 세멘테이션 조건에 따른 집전체의 자착 거동과 양극재 성분의 비자착물 혼입을 함께 평가하였다.

재료 및 실험방법

세멘테이션은 재킷형 반응기에서 수행하였고, 용액 온도와 교반속도는 각각 85 ℃와 200 rpm으로 설정하였다. N_2는 300 mL/min의 유량으로 공급하였으며, 초기 pH는 1M HCl과 1M NaOH를 이용하여 조절하였다. Al foil 실험에서는 시료 0.20 g과 $FeCl_2$용액 500 mL를 사용하였다. $FeCl_2$ 의농도는 0.01, 0.1 및 1.0 M, 초기 pH는 2.5, 3.0 및 3.5로 설정하여 30분간 반응시켰다. 이후 1.0 M 조건에서 반응 시간을 60분으로 연장하여 시간에 따른 자착 회수율을 비교하였다.

폐 LFP 전극은 먼저 1.0 M $FeCl_2$용액에서 60분간 처리하여 집전체의 분리 가능성을 확인하였다. 이어서 0.5 M $FeCl_2$용액 500 mL에 전극 시료 0.4 g을 투입하고, 초기 pH를 2.0, 3.0, 4.0 및 5.0으로 변화시켜 60분간 반응시켰다. 반응 후 자석봉을 이

* Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr

용한 자력선별을 통해 자착물과 비자착물을 구분하고, Al 및 Cu 집전체의 자착 비율을 평가하였다. 또한 ICP-OES를 이용하여 비자착물 내 Li와 P의 비율 및 Al 용해율을 비교하여 pH에 따른 분리 특성을 검토하였다.

결과 및 고찰

Al foil의 30분 반응 결과, 1.0 M에서는 약 89–95%를 나타냈다. 1.0 M $FeCl_2$, 초기 pH 3.5에서 약 95%로 가장 높은 값을 얻었다. 시험한 저농도 조건에서는 pH에 따라 회수율의 차이가 나타났으나, 1.0 M에서는 비교적 높은 자착 회수율을 확보할 수 있었다. 또한 1.0 M에서 반응 시간을 60분으로 늘린 경우 초기 pH 2.5, 3.0 및 3.5에서 모두 100%의 자착 회수율을 나타냈다. 이는 본 실험 범위에서 반응 시간의 증가가 Al foil의 자착 회수에 유리하게 작용하였음을 보여준다.

실제 전극물질이 부착되어진 폐 LFP 집전체를 1.0 M $FeCl_2$용액에서 60분간 처리한 경우에도 양극재가 부착된 Al 집전체를 모두 자착물로 회수하였다. 농도를 낮춘 0.5 M $FeCl_2$용액 500 mL에 폐LFP 집전체 시료 0.4 g을 투입한 실험에서는 초기 pH 2.0–5.0의 모든 조건에서 Al 집전체의 자착 회수율이 100%, Cu 집전체의 자착 비율이 0%였다.

비자착물 내 Li의 비율은 0.28–0.44 wt% 범위로 나타나 초기 pH에 따른 뚜렷한 증가 또는 감소 경향을 보이지 않았다. 동일한 조건에서 Al 용해율은 약 0.77%에서 0.052%로 감소하였다.

이상의 결과로부터 철 세멘테이션 후 자력선별을 통해 양극재가 부착된 Al 집전체의 선택적 회수 가능성을 확인하였다.

table 1. 폐 LFP 대비 비자착물내 주요 원소의 비율 (wt%)

	Li	P	Al	Fe	Cu
pH 2.0	0.28%	2.68%	0.77%	16.0%	73.8%
pH 3.0	0.44%	0.22%	0.40%	10.4%	75.0%
pH 4.0	0.39%	0.19%	0.40%	12.1%	75.2%
pH 5.0	0.40%	0.18%	0.22%	0.9%	75.3%

결론

Al과 Cu 집전체의 전기화학적 특성 차이를 이용하여 $FeCl_2$ 용액에서 Al 집전체에 선택적으로 철을 석출시키고, 이에 따른 자성 차이를 활용한 자력선별로 폐 LFP로부터 양극재를 선택적으로 분리·회수하는 연구를 수행하였다.

사사

이 논문은 2026년 한국광해광업공단으로부터 연구비를 지원받아 수정된 사업입니다. 지원해주신 관계자 분들께 감사드립니다.

PH-31

생물전기화학적 시스템을 통한 리튬이온배터리 양극재스크랩의 금속 침출 거동

Metal Leaching Behavior of Lithium-Ion Battery Cathode Scrap through a Bioelectrochemical System

장연서[1], 손성훈[2], 정해성[1,2*]

[1]국립창원대학교 이차전지화학공학, [2]국립창원대학교 G-lamp사업단

초록

폐리튬이온배터리 발생 증가에 따라 공정 에너지와 화학물질 사용을 줄일 수 있는 재활용 기술이 필요하다. 바이오리칭은 미생물 대사활동을 이용한 친환경 금속 침출 방법이지만, 금속과의 직접 접촉에 따른 미생물 활성 저하와 긴 반응시간이라는 한계가 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 미생물연료전지(Microbial Fuel Cell, MFC) 기반 생물전기화학적 금속 침출을 수행하고자 한다. Al호일에 코팅되어 있는 상태의 NCM523 양극재 스크랩을 파·분쇄 없이 MFC의 양극으로 직접 적용하였으며, MFC 운전은 Li, Ni, Co, Mn 침출을 향상시켰다. 용액 내 과포화를 완화하여 2차 광물화를 억제함으로써 추가적인 금속 침출을 촉진하였다.

주제어 : NCM양극재 스크랩, 생물전기화학적 시스템, 유가금속 침출

서론

전기자동차와 에너지저장장치의 보급 확대에 따라 폐리튬이온배터리(LIB) 발생량이 증가하면서 유가금속 회수 기술의 중요성이 커지고 있다. 기존 건식 및 습식 제련 공정은 높은 에너지 소비와 강산·환원제 사용, 파·분쇄 등의 전처리가 요구된다. 이에 대한 대안으로 바이오리칭이 제안되고 있으나, 중금속과의 직접 접촉에 따른 미생물 활성 저하와 긴 반응시간이라는 한계가 있다. 본 연구에서는 생물전기화학적 시스템인 MFC를 적용하여 미생물 반응과 금속 침출을 공간적으로 분리함으로써 기존 바이오리칭의 한계를 보완하였다. 미생물 대사과정에서 생성된 전자는 외부회로를 통해 NCM523 양극재 스크랩으로 전달되어 금속의 환원적 침출을 촉진하였으며, NCM523 양극재 스크랩을 파·분쇄 없이 MFC 전극으로 직접 적용하여 중성 조건에서의 금속 침출 거동을 평가하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 Dual-chamber H-type MFC는 anode와 cathode chamber로 구분되고 Nafion 117 membrane으로 분리하였다. Anode에는 carbon felt(3 × 4 cm), cathode에는 파·분쇄 과정을 거치지 않은 Al에 코팅된 NCM523 양극재(3 × 4 cm) 스크랩을 직접 사용하였다. MFC는 혐기성 조건에서 운전하였으며, Li, Ni, Co 및 Mn의 정량적 농도 분석을 위해 ICP-OES를 활용하였다.

결과 및 고찰

본 연구는 중성 조건(pH 7.6)에서 MFC 운전 시 Ni, Co, Mn 및 Li 농도는 각각 최대 85.2, 22.64, 24.44 및 38.84 mg L^{-1}에 도달하였다. 반면 non-MFC 조건에서는 각각 22.40, 7.73, 11.21 및 11.40 mg L^{-1}로 나타났다. 따라서 MFC를 통한 전자 전달은 Ni, Co, Mn 및 Li 침출을 각각 약 3.80, 2.93, 2.18 및 3.41배 향상시켰다.

반복 MFC 운전 간 NCM523 양극 표면에 흰색의 2차 광물이 점차 형성되면서 금속 침출이 감소하였다. 침전물에 대한 SEM-EDS 분석 결과 P와 Mn이 각각 51.35 및 27.52 at%로 높은 비율을 나타냈으며, XRD에서도 Mn-, Ni- 및 Co-phosphate 관련 결정상이 확인되었다. 이는 반복 운전 중 형성된 phosphate계 2차 광물화가 추가적인 금속 침출을 제한했음을 나타낸다. 침출 금

*Corresponding author : 정해성 / haesung.jung@changwon.ac.kr

속 이온의 축적을 완화하여 2차 광물화를 억제한 결과, Ni, Co, Mn 및 Li 농도는 각각 233.42, 80.66, 84.08 및 122.16 mg L^{-1}에 도달하였다. 따라서 용액 내 금속 이온 축적과 2차 광물화 제어가 금속 침출 거동을 개선하는 주요 인자로 나타났다.

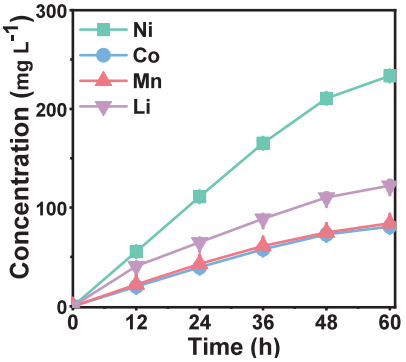


Fig. 1. Concentrations of leached metals under secondary-mineralization-suppressed conditions.

결론

Al호일에 코팅되어 있는 NCM523 양극재 스크랩을 파·분쇄 없이 MFC 양극으로 직접 사용하여 중성 조건에서의 금속 침출 거동을 평가하였다. 반복 운전 중 발생한 Mn-rich phosphate계 2차 광물화를 억제함으로써 금속 침출을 더욱 촉진하였다. 연구결과를 통해 MFC 기반 생물전기화학적 시스템은 미생물 반응과 금속 침출을 공간적으로 분리하여 기존 바이오리칭의 직접 접촉에 따른 한계를 보완하면서 NCM523 양극재의 금속 침출을 유도할 수 있음을 확인하였다. 또한 금속 침출과 함께 전력 생산 및 폐수처리를 연계할 수 있어 지속가능한 순환자원 공정으로의 적용 가능성을 제시하였다.

PH-32

석탄회로부터 희토류 회수를 위한 침투식 추출제련의 열역학 및 동역학적 거동 분석

Thermodynamic and Kinetic Profiling of Percolation-Based Extractive Metallurgy for Lanthanide Reclamation from Coal Ash

Lai Quang Tuan[1], Choi Sung Oong[2], Jiwhan Ahn[1*]
[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]강원대학교

Abstract

Coal fly ash is a promising secondary resource for recovering critical rare earth elements (REEs) while reducing industrial waste. Percolation-based leaching was evaluated using Ca-rich CFBC coal ash containing approximately 410 mg kg^{-1} ∑REYSc and 30.69 wt.% CaO. At 1 M HCl, stable percolation and ~70% solution recovery were achieved, whereas 2 M HCl increased initial REE dissolution but reduced solution recovery to ~60% due to pore blockage. Thermodynamic analysis revealed preferential Ca dissolution and acid consumption before progressive REE mobilization, highlighting the importance of reagent efficiency and permeability control. The results establish a practical basis for agglomeration-assisted scale-up and integrated coal-ash-to-REE recycling, linking continuous extraction with downstream REE separation and value-added product recovery.

Keywords : Coal ash recycling; Rare earth elements; Secondary resources; Percolation leaching; Resource recovery; Scale-up

Introduction

The increasing generation of industrial by-products and demand for critical minerals have created an opportunity to convert waste streams into secondary resources. Coal fly ash is particularly attractive because of its large generation volume and measurable REE content. Recovering REEs from coal ash can simultaneously reduce ash disposal and provide an alternative source of critical materials.

Conventional batch leaching using strong mineral acids can achieve REE dissolution but often causes extensive co-dissolution of Ca, Al, and Fe, increasing reagent consumption and downstream separation requirements. Batch systems also provide limited information on solution transport and permeability, which are critical for large-scale treatment of fine-grained ash.

This study therefore evaluated percolation-based leaching as a scalable resource-recycling approach, using column operation as a laboratory analogue of heap leaching. The objective was to identify the balance between REE dissolution kinetics, acid utilization, and hydraulic stability and to define the requirements for subsequent process scale-up.

Materials and Methods

CFBC coal fly ash was used as the secondary resource. Approximately 90% of the particles were smaller than 50 μm, with approximately 410 mg kg^{-1} ∑REYSc and 30.69 wt.% CaO. XRD and SEM analyses indicated Ca-bearing phases together with amorphous and crystalline aluminosilicates, with REEs distributed within the ash matrix.

Approximately 200 g of ash was packed into a vertical column and preconditioned with deionized water. HCl was introduced from the top and allowed to percolate downward under gravity. HCl concentrations from 0.1 to 1.0 M were evaluated, with 2.0 M HCl additionally tested. Sequential leachate fractions were analyzed for REEs and major elements, while solution recovery and pH evolution were monitored.

*Corresponding author : Jiwhan Ahn / ahnjw@kigam.re.kr

Table 1. Key feedstock characteristics and scale-up indicators

Parameter	Result / implication
Secondary resource	CFBC coal fly ash
Σ REYSc	~410 mg kg^{-1}
CaO	30.69 wt.%
Particle size	~90% <50 μm
Ash loading	~200 g/column
Optimum tested condition	1 M HCl
Solution recovery	~70% at 1 M HCl
Solution recovery	~60% at 2 M HCl
Preliminary REE recovery	~4–6%
Scale-up priority	Agglomeration + permeability control

Results and Discussion

At 1 M HCl, REE concentrations increased progressively during percolation, reaching maximum values after approximately 400–500 mL of cumulative leachate. Approximately 700 mL of leachate was recovered (~70% solution recovery) while maintaining stable flow through the ash bed.

Increasing the acid concentration to 2 M HCl accelerated the initial REE release, with Ce concentrations exceeding 7 mg L^{-1}. However, solution recovery decreased to approximately 60%, accompanied by partial pore blockage associated with fine-particle migration and re-precipitation.

Thermodynamic interpretation showed that Ca-bearing phases preferentially dissolve during the initial leaching stage, consuming acidity and buffering the solution. As the pH progressively decreases, REE mobilization becomes more favorable, resulting in sequential release of La, Nd, and Sc (Fig. 1.).

The preferential dissolution of Ca has direct implications for recycling efficiency because Ca represents a major acid-consuming component of the coal ash. Therefore, effective Ca management and optimized acid dosing are important for increasing the fraction of lixiviant available for REE recovery and reducing unnecessary dissolution of major matrix components.

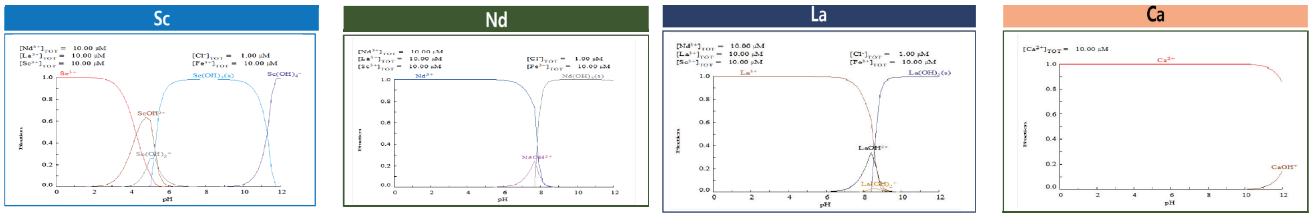


Fig. 1. Thermodynamic comparison of Ca and REE dissolution during percolation leaching as a function of decreasing pH.

Based on the extraction and thermodynamic results, three key engineering requirements were identified for practical scale-up: permeability control, reagent efficiency, and downstream product recovery (Fig. 2.)

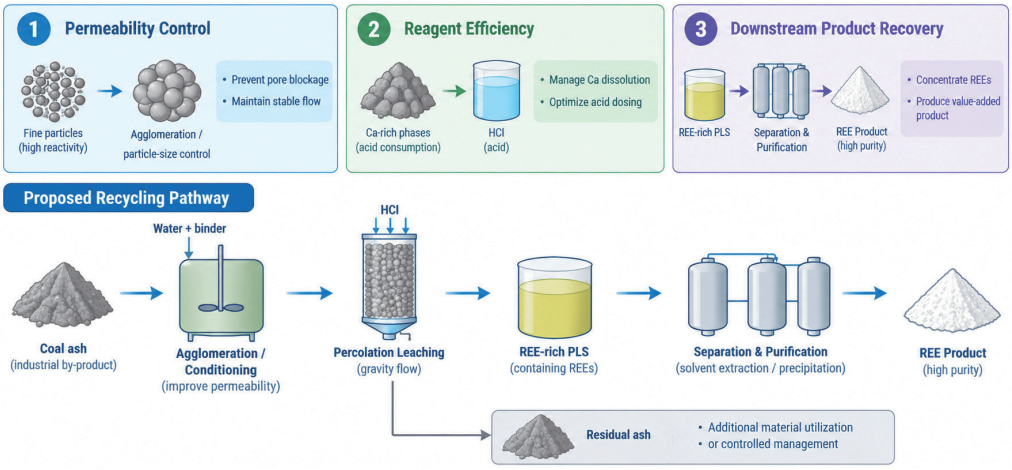


Fig. 2. Proposed scale-up and commercialization pathway for REE recovery from coal ash through percolation-based recycling.

Fine coal-ash particles provide high reactive surface area but can restrict solution flow and cause pore blockage during percolation. Agglomeration and particle-size conditioning are therefore proposed as the first scale-up step to improve bed permeability and maintain continuous solution throughput.

The high Ca content further increases acid consumption, indicating that Ca management and optimized acid dosing will be essential for improving reagent productivity. The resulting REE-bearing pregnant leach solution (PLS) can then be integrated with downstream concentration, separation, and purification to produce a value-added REE product.

Conclusions

Percolation-based leaching demonstrated the potential of CFBC coal ash as a secondary REE resource. The 1 M HCl condition provided a better balance between REE dissolution and hydraulic stability, achieving ~70% solution recovery. Preferential Ca dissolution was identified as a major factor controlling acid consumption and REE mobilization. Agglomeration, permeability control, and optimized acid dosing are key requirements for improving scale-up productivity. The results provide a practical basis for pilot-scale coal-ash-to-REE recycling and downstream production of value-added REE products.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Field-Driven Environmental Technology Commercialization R&D Program (Project No. RS-2026-25505340), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment of the Republic of Korea.

PH-33

알칼리 및 아민 매개 반응 환경의 해수로부터 침전 탄산칼슘을 생성하기 위한 수계 광물화 경로

Aqueous Mineralization Pathways for Precipitated Calcium Carbonate Generation from Seawater under Alkaline and Amine-Mediated Reactive Environments

Mihret Melese Baruda[1,2], Lai Quang Tuan[2], Jiwhan Ahn[2*]

[1]Korea National University of Science and Technology (UST), Daejeon, Republic of Korea,

[2]Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon, Republic of Korea

Abstract

Seawater contains abundant Ca^{2+} and Mg^{2+}, providing a potential medium for CO_2 mineralization through carbonate precipitation. However, direct carbonation (DC) is limited by CO_2 induced acidification and reduced carbonate-ion availability. This study investigated DC, NaOH-enhanced carbonation (NaOH-C), and 2-ethyl-1-hexylamine assisted carbonation (EHA-C) for seawater CO_2 mineralization. Hydra–Medusa modeling was used to evaluate pH-dependent carbonate precipitation, while Ca^{2+} and Mg^{2+} removal and precipitate characteristics were experimentally evaluated. DC resulted in limited carbonate precipitation, whereas NaOH enhancement promoted precipitation by maintaining alkaline conditions. EHA-assisted carbonation further enhanced CO_2 mineralization, achieving near-complete Ca^{2+} precipitation while maintaining substantial Mg^{2+} removal. The EHA/n-octanol phase was also readily separated from the aqueous phase, supporting its potential for phase recovery. These findings demonstrate that maintaining an alkaline pH plays a key role in promoting carbonate precipitation during CO_2 mineralization of seawater.

Keywords : CO_2 mineralization, Seawater carbonation, Carbonate precipitation, Amine-assisted carbonation

Introduction

Rising atmospheric CO_2 concentrations have increased the need for scalable carbon removal and storage technologies. Among these approaches, aqueous mineral carbonation can store CO_2 as stable carbonate minerals, and seawater provides abundant Ca^{2+} and Mg^{2+} for carbonate precipitation. However, DC rapidly decreases pH, and shifts carbonate speciation toward HCO_3^- and dissolved CO_2, limiting CO_3^{2-} availability. Various alkalinity and pH-control strategies have therefore been investigated to maintain favorable conditions for carbonate formation. Amine-assisted systems enhance CO_2 absorption and regulate solution chemistry, while hydrophobic amines additionally enable organic–aqueous phase separation. Among these, 2-ethyl-1-hexylamine (EHA) has demonstrated effective CO_2 absorption and Ca^{2+} precipitation in biphasic systems. However, its application to seawater-based CO_2 mineralization has not been reported. This study therefore investigates DC, NaOH-C, and EHA-C to evaluate how pH regulation influences Ca^{2+} and Mg^{2+} removal and carbonate precipitation.

Materials and Methods

Natural seawater was collected from Okgye, South Korea, while synthetic seawater was prepared according to ASTM D1141-98 using salts with concentrations above 0.1 g/L. NaOH, EHA, and n-octanol were used for chemical-assisted carbonation.

Three CO_2 mineralization pathways were investigated (Table 1). All experiments were conducted in a jacketed glass reactor

*Corresponding author : Ji Whan Ahn / ahnjw@kigam.re.kr

with mechanical stirring, pH and temperature monitoring, and CO_2 introduction through a diffuser. Aqueous samples from DC and EHA-C were analyzed by ICP-OES for Ca and Mg concentrations. NaOH-C precipitates were characterized to determine their mineralogical and morphological characteristics. In addition, Hydra–Medusa modeling evaluated pH-dependent carbonate speciation and carbonate mineral precipitation.

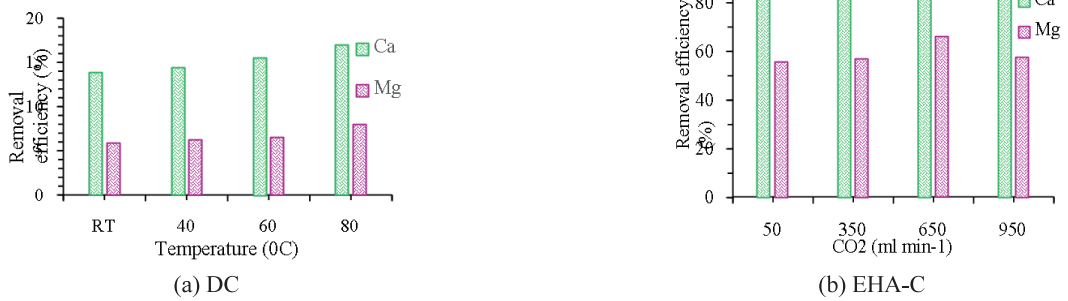
Table 1. Seawater carbonation experiments under different conditions

Medium	Experimental series	Chemical	Temp. (°C)	CO_2 flow rate (mL min^{-1})	Additional parameters
Natural seawater	Series A	None	RT, 40, 60, 80	50	—
Natural seawater	Series B	Sodium hydroxide	RT, 30, 40	300	—
Synthetic seawater	Series C	EHA	RT	50, 350, 650, 950	Alcohol to amine = 1, Organic to seawater = 1

Results and Discussion

Hydra–Medusa modeling indicated that carbonate mineral formation in seawater depended on pH and dissolved inorganic carbon (DIC). Under the initial seawater composition, carbonate minerals were mainly stable under alkaline conditions, while $MgCO_3$ was not predicted. Increasing DIC to 75 mM expanded the stability of $CaCO_3$, $MgCO_3$, and $CaMg(CO_3)_2$, indicating that sufficient carbonate availability is essential for seawater-based CO_2 mineralization. These equilibrium predictions represent thermodynamic tendencies. However, actual Mg-carbonate precipitation may remain kinetically limited due to strong Mg^{2+} hydration.

DC caused rapid acidification, with the pH decreasing from approximately 8.5 to below 6.7 within 4 min and to about 6.3 after 20 min. Consequently, carbonate-ion availability decreased as the system shifted toward HCO_3^- and dissolved CO_2, limiting carbonate precipitation. Ca^{2+} and Mg^{2+} removal remained relatively low, reaching 16.96% and 7.98%, respectively, at 80 °C. The limited difference among temperatures indicates that increasing temperature alone was insufficient to overcome the effects of rapid acidification. In contrast, NaOH-C maintained alkaline conditions and promoted carbonate precipitation. XRD confirmed Ca- and Mg-bearing carbonate phases, including calcite, Mg-calcite, aragonite, and monohydrocalcite-related phases. SEM-EDS further indicated Mg incorporation into the precipitates, with greater Mg/Ca ratios observed at higher temperature. These results demonstrate that maintaining alkalinity during CO_2 addition substantially changes the precipitation environment compared with DC. EHA-C, in turn, produced a different pH evolution because the amine buffered the acidity generated during CO_2 absorption. This prolonged the alkaline conditions favorable for carbonate formation and resulted in near-complete Ca^{2+} removal over a broad pH range. Mg^{2+} removal was lower and varied with CO_2 flow rate, reaching 65.95% at 650 mL min^{-1}, the highest value among the tested conditions. Overall, the results show that maintaining alkalinity and controlling CO_2 absorption are key factors governing seawater CO_2 mineralization, with EHA-assisted carbonation providing enhanced divalent-ion removal.



(a) DC (b) EHA-C

Fig. 1. Ca^{2+} and Mg^{2+} removal efficiencies during (a) DC of natural seawater and (b) EHA-C of synthetic seawater

Conclusions

CO_2 mineralization in seawater was strongly governed by alkalinity and carbonate-ion availability. DC caused rapid acidification, resulting in limited Ca^{2+} and Mg^{2+} removal. NaOH enhancement maintained alkaline conditions and promoted the formation of Ca- and Mg-bearing carbonate phases. EHA-C delayed acidification and extended the pH range favorable for carbonate formation. The EHA-C system achieved the highest Mg^{2+} removal of 65.95% at a CO_2 flow rate of 650 mL min^{-1}. Overall, amine-assisted buffering improved the conditions for seawater-based CO_2 mineralization, while further work should address CO_2 uptake, EHA regeneration, and carbonate stability.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Field-Driven Environmental Technology Commercialization R&D Program (Project No. RS-2026-25505340), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment of the Republic of Korea.

PH-34

베나노스케일 탄소점 제조를 위한 베트남 연소 부산물 내 잔류 탄소질 분획의 순차적 탄산화 및 부유 선별 분리

Sequential Carbonation and Froth Separation of Residual Carbonaceous Fractions in Vietnamese Combustion Byproducts for Nanoscale Carbon Dot Fabrication

Adrian Javier Sing Jethmal[1,2], Mohd Danish Khan[3], Jiwhan Ahn[2*]

[1]Resource Recycling Engineering, Korea National University of Science and Technology (UST), Republic of Korea,
[2]Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Republic of Korea,
[3]Daeho-Al Co. Ltd.,Daegu, Republic of KoreaDaeho-Al Co. Ltd., Daegu, Republic of Korea

Abstract

Coal fly ash (CFA) generated from industrial coal combustion presents critical environmental challenges due to high loss on ignition (LOI) values, which hinder its reuse in construction materials. However, residual unburnt carbon (UC) serves as a valuable precursor for advanced carbon nano-materials. Conventional wet froth flotation faces severe limitations from surface oxidation, porous structure reagent absorption, and complex mineralogy. This study evaluates an integrated carbonation-flotation process combined with mechanical grinding. Grinding liberates encapsulated carbon grains and destroys porous networks, while carbonation optimizes pulp density, reagent dosages, and particle-bubble collision kinetics. This yields a high LOI carbon concentrate and clean mineral tailings. The purified carbon is subsequently converted into crystalline graphene quantum dots (GQDs) exhibiting tunable photoluminescence quantum yields.

Keywords : Coa l Fly Ash, Froth Flotation, Unburnt Carbon, Carbonation, Graphene Quantum Dots

Introduction

Accumulation of unburnt carbon in coal fly ash decreases concrete strength and wastes valuable energy resources. Recovering this unburnt carbon via conventional flotation is technically difficult because high surface hydrophilicity and porous structures lead to excessive collector consumption. An integrated carbonation-flotation strategy coupled with mechanical milling addresses these interface limitations. Grinding increases specific surface exposure, strips inorganic phases, and improves floatability. Carbonation modulates governing operational parameters to establish a sustainable, circular economy framework for transforming waste fly ash into high value strategic nanocarbons.

Materials and Methods

Samples are subjected to mechanical ball milling to dissociate carbon particles embedded in aluminosilicate glass matrices. Carbonation pretreatment being integrated with froth flotation, optimizing pulp density, collector, and frother conditioning in a flotation cell. Recovered high LOI carbon concentrate underwent mineral acid demineralization and high temperature graphitization. Purified graphitized carbon can be tailored into GQDs via mild H_2O_2 oxidative cutting using a $CoFe_2O_4$ catalyst. To enhance optical properties, edge carboxyl and hydroxyl groups are functionalized via benzyl alcohol esterification.

*Corresponding author : Jiwhan Ahn / ahnjw@kigam.kr.re

Results and Discussion

Mechanical grinding combined with carbonation significantly reduced reagent capillary penetration and enhanced flotation recovery, achieving a high Decarburization Index (DI). Clean mineral tailings are successfully separated from the carbon concentrate. Subsequent H2O2 oxidative cutting converted purified carbon into thin layered GQDs. Esterification with benzyl alcohol (GQD-T) restricted the rotational flexibility of surface oxygen groups, suppressing non-radiative recombination and increasing the photoluminescence quantum yields.

Table 1. Key performance indices of the integrated carbonation-flotation and GQD synthesis process

Process Stage	Key Condition / Parameter	Major Output / Property
Feed Pretreatment	Mechanical Milling + Carbonation	Carbon grain liberation & pore destruction
Flotation Recovery	Optimized Pulp Density & Collector Dosage	Decarburization Index (DI) ~100%
GQD Synthesis	Mineral Acid Demineralization +H2O2 Cutting	Crystalline GQDs
Surface Modification	Benzyl Alcohol Esterification (GQD-T)	Enhanced Quantum Yield

Conclusion

The integrated carbonation-flotation technology combined with mechanical grinding achieves superior unburnt carbon recovery from coal fly ash. The purified carbon serves as a high quality feedstock for synthesizing GQDs with enhanced photoluminescence, offering a complete circular economy pathway for coal waste valorization.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Field-Driven Environmental Technology Commercialization R&D Program (Project No. RS-2026-25505340), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment of the Republic of Korea.

PH-35

조성이 다양한 열전 폐기물 매트릭스로부터 리튬염 수율 최적화를 위한 다변량 데이터 모델링

Multivariate Data Modelling for Enhanced Lithium Salt Yield Optimization from Compositionally Diverse Thermoelectric Waste Matrices

Mohd Danish Khan[1,2], Adrian Javier Sing Jethmal[2,3], Ji Whan Ahn[2*]

[1]Daeho-AI Co. Ltd., Daegu, Republic of Korea

[2]Center for Mineral Processing & Metallurgy Research, Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), 124 Gwahak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34132, Republic of Korea

[3]Korea National University of Science and Technology (UST), Daejeon, Republic of Korea

초록

Industrial combustion residues—including coal fly ash (CFA), coal bottom ash (CBA), municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash, and metallurgical slag—are abundant but underexploited secondary sources of lithium. This study develops an integrated, zero-effluent hydrometallurgical process for lithium carbonate recovery from these compositionally diverse wastes, supported by machine learning (ML)-guided optimization. Mechanical fractionation to <53 μm enriched lithium concentrations to 123 and 101 mg/kg in CFA and CBA, respectively. Sulfuric acid leaching (2 M H_2SO_4, S/L 1:10, 120 h) yielded 9.86–12.30 mg/L Li but also mobilized substantial Al and Fe impurities (up to 3,212 and 8,745 mg/L, respectively). Leaching exhibited three stages: rapid surface dissolution, passivation associated with gypsum and aluminosilicate gel formation, and pseudo-equilibrium. First-order kinetic modelling indicated that extraction plateaued within ~15 min, with maximum recoveries of 9.24% for CFA to 31.49% for slag. Seashell-derived nano-$Ca(OH)_2$ neutralization eliminated acidic effluent, converted Li_2SO_4 to LiOH, and removed >90% of Al and Fe, while producing recoverable gypsum. Sequential carbonation and pH-controlled precipitation reduced Ca, Al, and Fe to trace levels while retaining >97% of leached Li. An ML surrogate model trained on 128 records from 50 published sources (MAE = 24.05 recovery points; interval coverage = 96%) identified carbonate roasting at 800 °C as the most promising pretreatment, predicting 79–94% Li recovery across feedstocks. The proposed framework integrates waste valorization, zero-effluent processing, and data-driven optimization for lithium carbonate recovery.

서론

Global lithium demand approached 180,000 t of lithium carbonate equivalent in 2023 and continues to rise with the expansion of lithium-ion batteries and electric mobility, yet conventional ore- and brine-based production is constrained by high reagent and energy intensity, poor selectivity against co-dissolving Na, K, Mg and Ca, and significant environmental liabilities such as acidic tailings and hypersaline waste streams. Industrial combustion residues — coal fly ash (CFA), coal bottom ash (CBA), municipal solid waste incinerator (MSWI) bottom ash, and metallurgical slag — constitute an enormous but critically underexploited secondary lithium reservoir; coal fly ash alone is generated at 0.75–1 billion t yr^{-1} with Li_2O contents comparable to exploitable pegmatite-grade deposits. The published literature nonetheless remains sparse on multi-source comparisons evaluated under identical process conditions and on integrated, effluent-free process designs. This study develops a zero-effluent hydrometallurgical route for lithium carbonate recovery across four compositionally diverse residues

*Corresponding author : Ji Whan Ahn / ahnjw@kigam.re.kr

and couples it with a machine-learning framework that ranks pretreatment routes for improved extraction efficiency.

재료 및 실험방법

Four Korean residues were examined: coal fly ash (CFA02), coal bottom ash (PCBA02), MSWI bottom ash (MIBA01), and metallurgical slag (SLG01). Dried feeds were dry-sieved into four size fractions; the <53 μm fraction was selected on the basis of lithium grade and reactive surface area. Bulk and fraction compositions and mineralogy were determined by X-ray fluorescence, ICP-OES (following HF–HNO_3–$HClO_4$ digestion), and X-ray diffraction. Leaching was performed in 2 M H_2SO_4 (solid-to-liquid ratio 1:10, 120 h, ambient temperature) with time-resolved ICP-OES sampling for Li, Ca, Al and Fe. The acidic leachate was neutralized with seashell-derived nano-$Ca(OH)_2$, then refined in a three-stage purification sequence — CO_2 carbonation at 50 °C, pH-controlled co-precipitation at pH 4.5–5.0, and secondary carbonation at 80 °C — before Li_2CO_3 crystallization at 0 °C. A treatment-aware logit-linear surrogate model, operating in logit space to bound predicted recovery to 0–100%, was trained on 128 experimental records drawn from 50 publications spanning eight pretreatment families and validated by leave-one-source-out cross-validation.

결과 및 고찰

Feedstock characterization and lithium distribution. Sieving to <53 μm enriched lithium in the coal-derived ashes to 123 (CFA) and 101 mg kg^{-1} (CBA), consistent with volatilization–condensation of volatile lithium species onto high-surface-area fine particles during post-combustion cooling. Slag and MSWI ash showed the opposite trend (35.4 and 66.9 mg kg^{-1} at <53 μm), reflecting substitutional incorporation of lithium within the vitrified silicate network of quenched slag and the heterogeneous partitioning characteristic of municipal waste combustion. The <53 μm fraction was nonetheless adopted uniformly, providing the highest lithium grade in coal ashes and the greatest reactive surface area across all four matrices.

Leaching kinetics. Lithium extraction in 2 M H_2SO_4 followed a reproducible tri-phasic pattern: rapid surface dissolution (<12 h), mid-stage passivation through secondary gypsum and amorphous silica–alumina gel formation (12–72 h), and terminal pseudo-equilibrium (>72 h). A first-order model, $Et=Emax(1-e^{-kt})$, fitted each ICP-OES time series well; extraction was essentially complete within 15 min (half-lives 0.04–0.21h), with maximum recoveries varying four-fold across feedstocks (Table1). Metallurgical slag achieved the highest fractional recovery (31.5%) despite the lowest lithium grade, owing to its thermodynamically metastable amorphous glass, whereas the partially crystalline coal ashes recovered only ~9%. The residual 70–91% of the contained lithium is locked within crystalline or passivated phases that are kinetically inaccessible to sulfuric acid regardless of contact time—indicating that leaching duration is not a meaningful process lever.

Mass balance and purification. Acid dissolution mobilized 9.86–12.30 mg L^{-1} of lithium but generated a severe impurity burden, with Al reaching 3,212 and Fe 8,745 mg L^{-1} — 130–766 times the lithium concentration. Neutralization with nano-$Ca(OH)_2$ performed three functions simultaneously: it eliminated the acidic effluent, converted Li_2SO_4 to LiOH, and rejected >90% of Al and Fe as hydroxides while precipitating recoverable gypsum. The subsequent three-stage purification exploited a solubility-product hierarchy spanning more than 35 orders of magnitude, reducing Ca, Al and Fe to below 10 mg L^{-1} while retaining >97% of the leached lithium. This multifunctional neutralization is a central process innovation, converting a conventionally wasteful operation into a productive unit that addresses acid disposal, species conversion, and impurity rejection in a single step.

Machine-learning-guided optimization. Because direct leaching of unroasted feedstocks recovered only 9–32% of the contained lithium, the dissolution stage — rather than purification — is the governing bottleneck. A delta-from-baseline formulation absorbed the between-laboratory offsets that pervade published hydrometallurgical data and isolated the incremental effect of each pretreatment against the specific feedstock. Carbonate roasting (Na_2CO_3 fusion) ranked as the strongest treatment family (+3.08 logit units), ahead of fluoride, chloride, alkali and sulfate routes, while leach time and temperature pinned to zero fitted effect, corroborating the kinetic evidence. Under leave-one-source-out cross-validation the model achieved a mean absolute error of 24.05 recovery points with 96% interval coverage, making it suited to ranking

pretreatment options rather than to precise numerical forecasting. Applied at 800 °C, carbonate roasting is predicted to raise recovery to 79–94% across all feedstocks (Table 1) — gains of 47–70 percentage points over the measured baselines — and collapses a 475-point design grid to three Pareto-optimal candidate experiments.

Table 1. Lithium grade, measured first-order leaching kinetics under direct acid dissolution, and machine-learning-predicted recovery under the highest-ranked pretreatment (carbonate roasting at 800 °C) for the four combustion residues.

Feedstock	Li grade, <53 μm (mg kg^{-1})	Max. recovery, direct leach (%)	k (h^{-1})	Predicted recovery, Na_2CO_3 roast 800 °C (%)
CFA02, fly ash	123	9.24	3.29	79.3
PCBA02, bottom ash	101	9.12	3.36	78.8
MIBA01, MSWI ash	66.9	12.56	17.28	87.1
SLG01, slag	35.4	31.49	12.56	94.3

결론

An integrated, zero-effluent hydrometallurgical process recovered lithium carbonate from four abundant and compositionally diverse combustion residues. Seashell-derived nano-$Ca(OH)_2$ served as a multifunctional neutralization–conversion–purification reagent, and a three-stage carbonation and hydroxide-precipitation sequence delivered >97% lithium retention at trace impurity levels (<10 mg L^{-1} Ca, Al and Fe). A cross-validated machine-learning model identified upstream carbonate roasting at 800 °C — not optimization of leaching conditions — as the dominant lever for improving recovery, predicting 79–94% extraction across all feedstocks. The framework provides a scalable, waste-valorizing, and data-driven basis for the next experimental campaign, in which a roasting step and an evaporative or membrane-based concentration step will be integrated to exceed the lithium carbonate crystallization threshold from the dilute purified liquor.

Acknowledgement

This research was supported by the Basic Research Project (GP2025-004) of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), funded by the Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea

PH-36

이온성 액체와 CO_2결합 탈거법을 이용한 석탄 비산재로부터 3가 라타넘족 원소의 저독성 시약 기반 용매금속학적 추출

Reagent-Benign Solvometallurgical Extraction of Trivalent Lanthanides from Coal Fly Ash through Ionic Liquid and CO_2 Coupled Stripping

Hyebin Kim[1], Adrian Javier Sing Jethmal[1,2], Ahn Ji Whan[1*]

[1]Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources (KIGAM), Republic of Korea

[2]Resource Recycling Engineering, Korea National University of Science and Technology (UST), Republic of Korea

Abstract

Coal fly ash (CFA) is a promising secondary source of rare earth elements (REEs), but conventional recovery routes rely on mineral acid leaching, generating high chemical consumption and secondary waste. This study develops an acid-free process for recovering trivalent REEs from an alkali-activated, REE-enriched CFA residue using the thermomorphic ionic liquid [Hbet][Tf_2N] coupled with CO_2 carbonation stripping. The thermomorphic phase behavior of [Hbet][Tf_2N] enables selective REE transfer into the ionic-liquid phase while limiting co-extraction of major matrix elements, integrating leaching and extraction into a single step. CO_2 is then used to strip REEs as carbonate precipitates and regenerate the ionic liquid.

Keywords : Coal Fly Ash, Rare Earth Elements, Ionic Liquid, Acid free, CO_2 Stripping

Introduction

Rare earth elements (REEs) are critical materials for permanent magnets, electronics, and renewable energy technologies, and coal fly ash (CFA) has drawn attention as a secondary REE source. However, conventional acid leaching of CFA is chemically intensive and generates corrosive waste streams. Ionic liquids (ILs) offer tunable, low-volatility alternatives, and the betainium-based IL [Hbet][Tf_2N] is especially attractive because its carboxylic acid group enables proton-exchange leaching while its thermomorphic behavior allows leaching and extraction to be combined in a single phase-transition step. Coupling this system with CO_2 carbonation stripping further avoids mineral acid use during REE recovery, motivating development of a fully acid-free, closed-loop CFA valorization process.

Materials and Methods

CFA (SiO_2 32.08, CaO 22.74, Al_2O_3 15.66, Fe_2O_3 8.52 wt.%, among other oxides) was first alkali-activated to obtain an REE-enriched residue for leaching. The ionic liquid [Hbet][Tf_2N] was synthesized by reacting betaine hydrochloride with lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide (Li[Tf_2N]) in deionized water; the separated IL phase was washed free of chloride and dried under vacuum at 80 °C. REEs were leached from the alkali-activated residue into the IL phase under thermomorphic conditions, exploiting temperature-dependent phase separation to limit co-dissolution of Si, Al, Ca, and Fe. The REE-loaded IL was then contacted with CO_2 to re-protonate the betaine moiety, releasing REE^{3+} and precipitating REE carbonate, while the IL was recycled for repeated use. Recovered products were characterized by ICP-OES, XRD, and SEM.

*Corresponding author : Ahn Ji Whan / ahnjw@kigam.kr.re

Results and Discussion

Systematic evaluation of the thermomorphic ionic-liquid leaching process identified the optimal contact time, water content, and leaching temperature for maximizing REE extraction from the alkali-activated CFA residue. Under these optimized conditions, REEs were selectively transferred into the [Hbet][Tf_2N] phase while co-dissolution of major matrix elements (Si, Al, Ca, Fe) remained low, confirming the high selectivity of the thermomorphic system. These results indicate that careful control of the leaching parameters is critical to achieving both high REE recovery and effective phase separation.

Table 1. Summary of optimized leaching parameters and resulting REE recovery performance.

Processing Step	Optimized Parameter	Resulting Outcome
Residue preparation	**Alkali Activation**	**REE-enriched feed material**
Thermomorphic IL leaching	Contact time/water content/temperature	**Mazimized REE extraction efficiency**
Phase separation	Cooling-induced IL-aqueous split	**Low co-dissolution of Si, Al, Ca, Fe**

Conclusion

This study successfully identified the optimal ionic-liquid leaching conditions for recovering rare earth elements (REEs) from an alkali-activated coal fly ash residue using the thermomorphic ionic liquid [Hbet][Tf_2N]. By systematically evaluating the effects of key process variables—including the ionic-liquid-to-solid ratio, water content, and leaching temperature—an operating condition was established that maximizes REE extraction efficiency while minimizing the co-dissolution of major matrix elements such as Si, Al, Ca, and Fe. These findings, together with the subsequent CO_2 carbonation stripping and solvent regeneration steps, demonstrate the feasibility of a closed-loop, acid-free process for REE recovery from CFA.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Field-Driven Environmental Technology Commercialization R&D Program (Project No. RS-2026-25505340), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment of the Republic of Korea.

PH-37

알루미노실리케이트 비산재의 미세다공성 제올라이트 13X로의 순환적 전환 및 산업용 흡착제와의 정량적 CO_2 흡착 성능 비교

Circular Transmutation of Aluminosilicate Fly Ash into Microporous Zeolite 13X with Quantitative CO_2 Sorption Benchmarking against Industrial Adsorbents

김주언[1], Mohd Danish Khan[2*], 안지환[1*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]Daeho-AI Co. Ltd.

초록

석탄 비산재(Coal Fly Ash, CFA)는 실리카와 알루미나를 주요 성분으로 함유하고 있어 제올라이트 합성을 위한 유용한 알루미노실리케이트 자원으로 활용될 수 있다. 그러나 CFA를 원료로 제조된 제올라이트의 흡착 성능은 원료의 조성 및 합성 조건에 따라 달라지며, 상용 흡착제와의 정량적인 성능 비교가 충분히 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 CFA를 고부가가치 흡착제로 전환하기 위하여 알칼리 활성화 및 수열처리를 이용하여 미세다공성 제올라이트 13X를 합성하고, 제조된 제올라이트의 구조적 및 표면 특성을 분석하였다. 합성된 제올라이트 13X는 XRD, FT-IR 및 표면 특성 분석을 통해 제올라이트 구조의 형성과 미세다공성 특성을 확인하였으며, CO_2 흡착 실험을 통해 흡착 성능을 정량적으로 평가하였다. 또한 상용 제올라이트 13X와의 비교를 통해 CFA 유래 제올라이트의 CO_2 흡착 성능을 benchmark하였다. 이를 통해 폐기물로 취급되는 CFA를 CO_2 포집용 기능성 미세다공성 흡착제로 전환할 수 있는 가능성을 제시하였다.

주제어 : 석탄 비산재, 제올라이트 13X, 알칼리 활성화, 수열합성, CO_2 흡착, 순환자원화

서론

석탄 비산재(Coal Fly Ash, CFA)는 석탄화력발전 과정에서 대량으로 발생하는 산업 부산물로, 현재 상당량이 매립 및 폐기되고 있어 환경적·경제적 문제가 지속적으로 제기되고 있다. 특히 CFA는 실리카(SiO_2), 알루미나(Al_2O_3) 및 철 산화물 등을 주요 성분으로 하는 알루미노실리케이트 물질로, 제올라이트와 같은 고부가가치 기능성 소재의 원료로 활용될 수 있다. 제올라이트는 규칙적인 미세기공 구조와 높은 이온교환능을 가지며, 기체 및 금속 이온의 흡착 특성으로 인해 환경 및 가스 분리 분야에서 널리 활용되고 있다. 특히 제올라이트 13X는 미세다공성 구조를 기반으로 높은 CO_2 흡착능을 나타내어 CO_2 포집 및 분리용 흡착제로 주목받고 있다.

따라서 CFA에 함유된 알루미노실리케이트 성분을 활용하여 제올라이트 13X를 제조할 경우, 폐기물의 고부가가치 자원화와 동시에 CO_2 포집용 기능성 흡착제를 제조할 수 있다. 기존 연구에서는 CFA의 반응성이 낮은 결정질 실리카를 알칼리 융합을 통해 수용성 실리케이트로 전환한 후 수열처리하여 제올라이트를 합성하는 방법이 보고되었으며, 알칼리 융합과 수열합성 조건에 따라 제올라이트의 결정성이 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한 CFA로부터 제조된 제올라이트 13X는 상용 제올라이트 13X와 비교하여 구조적 특성과 CO_2 흡착 성능을 평가할 수 있으며, 선행연구에서는 CFA 유래 13X가 상용 제품에 상응하는 수준의 비표면적 및 CO_2 흡착 성능을 나타내는 것으로 보고되었다.

따라서 CFA를 이용하여 제올라이트 13X를 합성하고 이를 CO_2 포집용 흡착제로 활용하기 위한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 CFA를 알칼리 활성화 및 수열처리하여 미세다공성 제올라이트 13X를 합성하고, XRD, FT-IR 및 표면 특성 분석을 통해 합성물의 구조적 특성을 확인하였다. 또한 CO_2 흡착 및 탈착 특성을 정량적으로 평가하고 상용 제올라이트 13X와 비교하여, CFA 유래 제올라이트의 CO_2 흡착제로서의 성능을 검토하였다.

*Corresponding author : 안지환 / ahnjw@kigam.re.kr

재료 및 실험방법

본 연구에서는 전처리된 석탄 비산재(Coal Fly Ash, CFA)를 제올라이트 13X 합성을 위한 원료로 사용하였다. 전처리 CFA의 원소 조성을 XRF로 분석한 결과, Si와 Al은 각각 **14.05 및 9.81 mass%**로 확인되었으며, Ca(17.39 mass%)와 Fe(5.58 mass%)가 주요 구성 성분으로 함께 존재하였다. 또한 Mg(1.61 mass%), K(0.78 mass%) 및 Na(0.23 mass%)가 소량 검출되었다.
이러한 알루미노실리케이트 성분을 제올라이트 합성에 활용하기 위하여 CFA에 NaOH를 이용한 알칼리 퓨전(alkali fusion)을 적용한 후 수열합성을 수행하였다. 알칼리 퓨전 및 수열합성 과정을 통해 제올라이트 13X를 제조하였으며, 합성된 시료의 결정구조 및 표면 특성을 XRD, FT-IR 및 표면 특성 분석을 통해 평가하였다. 또한 CO_2 흡착 실험을 수행하여 합성된 제올라이트 13X의 CO_2 흡착 성능을 정량적으로 평가하고, 동일 조건에서 상용 제올라이트 13X와 비교하였다.

결과 및 고찰

XRF 분석 결과, 전처리된 석탄 비산재(CFA)는 Si, Al, Fe, Ca, K 및 Na를 주요 원소로 함유하는 것으로 확인되었다. 전처리 CFA의 화학 조성은 Table 1에 정리하였다.
시료의 결정상은 XRD 분석을 통해 확인하였으며, 처리 과정에서 얻어진 상등액은 ICP-OES를 이용하여 분석하였다. 분석 결과, 합성된 제올라이트 13X는 상용 제올라이트 13X와 유사한 물리화학적 특성을 나타내는 것으로 확인되었다.
또한 CFA/NaOH 중량비 1:1.2에서 500 °C, 1 h의 알칼리 퓨전 조건은 비산재 내 SiO_2상의 전환을 촉진하고 제올라이트 13X의 형성을 유도하는 데 효과적인 것으로 나타났다. 최종적으로 합성된 제올라이트 13X의 CO_2 흡착량은 적용된 실험 조건에서 약 225 mg CO_2/g adsorbent로 확인되었다.

Table 1. Chemical composition of pre-treated CFA

Element	Si	Al	Ca	Fe	Mg	K	Na
Content (mass%)	14.05	9.81	17.39	5.58	1.61	0.78	0.23

결론

본 연구에서는 전처리된 CFA를 알칼리 퓨전 및 수열처리하여 제올라이트 13X를 합성하였으며, XRD 및 ICP-OES 분석을 통해 합성 및 처리 특성을 확인하였다. CFA/NaOH 중량비 1:1.2, 500 °C, 1 h의 알칼리 퓨전 조건에서 제올라이트 형성이 효과적으로 이루어졌으며, 합성된 제올라이트 13X는 약 225 mg CO_2/g adsorbent의 CO_2 흡착량을 나타냈다. 이를 통해 CFA의 고부가가치 제올라이트 전환 및 CO_2 포집용 흡착제로의 활용 가능성을 제시하였다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Field-Driven Environmental Technology Commercialization R&D Program (Project No. RS-2026-25505340), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment of the Republic of Korea.

PH-38

란타나이드의 이동성 증대 및 선택적 용해를 위한 유리질 알루미노실리케이트 미세구조의 알칼리 열수 재구성

Alkaline Hydrothermal Reconstruction of Glassy Aluminosilicate Microstructures for Amplified Lanthanide Mobilization and Selective Dissolution

Abdullah Bin Fazal[1,2] Mohd Danish Khan[3], Choi Sung Oong[4], Ahn Ji-Whan[1*]
[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]과학기술연합대학원대학교, [3]Daeho-Al Co. Ltd., [4]강원대학교

Abstract

Coal fly ash (CFA) is a promising secondary source of rare earth elements (REEs), but their recovery is constrained by incorporation within refractory glassy aluminosilicate and mullite phases. This study investigates alkaline hydrothermal reconstruction as a pretreatment to modify the CFA matrix and improve the potential accessibility of matrix-associated lanthanides. CFA was treated with 10 wt.% $Ca(OH)_2$ at 100 °C for 1–6 h, and mineralogical, structural, and solution-chemical changes were evaluated using XRD, FTIR, and ICP-OES.

XRD showed progressive consumption of portlandite, which was clearly present at 1–2 h but substantially consumed by 3 h. A new low-angle reflection corresponding to d ≈ 8.9–9.5 Å emerged concurrently, consistent with a dehydrated tobermorite-type C–S–H phase. Additional reflections compatible with xonotlite- and katoite-type calcium-(alumino)silicate hydrates indicated development of a secondary Ca–Si–Al hydrate assemblage. FTIR showed a shift of the principal Si–O–(Al) band from approximately 1039 cm^{-1} to 953–965 cm^{-1}, indicating modification and depolymerization of the original aluminosilicate network. ICP-OES revealed initial Si and Al release during 1–2 h, followed by declining concentrations through 3–4 h, consistent with their subsequent incorporation into secondary hydrates.

The combined results demonstrate reaction-driven reconstruction of the glassy CFA matrix, with the principal transformation occurring within approximately 3–4 h. This structural modification provides a mechanistic basis for enhanced lanthanide accessibility during subsequent selective dissolution.

Introduction

CFA contains appreciable REE concentrations and is increasingly considered a secondary critical-metal resource. However, REE recovery is limited by their association with refractory aluminosilicate glass and other resistant phases. The stable Si–O–Si and Si–O–Al framework can restrict reagent penetration and REE dissolution. Therefore, restructuring the host matrix before leaching represents an important strategy for improving downstream recovery.

Alkaline hydrothermal treatment can promote dissolution of Si- and Al-bearing glass components while simultaneously forming secondary Ca–Si–Al hydrates. This study evaluates $Ca(OH)_2$-assisted hydrothermal reconstruction at 100 °C to determine the relationship between reaction time, matrix dissolution, hydrate formation, and structural modification.

Materials and Methods

CFA was treated with 10 wt.% $Ca(OH)_2$ at 100 °C for 1, 2, 3, 4, and 6 h. Untreated CFA and a lime-free hydrothermal control were used for comparison. After treatment, solids were separated for XRD and FTIR analysis, while corresponding leachates were analyzed by ICP-OES for dissolved Si and Al.

*Corresponding author : Jiwhan Ahn / ahnjw@kigam.re.kr

Table 1. Experimental conditions

Parameter	Condition
CFA treatment	Hydrothermal
CaO	10M
Temperature	100 °C
Time	1–6 h
Controls Untreated	without CaO
Characterization	XRD, FTIR, ICP-OES
Key elements	Si, Al
Main hydrate	C–S–H
Main reaction window	~3–4 h

Results and Discussion

XRD demonstrated progressive mineralogical transformation. Portlandite remained detectable during the first 1–2 h but was substantially consumed by 3 h. At the same time, the appearance of a d ≈ 8.9–9.5 Å reflection indicates development of a tobermorite-type C–S–H phase. Xonotlite- and katoite-type reflections further suggest formation of Ca–Si–Al hydrate phases. FTIR supported this transformation through displacement of the main Si–O–(Al) band from ~1039 cm^{-1} in raw CFA to 953–965 cm^{-1} after treatment. This shift indicates modification of the original aluminosilicate network and is consistent with progressive depolymerization and reconstruction.

ICP-OES showed that dissolved Si and Al increased initially and subsequently decreased. The initial increase indicates alkaline dissolution of the CFA matrix, whereas the later decline is consistent with consumption of dissolved species during secondary hydrate precipitation.

The temporal agreement between portlandite consumption, Si/Al release, FTIR band displacement, and secondary hydrate formation indicates a coupled dissolution–reprecipitation mechanism rather than simple physical mixing of CFA and lime.

Table 2. XRD Reflections during CFA–Lime Treatment at Different Reaction Times

Diagnostic reflection	Raw CFA	0 wt.% / 2 h	10 wt.% / 1 h	10 wt.% / 2 h	10 wt.% / 3 h	10 wt.% / 4 h	10 wt.% / 5 h	10 wt.% / 6 h
Portlandite (001), 18.09°	—	—	29	20	—	—	—	—
Portlandite (101), 34.15°	—	—	34	27	—	—	—	—
Quartz (101), 26.64°	215	244	186	201	148	180	137	175
Calcite (104), 29.40°	105	93	80	92	82	103	84	85
Tobermorite-type C-S-H (002), ≈9.3–9.9°	—	—	—	—	55	27	52	31

The main Si–O–(Al) asymmetric stretching band, which reflects the degree of polymerization of the aluminosilicate network, sits at 1039.02 cm^{-1} in raw CFA and 1026.52 cm^{-1} in the water-only control — essentially unchanged, confirming that hydrothermal treatment without lime does not alter the glass network. In the 10 wt.% lime series, the band remains near the raw position at 1 h (1100.63 cm^{-1}) and 2 h (1092.35 cm^{-1}), then downshifts sharply to 964.83 cm^{-1} at 3 h and plateaus at 953–955 cm^{-1} from 4 to 6 h. This downshift is the spectroscopic signature of network depolymerization and occurs at the same reaction time (3 h) at which portlandite disappears and the tobermorite-type XRD reflection appears — three independent observations converging on the same transition point.

Fig. 1 shows the stacked XRD patterns for raw CFA, the 0 wt.% (water-only) control, and the 10 wt.% $Ca(OH)_2$ series from 1 to 6 h. Quartz (26.64°, 20.86° 2θ) is the dominant crystalline reflection in every pattern and does not disappear at any treatment time; calcite (29.40°) is present throughout, including in the raw and water-only samples, indicating a native carbonate component independent of the lime treatment.

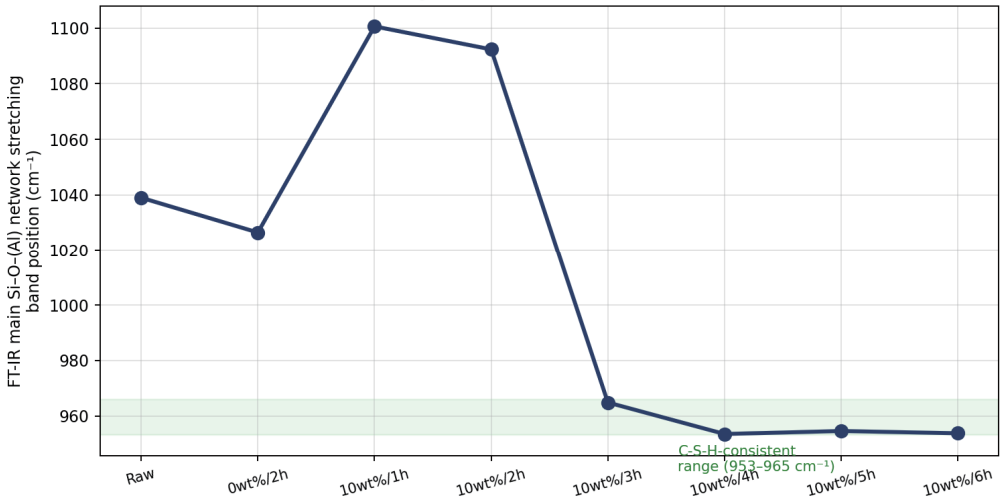


Fig. 1. Progressive downshift of the FT-IR network band with hydrothermal lime activation time.

Conclusion

Hydrothermal treatment with 10 wt.% $Ca(OH)_2$ at 100 °C effectively reconstructs the glass-rich CFA aluminosilicate matrix. XRD, FTIR, and ICP-OES collectively demonstrate progressive matrix dissolution, portlandite consumption, Si/Al redistribution, and formation of a tobermorite-bearing Ca−Si−Al hydrate assemblage. The major transformation occurs within approximately 3−4 h, defining a suitable reaction window for pretreatment optimization. The resulting matrix reconstruction provides a mechanistic basis for enhanced lanthanide accessibility and subsequent selective dissolution, which should be confirmed through direct REE-leaching experiments.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Environmental Industry & Technology Institute (KEITI) through the Field-Driven Environmental Technology Commercialization R&D Program (Project No. RS-2026-25505340), funded by the Ministry of Climate, Energy and Environment of the Republic of Korea.

PH-39

흡착제 도금막을 이용한 전자산업 폐수 내 유가금속 전기화학적 회수

Elctrochemical recovery of precious metal from electronic wastewater using an electroplated adsorbent membrane

김마리앙드레[1,2], 한종인[1,2*]

[1]한국과학기술원 건설및환경공학과, [2]주식회사 레빙엠포

초록

Electronic waste is in the spotlight as a sustainable source of valuable metals. Separation and refining, however, remain complicated. A novel porphyrin-based porous polymer, COP-180, was introduced as an efficient adsorbent, especially for gold. In this study, an adsorbent membrane is fabricated by electroplating COP-180 with high gold selectivity on a membrane filter to investigate the process, efficiency, and plating stability for electrochemical gold adsorption. In this system, COP-180 maintained excellent gold adsorption properties even after fabrication as a membrane (1.38 g Au/g COP-180). The surface stability and adsorption efficiency were confirmed by recycling the membrane.

서론

전자제품의 수요 증가에 따라 금을 비롯한 유가금속의 사용량이 지속적으로 증가하고 있으며, 전자 폐기물과 전자산업 폐수는 이러한 금속을 회수할 수 있는 중요한 2차 자원으로 주목받고 있다. 그러나 기존의 유가금속 회수 공정은 분리·정제 과정이 복잡하고 많은 양의 화학물질과 에너지가 필요하며 경제성과 환경성 측면에서 한계가 있다. 따라서 저농도의 유가금속 이온을 선택적으로 분리하고 효율적으로 회수할 수 있는 공정의 개발이 필요하다.

포르피린 기반 다공성 고분자인 COP-180은 금에 대한 높은 흡착 용량과 선택성을 갖지만, 분말 형태로 사용하면 회수와 재사용이 어렵다는 문제가 있다. 본 연구에서는 COP-180을 막 형태로 고정하고, 흡착제와 전도성 물질을 멤브레인에 전기 도금하여 전도성 있는 흡착제 도금막을 제조하였다. 이를 플로우 형태 전기셀에 적용하여 전자산업 폐수 내 유가금속의 전기흡착 성능과 막의 재사용 가능성을 평가하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 금에 대한 높은 선택성을 갖는 다공성 흡착제 COP-180을 polyvinylidene fluoride(PVDF) 기반 막에 고정하였다. 이후 은 나노와이어를 침전한 멤브레인을 다시 은 전기도금하여 전기전도성 흡착막으로 제조한다. 은 나노와이어는 흡착제를 지지하는 동시에 전기도금을 위한 전도 경로를 제공하도록 구성하였으며, 흡착 사이트가 노출되도록 막의 다공성 구조를 유지하였다.

제조한 흡착막을 전기셀에 장착하고 금이 함유된 용액을 순환시키며 전기흡착 실험을 수행하였다. 시간에 따른 용액 내 금 농도를 분석하여 흡착 효율과 흡착속도를 평가하고, 분말형 흡착제와의 최종 흡착 용량을 비교하였다. 전기흡착 후에는 비시안계 용액을 이용하여 금을 탈착하였으며, 재생된 막의 구조적 안정성과 재사용에 따른 금 흡착 성능을 확인하였다.

*Corresponding author : 한종인 / hanj2@kaist.ac.kr

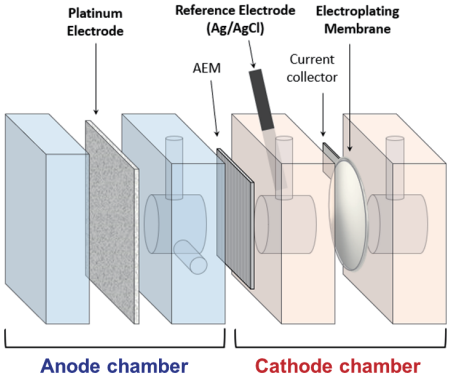


Fig. 1. 멤브레인 투수성을 고려한 플로우 형태 전기셀

결과 및 고찰

그림 2(a)는 분말형 COP-180을 이용한 비전기화학적 흡착과 Ag/COP 전도성 막을 이용한 전기흡착의 금 흡착 효율을 비교한 결과이다. 전기흡착 조건에서는 6시간 이내에 70% 이상의 금이 회수되었으며, 12시간 후에는 약 90%에 도달하였다. 특히 초기 6시간 동안 전도성 흡착막이 분말형 흡착제보다 높은 흡착 효율을 보여, 전기화학적 구동력이 금의 초기 흡착속도 향상에 기여한 것으로 판단된다.

그림 2(b)는 pH 2 및 25 ℃의 혼합 금속 용액에서 흡착제 도금막의 금속별 흡착 효율을 나타낸다. 금의 흡착 효율은 95% 이상으로 나타난 반면, 은, 알루미늄, 철 및 니켈은 거의 흡착되지 않았다. 구리와 팔라듐의 흡착도 매우 낮은 수준으로 확인되었다. 이러한 결과는 경쟁 금속 이온이 존재하는 조건에서도 흡착막이 금을 선택적으로 포집할 수 있음을 보여준다. 따라서 제조된 흡착제 도금막은 전자산업 폐수로부터 금을 신속하고 선택적으로 회수하는 데 활용될 수 있다.

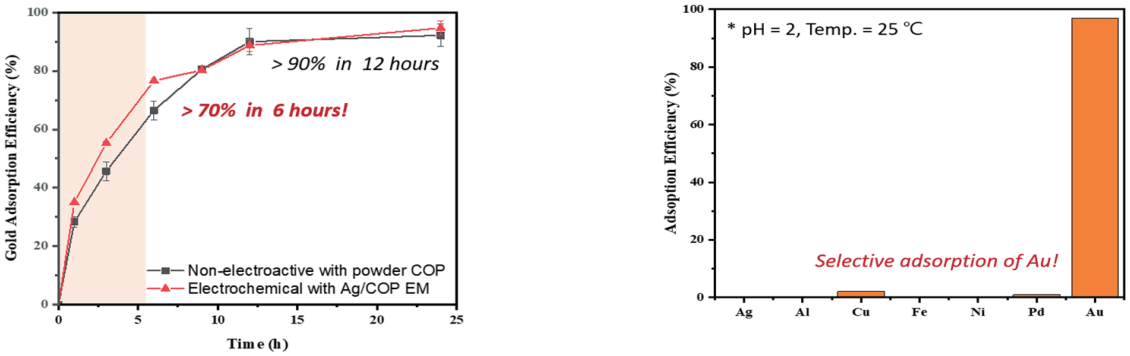


Fig 2. (a) 분말형 COP-180과 전도성 흡착막의 시간에 따른 금 흡착 효율(왼쪽),
(b) 혼합 금속 용액에서 전도성 흡착막의 금속별 흡착 효율(오른쪽)

결론

COP-180 기반 전도성 흡착막은 분말형 흡착제보다 빠른 금 흡착속도와 높은 선택성을 나타냈다. 따라서 전자 산업 폐수로부터 금을 선택적으로 회수하는 전기화학적 회수 공정에 활용될 수 있는 가능성을 입증하였다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

포스터

소재



The Korean Institute of Resources Recycling

PM-01

폐배터리 회복전압 제어를 위한 저항방전 장치 개발 및 처리공정 안전성 평가

Development of a Resistive Discharge Device for Rebound Voltage Control of Spent Lithium-Ion Batteries and Safety Evaluation of the Pretreatment Process

양현선, 김건우, 최수경, 김민재, 임유정, 문종근*
한국건설생활환경시험연구원 배터리본부 배터리1센터

초록

폐배터리는 방전 후에도 전압이 다시 상승하는 회복전압 현상으로 인해, 해체 및 파쇄 전 안전한 전압 관리가 요구된다. 본 연구에서는 배터리의 직·병렬 구성에 따라 외부 저항값을 설정할 수 있는 모드전환형 저항방전 장치를 개발하였다. 전기차용 폐배터리 팩 및 모듈에 적용한 결과, 팩 전압을 회복전압 최고값 대비 79.6 % 저감하였으며, 진동·압착·파쇄 시험에서 발화 및 누액 등의 이상 현상이 발생하지 않아 안전성을 확인하였다. 개발된 장치는 폐배터리의 운송·보관 및 해체·파쇄 전처리 공정의 안전성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

주제어 : 폐배터리, 회복전압, 저항방전 장치, 안전성 평가, 재활용 전처리

서론

폐배터리의 재활용 전처리 과정에서 방전은 해체 및 파쇄 공정의 안전성 확보에 중요하다. 그러나 배터리의 화학적 특성으로 인해 방전 후에도 회복전압(Rebound Voltage)이 상승하여 안전성을 저해한다. 이를 제어하기 위해 기존에는 직접 단락 방식이 사용되었으나, 접속 시 과도전류에 의한 스파크 및 전선 용융의 위험이 있다. 이에 본 연구에서는 배터리의 직·병렬 구성에 따른 저항값을 산출하여 저항방전-단락 모드 전환형 방전 장치를 개발하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 전기자동차용 폐배터리 모듈 및 팩을 대상으로, 초기 방전 후 개발한 저항방전 장치를 연결하여 방전을 수행하였다. 외부 저항값은 배터리의 셀 직·병렬 구성에 따라 산출·선정하였으며, 방전 중 전압 및 온도를 모니터링하고 장기간 연결 유지 및 진동조건에서의 거동을 평가하였다. 이후 단락 모드로 전환하여 잔류 에너지를 제거하고, 압착 및 파쇄시험을 통해 후속 공정에서의 안전성을 평가하였다.

결과 및 고찰

3P98S로 구성된 전기자동차 폐배터리 팩을 대상으로 저항방전 시험을 수행하였다. 충·방전 장치 분리 직후 회복전압에 의해 팩 전압은 9.8 V에서 73.86 V까지 상승하였으나, 저항방전 장치의 작동에 따라 20.54 V까지 급격히 감소하였다. 이후 전압 재상승이 지속적으로 억제되면서 팩 전압은 완만하게 감소하여 최종적으로 15.05 V(0.15 V/cell)까지 감소하였으며, 회복전압 최고값 대비 79.62 %의 전압 감소율을 나타냈다.

이후 단락 모드로 전환하여 잔류 전기에너지를 제거한 후 해당 팩을 해체하여 3P10S 모듈을 확보하였다. 확보된 3P10S 모듈을 대상으로 수평 방향 압착 및 파쇄시험을 실시하였다. 압착시험(100–105 kN, 3 min) 결과 전해액 누출, 발화 및 폭발 등의 이상 현상은 관찰되지 않았으며, 파쇄시험에서도 과도한 발열은 발생하지 않고 표면 온도 변화는 1 °C 미만으로 나타났다.

*Corresponding author : 문종근 / mjk1313@kcl.re.kr

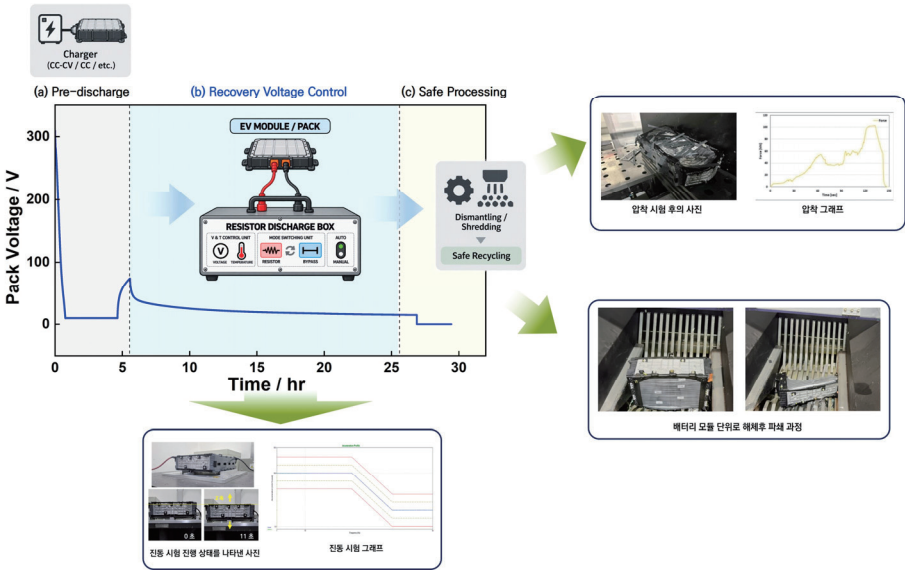


Fig. 1. Recovery Voltage Control and Safety Evaluation of Spent EV Batteries Using a Resistive Discharge Device

한편, 운송 중 진동 환경에서의 안전성을 평가하기 위해 별도로 준비한 3P10S 모듈에 저항방전 장치를 연결하고, KMVSS 48 규격에 따라 진동시험을 실시하였다(7–50 Hz, 10 m/s², 3 h). 연결 후 17 h 경과 시 모듈 전압은 1.22 V(0.12 V/cell)까지 감소하였으며, 진동시험 후에도 1.20 V(0.12 V/cell)로 유지되어 회복전압이 상승하는 거동은 나타나지 않았다. 또한, 저항체 온도의 유의한 변화가 나타나지 않았으며, 발화, 폭발, 벤팅 및 전해액 누출 등의 이상 현상도 관찰되지 않았다.

결론

본 연구에서는 배터리의 직·병렬 구성에 따라 선정된 외부 저항체를 적용하는 저항방전 장치를 개발하여 폐배터리의 회복전압을 효과적으로 제어하였으며, 모드 전환을 통해 잔류에너지를 제거함으로써 운송·보관 및 해체·파쇄 단계에서의 안전성을 확인하였다. 이를 통해 개발된 장치는 배터리 구성 및 공정 단계별 요구조건에 맞추어 폐배터리의 전처리·재활용 현장에서 활용 가능한 안전 방전 기술로 판단된다.

사사

본 연구는 산업통상부(MOTIR)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(과제번호: 20221B1010003A).

PM-02

비활성 촉매로부터 재활용된 희유금속의 시험기준과 품질인증 방안 연구

A study on testing criteria and quality certification methods for recycled rare metal from inert catalysts

김효경[1], 류지승[1], 전미진[1], 전용우[1*]
[1]한국산업기술시험원 탄소중립대응센터

초록

니켈(Ni)은 스테인리스 합금, 이차전지, 도금, 촉매 및 전기·전자산업에 폭넓게 사용되는 핵심 금속으로, 전기차 및 에너지저장장치 보급 확대에 따라 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 동시에 원광·정련 공급망의 지역 편중과 자원안보 이슈, 배터리 재활용 의무 확대에 따라 사용 후 이차전지, 폐전기·전자제품, 니켈 함유 금속 및 제조공정 부산물로부터 회수한 재활용 니켈의 안정적 활용이 중요해지고 있다. 그러나 ISO 6283 및 ASTM B39-79등 기존 규격은 정련 니켈의 화학조성과 순도를 규정하고 있으나, 다양한 폐자원과 재활용 공정에서 유래하는 불순물 특성을 반영한 재활용 금속 니켈의 국내 품질인증기준은 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 재활용 니켈의 품질 신뢰성 확보와 시장 활용 확대를 목적으로 우수재활용제품(Good Recycled Product, GR) 품질인증기준을 제안하였다. 적용대상은 니켈 함유 폐자원으로부터 분리·회수 및 정제하여 제조한 판상, 괴상, 브리켓, 펠릿 및 분말 형태의 금속 니켈로 설정하였으며, 니켈 함량은 99.80 질량% 이상으로 규정하였다. 주요 불순물 기준은 Co 1,500 mg/kg 이하, Cu 및 Fe 200 mg/kg 이하, C 300 mg/kg 이하, S 100 mg/kg 이하, Zn, Pb, P, Si, Mn, As, Bi, Sn 및 Sb는 50 mg/kg 미만으로 설정하였다. 미량 금속 원소는 유도결합플라즈마 방출분광법(ICP-OES)으로 정량하고 C 및 S는 연소-적외선 흡수법을 적용하며, 니켈 순도는 정량된 불순물의 총량을 차감하는 방식으로 산정하도록 시험절차를 구성하였다. 또한 원재료의 발생원 및 로트 이력, 재활용 원료 사용 확인, 주요 공정조건 및 제품검사 기록을 인증심사 항목과 연계하여 재활용 원료의 추적성과 제품 품질의 일관성을 확보하도록 하였다. 향후 산업체 재활용 니켈 시료와 다기관 시험을 통한 시험방법의 정밀도 및 적용성 검증을 수행함으로써 재활용 니켈의 품질인증 기반을 고도화하고, 핵심광물의 국내 순환이용과 공급망 안정화에 기여하고자 한다.

주제어 : 재활용 니켈, GR 인증, 품질기준, ICP-OES, 자원순환

사사

본 연구는 산업통상자원부의 산업혁신기반구축사업(P0021507) 지원으로 수행되었습니다.

* Corresponding author : 전용우 / ywjeon@ktl.re.kr

PM-03

NCM811 블랙파우더로부터 직접 전기화학적 리튬 금속 회수를 위한 작동 전위 범위의 제일원리 계산 기반 고찰

First-Principles Determination of the Operating Potential Window for Direct Electrochemical Lithium Metal Recovery from NCM811 Black Powder

응우옌 쑤언 비엣[1], 주신형[1], 이종현[1,2*]
[1]충남대학교, [2]급속응고신소재연구소

Abstract

DFT and CI-NEB calculations guided preliminary lithium-extraction experiments on NCM black powder. A mean calculated delithiation voltage of 3.85 V, together with composition-dependent Li-migration barriers, informed selection of a 4.20 V experimental cutoff potential, kept 0.10 V below a 4.30 V literature-derived degradation benchmark. Preliminary potentiostatic experiments performed up to this simulation-guided cutoff produced current responses qualitatively consistent with the predicted extraction voltage window, indicating that the calculated potential range can define a viable electrochemical Li-recovery regime for black powder independent of a separate evaluation of electrode-material behavior.

Keywords : Lithium recycling; Black powder; NCM811; DFT; Electrochemical extraction.

Introduction

Increasing global lithium demand, combined with the rapid accumulation of end-of-life lithium-ion batteries, motivates the development of simpler and more direct recycling routes for cathode-derived black powder. Conventional pyrometallurgical and hydrometallurgical processes typically require energy-intensive smelting or multi-step leaching with selective separation of Ni, Co, and Mn prior to lithium recovery. Direct electrochemical extraction from NCM-containing black powder offers a potential alternative that avoids this prior separation step, provided that an appropriate operating potential window can be identified. Selecting this window is not straightforward: an insufficient potential limits the amount of lithium that is thermodynamically extractable, whereas exceeding a literature-derived degradation benchmark risks irreversible side reactions and electrolyte decomposition. This study therefore combines first-principles DFT and CI-NEB calculations with preliminary potentiostatic experiments to determine a computationally guided cutoff potential and, from the resulting voltage and migration-barrier landscape, to clarify the extent to which lithium recovery from black powder is both thermodynamically permissible and kinetically accessible within that window, independent of any separate evaluation of electrode-material behavior.

Computational and Experimental Methods

Density functional theory (DFT) and climbing-image nudged elastic band (CI-NEB) calculations were used to evaluate Li-extraction voltages, Li-migration barriers, and Ni magnetic moments as a function of composition in $Li_xNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ (NCM811), where x denotes the remaining Li fraction relative to the fully lithiated structure. Voltage profiles were obtained from calculated total-energy differences between adjacent delithiated compositions, migration barriers were extracted from the CI-NEB reaction pathway connecting neighboring Li sites at each composition, and the associated Ni magnetic moment

* Corresponding author : 이종현 / jonglee@cnu.ac.kr

was tracked as an indicator of the redox center accommodating charge compensation during delithiation.

Preliminary potentiostatic electrochemical extraction experiments were carried out on black-powder working electrodes assembled in a three-electrode cell, using EC/DMC (1:1) with 1.0 M $LiPF_6$. Guided by the calculated voltage window, the applied potential during Li extraction from the black powder was limited to 4.20 V vs. Li/Li^+, and the resulting current transients recorded during the potential hold were used as a preliminary indicator of the electrochemical response of the black powder under conditions matched to the simulation-derived cutoff.

Results and Discussion

The calculated voltage profile gave a mean Li-extraction voltage of 3.85 V, with all sampled compositions remaining below a selected literature-derived degradation benchmark of 4.30 V (Figure 1). This 0.45 V margin defines a thermodynamically accessible extraction window ahead of the onset of the electrolyte and structural degradation reported in the literature for NCM-type cathodes at higher potentials. Li-migration barriers varied non-monotonically with composition, ranging from 0.02 to 0.54 eV over most of the sampled Li content and rising sharply to 1.16 eV near $x \approx 0.75$. This local maximum coincided with a change in the calculated Ni magnetic moment consistent with a shift in the Ni-centered redox state, indicating a composition-dependent kinetic bottleneck superimposed on an otherwise thermodynamically favorable delithiation pathway. Thermodynamic favorability therefore does not by itself guarantee rapid Li transport, and the calculated barrier landscape shows that Li removal proceeds with markedly different kinetic ease at different states of charge.

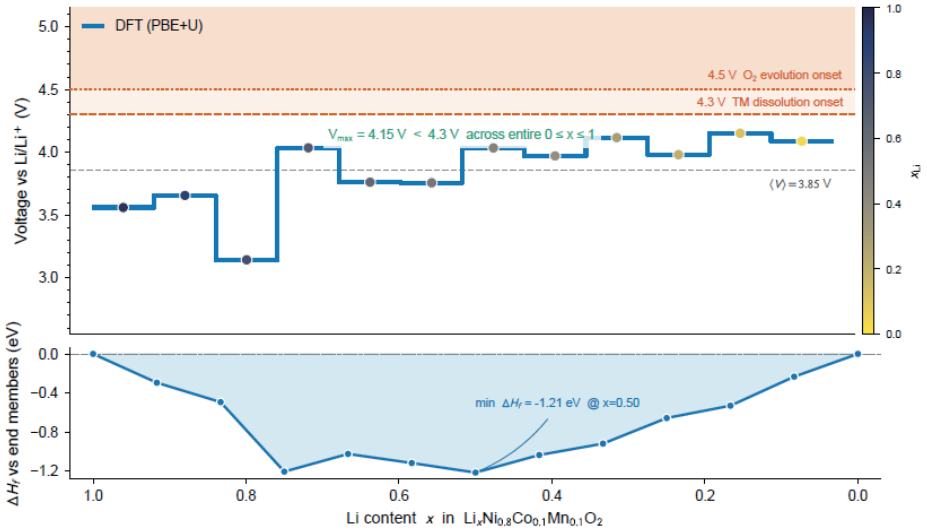


Fig. 1. Calculated voltage profile and Li-migration barrier as a function of composition (x), showing the determination of the operating cutoff potential

With the operating cutoff fixed at 4.20 V, 0.10 V below the 4.30 V benchmark, the calculated barrier landscape can be used to gauge which part of the Li inventory is realistically recoverable within this window. Because migration barriers remain comparatively low (0.02−0.54 eV) over most of the sampled compositions, lithium removal in that range should proceed under mild kinetic resistance at the operating potential, whereas the compositions near $x \approx 0.75$, where the barrier rises to 1.16 eV, are expected to contribute more slowly, if at all, on the timescale accessible to the preliminary experiments. The calculated cutoff should therefore be read not merely as an electrochemical stability limit, but as a boundary separating a kinetically accessible fraction of the Li content from a fraction that is thermodynamically extractable yet transport-limited — a distinction that governs the practically recoverable Li capacity once the cutoff potential has been fixed, independent of any separate evaluation of electrode-material behavior.

Preliminary potentiostatic experiments performed up to the simulation-guided cutoff of 4.20 V vs. Li/Li^+, 0.10 V below the calculated benchmark, produced measurable current responses during the potential hold together with a change in the electrochemical behavior of the black powder after treatment. The onset and general magnitude of this response are

qualitatively consistent with operation inside, rather than outside, the DFT-predicted extraction voltage window, supporting the use of the calculated cutoff to define the experimental operating range and indicating reasonable agreement between the computational and experimental approaches at this preliminary stage. This current response alone, however, cannot quantify the amount of lithium recovered or unambiguously establish its origin, since competing reactions — including electrolyte decomposition or capacitive contributions — may also contribute to the measured current at potentials close to the calculated benchmark. The present results should therefore be read as consistent with, rather than as direct confirmation of, the simulation-predicted Li-recovery window; establishing the actual recovered Li quantity requires ex-situ chemical analysis of the electrolyte or extracted product, which lies beyond the scope of the present preliminary dataset.

Conclusions

Combining DFT/CI-NEB calculations with preliminary potentiostatic experiments allowed an operating cutoff potential of 4.20 V vs. Li/Li^+ to be selected 0.10 V below a 4.30 V literature-derived benchmark, while the calculated migration-barrier landscape further identifies a composition-dependent kinetic bottleneck near $x \approx 0.75$ that, more than the thermodynamic voltage window alone, is likely to limit the fraction of lithium recoverable within a practical timescale. Preliminary experimental current responses obtained at this simulation-guided cutoff are qualitatively consistent with the calculated extraction voltage window, indicating reasonable agreement between the computational and experimental approaches at this stage. This combined framework clarifies the Li-recovery capability implied by the simulation once the cutoff potential is fixed, independent of a separate assessment of electrode-material behavior. Quantitative verification — including chemical analysis of the recovered lithium and its yield, together with evaluation of electrolyte stability, interfacial polarization, and black-powder heterogeneity — remains necessary to confirm the extent of recovery suggested by the present computational and preliminary experimental results.

PM-04

단일 단계 용융 합금화 및 급랭을 통한 $Li_{13}Si_4$의 선택적 합성

Selective $Li_{13}Si_4$ Synthesis via Single-Step Melt Alloying and Quenching

주신형[1], 이종현[1,2*]

[1]충남대학교, [2]급속응고신소재연구소

Abstract

Li recovered from spent NCM black powder via electrorefining (99.97 wt%, 3N) was melt-alloyed with Si (Li:Si=3.25, 750°C, SUS304, Ar) for $Li_{13}Si_4$ synthesis. Stirring across 618°C and quenching suppressed metastable $Li_{16.42}Si_4$, giving single-phase $Li_{13}Si_4$ (XRD/WPPF), reproducible across batches.

주제어 : Thermal Battery, Lithium Siliside, Primary cell, High-Temperature Metallic Synthesis, Melting Synthesis

Introduction

Recycling of spent lithium-ion batteries typically ends at commodity intermediates (Li_2CO_3, LiOH). This work directly converts electrorefined Li metal into $Li_{13}Si_4$, a thermal battery anode material, bypassing salt-conversion steps.

Experimental

Li metal recovered from spent NCM black powder leachate by electrorefining was analyzed by ICP-OES (Table 1). The recovered Li and Si powder (Li:Si molar ratio 3.25) were melt-alloyed in a SUS304 crucible under Ar (glovebox), heated directly to 750°C, held with stirring across the 618°C peritectic transition, and rapidly quenched. Phase identification was by XRD with WPPF refinement.

Table 1. Elemental composition of electrorefined Li metal (ppm)

Element	Ni	Co	Al	Fe	Mn	Li (calc., wt%)
Content	102.07	28.11	ND	65.99	55.57	99.97

Results and Discussion

The recovered Li exceeded the target 3N purity (99.97 wt%), with Ni/Co/Fe/Mn as residual elements and Al below detection limit. XRD and WPPF confirmed single-phase, orthorhombic $Li_{13}Si_4$ with no residual Si or unreacted Li, reproducible across batches. Since $Li_{13}Si_4$ is a congruently melting compound, Li-enriched melt locally retained around solidified $Li_{13}Si_4$ can back-react at ~618°C to re-form $Li_{16.42}Si_4$ on slow cooling; stirring homogenizes the melt while quenching minimizes residence time in this window, together suppressing the metastable phase. Trace-metal carryover from the SUS304 crucible was minor, supporting a low-cost crucible route.

Conclusion

Electrorefined Li from spent NCM black powder was successfully converted into single-phase $Li_{13}Si_4$ via single-step melt alloying with stirring and quenching, linking battery recycling directly to thermal battery anode material supply. (Patent pending.)

* Corresponding author : 이종현 / jonglee@cnu.ac.kr

PM-05

Taylor-Couette 유동을 이용한 기-액 반응 강화 및 고순도 탄산마그네슘의 신속 합성

Rapid Synthesis of High-Purity MgCO3 through Taylor-Couette Flow-Assisted Gas-Liquid Carbonation

김지민[1], 정재민[1], 유재범[2*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]충남대학교

초록

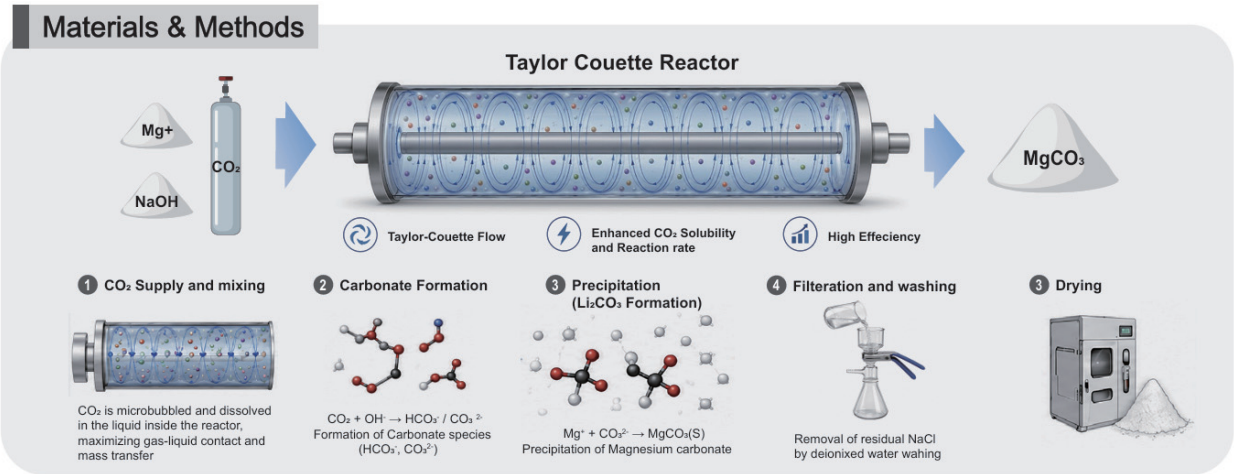
Mg-bearing sulfate solution from graphite purification is discarded, causing Mg loss and wastewater burden. Stirred carbonation limits Mg recovery due to poor gas-liquid contact.

Taylor-Couette flow enhanced CO_2 transfer, yielding uniform Mg carbonate particles (~20 μm) at 1,000 rpm and 0.5 L/min.

흑연 정제 공정에서 발생하는 Mg 함유 황산염 용액은 회수 가능한 Mg를 포함하고 있음에도 후처리 과정에서 배출되어 자원 손실과 폐수 처리 부담을 초래한다. 또한 기존 교반식 탄산화는 기-액 접촉과 CO_2물질전달이 제한되어 신속한 Mg 회수에 한계가 있다.

이를 해결하기 위해 CO_2와 Taylor-Couette 유동을 결합한 탄산화 공정을 적용하였다. Taylor vortex의 강한 전단력은 미세 기포 형성을 통해 기-액 접촉을 증가시켜 반응 속도를 향상하였다. 최적조건은 1,000 rpm, CO_2 0.5 L/min에서 평균 20 μm의 균일한 입도의 탄산마그네슘계 소재를 제조하였다.

Keywords : Taylor-Couette flow; Gas-liquid reaction; Magnesium carbonate; Rapid synthesis; Carbon Capture Utilization



*Corresponding author : 유재범 / jb.you@cnu.ac.kr

PM-06

폐배터리 유래 조탄산리튬의 고순도화 및 수산화리튬 전환 공정 연구

Purification of Crude Lithium Carbonate Derived from Spent Batteries and Conversion to Lithium Hydroxide

김재형[1], 이지현[1], 홍현선[2*]

[1]성신여자대학교 미래응용과학학과, [2]성신여자대학교 청정신소재공학과

초록

본 연구에서는 폐배터리 재활용 공정에서 회수된 조탄산리튬(crude Li_2CO_3)의 고순도화와 이를 수산화리튬으로 전환하는 공정을 검토하였다. 조탄산리튬은 탄산수소화(bicarbonation) 공정을 통해 $LiHCO_3$로 전환한 후 불용성 불순물을 제거하고, 가열에 의해 Li_2CO_3를 재석출하였다. 정제 전·후 시료에 대해 ICP-OES, XRD 및 SEM 분석을 수행한 결과, Al, Ni, Cu, Co 및 Na 등의 불순물 농도가 감소하였으며, 특히 Na는 약 94% 감소하였다. 이후 정제된 Li_2CO_3를 $Ca(OH)_2$와 반응시켜 LiOH 수용액으로 전환하고, 생성된 $CaCO_3$를 여과 제거하였다. 얻어진 LiOH 수용액에 isopropyl alcohol(IPA)을 항용매로 첨가하여 결정화를 수행하였으며, XRD 분석을 통해 $LiOH·H_2O$ 상을 확인하였다. 또한 항용매 주입속도에 따라 결정 형상이 변화하였으며, 열처리를 통해 LiOH로의 전환 가능성도 확인하였다. 이상의 결과로부터 탄산수소화–가성화–항용매 결정화 공정을 이용하여 폐배터리 유래 저순도 리튬 자원을 고순도 리튬 화합물로 전환할 수 있음을 확인하였다.

서론

전기자동차 및 에너지저장장치의 보급 확대에 따라 사용후 리튬이온전지의 발생량이 증가하고 있으며, 이로부터 Li, Ni, Co, Mn 등의 유가금속을 회수하여 다시 배터리 원료로 활용하는 자원순환 기술의 중요성이 높아지고 있다. 특히 리튬은 재활용 공정에서 Li_2CO_3 형태로 회수될 수 있으나, 실제 회수된 조탄산리튬에는 Na와 일부 금속 불순물이 잔류할 수 있어 고순도 원료로 활용하기 위해서는 추가적인 정제 공정이 필요하다.

Table 1. Comparison of impurity concentrations in crude and purified Li_2CO_3

Elements	Raw Li_2CO_3 (mg/kg)	Purified Li_2CO_3 (mg/kg)	Reduction (%)
Al	90.9	63.8	30%
Ni	12.7	6.0	53%
Cu	16.8	2.0	88%
Co	19.1	4.0	79%
Mn	4.6	6.0	-29%
Mg	49.2	55.8	-13%
Ca	405.5	1,349.7	-233%
Na	70,667.3	3,891.5	94%

탄산수소화 공정은 Li_2CO_3를 CO_2 및 H_2O와 반응시켜 수용성 $LiHCO_3$로 전환한 후 불용성 불순물을 제거하고, 다시 Li_2CO_3를 재석출시키는 정제 방법이다. 또한 정제된 Li_2CO_3는 $Ca(OH)_2$와의 가성화 반응을 통해 LiOH로 전환할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 폐배터리 유래 조탄산리튬의 고순도화와 LiOH 전환 공정을 연계하고, 최종적으로 IPA 항용매 결정화를 통해 $LiOH·H_2O$를 제조하여 리튬 자원의 고부가가치화 가능성을 평가하였다.

*Corresponding author : 홍현선 / hshong@sungshin.ac.kr

재료 및 실험방법

폐배터리 재활용 공정에서 회수된 조탄산리튬을 원료로 사용하였다. 조탄산리튬을 수용액에 분산시킨 후 CO_2를 주입하여 Li_2CO_3를 수용성 $LiHCO_3$로 전환하였으며, 반응 후 불용성 불순물을 여과하여 제거하였다. 이후 여액을 가열하여 CO_2를 방출시키고 Li_2CO_3를 재석출하였다. 정제 전·후 시료의 불순물 농도와 결정 특성 변화를 확인하기 위해 ICP-OES, XRD 및 SEM 분석을 수행하였다.

정제된 Li_2CO_3는 $Ca(OH)_2$와 반응시켜 LiOH 수용액으로 전환하였으며, 반응 중 생성된 $CaCO_3$ 침전물을 여과 제거하였다. 이후 LiOH 수용액에 IPA를 항용매로 주입하여 결정화를 수행하였으며, 주입속도에 따른 결정 형상 변화를 비교하였다. 회수된 생성물은 XRD와 SEM을 이용하여 결정상과 입자 형상을 분석하였고, 일부 시료는 열처리 후 결정상 변화를 확인하였다.

결과 및 고찰

탄산수소화 공정 전·후 ICP-OES 분석 결과, Al, Ni, Cu, Co 및 Na 등의 불순물 농도가 감소하였으며, 특히 Na는 약 94% 감소하였다. 이는 Li_2CO_3가 $LiHCO_3$로 전환되는 과정에서 불용성 불순물이 분리되고, 이후 Li_2CO_3가 다시 석출되면서 불순물과의 분리가 이루어진 결과로 판단된다. XRD 분석에서는 정제 후에도 Li_2CO_3의 주요 결정상이 유지되었으며, SEM 분석에서는 정제 과정에 따른 입자 형상 및 크기 변화가 관찰되었다.

정제된 Li_2CO_3는 $Ca(OH)_2$와의 가성화 반응을 통해 LiOH 수용액으로 전환되었으며, 생성된 $CaCO_3$를 고액 분리함으로써 LiOH를 용액상으로 회수할 수 있었다. 이후 IPA를 첨가하여 항용매 결정화를 수행한 결과, 주입속도에 따라 결정의 형상과 성장 거동에 차이가 나타났다. 최종 선정 조건에서 얻어진 결정의 XRD 분석 결과 $LiOH·H_2O$ 상이 확인되었으며, 열처리 후에는 LiOH로의 전환 가능성을 확인하였다. 이를 통해 정제된 Li_2CO_3로부터 LiOH계 화합물을 제조할 수 있음을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 탄산수소화 공정을 이용하여 폐배터리 유래 조탄산리튬의 불순물을 저감하고, 정제된 Li_2CO_3를 가성화 및 항용매 결정화 공정을 통해 $LiOH·H_2O$로 전환하였다. 탄산수소화 후 주요 불순물의 농도가 감소하였으며, 특히 Na가 약 94% 제거되어 정제 효과를 확인하였다. 또한 $Ca(OH)_2$를 이용한 가성화 반응과 IPA 항용매 결정화를 통해 $LiOH·H_2O$를 회수하였고, 열처리 후 LiOH로의 전환 가능성도 확인하였다. 따라서 본 공정은 폐배터리에서 회수된 저순도 리튬 자원을 고순도·고부가가치 리튬 화합물로 전환하기 위한 재자원화 공정으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

PM-07

제조방식 변화에 따른 소다라임 특성 평가

Effects of Preparation Methods on the Properties of Soda Limes

김영진[1], 김나영[1], 김태형[1], 정우철[1], 조진상[1*]

[1]한국석회석신소재연구소 연구개발부

초록

소다라임(Soda lime)은 소석회를 주원료로 제조하는 이산화탄소 흡수제로, 의료 및 잠수용 재호흡 장치 등에서 활용된다. 소다라임의 활용성을 높이기 위해서는 이산화탄소와의 반응성뿐 아니라 취급 과정에서의 마모와 분진 발생을 고려한 물성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 소다라임의 제조 방식(디스크형 펠렛타이저 방식 및 압출 방식) 변화에 따른 비표면적, 탄산화 반응 특성 및 마손도 등을 비교하였다. 실험을 위해 수산화나트륨(NaOH), 수산화칼륨(KOH), 지시약(Ethyl Violet)이 균질하게 혼합될 수 있도록 물에 넣고 완전히 녹여 수용액 상태로 제조하였고, 수용액을 소석회 분말에 분사 및 혼합하여 실험하였다. 디스크 펠렛타이저를 이용한 실험은 회전하는 분말층에 수용액을 분사하여 구형 펠렛을 성장시켰고, 압출식은 수용액과 혼합한 반죽을 타공판을 통해 압출하여 기둥형 펠렛을 제조하였다. 소다라임의 특성 평가를 위한 이산화탄소 반응시험은 순도 99%의 CO_2를 1 L/min.으로 20분간 공급하여 수행하였다. 반응 전후의 특성은 X선회절분석(XRD), 열중량분석(TGA), 비표면적 분석(BET) 및 마손도 시험(Tablet Friability Test)을 평가하였다. 분석 결과, 디스크 펠렛타이져를 이용하여 제조한 소다라임의 비표면적이 압출방식에 비해 2배 이상 높게 확인되었으며, 탄산칼슘으로의 전환율도 약 2배 이상 차이가 나타났다. 마손도의 경우, 압출식으로 제조한 소다라임이 약 1 % 수준으로 가장 낮은 특성을 확인하였다.

주제어 : 소다라임, 디스크 펠릿타이저, 압출식, 이산화탄소

*Corresponding author : 조진상 / chsang@kilam.re.kr

PM-08

폐 Cu 타겟 전해정련 시 전위 및 시간 조건에 따른 Cu 전착 성장 거동 및 평가

Growth Behavior and Evaluation of Copper Electrodeposits as a Function of Applied Potential and Electrolysis Time during Electrorefining of Waste Cu Targets

문정식[1], 박지니[1], 김대근[1], 임병용[1*]
[1]고등기술연구원 신소재공정센터

초록

반도체 공정에서 발생하는 폐 Cu 타겟의 고부가가치 재활용을 위해 전해정련을 적용하고, 전위 및 시간 조건에 따른 Cu 전착 성장 거동을 평가하였다. $CuSO_4$-H_2SO_4계 전해액에서 정전위 전해정련을 수행하여 전위별 전류밀도와 총 전하량을 분석하고, 이론 및 실제 Cu 석출량을 비교하여 전류효율을 평가하였다. 또한 EBSD를 통해 전착층의 결정립 성장 거동을 분석하고 ICP-OES로 순도를 평가하였다. 그 결과 약 98% 이상의 전류효율과 4N7 이상의 Cu 순도를 확인하여 폐 Cu 타겟의 고순도 Cu 회수 가능성을 확인하였다.

주제어 : 폐 Cu 타겟, 전해정련, 전착, 고순도 Cu

서론

반도체 소자의 고집적화 및 미세화에 따라 배선 및 박막 형성에 사용되는 고순도 Cu의 수요가 증가하면서 공정 후 발생하는 폐 Cu 타겟의 재활용 및 고부가가치화 기술이 요구되고 있다. 전해정련은 양극의 Cu를 전기화학적으로 용해하여 음극에 선택적으로 전착시키는 공정으로, 인가 전위와 전해 시간은 전류밀도, 전착량 및 전착층의 성장 거동에 영향을 미치는 주요 공정변수이다. 따라서 본 연구에서는 폐 Cu 타겟의 전해정련 시 전위 및 시간에 따른 전류밀도와 총 전하량을 분석하고, 이론 및 실제 Cu 석출량을 비교하여 전류효율을 평가하였다. 또한 전착 Cu의 미세조직과 불순물 함량을 분석하여 전해정련 조건에 따른 Cu 전착 성장 거동과 고순도화 특성을 평가하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 폐 Cu 타겟으로부터 회수된 조동(Crude Cu)을 전해정련 원료로 사용하였으며, XRF 분석 결과 Cu 함량은 98.77 wt%로 확인되었다.

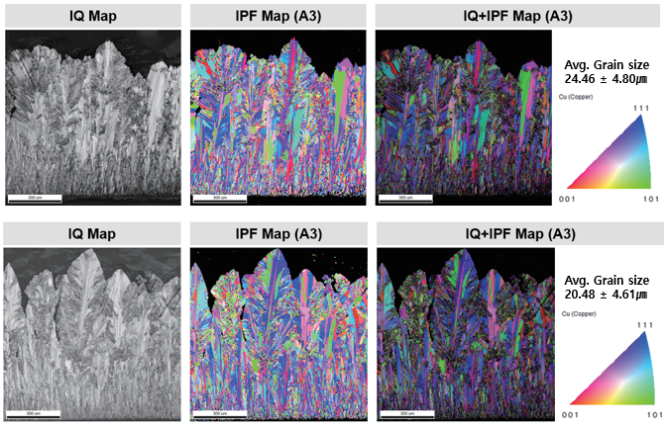
Table 1. Chemical composition of crude copper used for eletrorefining

El	Cu	Si	Al	Ca	P	Mg	Cl
Content (%)	98.7727	0.3176	0.5825	0.0698	0.0552	0.0516	0.0483

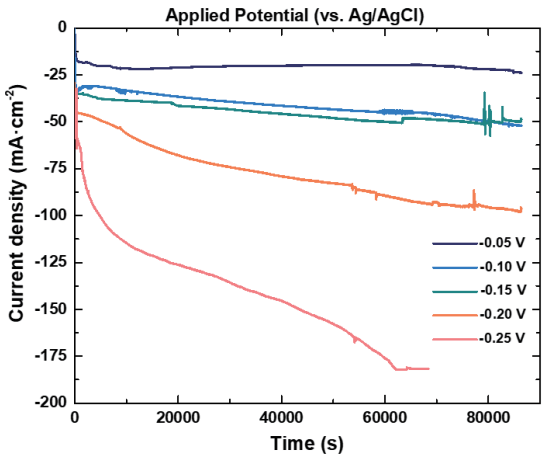
결과 및 고찰

폐 Cu 타겟의 전해정련 시 인가 전위에 따른 Cu 전착 거동을 평가하기 위해 −0.05~−0.25 V(vs. Ag/AgCl)의 전위 조건에서 24 h 동안 정전위 전해정련을 수행하였다. 전해정련 결과(Fig. 1(a)), 인가 전위가 음의 방향으로 증가함에 따라 전류밀도의 절대값이 증가하였으며, 이에 따라 Cu 전착량도 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 측정된 총 전하량으로부터 이론적 Cu 석출량을 산출하고 실제 전착량과 비교한 결과, 95% 이상의 전류효율을 나타내어 안정적인 Cu 전착이 이루어졌음을 확인하였다.

*Corresponding author : 임병용 / imby@iae.re.kr



(a) Current density at different applied potentials



(b) EBSD maps of electrodeposited Cu in vertical and horizontal directions

Fig. 1. Electrochemical behavior and microstructure of electrodeposited Cu during electrorefining

−0.10 V(vs. Ag/AgCl) 조건에서 전착된 Cu의 미세조직을 Vertical 및 Horizontal 방향으로 EBSD 분석한 결과(Fig. 1(b)), 전착 방향을 따라 발달한 주상 형태의 결정립 조직이 관찰되었다. 평균 결정립 크기는 Vertical 방향에서 24.46 ± 4.80 μm, Horizontal 방향에서 20.48 ± 4.61 μm로 나타나 분석 방향에 따른 차이를 보였다. 이는 Cu 전착층이 전착 방향을 따라 방향성을 갖는 결정립 성장 거동을 나타내는 것으로 판단되며, 이를 통해 해당 전해정련 조건에서 Cu 전착층의 형성 및 결정립 성장 거동을 확인하였다.

결론

폐 Cu 타겟으로부터 고순도 Cu를 회수하기 위해 정전위 전해정련을 수행하고, 전위 및 시간 조건에 따른 전류밀도, 전착량 및 전류효율을 평가하였으며, EBSD와 ICP-OES 분석을 통해 Cu 전착층의 결정립 성장 거동과 고순도 Cu 회수 가능성을 확인하였다.

PH-09

아연 제련공정에서 발생 된 폐Mg-Cr내화벽돌을 재활용한 내화물의 기초 평가

Evaluation of Mg-Cr Refractory Utilizing Spent Mg-Cr Bricks from Zinc Smelting Processes

김희선[1], 김대원[1*], 진연호[1], 김현아[2], 양수영[2]
[1]고등기술연구원 소재부품연구본부, [2]금강RC

초록

비철금속 제련 공정 중 아연소광분진에서 고순도 산화아연을 제조하는 과정에서 다량의 Mg-Cr 폐내화물이 발생하며, 이에 대한 재활용 기술 개발이 요구되고 있다. 사용 후 Mg-Cr 내화벽돌을 분석한 결과, 제련 시 발생하는 NiO 및 ZnO 등의 +2가 금속이 크롬철광중의 MgO를 치환하면서 Mg-Cr 내화벽돌의 손상이 진행되고, 배면으로 갈수록 $NiCr_2O_4$의 생성량이 감소하는 현상이 확인하였다.

본 연구에서는 이러한 분석 결과를 바탕으로, +2가 금속에 의한 침윤을 저감시키는 배합 설계를 적용하여 폐 Mg-Cr 내화물을 재활용한 내화벽돌을 제조하고 그 특성을 평가하였다. 폐내화물의 재활용을 위해 Roller Crusher 방식의 2차 파쇄 및 선별 설비를 자체 설계 및 제작하여 5～3 mm, 3～1 mm, 1 mm 이하의 3가지 입도로 분쇄물을 제조하였다. 재생 내화벽돌은 폐 Mg-Cr 내화벽돌 분쇄물을 75～100% 사용하여 배합되었다. 이후 100 kg/cm² 이상의 일축 가압성형을 거쳐 1,750°C 이상의 공기 중 분위기에서 소성하였다.

제조된 재생 내화벽돌의 미세구조를 분석한 결과, MgO 결정립들이 균일하게 분포하고 있으며 $(Mg, Fe)Cr_2O_4$ 2차 Spinel에 의해 결정립들이 연결 및 치밀화된 구조를 형성함을 확인하였다. 주요 물성 평가 결과, 밀도는 3.02 g/cm³ 이상, 기공율은 17.1% 이하를 나타내었다. 특히 주요 성능 지표인 압축강도는 300 kg/cm² 이상, 열간팽창율은 1.3% 이하를 기록하여 해당 연구 단계의 정량적 목표치인 압축강도 300 kg/cm² 이상 및 열간팽창율 1.9% 이하를 성공적으로 달성하였다. 본 연구 결과는 아연 제련 공정에서 발생하는 Mg-Cr 폐내화물의 고부가가치 자원화 가능성을 제시한다.

주제어 : 아연 제련, Mg-Cr 폐내화벽돌, 열간팽창율, 압축강도

감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 패키지형 RS-2024-0044834)

*Corresponding author : 김대원 / mdsimul@naver.com

PM-10

폐리튬전지 재자원화에서 NaOH 처리를 통한 블랙매스로부터 알루미늄 제거가 리튬 회수율에 미치는 영향

Effect of Aluminum Removal by NaOH Treatment on Lithium Recovery from Spent Lithium-Ion Battery Black Mass

권현석[1,2], 주우현[1,2], 신현호[1,2], 조용수[1*], 이철경[2†]

[1]아이에스에코솔루션, [2]국립금오공과대학교

초록

폐리튬이온전지에서 발생하는 블랙매스(Black mass)에는 Li, Ni, Co, Mn 등의 유가금속과 함께 집전체인 금속 알루미늄이 불순물로서 혼재한다. 블랙매스 내 리튬을 선택적으로 탄산화한 후 수침출을 통해 회수하는 공정 개발 과정에서, 알루미늄이 열처리 중 리튬과 반응하여 난용성인 $LiAlO_2$를 형성함으로써 리튬 탄산화 반응을 저해하고 최종 회수율을 떨어뜨리는 주요 불순물로 작용함을 확인하였다. 본 연구는 탄산화 열처리 이전 단계에서 NaOH 수용액을 이용한 알칼리 전처리로 알루미늄을 선택적으로 용출·제거함으로써 리튬 탄산화 반응과 최종 리튬 회수율을 향상시키는 것을 목적으로 하며, NaOH 첨가 당량비·고액비·반응시간을 주요 변수로 하여 알루미늄 제거율과 리튬 손실률의 관계를 규명하였다.

NaOH 첨가 당량비, 고액비, 반응시간에 따라 알루미늄 제거율과 리튬 손실률을 비교하여, 리튬 손실을 최소화하면서 알루미늄을 효과적으로 제거할 수 있는 적정 조건을 도출하였다, NaOH 처리를 통해 블랙매스 내 알루미늄이 수용액상으로 선택적 용출되어 제거됨을 확인하였다. NaOH 전처리 시료에서는 무처리 시료 대비 $LiAlO_2$ 형성이 억제되고 리튬의 탄산화 반응이 촉진되었다. 특히 수침출 가능한 리튬 화합물 생성이 증가하여 전처리 시료의 최종 리튬 회수율이 무처리 시료 대비 향상됨을 확인하였다.

블랙매스 내 알루미늄은 탄산화 열처리 과정에서 $LiAlO_2$를 형성하여 리튬 탄산화 반응 및 회수율을 저해하는 핵심 불순물로 작용한다. 탄산화 열처리 전 NaOH 알칼리 전처리를 통해 알루미늄을 선택적으로 제거함으로써 $LiAlO_2$형성을 억제하고 리튬 탄산화 반응을 촉진할 수 있으며, 이를 통해 최종 리튬 회수율을 효과적으로 향상시킬 수 있었다.

주제어 : 블랙매스, 리튬 회수, 알루미늄 제거, NaOH 전처리, 탄산화 열처리

*Corresponding author : 조용수 / ys_jo@isecosolution.com

† Corresponding author : 이철경 / cklee@kumoh.ac.kr

PM-11

염소화 기반 재활용 공정 중 $LiFePO_4$ 양극재의 입자 단위 분석

Particle-Level Analysis of $LiFePO_4$ Cathode upon Chlorination-Based Recycling Process

김성욱[1*], 전민구[1], 김형섭[1], 김경선[1,2]

[1]한국원자력연구원, [2]고려대학교 화공생명공학과

초록

염소화 반응을 이용한 $LiFePO_4$ 양극재의 재활용 공정이 개발되었다. 투과전자현미경을 이용해 재활용 과정에서 얻어지는 초기 $LiFePO_4$, $FePO_4$ 염소화 생성물, 재합성 $LiFePO_4$의 입자 단위 특성 변화를 확인하였다. Li 제거/재삽입 과정에서 입자 구조 및 결정 구조가 안정적으로 유지되었으며 Fe 산화수도 가역적으로 변화하였다. 단, 재합성 $LiFePO_4$ 표면에서 탄소층 소실 및 불규칙 미세 입자 형성을 관찰하였으며, 추후 이를 억제하기 위한 공정 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

주제어 : 리튬이차전지, LiFePO4, 염소화, 재활용, 투과전자현미경

서론

전기차 시장에서 단가가 낮고 안전성이 우수한 $LiFePO_4$ 배터리의 보급이 활발하게 이루어지고 있다. 이에 따라 $LiFePO_4$ 양극재의 재활용 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다. Cl_2는 Li와 같은 알칼리 금속과 반응성이 좋다. 이를 이용해 염소화 기반의 재활용 공정을 설계하였다. $LiFePO_4$를 Cl_2와 반응시키면 수용성 LiCl과 비수용성 $FePO_4$가 형성된다. 후속 용해/여과 과정을 통해 LiCl과 $FePO_4$를 손쉽게 분리할 수 있다. 수용액 내 LiCl은 기존 공정을 통해 Li_2CO_3, LiOH 등의 전구체로 전환된다. $FePO_4$도 Li_2CO_3 등과 반응시키면 $LiFePO_4$로 재합성 할 수 있다.

본 연구에서는 재활용 공정 중 소재의 변화를 파악하기 위해 투과전자현미경 분석을 수행하였다. 투과전자현미경은 입자의 형상 뿐 아니라 결정구조 및 화학적 특성에 대한 정보도 동시에 관찰할 수 있다는 장점이 있다. 투과전자현미경의 입자 단위 분석 결과와 기존 거시적 분석 결과를 비교하여 상호보완적으로 활용하면 $LiFePO_4$ 재활용 공정에 대한 전반적인 이해도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

재료 및 실험방법

표면에 탄소층이 코팅되어 있는 상용 $LiFePO_4$(MTI)를 시작물질로 활용하였다. 튜브 퍼니스를 이용해 200도의 온도에서 초기 $LiFePO_4$(P-LFP)를 Ar/Cl_2 기체와 반응시켰다. 염소화 반응에 의해 생성된 LiCl가 $FePO_4$가 공존하는 생성물을 초순수에 분산/용해 시킨 후 여과를 거쳐 LiCl 수용액과 $FePO_4$ 분말을 분리하였다. $FePO_4$ 생성물(C-FP)에 $LiOH{\cdot}H_2O$를 혼합한 후 Ar/H_2 분위기에서 650도로 가열하여 재합성 $LiFePO_4$(R-LFP)를 얻었다.

결과 및 고찰

그림 1은 염소화 기반의 폐양극재 재활용 공정을 보여주는 그림이다. Cl_2가 적절한 선택도를 가지는 조건에서 염소화 반응을 진행시키면 양극재에서 Li만 선택적으로 추출할 수 있다. Li이 제거된 전이금속 화합물에 다시 Li를 투입하면 양극재의 재합성이 가능하다.

그림 2는 $LiFePO_4$ 양극재의 재활용 공정 단계에 따른 P-LFP, C-FP, R-LFP의 투과전자현미경 사진이다. 전반적으로 입자의 크기와 형상은 안정적으로 유지되었다. 단, R-LFP 입자 표면에서 탄소층 소실 및 불규칙 미세 입자 형성이 관찰되는데, 이는 재합성 과정에서 탄소층 산화, 물리적 충격, 표면 불균일 반응 등의 영향으로 보인다. 전자 회절 패턴 분석을 통해 Pnma 결정

*Corresponding author : 김성욱 / swkim818@kaeri.re.kr

구조가 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. Fe의 산화수 변화를 전자 에너지 손실 분광법을 이용해 분석하였다. 염소화 과정에서 Fe 산화수가 증가하고 재합성 과정에서 다시 Fe 산화수가 감소하였다. 재활용 과정에서 입자 단위의 결정구조와 Fe 산화수의 변화는 X선 회절법과 뫼스바우어 분광법 등으로 확인한 거시적 변화와 일치하였다. 이를 통해 입자 단위에서 염소화 및 재합성 반응이 균일하게 일어나는 것을 확인하였다.

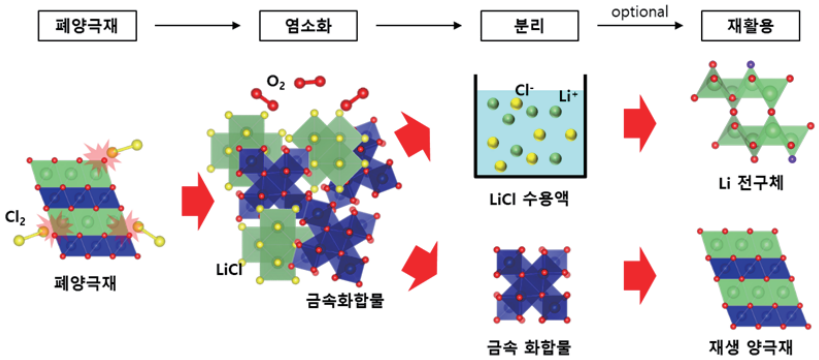
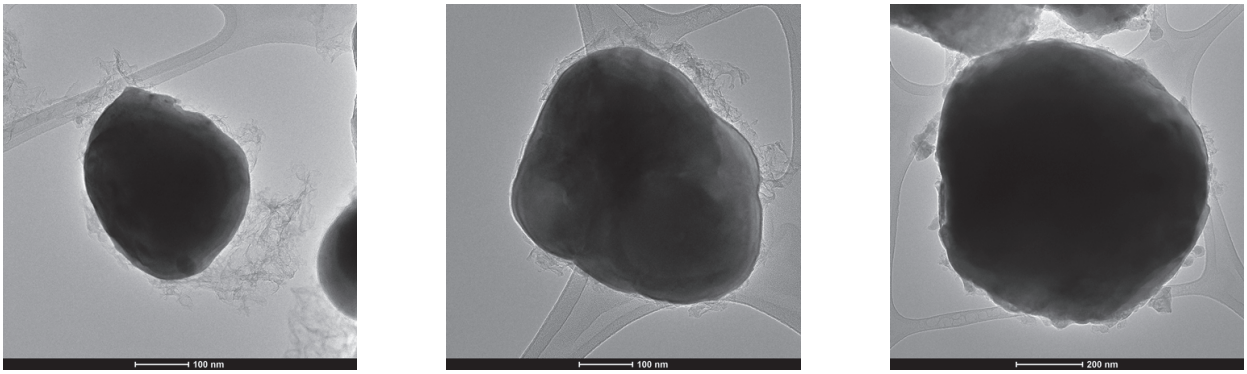


Fig. 1. Lithium-ion battery cathode recycling process based on chlorination



(a) P-LFP (b) C-FP (c) R-LFP

Fig. 2. Transmission electron microscope images

결론

투과전자현미경을 통해 염소화 기반 재활용 공정 중 $LiFePO_4$ 입자의 변화를 분석하였다. 특히, 거시적 분석 방법으로는 판단이 어려운 표면 영역 분석을 통해 P-LFP와 R-LFP의 표면 특성 차이를 확인하였다. 표면 특성 변화는 R-LFP의 전기화학적 특성에 영향을 줄 수 있다. 추후 최적화 단계에서 재합성 입자의 표면 특성을 효과적으로 제어할 수 있는 공정 조건의 확보가 필요한 것으로 판단된다.

PM-12

사용후 배터리로부터 전기화학적 수산화리튬 회수 및 양극활물질 재합성을 통한 폐쇄형 자원순환 연구

Closed-Loop Recycling through Electrochemical Recovery of Lithium Hydroxide and Resynthesis of Cathode Active Materials from Spent Lithium-Ion Batteries

김은석[1,2], 임하나[1], 최진섭[2], 김현종[1*]
[1]한국생산기술연구원, [2]인하대학교

배터리 산업의 성장과 함께 리튬을 비롯한 핵심 원료의 수요가 지속적으로 증가하면서, 사용후 배터리에 포함된 유가자원을 다시 활용하기 위한 재활용 기술의 중요성도 높아지고 있다. 사용후 배터리는 리튬을 비롯한 다양한 유가금속을 함유한 2차 자원으로서, 이들 자원을 회수하여 배터리 소재 생산에 다시 활용하는 것은 신규 원료의 사용을 줄이고 자원의 순환 이용을 확대하기 위한 중요한 방법이다. 그러나 회수된 자원을 실제 배터리 소재의 원료로 재사용하기 위해서는 단순히 유가금속을 높은 회수율로 확보하는 것만으로는 충분하지 않다. 회수 과정에서 유입되거나 잔존하는 불순물은 후속 소재 합성과 전기화학적 특성에 영향을 줄 수 있으므로, 재사용 목적에 적합한 수준으로 불순물 함량을 제어하고 요구되는 화학적 형태와 품질을 확보해야 한다. 따라서 사용후 배터리의 재활용은 유가금속의 회수에 그치지 않고, 회수 자원을 다시 배터리 소재로 활용할 수 있도록 분리·정제하고 적절한 화합물로 전환하는 과정까지 연계하여 고려할 필요가 있다.

이러한 관점에서 습식제련 공정은 비교적 높은 금속 회수율을 보이며 사용후 리튬이온전지로부터 유가금속을 회수하기 위한 대표적인 방법으로 널리 활용되어 왔지만 침출 이후 금속을 분리하고 정제하는 과정에서 과량의 산이나 염기성 pH 조절제, 침전제 등의 추가적인 화학약품이 요구되는 문제점이 있다. 이로 인해 중화염과 폐수의 발생량이 증가하고 공정 단계가 복잡해질 수 있으며, 특히 리튬의 경우 수용액상으로 회수된 이후에도 배터리 소재의 원료로 다시 활용하기 위해서는 불순물 제거와 함께 목적에 맞는 리튬 화합물로 전환하는 추가 공정이 필요할 수 있다. 따라서 리튬 재활용 공정은 단순히 회수율을 높이는 데 초점을 맞추기보다, 화학약품의 사용과 후처리 부담을 줄이면서도 리튬을 선택적으로 분리하고 후속 소재 제조에 적합한 형태로 전환할 수 있도록 설계될 필요가 있다.

본 연구에서는 사용후 배터리로부터 리튬을 회수하고 이를 다시 양극재 원료로 활용하기 위한 연계형 자원순환 공정을 구성하였다. 먼저 별도의 NaOH와 같은 알칼리성 pH 조절제를 투입하지 않고 고액비(S/L ratio), 산 투입량 및 반응조건을 조절하여 원료 내 주요 전이금속 성분인 Fe의 용출을 억제하면서 Li가 선택적으로 수용액상으로 이동할 수 있는 조건을 검토하였다. 이를 통해 후속 침전 및 중화공정에 대한 의존도를 낮추는 동시에, Li가 상대적으로 농축되고 불순물 함량이 제어된 수용액을 확보하여 후속 전기화학적 전환 공정에 적용하였다. 이와 같이 회수된 Li 함유 용액으로부터 배터리용 리튬 전구체인 LiOH를 제조하기 위하여 양이온교환막(cation exchange membrane, CEM)을 적용한 전기화학적 전환 공정을 구성하였다. 양극실과 음극실을 CEM으로 분리하고 전기장을 인가하여 양극실의 Li^+가 막을 통해 음극실로 이동하도록 하였으며, 음극에서의 물 환원반응에 의해 생성되는 OH^-와 결합하여 LiOH가 농축되도록 하였다. 이 과정에서 Li_2SO_4 농도와 전류밀도 등 주요 운전변수가 Li^+ 이동 및 LiOH 전환·농축 거동에 미치는 영향을 평가하였으며, 전극 배치와 셀 구조를 함께 고려하여 안정적인 운전조건을 검토하였다. 특히 침출 단계에서 Fe의 용출을 선제적으로 억제한 후 막 기반 전기화학 공정을 연계함으로써, 후속 공정으로의 불순물 유입을 최소화하면서 Li를 분리·농축할 수 있도록 공정을 구성하였다. 이는 추가적인 화학적 정제단계의 부담을 완화하면서 고순도 LiOH 확보 가능성을 높일 수 있는 공정적 장점이 있다. 최종적으로 전기화학 공정을 통해 회수한 LiOH를 리튬 전구체로 사용하여 $LiCoO_2$(LCO) 양극활물질을 합성하고, 결정구조와 전기화학적 특성을 평가하여 회수 리튬의 배터리 소재 재사용 가능성을 검토하였다.

즉, 본 공정은 사용후 배터리에서 리튬을 선택적으로 수용액상으로 분리하는 단계에서 그치지 않고, LiOH로 전환·농축한 후 이를 다시 양극활물질 제조에 적용함으로써 회수 원료의 실제 소재 활용 가능성까지 연계하여 평가하였다. 이러한 접근은 화

* Corresponding author : 김현종 / hjkim23@kitech.re.kr

학약품과 후처리 공정의 부담을 저감하는 동시에 회수 리튬의 품질을 제어하고, 이를 다시 양극재 제조에 투입할 수 있는 자원 순환 경로를 제시한다는 점에서 의의가 있다. 나아가 사용후 배터리 유래 리튬을 다시 배터리 소재 제조에 활용하는 battery-to-battery 자원순환의 가능성을 제시하였으며, 본 연구에서 검토한 공정이 향후 회수 리튬의 고순도화, 공정 최적화 및 다양한 배터리 소재로의 적용을 위한 후속 연구로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : 수산화 리튬, 수전해공정, 폐배터리, 전기화학 반응

PM-13

커피박의 다단계 처리공정을 통한 친환경 기능성 소재화

Eco-friendly functional materialization through a multi-stage processing of coffee grounds

신창훈[1,2*], 하정현[1]

[1]주식회사 네오에코, [2]서울시립대학교 환경공학과

초록

한국의 성인 한 명이 1년간 소비하는 커피양은 세계 평균보다 높으며 계속 증가하고 있다. 카페 수도 매년 증가하고 있으며 한국의 커피 전문점 시장은 이제 세계적인 규모가 되었다.

커피의 99.8%는 커피를 추출한 후 남겨진 커피박(粕, 커피 찌꺼기)이며 커피박을 매립 및 소각하는 과정에서 배출되는 이산화탄소도 상당하여 문제가 되고 있다. 커피박은 커피 소비 증가에 따라 매년 대량으로 발생하여 빠른 속도로 늘어나고 있으며 주로 퇴비나 고형연료로 활용되고 있지만 여전히 많은 양의 커피박이 제대로 활용되지 못하고 있다. 따라서, 커피박의 효율적인 재활용 방안이 필요하며 새활용을 통해 부가가치가 높은 소재로 활용해야 한다.

본 연구는 국내에서 급격히 증가하는 커피박 폐기물을 다단계 처리공정을 통해 효율적으로 활용하여 기능성 소재로 제조하는 기술을 개발하고 그 사업화 가능성을 검토하였다. 본 연구에서는 커피박을 세척·건조 후 추출 및 탄화·활성화 과정을 거쳐 흡착 능력이 우수한 친환경 흡착제를 제조하였다. 열분석(TGA/DTA/DSC) 결과 저온 처리가 최적 조건임을 확인하였으며, 커피박을 액상 추출 후 탄화 및 활성화 처리할 때 TOC 제거율이 기존 활성탄과 유사하거나 우수한 성능을 나타내었다. 흡착제는 공기정화 필터 및 수처리 분야에 적용할 수 있으며, 부산물인 커피오일은 항산화·항균 기능성 소재로 활용할 수 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 커피박 흡착제의 제조공정, 물성 분석, 흡착 성능 평가, 사업화 전략 및 기대효과를 종합적으로 제시한다.

주제어 : 커피박, 이산화탄소, 탄화, 활성화, 커피오일

*Corresponding author : 신창훈 / chshin@neoeco.co.kr

PM-14

폐공시체 기반 순환골재의 잔류 페이스트 영향에 따른 ASR 내구성 평가

ASR Durability Assessment of Recycled Concrete Aggregates Derived from Laboratory Waste Specimens Influenced by Residual Mortar Paste

정우철, 조진상[1], 김병렬[1], 김나영[1], 최문관[1*]
[1]한국석회석신소재연구소

초록

최근 건설산업에서는 천연골재 고갈과 환경 규제 강화로 인해 천연골재의 수급 불균형이 심화되고 있으며, 이를 대체할 순환골재의 활용에 대한 관심이 증대되고 있다. 그러나 건설폐기물 기반의 순환골재는 철근 및 기타 이물질(목재, 비닐, 플라스틱 등 유기 이물질), 잔류 부착 모르타르로 인한 품질 변동성, 높은 흡수율에 따른 건조수축 및 균열 증가, 알칼리-실리카 반응(ASR) 등의 내구성 저하 우려가 존재한다. 이러한 이유로 현행 국가건설기준(KCS 및 KS)에서는 구조물의 안전성 확보를 위해 구조용 콘크리트 내 순환골재의 치환율을 엄격하게 제한하고 있다. 그러나 레미콘 업체, 건설현장 및 시험기관에서 강도 시험 후 배출되는 폐콘크리트 공시체는 모체 콘크리트의 배합 이력이 명확하고 외부 이물질 및 토사 혼입이 없는 고순도 콘크리트 자원으로서, 일반 건설폐기물 대비 균일한 품질 확보가 가능할 뿐만 아니라 관리가 용이하다.

이에 본 연구에서는 시험실에서 배출된 폐콘크리트 공시체를 수거하여 단계별 파쇄 및 체가름 선별 과정을 통해 입도를 조정한 구조용 콘크리트용 순환 굵은골재를 제조하였다. 제조된 순환 굵은골재에 대해『KS F 2573(콘크리트용 순환골재)』에서 규정한 절건밀도, 표건밀도, 흡수율, 마모감량 등의 물리적 품질기준 충족 여부를 실증적으로 평가하였다. 또한 기존 제한 기준을 초과하는 높은 치환율 적용 시의 장기 내구적 안전성을 확보하기 위하여, 파쇄 과정에서 발생한 신규 골재 파단면의 반응성 실리카 노출 및 잔류 부착 페이스트의 영향을 고려한 알칼리-실리카 반응성(ASR) 평가를 수행하였다.

Keywords : 폐공시체, 순환 굵은골재, KS F 2573, 알칼리-실리카반응, 내구성

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부와 한국에너지기술평가원의 “시멘트산업 이산화탄소 저감 종합실증센터 구축 사업”(과제번호 P0027571) 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding author : 최문관 / moon4767@kilam.re.kr

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

포스터

자원

The Korean Institute of Resources Recycling

PR-01

산업부산물 기반 인공골재의 CO_2 양생에 따른 탄산화 특성

Carbonation Characteristics of Industrial By-product-Based Artificial Aggregates under CO_2 Curing

김나영[1], 김태형[1], 최문관[1], 김영진[1*]
[1]한국석회석신소재연구소 연구개발부

초록

산업부산물 발생에 따른 처리 및 환경문제를 해결하고 자원순환을 촉진하기 위한 재활용 및 자원화에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 특히 슬래그류는 칼슘 성분을 함유하고 있어 건설 재료 등으로의 활용 가능성이 높으며, 이를 활용한 인공골재의 제조 및 특성에 관한 연구가 이루어지고 있다. 산업부산물 기반 인공골재에 CO_2 양생을 적용하면 CO_2와 골재에 포함된 주요 성분의 반응을 통해 탄산칼슘($CaCO_3$)을 형성한다. 이러한 특성은 CO_2를 고정하는 동시에 인공골재의 특성을 개선할 수 있는 방법으로 활용되고 있다. 해외에서는 산업부산물을 활용한 인공골재의 CO_2 양생 및 탄산화에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있으나, 국내에서는 CO_2 양생을 적용한 산업부산물 기반 인공골재에 관한 연구가 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구에서는 산업부산물인 슬래그를 대상으로 디스크 방식 펠릿타이저를 활용하여 제조한 인공골재에 CO_2 양생을 실시하고, 양생시간(0.5, 1, 3, 7, 14 day)에 따른 인공골재의 탄산화 특성을 분석하였다. CO_2농도 20%, 상대습도 60%, 온도 20 ℃의 조건을 고정하여 양생을 실시하였으며, 탄산화 특성 변화를 분석하였다.

양생 시간 및 입도 구간에 따른 인공골재의 탄산화 특성을 평가하고자 X선 회절 분석(XRD)과 열중량 분석(TG)을 수행하여 광물학적 및 열적 특성을 분석하였으며, 이러한 결과는 이산화탄소를 활용한 인공골재 제조 기초연구 자료로 제시하고자 하였다.

주제어 : 산업부산물, 인공골재, CO_2 양생, 탄산화

*Corresponding author : 김영진 / yjcokr@kilam.re.kr

PR-02

디스크 방식 펠릿타이저 운전 조건에 따른 인공골재의 입도 분포 특성

Particle Size Distribution Characteristics of Artificial Aggregates Depending on Disc Pelletizer Operating Conditions

김나영[1], 김영진[1], 김태형[1], 정우철[1], 조진상[1*]

[1]한국석회석신소재연구소 연구개발부

초록

천연골재의 자원 고갈과 채취 과정에서 발생하는 환경문제를 저감하기 위해 인공골재 개발의 필요성이 높아지고 있다. 인공골재 제조를 위한 디스크 펠릿화 공정에서는 원료의 수분 함량, 팬의 기울기, 회전속도 등의 운전조건에 따라 골재의 입자 크기가 변화한다. 국외에서는 인공골재의 활용 목적에 따른 입자 크기 제어 및 입도 조절에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으나, 국내에서는 이와 관련한 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 산업부산물인 슬래그를 대상으로 디스크 방식 펠릿타이저를 활용하여 인공골재를 제조하고, 펠릿타이저의 운전조건에 따른 인공골재의 입도분포 특성을 분석하였다. 인공골재 제조를 위한 펠릿화 과정에서 물을 분사하여 입자를 성형하였으며, 슬래그 400 g 기준 물 투입양(85, 87, 90g), 디스크 각도(30, 40, 50 °), 회전속도(35, 45, 55 rpm) 및 성형시간(4, 6, 8 min.)을 주요 운전변수로 설정하였다.

제조된 인공골재는 체가름을 통해 입자 크기별로 분류하고 각 입도 구간의 질량 분율 및 누적율을 산출하였다. 물 투입량이 감소할수록 2.36 mm 미만의 비율이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 물 투입량 부족에 따른 입자 핵형성 및 성장 과정이 충분히 이루어지지 않아 나타난 결과로 판단된다. 또한 디스크 각도 및 회전속도 변화에 따라 입도분포가 크게 달라지는 경향을 확인하였다. 이러한 결과는 인공골재의 입도 확보를 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

주제어 : 인공골재, 산업부산물, 디스크 펠릿타이저, 입도분포

*Corresponding author : 조진상 / chsang@kilam.re.kr

PR-03

볼밀링 공정변수에 따른 산화아연 미세구조 제어 및 자외선 차단 적용성 평가

Microstructural Control of ZnO through Ball-Milling Process Parameters and Evaluation of UV-Shielding Performance

김예린[1], 홍현선[2*]

[1]성신여자대학교 대학원 미래응용과학학과, [2]성신여자대학교 청정신소재공학과

초록

본 연구에서는 폐아연 분진으로부터 회수·제조된 ZnO 분말의 고부가가치 재활용을 목적으로, 볼밀링 공정조건에 따른 입자 형태, 결정구조, 입도분포 및 자외선 차단 특성의 변화를 조사하였다. 회수된 ZnO 분말은 건식 및 에탄올을 첨가한 습식 조건에서 각각 1 mm와 3 mm 크기의 지르코니아 볼을 이용하여 밀링하였으며, 공정 전후 분말의 특성을 주사전자현미경(SEM), X선 회절분석(XRD), 입도분석(PSA) 및 자외선-가시광선 분광분석(UV-Vis)을 통해 평가하였다. 분석 결과, 볼 크기와 용매 첨가 여부에 따라 ZnO의 파쇄 및 응집 거동이 상이하게 나타났으며, 건식과 습식 조건에서 서로 다른 입자 형태와 입도 분포 변화를 보였다. UV-Vis 분석을 통해 공정조건에 따른 입자 특성 변화가 자외선 투과 특성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 따라서 볼밀링 공정은 ZnO의 결정구조를 유지하면서 입자 특성 및 자외선 차단 특성을 제어할 수 있는 유효한 방법이며, 폐아연 분진 유래 ZnO의 고부가가치 기능성 소재로의 활용 가능성을 제시한다.

주제어 : ZnO, Ball milling, Waste zinc dust

서론

아연계 산업 폐기물은 유가금속을 함유하고 있어 자원순환 및 고부가가치 소재화를 위한 중요한 2차자원으로 활용될 수 있으며, 특히 ZnO는 우수한 화학적 안정성과 자외선 흡수 특성을 바탕으로 다양한 기능성 소재로의 적용이 가능한 물질이다. 또한 ZnO의 광학적 특성은 입자 크기, 형상 및 응집 상태에 따라 달라질 수 있으므로, 회수된 ZnO를 고부가가치 소재로 활용하기 위해서는 분말 특성의 적절한 제어가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 폐아연 분진으로부터 제조된 ZnO 분말의 입자 특성과 자외선 차단 특성을 제어하기 위하여 볼밀링 공정조건에 따른 입자 형태, 결정구조, 입도분포 및 자외선 투과 특성의 변화를 비교하고, 폐아연 분진 유래 ZnO의 고부가가치 기능성 소재로의 활용 가능성을 평가하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 폐아연 분진으로부터 제조된 ZnO 분말을 원료로 사용하였으며, 볼밀링 공정조건에 따른 입자 특성 변화를 비교하기 위하여 45 mL 및 80 mL 지르코니아 용기를 이용하여 밀링 실험을 수행하였다. 각 용기에서는 1 mm와 3 mm 크기의 지르코니아 볼을 사용하고, 건식 및 에탄올을 첨가한 습식 조건에서 일정 시간 범위 동안 밀링을 수행하여 처리시간에 따른 ZnO 분말의 변화를 비교하였다. 밀링 전후 시료의 입자 형상과 결정구조는 SEM 및 XRD를 이용하여 분석하였으며, PSA와 UV-Vis 분석을 통해 입도 분포와 자외선 투과 특성의 변화를 평가하였다.

결과 및 고찰

SEM 및 PSA 분석 결과, 볼 크기와 건식·습식 조건에 따라 ZnO 분말의 파쇄 및 응집 거동에 차이가 나타났다. 건식 조건에서는 조대한 응집체와 파쇄된 미세입자가 함께 관찰되었으며, 볼 크기에 따라 파쇄 정도와 입도분포가 달라졌다. 반면 습식 조건에서는 에탄올의 분산 효과로 인해 건식 조건과 다른 입자 형상과 분포를 나타냈으며, 일부 조건에서는 판상 또는 불규칙한 파

*Corresponding author : 홍현선 / hshong@sungshin.ac.kr

쇄 입자가 형성되었다. 또한 밀링 시간이 증가함에 따라 입자 미세화가 진행되었으나, 장시간 처리 시에는 미세입자의 재응집이 함께 발생하여 조건별로 상이한 입도 변화가 나타났다.

XRD 분석 결과, 모든 볼밀링 조건에서 ZnO의 육방정계 우르차이트 결정구조가 유지되어 공정에 따른 뚜렷한 결정상 변화는 관찰되지 않았다. UV-Vis 분석에서는 볼밀링에 따른 입자 크기, 형상 및 분산 상태의 변화에 따라 자외선 영역의 투과 특성이 달라지는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 용기 크기, 볼 크기, 밀링 방식 및 처리시간과 같은 공정변수가 ZnO의 파쇄와 응집 거동에 영향을 미치며, 적절한 공정 조건의 제어를 통해 결정구조를 유지하면서 입자 특성과 자외선 차단 특성을 조절할 수 있음을 보여준다.

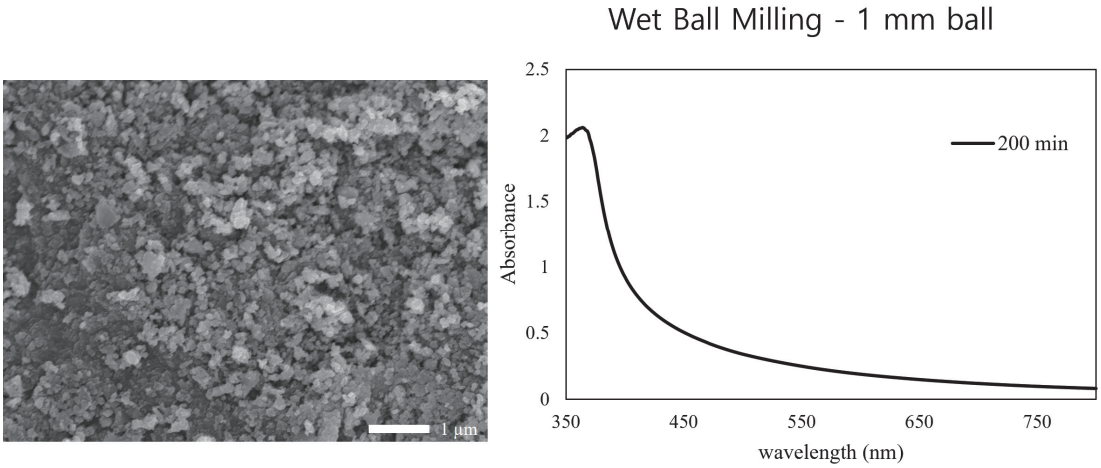


Fig. 1. SEM image and UV-Vis spectrum of ZnO after wet ball milling in a 45 mL jar using 1 mm balls for 200 min

결론

폐아연 분진 유래 ZnO는 볼밀링 공정 조건에 따라 입자 특성과 자외선 투과 특성이 변화하였으며, 결정구조는 안정적으로 유지되었다. 이를 통해 볼밀링이 ZnO의 물성을 조절할 수 있는 유효한 후처리 공정임을 확인하였으며, 폐아연 분진의 고부가가치 기능성 소재화 적용 가능성을 제시하였다.

PR-04

리튬이온배터리 Black Mass 부유선별 후 양극 유가금속 회수 및 활용

Recovery of valuable metals from Lithium-ion battery black mass via flotation

전찬미[1], 유준상[1], 홍길상[1], 김관호[1], 유광석[1*]
한국지질자원연구원 자원활용연구본부

초록

폐리튬이온전지의 급증에 따라 안전하고 효율적인 재활용 공정의 필요성이 대두되고 있으며, 이를 위해 폐배터리를 BM(Black Mass) 형태로 분말화하는 공정이 보편적으로 적용되고 있다. 특히 음극재의 주성분인 흑연은 부유선별 공정을 통해 회수하는 것이 일반적이나, 회수된 흑연 내에는 양극물질이나 음극 집전체로부터 기인한 Cu 등의 불순물이 혼입되는 문제가 발생한다. 본 연구에서는 흑연의 순도를 향상시키기 위해 산 침출 공정을 적용하였으며, 이때 발생하는 산 침출 용액 내 잔존하는 유가금속(Li, Ni, Co, Mn) 및 불순물(Cu, Fe, Al)의 효율적인 회수 및 정제 공정을 다루고자 했다. 기존의 전통적인 구리 제거 방식인 용매추출법이나 Na_2S 침전법과 달리, 본 연구에서는 NaOH를 이용한 단계별 pH adjust 방식을 도입하여 공정 단순화를 도모하였다. 이를 통해 불순물(Cu, Al)을 선택적으로 제거하는 동시에 유가금속의 공침 손실을 최소화하는 최적의 정제 영역을 도출하고, BM으로부터 유가금속을 최대한 회수 및 활용하기 위한 통합 공정 방안을 고찰하였다.

주제어 : 부유선별, 재활용, 유가금속, 원료회수

서론

전기차 시장의 급성장과 함께 폐리튬이온전지의 발생량이 급증하고 있으며, 이에 따른 핵심 유가금속(리튬, 니켈, 코발트, 망간 등)의 회수 및 자원순환 기술이 국가적 과제로 자리 잡고 있다. 폐배터리 재활용의 전처리 공정으로는 BM(Black Mass) 제조가 주로 활용되며, 유가금속 회수 외에도 음극재인 흑연의 고순도화가 중요한 화두로 떠오르고 있다. 일반적으로 흑연은 부유선별을 거쳐 회수되나, 공정 특성상 Cu 등의 금속 불순물이 잔류하여 흑연의 순도를 떨어뜨리는 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 산 침출을 거쳐 흑연의 순도를 98% 수준까지 끌어올리는 기술을 확보했으나, 문제는 침출 이후 다량의 유가금속이 포함된 강산성 폐액이 잔류한다는 점이다. 이 침출수를 적절히 처리하지 못하면 환경 오염을 유발할 뿐만 아니라 고부가가치 금속의 경제적 손실로 이어지게 된다. 기존 공정에서는 구리 등 불순물을 제거하기 위해 별도의 용매추출이나 황화물 침전제를 사용하는 복잡한 단계를 거쳤으나, 이는 공정 비용 상승 및 폐수 처리 부담을 가중시킨다. 이에 본 연구에서는 추가적인 추출제 전환 없이 NaOH를 활용한 pH adjust 공정만으로 불순물을 선택적으로 침전·제거하고, 이어지는 연속식 공정을 통해 리튬 및 MHP(Mixed Hydroxide Precipitate) 형태의 유가금속들을 효율적으로 회수하는 통합 정제 프로세스를 제안하여 그 활용에 대해 논의하고자 한다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 BM은 NCM622 양극재와 흑연으로 구성된 물질이다.
산 침출은 0.5 M H_2SO_4와 2 M H_2O_2 수용액을 사용하여, 고액비(S/L ratio) 40g/L 조건에서 60℃를 유지하며 90분 동안 수행하였다. 이후 침출 용액 내 불순물 제거 및 유가금속 회수를 위한 pH adjust 공정은 2 M NaOH 용액을 사용하여 단계별로 진행하였다.

결론

본 연구에서는 폐리튬이온전지 BM의 부유선별 공정 이후, 흑연의 고순도화 과정에서 발생하는 잔류 여액으로부터 유가금속

*Corresponding author : 유광석 / youks@kigam.re.kr

의 손실을 방지하고 이를 효율적으로 회수하기 위한 통합 정제 방안을 고찰하였다.
본 연구에서 제안한 단순화된 통합 정제 프로세스는 불순물의 효과적인 제어와 유가금속의 손실 최소화를 가능하게 하므로, 부유선별을 통해 분리한 유가금속의 회수율을 높이는 방법으로 매우 적절하다. 이는 전체 재활용 공정의 경제성과 효율성을 제고할 뿐만 아니라, 향후 폐배터리 재활용 산업에서 핵심 광물의 실질적인 자원 순환율을 극대화하는 데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 결과물은 기후에너지환경부 재원으로 한국환경산업 기술원의 사용 후 배터리 안전관리 및 재제조 유통순환 기술 개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (유해가스 및 폐수 등 환경오염 물질 배출 저감을 위한 사용 후 배터리 전처리 기술 및 글로벌 현지화 기술 개발, RS-2025-02172969).

PR-05

타이타늄 광석의 자원활용 확대를 위한 선광 및 광미 활용 특성 연구

Beneficiation of Titanium Ore and Utilization of Its Tailings for Enhanced Resource Efficiency

김양수[1], 이형주[1], 조진상[1], 김영진[1], 서준형[1*]

[1]한국석회석신소재연구소

초록

첨단산업의 발전과 핵심 광물자원에 대한 수요 증가에 따라 광물자원의 안정적인 확보와 효율적인 활용의 중요성이 지속적으로 높아지고 있다. 타이타늄은 우수한 물리·화학적 특성을 바탕으로 다양한 산업 분야에서 활용되는 주요 금속자원으로, 국내에서는 원료 및 소재의 해외 의존도가 높아 국내 부존자원의 활용가치를 높이기 위한 관련 기술개발이 요구된다. 한편, 광석의 파쇄·분쇄 및 선광 과정에서 발생하는 광미는 장기간 적치 및 관리에 따른 환경적·경제적 부담을 수반할 수 있어, 원광 내 유용성분의 농축과 함께 발생 광미의 재활용 방안을 검토할 필요가 있다. 본 연구에서는 국내 타이타늄 광석을 대상으로 선광에 따른 Ti 성분의 농축 특성을 평가하고, 선광 과정에서 발생한 광미의 특성 및 재활용 가능성을 함께 검토하였다. TiO_2 원광에 소성 및 자력선별을 적용한 결과, 정광의 TiO_2 품위가 약 40% 수준까지 증가하여 타이타늄 성분의 농축 가능성을 확인하였다. 또한 선광 광미의 화학적·광물학적 특성을 분석하고, 골재 품질 및 시멘트 혼합재 적용 특성을 평가하였다. 이상의 결과를 통해 국내 타이타늄 원광의 선광에 따른 유용성분 농축 가능성과 선광 광미의 재활용 가능성을 확인하였다.

사사

이 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00235021).

*Corresponding author : 서준형 / jjun4114@kilam.re.kr

PR-06

사용 후 배터리 전극의 집전체-활물질 분리를 위한 초음파 박리 기초 연구

A Preliminary Study on Ultrasonic-Assisted Delamination for Current Collector-Active Material Separation in Spent Lithium-Ion Battery Electrodes

김민혁[1], 이정[1], 김종배[1*]
[1]주식회사 이알

초록

사용 후 리튬이온배터리 재활용 공정에서 집전체와 활물질의 분리는 후속 공정의 회수율과 재활용 소재의 품질에 영향을 미치는 중요한 전처리 단계이다. 전극 내 활물질은 고분자 바인더에 의해 금속 집전체에 강하게 결합되어 있어, 기계적 처리만으로 충분한 박리 효과를 얻기 어렵다. 이러한 문제로 인해 기존의 금속 제련 기반 회수 방식과 달리 전극 소재를 직접 재생하는 공정이 주목받고 있다. 선행 연구들은 N-methyl-2-pyrrolidone(NMP), dimethylacetamide(DMAc) 등의 유기 용매를 이용하여 바인더를 용해하거나 고온 열처리 등을 통해 바인더를 제거하여 활물질과 집전체를 분리하는 방법이 연구되고 있다. 그러나 용매 처리는 충분한 바인더 제거를 위해 장시간 또는 가열 공정이 필요하고, 고온 열처리는 전극 내 잔존 전해액과 전해질 염의 열분해를 유발하여 LiF, HF 등 불소계 가스 발생과 동시에 활물질의 결정구조 변화나 상전이를 초래할 수 있다.
본 연구에서는 방전된 사용 후 리튬이온배터리로부터 전해액을 진공증류법으로 우선 제거한 후, 저온 열처리 및 초음파 처리를 순차적으로 진행하여 양극 및 음극 집전체-활물질의 박리 가능성 확인하고자 하였다. 열처리 시간은 일정하게 유지하고, 초음파 출력, 초음파 bath 온도, 처리 시간 및 시료 크기를 주요 변수로 설정하여 각 조건이 박리 거동에 미치는 영향을 비교하였다. 이를 통해 박리 효율과 활물질의 결정구조 변화를 최소화할 수 있는 최적의 조건을 도출하고자 하였다.

주제어 : 사용 후 리튬이온배터리, 전해액 제거, 진공증류, 열처리, 초음파 박리

*Corresponding author : 김종배 / jobkim98@daum.net

PR-07

소형 폐전기전자(Small WEEE)로부터 블랙매스의 회수 및 부유선별: 열전처리에 따른 흑연·금속·불순물의 분리 특성 평가

Recovery and Flotation of Black Mass from Battery-Embedded Small WEEE: Effect of Thermal Pretreatment on the Separation of Cathode Materials, Graphite, and Metal Impurities

Donghyun Kim[1], Sunghyun Bae[1,2], Jaemin Ahn[1,3], Serin Kang[1,4], Seongmin Kim[1], Seongsoo Han[1,2], Wonjae Lee[1], Yosep Han[1,2*]

[1]Resources Utilization Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM)
[2]Resources Engineering, University of Science and Technology (UST)
[3]Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Seoul National University of Science and Technology
[4]Department of Chemical Engineering, Changwon National University

Abstract

In this study, black mass was recovered by whole-device crushing of end-of-life small waste electrical and electronic equipment (small WEEE), including wireless earphones and smart watches, and the effects of thermal pretreatment on the flotation separation of cathode materials, graphite, and metal impurities were investigated. Size-by-size characterization showed that cathode-related elements were enriched below 0.5 mm, while the contents of Al, Cu, and Fe decreased. The -0.106 mm fraction was thermally pretreated at 300-600 °C in air prior to flotation. Thermal pretreatment promoted the removal of residual binders and particle deagglomeration, whereas substantial graphite oxidation occurred at 600 °C. Pretreatment at 500 °C produced the highest cathode-material grade in the cell product, while 400 °C promoted the flotation of Al- and Cu-bearing particles and produced a cleaner cathode-rich product. These results show that pretreatment temperature strongly influences cathode–graphite separation and the partitioning of metal impurities.

Keywords : Small WEEE; black mass; recovery; thermal pretreatment; flotation

Introduction

Battery-embedded small WEEE often has complex product structures, making selective battery removal difficult and resulting in the devices being shredded as a whole during recycling. Consequently, heterogeneous black mass containing not only electrode materials but also metal impurities such as Al, Cu, and Fe can be generated. Therefore, efficient recycling of small-WEEE-derived black mass requires pretreatment and separation strategies that consider both cathode–graphite separation and the behavior of metal impurities. In this study, black mass was recovered by whole-device crushing of end-of-life wireless earphones and smartwatches, and the effects of thermal pretreatment and froth flotation on the separation of cathode materials and graphite, as well as the behavior of Al, Cu, and Fe impurities, were investigated.

Materials and Methods

The -0.106 mm black mass recovered by crushing and size classification was subjected to thermal pretreatment and froth

*Corresponding author : Yosep Han / yosep@kigam.re.kr

flotation. For thermal pretreatment, 50 g of black mass was heated in air to 300, 400, 500, or 600 °C at a heating rate of 3 °C/min and held at the target temperature for 2 h. Flotation tests of the untreated and thermally pretreated black mass were conducted using a Denver Sub-A flotation machine with a 1 L cell at a pulp density of 20 g/L and an impeller speed of 1500 rpm. Kerosene (300 g/ton) and MIBC (150 g/ton) were used as the collector and frother, respectively, and the froth was collected for 4 min. The floated and remaining fractions were designated as the graphite-rich froth product (FP) and cathode-rich cell product (CP), respectively, to evaluate the effect of pretreatment temperature on flotation separation.

Results and Discussion

Crushing and size classification showed that cathode materials and graphite became progressively concentrated in the fine fractions, and the −0.106 mm black mass was therefore selected for thermal pretreatment and flotation. Thermal pretreatment at 300–500 °C progressively removed residual organics and binders and promoted the deagglomeration of electrode particles, whereas substantial oxidative loss of graphite occurred at 600 °C. Flotation results showed that 300 °C was insufficient to fully restore selective graphite flotation because residual organic components remained on the particle surfaces. At 400 °C, the preferential flotation of Al- and Cu-bearing particles produced the cleanest cathode-rich cell product, whereas 500 °C provided the most effective cathode–graphite separation, with enhanced cathode-material enrichment in the cell product and selective graphite recovery in the froth product. At 600 °C, graphite oxidation during pretreatment reduced the overall flotation selectivity.

Conclusions

In this study, black mass was recovered from battery-embedded small WEEE, and the effects of thermal pretreatment on cathode–graphite separation and the behavior of metal impurities were evaluated. At 500 °C, cathode–graphite separation was most effective and selective graphite recovery in the froth product was the highest, although Al and Cu tended to remain in the cell product. In contrast, at 400 °C, Al- and Cu-bearing particles were preferentially floated together with graphite, resulting in a cleaner cathode-rich product with lower impurity content. These differences indicate that the flotation behavior of metal impurities is governed not only by their concentration, but also by their origin, association with the electrode materials, and the extent of binder decomposition during thermal pretreatment. Therefore, for flotation-based upgrading of small-WEEE-derived black mass, the pretreatment condition should be selected according to the target product, while considering both cathode–graphite separation and the partitioning of metal impurities.

Acknowledgement

This work was supported by the Basic Research Project (GP2025-031, 26-3222) of the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) funded by the Ministry of Science, ICT.

PR-08

재활용 알루미늄 합금의 불순물 및 압출 공정 조건에 따른 기계적 신뢰성 변화 연구동향

Research Trends on the Effects of Impurities and Extrusion Process Conditions on the Mechanical Reliability of Recycled Aluminum Alloys

김유진[1], 이정재[1], 차민준[1], 이진영[1], 하원[2], 김명균[2], 신병수[3], 최성규[4], 김병철[5], 박수림[6], 한상돈[7], 변재원[1*]

[1]서울과학기술대학교 신소재공학과, [2]포항산업과학연구원, [3]고등기술연구원, [4]동산테크, [5]디에스리퀴드, [6]휘일, [7]신화에이치앤티

초록

탄소중립 및 자원순환 요구가 확대됨에 따라, 1차 알루미늄 생산 대비 에너지 사용량과 탄소배출량을 줄일 수 있는 재활용 알루미늄의 활용이 증가하고 있다. 그러나 고함량 스크랩 적용 시 불순물·개재물과 조성 편차가 증가하여 미세조직과 정적 기계적 특성뿐 아니라 피로특성과 물성 산포에도 영향을 미칠 수 있다. 다만 기존 연구는 불순물·미세조직 및 공정조건의 개별 영향에 주로 초점을 두어 왔으며, 이를 기계적 신뢰성 관점에서 종합적으로 정리한 연구는 상대적으로 제한적이다. 이에 본 연구에서는 국내외 선행연구를 종합하여 재활용 알루미늄 합금의 불순물 및 압출 공정 조건에 따른 기계적 신뢰성 변화 양상을 정리하고, 평균 물성과 피로특성 및 물성 산포를 함께 고려한 신뢰성 평가 관점에서 연구동향을 고찰하였다.

주제어 : 재활용 알루미늄, 알루미늄 스크랩, 저탄소 알루미늄, 기계적 신뢰성

서론

재활용 알루미늄은 1차 알루미늄 생산 대비 에너지 사용량을 약 95% 절감할 수 있어 탄소중립과 자원순환 대응의 핵심 수단으로 주목받고 있다. 최근 EU CBAM 시행과 자동차용 재생원료 확대 정책으로 저탄소·재활용 소재의 중요성도 커지고 있다. 그러나 최근 연구에서는 고함량 스크랩에 따른 Fe 등 잔류 불순물과 개재물의 증가가 단순한 평균 물성 저하뿐 아니라 결함 기점의 균열 발생, 피로성능 및 물성 산포에 영향을 미칠 수 있음이 보고되고 있다. 이러한 특성 변동을 고려할 때, 구조용 소재의 안정적인 적용을 위해서는 평균 강도뿐만 아니라 피로수명과 물성 산포를 포함한 기계적 신뢰성 평가가 요구된다. 이에 본 연구에서는 국내외 선행연구를 바탕으로 불순물·개재물 및 압출 공정조건이 기계적 신뢰성에 미치는 영향을 검토하고 향후 평가 방향을 고찰하였다.

고찰 및 결론

국내외 선행연구를 종합한 결과, 고함량 스크랩 소재의 적용성은 스크랩 함량 자체만으로 결정되기보다 불순물의 수준·존재형태와 후속 공정에 따른 미세조직 및 결함 제어에 크게 좌우되는 것으로 판단된다. Fe-rich 금속간화합물은 크기·형상·분포에 따라 균열 개시와 피로성능에 영향을 미치며, 재활용 상태를 모사한 고불순물 6082 합금에서는 1차 알루미늄 기반 소재 대비 피로한도가 약 30% 낮게 보고되었다. 반면 약 73%의 소비 후 스크랩을 사용한 6082 압출재에서는 조성 및 공정 제어를 통해 100% 1차 알루미늄 기반 소재와 유사한 인장특성과 범퍼빔 성능이 확보되었다. 이는 고스크랩화의 핵심이 스크랩 함량의 단순 제한보다 불순물–미세조직–공정 간 상호작용을 제어하는 데 있음을 시사한다. 이에 본 연구에서는 이들 인자가 기계적 신뢰성에 미치는 연계 영향을 종합적으로 고찰하고, 평균 물성뿐 아니라 피로수명과 물성 산포를 함께 고려하는 신뢰성 평가 방향을 제시하였다.

*Corresponding author : 변재원 / byeonjw@seoultech.ac.kr

PR-09

폐배터리 블랙파우더 내 정전기적 피복 파괴 및 공기-비중선별을 통한 Al·Cu 불순물 제어 공정 연구

A Study on Al and Cu Impurity Control in Spent Battery Black Powder via Electrostatic Decoupling and Pneumatic Gravity Separation

이재웅[1*], 서지민[2], 박경준[2], 장성호[2]

[1]한국생산기술연구원 신산업부품화연구부문, [2]페트로마인코리아

초록

폐리튬이온배터리(LIB)의 건식 전처리 과정에서 발생하는 미세 블랙파우더(BP)와 집전체 유래 알루미늄(Al) 및 구리(Cu) 금속 과립 간의 정전기적·바인더 결착에 따른 피복(Masking) 현상은 후속 제련 공정의 수율과 품질을 저하시키는 핵심 요인이다. 본 연구에서는 상향 공기 기류(Air Blow)와 진동 전단력을 결합한 공기-비중선별(Pneumatic Gravity Separation) 기술을 적용하여, 표면 피복 부착력을 물리적으로 파괴하고 미세 BP와 금속 과립을 유체역학적으로 선택 분리하는 공정을 규명하였다. 실험 결과, 비중선별 전 Al 6.35 wt%, Cu 16.42 wt% (총 불순물 22.77 wt%)였던 원시 시료에서 Al 및 Cu 불순물을 80% 이상 제거하여, 선별 후 Al 0.82 wt%, Cu 1.95 wt% (총 불순물 2.77 wt%) 수준의 고순도 블랙파우더를 확보하였다.

주제어 : 폐리튬이온배터리, 블랙파우더, 정전기적 탈리, 공기-비중선별

서론

폐리튬이온배터리 재활용 전처리 공정의 핵심 목적은 후속 유가금속 추출(침출 및 제련) 공정의 경제성과 수율을 극대화할 수 있도록 불순물이 최소화된 고순도 블랙파우더(BP)를 회수하는 것이다. 일반적으로 습식 제련 및 제련 공정 투입을 위한 불순물 허용 기준은Al+Cu의 양이 3.0wt% 이하로 엄격히 관리되나, 실제 기계적 파쇄 및 분쇄를 거친 산물에는 집전체에서 유래한 Al 및 Cu 박막 파편이 다량 혼입된다.

건식 전단 파쇄 시 마찰전기와 잔류 유기 바인더(PVDF/SBR)의 결합 작용으로 미세 BP 분말이 3차원 Cu/Al 과립 표면에 강하게 부착(Masking)된다. 이로 인해 외관이 검게 변하고 표면 성상이 동일화되어 단순 물리선별이 불가능해진다. 본 연구에서는 기계적 충돌·전단력을 기반으로 금속 표면 부착 BP의 결착력을 파괴하는 '공기-비중선별(Pneumatic Gravity Separation)' 공정을 제안하고, 유체역학적 층상화 거동 및 정량적 ICP 분석을 통해 Al·Cu 불순물 제어 성능을 검증하고자 한다.

결과 및 고찰

[공기-비중선별 분리 메커니즘]

1. Stage 1: 진동·공기 유동 복합력에 의한 BP 탈착

유동화된 입자 혼합물 내에서 고속 입자 간 충돌 및 데크 전단력이 발생한다. 이 기계적 에너지가 Cu/Al 과립 표면에 작용하는 정전기력, 반데르발스 힘, 잔류 바인더의 화학적 부착력의 합을 초과함으로써 표면 부착 BP 분말이 물리적으로 탈리된다.

2. Stage 2: 공기 유동에 의한 유체역학적 상하 층상화

항력(F_{drag})과 중력($F_{gravity}$) 차이에 따라 수직 분리된다. 미세 BP 분말은 $F_{drag}>F_{gravity}$ 조건으로 부상하여 사이클론으로 이송되며, 고밀도 Cu/Al 과립(Cu = 8.96g/cm^3, Al = 2.70g/cm^3)은 $F_{drag}>F_{gravity}$ 조건으로 데크 바닥면에 침강한다.

3. Stage 3: 진동 구동에 의한 금속 과립 이송 및 회수

데크 바닥면에 침강한 Cu/Al 메탈 과립은 데크의 주기적 진동 운동, 경사각, 마찰·충돌 관성에 의해 하부 토출구 방향으

*Corresponding author : 이재웅 / woong428@kitech.re.kr

로 전진 이송되어 연속 회수된다.

[공정창 및 운전 변수 최적화]

상향 풍속은 불순물 분리 효율과 BP 회수 수율 간의 명확한 트레이드오프(Trade-off) 관계를 형성한다. 풍속이 적정 하한치 미만일 경우 정전기력 파괴를 위한 유동화 에너지 부족으로 금속 표면의 BP 탈리율이 저하된다. 반면 풍속이 상한치를 초과할 경우 조대한 Cu/Al 과립까지 상부 비산류에 비동반 유출되거나 미세 BP 수율이 손실되는 현상이 발생한다. 따라서 불순물 80% 이상 제거 및 BP 회수 수율 90% 이상을 동시에 만족하는 상·하한 공정 윈도우 수립이 필수적이다.

table 1. 공기-비중선별 공정 적용 전후 주요 원소 함량 분석 데이터 (wt%)

공정 구분	**Al (wt%)**	**Cu (wt%)**	**Al+Cu (wt%)**	평가 및 목표 달성 여부
비중선별 전	6.35	16.42	22.77	정전기적 피복 상태 원시 시료
비중선별 후	0.82	1.95	2.77	Al·Cu 불순물 80% 이상 분리 성공
불순물 제거율 (%)	87.1%	88.1%	87.8%	

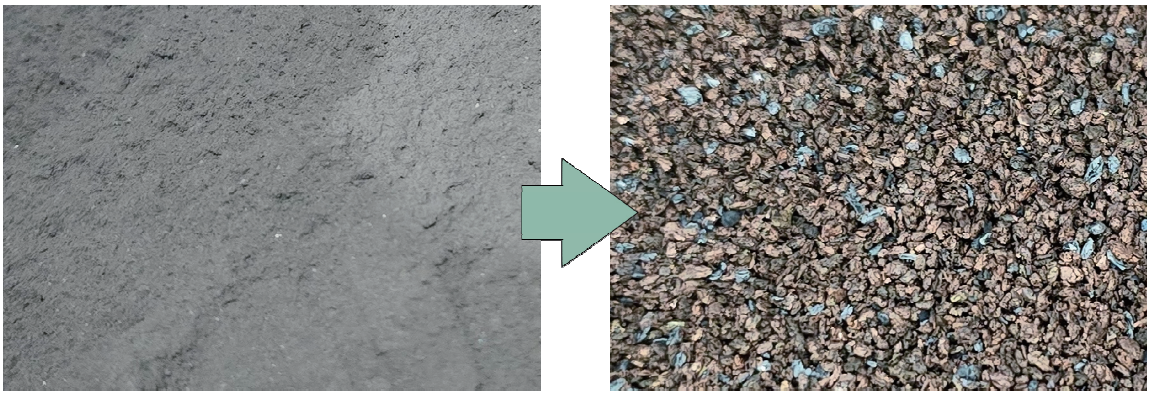


Fig. 1. (좌)파쇄 직후 정전기적 마스킹 상태 시료, (우)분리된 Cu/Al 과립

결론

폐배터리 파쇄산물 내 Al/Cu 과립 표면의 정전기적 피복(Masking) 현상을 규명하고, 상향 공기 기류와 진동 전단력을 결합한 공기-비중선별(PGS)을 통해 부착력을 성공적으로 파괴하였다. 비중선별 전 대비 Al·Cu 불순물을 80% 이상 선제 제거하여 Al 0.82 wt%, Cu 1.95 wt% (총 불순물 2.77 wt%)의 고순도 블랙파우더를 회수하였다

PR-10

배터리 재활용 공정 산물의 분리막 함량 정량화 연구

Quantification of Separator Content in Products from Battery Recycling Processes

문서진[1,2], 강세린[1,2], 이원재[1], 서주범[1], 한요셉[1,3], 정해성[2] 한성수[1,3]*,

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터, [2]창원대학교 이차전지화학공학과,

[3]과학기술연합대학원대학교 자원공학

초록

전기자동차 보급 확대와 에너지저장시스템 등 관련 산업의 성장에 따라 리튬이온배터리의 수요와 사용 후 배터리 발생량이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 대량으로 발생하는 사용 후 배터리의 효율적인 재활용이 중요해지고 있다. 특히 배터리 재활용 전처리 공정에서 분리막(separator)은 블랙매스를 비롯한 파·분쇄 및 입도분리 산물에 혼입될 수 있는 주요 유기계 불순물로, 후단 유가금속 회수공정의 효율과 최종 산물의 품질 향상을 위해 효과적인 제거가 요구된다. 그러나 현재 배터리 재활용 공정 산물에 포함된 분리막의 함량을 정량적으로 평가하기 위한 표준화된 분석방법은 확립되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 배터리 재활용 전처리 과정에서 발생하는 블랙매스 및 다양한 입도구간의 공정 산물을 대상으로 분리막 함량의 정량 분석 가능성을 평가하고자 하였다. 이를 위해 두 가지 열적 분석방법을 적용하였다. 첫 번째 방법은 공기 분위기의 전기로에서 시료를 350 °C로 열처리한 후 질량 감소량을 측정하는 방법이며, 두 번째 방법은 질소 분위기에서 열중량분석(thermogravimetric analysis, TGA)을 수행하여 질량 감소 특성을 평가하는 방법이다. TGA 분석 전 질소 분위기 안정화 시간의 영향을 평가한 결과, 안정화 과정을 거치지 않은 경우보다 7시간 동안 안정화한 후 분석한 경우 질량 감소 결과의 변동이 적게 나타났다. 이는 분석 전 충분한 시간 동안 질소를 공급함으로써 TGA 내부의 분석 분위기가 안정화되었기 때문으로 판단된다. 이후 블랙매스를 포함한 배터리 재활용 공정 산물을 대상으로 TGA와 전기로 열처리법을 각각 적용하여 분리막 함량 분석 결과를 비교하였다. 그 결과, 공기 분위기의 전기로 열처리에 의해 측정된 질량 감소율이 질소 분위기의 TGA 분석 결과보다 전반적으로 높게 나타났다. 이러한 차이는 공기 분위기의 전기로 열처리 조건에서 polypropylene(PP) 및 polyethylene(PE)계 분리막의 열분해와 산화 반응이 질소 분위기의 TGA 조건에 비해 더욱 활발하게 진행되었기 때문으로 해석된다.

본 연구 결과는 배터리 재활용 전처리 공정에서 발생하는 다양한 공정 산물 내 분리막 함량을 정량적으로 평가하기 위한 기초 분석방법을 제시한다. 또한 분리막 함량의 정량적 평가는 전처리 공정별 분리막 제거효율 및 블랙매스 품질을 평가하는 지표로 활용될 수 있으며, 향후 분리막 제거공정의 최적화와 고품질 블랙매스 생산을 위한 전처리 공정 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 배터리 재활용, 분리막, 전처리, 열중량분석, 열처리

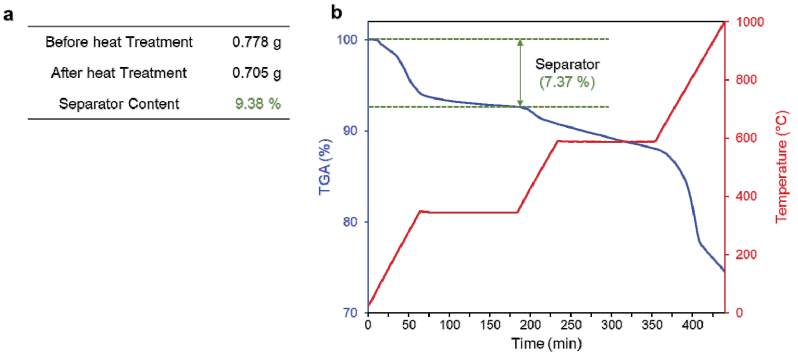


Fig. 1. Determination of separator content in battery recycling products using (a) heat treatment at 350 °C in air and (b) thermogravimetric analysis (TGA) under a nitrogen atmosphere.

*Corresponding author : 한성수 / sshan@kigam.re.kr

PR-11

폐배터리 재활용 공정에서 유가금속 손실 방지를 위한 습식 선별 기술의 적용성 평가

Evaluation of Wet Separation for Preventing Valuable Metal Losses in Spent Battery Recycling

김민규[1], 권석제[1], 손재홍[1], 김종일[1], 오영기[1*]

[1]에너지머티리얼즈 기술개발본부

초록

사용 후 리튬이온 배터리 재활용 공정에서 전처리 공정은 블랙매스(Black Mass, 이하 B.M)의 품질과 회수율을 결정하는 핵심 단계이며, 후처리 공정의 금속 회수 효율 및 경제성에 직접적인 영향을 미친다. 최근 폐배터리 발생량 증가에 따라 공정 처리량과 생산성 향상의 중요성이 더욱 부각 되고 있으며, 이에 따라 기존 파쇄 열처리 기반 전처리 공정을 보완할 수 있는 습식 선별 및 리튬(Li) 선 추출 기술의 적용 가능성을 검토하였다.

습식 선별은 미분(Fine Particle)의 분리 효율을 향상할 수 있는 효과적인 공정으로 알려져 있으나, 선별 과정에서 발생하는 폐수 처리 문제가 실제 공정 적용의 주요 제약 요인으로 작용한다. 이에 본 연구에서는 습식 선별 공정 적용 가능성을 평가하고, 폐수 문제 해결 방안으로 공정 내 순환수(Recycled Water) 사용의 타당성을 분석하였다.

습식 자력선별 결과, 광액 농도(Pulp Density)와 자력 세기(Gauss)는 처리량과 밀접한 상관관계를 나타냈다. 그러나 광액 농도가 일정 수준 이상 증가하거나 자력 세기가 과도하게 높아질 경우, 슬러리 점도 상승 등의 영향으로 인해 응집과 불순물의 동반 혼입(Entrainment) 현상으로 선별 효율이 오히려 감소하는 경향을 확인하였다.

또한 순환수(Recycled Water)를 적용할 경우, 열처리 B.M에서 리튬 이온의 용출이 발생하므로 불가피한 리튬 이온의 손실을 분석하였다. 분석 결과, 초기 1 batch에서는 약 2,500 ppm 수준의 리튬 이온이 용출되고 순환이 반복됨에 따라 용출량이 급격히 감소하는 경향이 보였다. 따라서 습식 선별 공정에서 순환수 이용 방법을 연속공정에 적용하는 경우, 리튬 이온이 포화 되어 연속공정에서 리튬 손실을 최소화할 수 있을 것으로 판단하였다.

주제어 : 폐배터리, 자력선별, Black Mass, 습식 선별, 공정수 재이용

*Corresponding author : 오영기 / youngkhee.oh@energymaterials.com

PR-12

자력선별 및 알칼리 개질을 적용한 철강슬래그의 니켈·인 제거 연구

Study on Nickel and Phosphorus Removal from Steel Slag Using Magnetic Separation and Alkali Modification

권효정[1], 차종문[2*]

[1]동아대학교 에너지 · 자원공학과, [2]동아대학교 환경 · 에너지공학부 미래에너지공학전공

초록

철강슬래그는 철강 생산 과정에서 다량 발생하며, 주로 시멘트 원료, 성·복토재, 도로용 소재 등으로 재활용되고 있다. 한편 철강슬래그에 포함된 Ca, Si, Fe 등의 성분을 이용하여 중금속과 인을 제거하는 수처리 소재로 활용하기 위한 연구도 오래전부터 이루어져 왔으며, 최근에는 알칼리 개질을 통해 제거 성능을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 고로슬래그와 제강슬래그에 자력선별 및 규산나트륨 기반 알칼리 개질을 적용한 후 수계 내 Ni과 P 제거 특성을 비교하였다. 또한 슬래그 사용에 따른 pH 상승과 Ca 용출을 분석하여 표면 흡착뿐만 아니라 Ni 수산화물 및 Ca-P 화합물의 침전이 제거에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

주제어 : 철강슬래그, 자력선별, 알칼리 개질, 니켈, 인, 수처리

사사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2024-00401917)

*Corresponding author : 차종문 / jmcha@dau.ac.kr

PR-13

AI 활용 폐플라스틱 선별 공정 및 기술 연구

A Study on AI-Based Waste Plastic Sorting Processes and Technologies

박명선[1], 황용우[2*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2]인하대학교 환경공학과

전 세계 폐플라스틱 발생량은 지속적으로 증가하는 반면 재활용률은 9%에 불과하며, 국내에서도 연간 600만 톤 이상의 폐플라스틱이 발생하여 처리 한계에 도달한 상황이다. 기존 NIR 기반 선별 기술은 카본블랙을 포함한 검정 플라스틱을 인식하지 못하고, 수작업 선별은 낮은 정확도와 높은 인건비 비중(60% 이상)의 한계를 가지며, 복합소재·혼합오염 재질의 오분류율이 30~50%에 달한다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 NIR/SWIR-형광-THz 센서를 직렬 배치한 3단계 다중 센서 융합 선별 공정을 설계하고, CNN 기반 AI 멀티모달 모델로 각 센서 데이터를 통합 학습·분류하는 지능형 선별 시스템을 제안하였다. NIR/SWIR 1차 고속 분류로 PE·PP·PET·PVC 등 주요 재질을 선별하고, 형광 센서를 통해 검정 플라스틱 인식률을 95% 이상으로 향상시켰으며, THz 센서로 복합재·층상 구조 내부 물성 및 오염물 잔존 여부를 비파괴적으로 분석하였다.

기술별 선별 정확도는 수작업(55%), NIR 단독(72%), NIR+형광(85%), NIR+형광+THz(94%)를 거쳐 AI 멀티모달 통합 시 99% 이상으로 향상되었으며(수작업 대비 +44%p), 이를 통해 검정 플라스틱을 포함한 전 재질의 완전 자동분류가 가능함을 확인하였다. 비용 분석 결과 AI 도입 시 초기투자비(CAPEX)는 30~50% 증가하나 인건비(OPEX)는 40~60% 절감되어 10년 기준 총소유비용(LTC)이 25~35% 감소하였으며, 순도 99% 이상의 고순도 재생원료 생산을 통해 재생원료 가치가 약 50% 상승하는 것으로 나타났다.

본 연구는 2025~2030년 로드맵에 따라 처리속도 10t/h급 상용 설비로 확장할 계획이며, 향후 THz 처리속도 고도화, 실증 플랜트 기반 LCA 환경성 평가, 디지털제품여권(DPP) 연계 데이터 플랫폼 개발을 통해 AI 기반 지능형 선별 기술의 상용화를 추진할 예정이다.

주제어 : 폐플라스틱, AI 선별, 다중 센서 융합, 테라헤르츠, 재생원료(PCR)

사사

이 연구는 기후에너지환경부 환경산업기술원의 지식서비스 특성화대학원의 지원을 받아 작성하였습니다.

* Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac.kr

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

포스터

건식제련

The Korean Institute of Resources Recycling

PP-01

부산물 재활용 Flux가 탈황에 미치는 영향 및 반응기구 제시

Effect of Recycled Flux on the Desulfurization and Reaction Mechanism of API Steel

차은환[1], 정용석[1*]

[1]한국공학대학교

초록

API강은 석유 및 가스 수송용 파이프라인에 널리 사용되며, 높은 강도와 내식성, 우수한 인성이 요구된다. 따라서 취성을 유발하는 인(P)과 황(S)의 농도를 엄격하게 제어해야 하므로 Ladle Furnace(L.F.) 정련 공정이 필수적이다. L.F. 공정에서는 탈황을 위해 CaO/Al_2O_3 비가 2.0 이상인 고염기도 슬래그가 사용된다. 그러나 이러한 슬래그는 높은 고상 분율로 인해 탈황 성능이 저하될 수 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 저융점의 $CaO\text{-}Al_2O_3$계 B-Flux가 일반적으로 사용된다. 본 연구에서는 Recycled Concrete Paste(RCP)와 재활용 알루미나 내화물을 원료로 사용하여 세 종류의 친환경 플럭스를 개발하였으며, 이를 기존 래들 슬래그에 첨가하여 1550 °C에서 API강의 탈황 거동을 조사하였다. 용강 중 황 농도를 시간에 따라 측정하였으며, 60분 후 평형에 도달한 것으로 가정하여 황 분배비(L_S)를 산출하고 탈황 성능을 평가하였다. 실험 결과, 개발된 플럭스를 적용한 경우 용강 중 황 농도가 기존 래들 슬래그를 사용한 경우의 약 33% 수준까지 감소하여 탈황 성능이 크게 향상되었음을 확인하였다. 또한 실험 전후의 슬래그 및 용강 조성을 분석한 결과, 슬래그 중 MnO 함량과 L_S 사이 선형적인 상관관계가 나타났다. 이러한 관계는 산소 활동도의 열역학적 평형 관점에서 해석하였다. 본 연구 결과는 재활용 원료로 제조된 친환경 플럭스가 래들 슬래그의 탈황 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있음을 시사한다.

주제어 : RCP, Al_2O_3 refractory, Ladle Slag, API steel, Desulfurization, MnO, 산소 활동도(a_O)

* Corresponding author : 정용석 / ychung@tukorea.ac.kr

PP-02

폐IGZO 타겟 분말의 수소 열환원 기초 연구

A Preliminary Study on Hydrogen Thermal Reduction of Spent IGZO Target Powder

김대원[1*], 안낙균[1], 이광희[1], 박태준[2]

[1]고등기술연구원 소재부품본부, [2]한국지질자원연구원 자원소재연구센터

초록

차세대 디스플레이 산업의 핵심 소재인 IGZO($InGaZnO_4$) 스퍼터링 타겟은 고부가가치 유가금속을 다량 함유하고 있어 효율적인 재활용 기술 개발이 필수적이다. 기존의 전량 습식 침출 방식은 막대한 화학약품 소모와 다단 용매추출로 인한 공정 부하 및 환경 문제를 야기하는 한계가 있다. 본 연구에서는 고온 수소 환원 분위기에서 각 원소별 열역학적 거동과 환원 금속의 비점 차이를 이용하여, 폐IGZO를 3상(고상, 액상, 기상)으로 사전 물리적 분리하는 친환경 건식 공정에 대한 기초연구로서 진행하였다.

분급된 폐IGZO 타겟 분말을 50T 프레스로 성형한 후, 1,000°C의 수소(3 L/min) 분위기에서 1시간 동안 열처리한 결과, 성형체는 약 34.18%의 뚜렷한 질량 감소를 나타내었다. 이는 산화아연의 100% 기화 휘발 및 인듐의 금속 환원을 가정한 이론적 질량 감소율(33.57%)과 매우 일치하는 결과이다. 반응 후 시편의 단면을 관찰한 결과, 아연 가스가 빠져나가 형성된 다공성의 산화갈륨(Ga_2O_3) 뼈대(Skeleton) 내부 기공을 타고, 환원된 액상 인듐이 펠릿 외부로 밀려 나와 응결되는 스웨팅(Sweating) 현상이 뚜렷하게 관찰되었다. SEM-EDX 성분 분석 결과, 표면 금속 광택 부위에서는 아연이 전혀 검출되지 않은 채 인듐이 최대 81.93 wt%까지 집중되어 고순도 조인듐(Crude In) 영역을 형성한 반면, 내부 입자 부분은 갈륨(44.77 wt%) 중심의 잔사로 구성됨이 확인되었다.

향후 연구에서 이와 같은 단일 단계의 고온 수소 환원 처리는 복잡한 화합물 형태의 IGZO를 금속 인듐(액상), 아연 증기(기상), 갈륨 산화물(고상)로 물리적으로 분리할 수 있는 연구를 추가적으로 지속할 예정이다. 이와 같은 연구는 후속 습식 정제 공정의 화학적 부하를 획기적으로 낮출 수 있는 전처리 브릿지 기술로 연결하여 친환경적인 공정으로 연결할 수 있다고 판단된다.

주제어 : 폐IGZO 타겟, 수소 환원, 인듐, 갈륨, 아연

감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 패키지형 RS-2024-0044834)

*Corresponding author : 김대원 / mdsimul@naver.com

PP-03

폐PGM 촉매로부터 회수된 Cu 합금의 산화정련 공정을 통한 귀금속 농축 거동

Precious Metal Enrichment in Cu Alloys Recovered from Spent PGM Catalysts through Oxidative Refining Process

이자성, 한승연, 김영민, 황인성, 김용환*
한국생산기술연구원

전 세계적으로 탄소중립 및 친환경 에너지 전환이 가속화되면서, 자동차 배기가스 정화용 촉매와 수소 연료전지를 중심으로 한 차세대 핵심 산업에서 백금족 금속(PGMs)의 수요가 빠르게 증가하고 있다. 그러나 천연자원의 부존 희소성과 지정학적 편재성으로 인해 이러한 원료의 공급망 취약성이 심화되고 있다. 이에 따라 해외 원료 의존도를 낮추고 핵심광물의 안정적인 공급망을 확보하기 위하여, 폐PGM 촉매와 같은 2차자원으로부터 고부가가치 유가금속을 회수·농축하는 고효율 기술 개발에 대한 산업계 및 학계의 관심이 크게 집중되고 있다.

본 연구에서는 고온 환원용융 공정을 통해 1차적으로 회수된 Cu계 합금을 활용하였다. 특성 분석 결과, 회수된 합금 내에는 Au, Ag, Pd, Pt 등의 귀금속과 함께 Fe, Si와 같은 원소가 함유되어 있음을 확인하였다. 합금 내 잔류하는 Fe 및 Si는 침출 공정에 어려움을 주기 때문에, 이러한 불순물을 제거하고 귀금속의 농축률을 높이기 위해 산화정련 공정을 적용하였다. 산화공정은 산소가스를 주입하여 1200 °C 부터 1400 °C 사이에서 진행되었다.

이를 통해 온도 및 시간에 따라 Au, Ag, Pd, Pt 등의 금속이 최대 7배 농축되는 경향을 확인하였다. 이를 바탕으로 유가금속의 순도 및 회수 거동을 규명함으로써 고온 산화정련 공정에 대한 기초 데이터를 확보하였다.

* Corresponding author : 김용환 / yhkim@kitech.re.kr

PP-04

탄소열 환원 기반 Fe-P 합금의 수소 발생 촉매 특성 및 메커니즘

Electrocatalytic hydrogen evolution performance and mechanism of carbothermic reduction based Fe-P alloys.

명재욱, 김선중*
조선대학교 신소재공학과

서론

2050 탄소 중립을 위한 철강 산업의 수소 환원 전환은 수소 연료의 중요성을 키우고 있다. 하지만 대부분의 수소 연료를 생산하는 천연가스의 개질($CH_4 + 2H_2O = CO_2 + 4H_2$)은 탄소 중립에 적합하지 않다.[1,2] 따라서 H_2O의 전기 분해 방식을 통해 생산되는 그린 수소가 주목받고 있다. H_2O의 전기 분해는 음극에서 $4H^+ + 4\,e^- = 2H_2$, 양극에서 $2H_2O = O_2 + 4H^+ + 4e^-$ 반응을 통해 그린 수소와 함께 산소를 생산하여 탄소 중립에 적합하다. 하지만 그린 수소는 Pt 음극에서 생산되어 단가가 비싸 대량 생산이 어렵다. 그린 수소의 생산 단가를 낮추기 위해 Pt의 대체재가 연구되고 있으며, 그중 Fe_3P 합금이 주목받고 있다.[3]
본 연구에서는 Pt 음극을 대체하기 위해 $FePO_4$를 탄소 열 환원하여 Fe_3P의 회수 가능성을 파악하고, 수소 발생 촉매 특성과 메커니즘을 조사하였다.

실험방법

불활성 분위기의 1473~1673K에서 $FePO_4$를 환원하여 Fe-P 합금을 회수하였다. $FePO_4$는 활성탄 및 Fe를 첨가하여 환원하였으며, (Metallic.Fe/$FePO_4$)의 혼합비가 0~2.1이 되도록 투입하였다. 회수한 Fe-P 금속은 C/S, N/O 및 ICP-OES 분석을 통해 금속의 성분을 분석하였으며, XRD 및 EPMA 분석을 통해 상 및 미세구조를 관찰하였다. 또한 선형 전압 주사 방법을 통해 Fe-P 합금의 수소 발생 촉매 특성을 분석하였다.

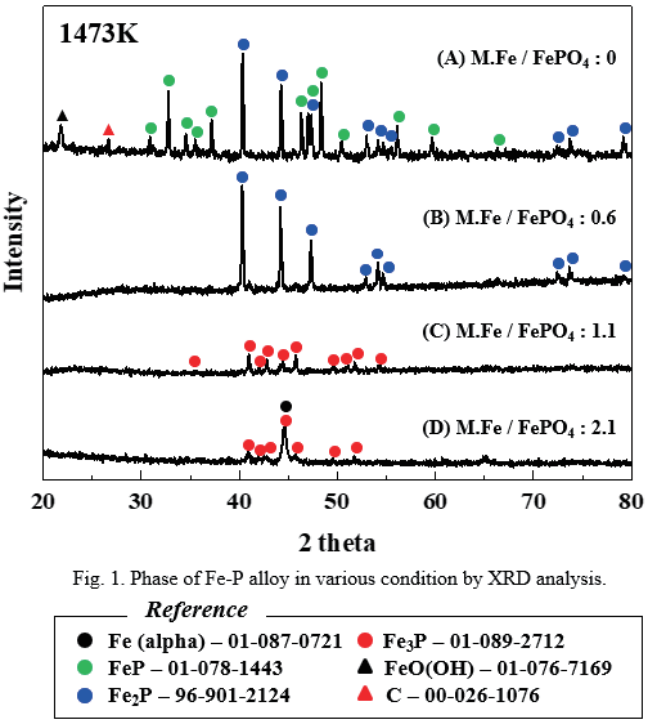


Fig. 1. Phase of Fe-P alloy in various condition by XRD analysis.

결과 및 고찰

그림 1은 $FePO_4$를 1473K에서 탄소 열 환원 후 회수한 Fe-P 합금의 XRD 상 분석 결과이다. (A)는 Fe를 투입하지 않은 조건이며, 환원 시 FeP 및 Fe_2P 상이 형성되었다. 반면 혼합비가 0.6이 되도록 Fe를 투입한 (B) 조건의 경우 Fe_2P 상이 관찰되었다. 또한 혼합비가 1.1이 되도록 Fe를 투입한 경우 Fe_3P 상이 관찰되었으며, Fe를 과량 투입한 (D) 조건의 경우 Fe_3P 상과 함께 alpha 상의 Fe가 관찰되었다. 따라서 탄소 열 환원 반응 시 혼합비(M.Fe/$FePO_4$)의 조절을 통해 Fe_3P 상의 형성이 가능하다고 판단된다. 또한 환원 반응을 통해 생성된 Fe-P 합금을 전기화학 실험하여 수소 발생 촉매 특성 및 메커니즘을 고찰한다.

*Corresponding author : 김선중 / Ksjoong@chosun.ac.kr

결론

본연구에서는 $FePO_4$의 탄소 열 환원을 기반으로 한 Fe-P 합금의 수소 발생 반응을 평가하고 메커니즘을 조사하였다. $FePO_4$의 단독 환원 반응 시 FeP 및 Fe_2P가 생성되며, 혼합비(M.Fe/$FePO_4$)를 조절하여 원하는 상의 Fe-P 합금 생성이 가능하다. 또한 회수된 Fe-P 합금을 선형 전압 주사 실험을 통해 수소 발생 반응 및 Pt 대체 가능성을 평가하였다.

[1] Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. A. H., & Rooney, D. W. (2022). Environmental Chemistry Letters, 20(1), 153-188.

[2] Bhuiyan, M. M. H., & Siddique, Z. (2025). International Journal of Hydrogen Energy, 102, 1026-1044.

[3] Hughes, J. P., Rowley-Neale, S., & Banks, C. (2021). RSC advances, 11(14), 8073-8079.

PP-05

1273K에서 Biomass 활용 DRI 복합 펠렛의 환원 및 탄소 거동

Reduction and carbon behavior of biomass-based DRI composite pellets at 1273K.

김윤하, 김선중*
조선대학교 신소재공학과

서론

최근 철강 산업에서는 탄소중립 실현을 위해 수소를 환원제로 활용하는 수소환원철 기술이 주목받고 있다. 그러나 수소 환원 반응은 강한 흡열반응으로 반응 온도를 유지하기 위한 추가적인 열에너지 공급이 요구된다.[1] 이에 따라 전기로에서 발생하는 고온 배가스를 예열 공정에 활용하여 에너지 소비를 저감하는 방안이 제안되고 있다. 이때 바이오 탄소재가 배합된 복합 펠렛을 적용할 경우 예열 구간에서 배가스와의 반응을 통해 환원 및 가탄 효과를 향상시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 전기로 배가스의 CO 가스와 Biomass를 활용하여 DRI의 환원 및 가탄 거동을 평가하고, Biomass의 환원제로서의 적용 가능성을 검토하였다.

실험방법

예열대 온도인 1273K에서 DRI와 Biomass의 복합 펠렛을 CO 가스와 반응시켰다. 또한 Biomass의 환원 특성을 비교하기 위해 분코크스를 환원제로 사용한 조건에서도 동일한 실험을 진행하였다. 환원제 비율은 5, 10 및 15%로 설정하였으며, 반응 가스는 Ar과 CO를 혼합하여 가스 비율에 따른 반응 거동을 비교하였다. 반응 중 배출가스 분석을 진행하였으며, 반응 후 시료는 가스 퀜칭을 통해 회수하였다. 회수된 시료는 SEM-EDS, HNO 및 C/S 분석을 진행하여 반응 후 조성 및 특성을 확인하였다.

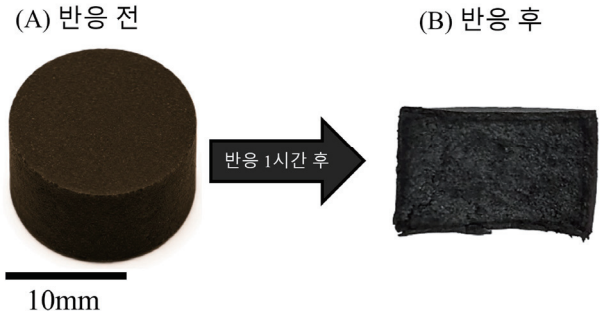


Fig 1. 환원 전, 후 펠렛 이미지

결과 및 고찰

Fig. 1은 DRI와 Biomass의 복합 펠렛을 Ar 분위기에서 반응 후 회수된 시료의 이미지를 나타낸다. 반응 후 복합 펠렛의 무게는 감소하였으며, SEM 관찰 결과 Biomass와 DRI의 펠렛 내부에 기공이 다량으로 확인되었다. 또한 반응 후 펠렛의 잔류 탄소 함량은 CO가스 비율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타냈다.

결론

본 연구에서는 1273K에서 배가스 중 CO 가스의 분위기 조건에서 Biomass와 DRI의 복합 펠렛의 환원 및 가탄 거동을 조사하였다. 또한 분코크스와 비교를 통해 Biomass의 적용 가능성을 평가하였다. CO 가스 비율이 증가할수록 반응 후 시료의 잔류

*Corresponding author : 김선중 / ksjoong@chosun.ac.kr

탄소 함량이 증가하였으며, 이는 CO 가스에 의한 간접 환원이 환원제의 직접적인 탄소 반응을 감소하였다. 또한 Biomass를 환원제로 사용할 경우 분코크스에 비해 반응 후 회수된 시료의 산소 함량이 낮게 나타나 뛰어난 환원 특성을 확인하였다. 반면 잔류 탄소 함량은 분코크스 사용 조건에서 더 높게 나타나 가탄 측면에서 유리한 특성을 보였다. 따라서 실제 공정에서 Biomass와 분코크스를 혼합 장입하여 환원 특성과 가탄 효과를 동시에 나타낼 수 있다.

[1] von Schéele, J. (2023). Pathways towards full use of hydrogen as reductant and fuel. Matériaux & Techniques, 111(4), 405. https://doi.org/10.1051/mattech/20230300.

PP-06

비철제련슬래그 플럭스를 이용한 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석으로부터 네오디뮴의 건식제련 회수 거동 연구

A Study on the Pyrometallurgical Recovery Behavior of Neodymium from Nd-Fe-B Magnets in End-of-Life EV Motors Using Non-Ferrous Smelting Slag Flux

김창정[1], 정연준[2], 왕제필[3*]

[1]국립부경대학교 금속공학과, [2]현대자동차(주), BB21 Plus Team, [3]국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공

초록

본 연구에서는 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석 함유 소재로부터 네오디뮴(Nd)을 선택적으로 산화시켜 슬래그상으로 회수하는 건식제련 기반 금속-슬래그 분리 공정을 검토하였다. Nd는 Fe에 비해 산소 친화도가 높기 때문에 고온 용융 조건에서 선택적 산화가 가능하며, 생성된 Nd 산화물은 적절한 슬래그 플럭스를 통해 슬래그상으로 포집될 수 있다. 본 연구에서는 파얄라이트계 합성 슬래그 플럭스를 이용하여 슬래그 첨가량 및 Fe_2O_3 첨가량의 영향을 평가하였고, 이를 바탕으로 산업 부산물인 비철제련슬래그 플럭스의 적용 가능성을 검토하였다. 또한 도가니 재질에 따른 Nd 분배 및 공정 안정성 변화를 함께 평가하였다. 그 결과, 파얄라이트계 합성 슬래그 플럭스 조건에서는 30 wt.% 슬래그 플럭스 및 2 wt.% Fe_2O_3 첨가 조건에서 80.92%의 Nd 회수율을 나타냈으며, 비철제련슬래그 플럭스를 적용한 경우에도 73.16%의 Nd 회수율을 보였다. 도가니 재질은 Nd 분배에 큰 영향을 미쳤으며, zirconia 도가니에서는 Nd가 도가니 반응층에 강하게 잔류한 반면, alumina 도가니는 회수율, 공정 안정성 및 경제성을 고려할 때 가장 실용적인 도가니 재질로 판단되었다. 본 연구 결과는 비철제련슬래그 플럭스가 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석으로부터 Nd를 회수하기 위한 기능성 슬래그 형성재로 활용될 수 있음을 보여준다.

주제어 : EV 폐모터(End-of-life EV motors), Nd-Fe-B 자석(Nd-Fe-B magnets), 네오디뮴 회수(Neodymium recovery), 건식제련(Pyrometallurgical recycling), 비철제련슬래그(Non-ferrous smelting slag), 금속-슬래그 분리(Metal-slag separation)

서론

희토류 원소는 전기자동차, 풍력발전, 전자기기 등 첨단 산업에 필수적인 핵심 소재로 사용되고 있으며, 특히 네오디뮴(Nd)은 고성능 Nd-Fe-B 영구자석의 주요 구성 원소이다. 최근 전기자동차 보급 확대에 따라 Nd-Fe-B 자석의 사용량이 증가하고 있으며, 이에 따라 사용 후 EV 모터로부터 희토류 원소를 회수하는 기술의 중요성이 커지고 있다. 기존 희토류 재활용 공정은 해체, 선별 및 습식제련 공정에 의존하는 경우가 많아 공정이 복잡하고 폐액 처리 등의 환경적 부담이 존재한다. 따라서 금속상과 산화물상을 이용하여 Nd를 선택적으로 분리할 수 있는 건식제련 기반 공정의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석 함유 소재를 대상으로 Fe_2O_3 산화제와 비철제련슬래그 플럭스를 활용하여 Nd를 선택적으로 산화 및 슬래그상으로 회수하는 공정의 적용 가능성을 평가하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 EV 폐모터 rotor 유래 소재 중 steel 및 Nd-Fe-B 자석 분율을 기반으로 구성한 시료를 사용하여 LAB-scale 건식용융 실험을 수행하였다. 실험은 고주파 유도로를 이용하여 대기 분위기에서 진행하였으며, 시료를 약 1600℃까지 가열하여 금속상을 완전히 용융시켰다. 용융 후 Nd의 선택적 산화를 유도하기 위해 Fe_2O_3를 산화제로 첨가하였고, 이후 생성된 Nd 산화물이 슬래그상으로 포집되도록 슬래그 플럭스를 투입하였다.

먼저 파얄라이트계 합성 슬래그 플럭스를 사용하여 슬래그 첨가량 및 Fe_2O_3 첨가량이 Nd 회수율에 미치는 영향을 평가하였

* Corresponding author : 왕제필 / jpwang@pknu.ac.kr

다. 이후 최적 조건을 바탕으로 산업 부산물인 비철제련슬래그 플럭스를 적용하여 Nd 회수 가능성을 검토하였다. 또한 Al_2O_3, MgO, ZrO_2 및 carbon 도가니를 사용하여 도가니 재질에 따른 Nd 분배, 슬래그-도가니 반응 및 공정 안정성을 비교하였다. 반응 후 금속상, 슬래그상 및 도가니 반응층을 분리하여 ICP 및 XRF 분석을 수행하였으며, 각 상으로 분배된 Nd 함량을 바탕으로 Nd 회수율을 산정하였다.

결과 및 고찰

파얄라이트계 합성 슬래그 플럭스를 이용한 실험 결과, 슬래그 첨가량이 증가함에 따라 Nd의 슬래그상 회수율이 향상되는 경향을 보였다. 10, 20 및 30 wt.%의 슬래그 플럭스를 첨가한 경우 Nd 회수율은 각각 40.12, 65.03 및 80.92%로 증가하였으며, 이는 산화된 Nd가 슬래그상으로 효과적으로 포집되었음을 나타낸다. Fe_2O_3 첨가량에 따른 실험에서는 2 wt.% Fe_2O_3 첨가 조건에서 가장 높은 Nd 회수율을 나타냈으며, 과량의 Fe_2O_3 첨가는 회수율 향상에 큰 영향을 주지 않았다.
최적 조건을 바탕으로 비철제련슬래그 플럭스를 적용한 결과, Nd는 슬래그상으로 효과적으로 분배되었으며 73.16%의 회수율을 나타냈다. 이는 파얄라이트계 합성 슬래그 플럭스 조건의 80.92%보다는 낮지만, 산업 부산물인 비철제련슬래그가 Nd 회수를 위한 슬래그 형성재로 활용 가능함을 보여준다. 대표적인 Nd 회수 결과는 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Representative Nd recovery results under selected smelting conditions

Condition	Slag flux	Crucible	Nd recovery into slag (%)	Main observation
Optimized synthetic slag flux	Fayalite-based slag flux	Alumina	80.92	Highest recovery under synthetic slag flux condition
Industrial slag flux	Non-ferrous smelting slag flux	Alumina	73.16	Feasible recovery using industrial slag flux
MgO crucible condition	Non-ferrous smelting slag flux	MgO	72.33	Similar recovery behavior to alumina crucible
Zirconia crucible condition	Non-ferrous smelting slag flux	Zirconia	30.88	Significant Nd retention in crucible-reacted region
Carbon crucible condition	Non-ferrous smelting slag flux	Carbon	98.6	High recovery but severe slag foaming and process instability

도가니 재질에 따른 실험에서는 alumina 및 MgO 도가니가 유사한 Nd 회수 거동을 보였으며, 각각 73.16 및 72.33%의 Nd 회수율을 나타냈다. 반면 zirconia 도가니에서는 Nd가 도가니 반응층에 강하게 잔류하여 슬래그상 회수율이 30.88%로 낮게 나타났다. Carbon 도가니의 경우 98.60%의 높은 Nd 회수율을 보였으나, 슬래그 발포, 도가니 열화 및 금속상의 탄소 픽업 가능성으로 인해 안정적인 공정 운전에는 부적합한 것으로 판단되었다. 따라서 Nd 회수율뿐만 아니라 슬래그-도가니 반응성, 금속-슬래그 분리 안정성 및 경제성을 종합적으로 고려할 때 alumina 도가니가 가장 실용적인 조건으로 판단되었다.

결론

본 연구에서는 EV 폐모터 유래 Nd-Fe-B 자석 함유 소재로부터 Nd를 선택적으로 산화시켜 슬래그상으로 회수하는 건식제련 기반 공정을 평가하였다. 파얄라이트계 합성 슬래그 플럭스 조건에서는 30 wt.% 슬래그 플럭스 및 2 wt.% Fe_2O_3 첨가 조건에서 80.92%의 Nd 회수율을 나타냈으며, 비철제련슬래그 플럭스를 적용한 경우에도 73.16%의 Nd 회수율을 달성하였다. 이는 비철제련슬래그가 Nd 회수를 위한 기능성 슬래그 플럭스로 활용될 수 있음을 의미한다. 또한 도가니 재질은 Nd 분배 및 공정 안정성에 큰 영향을 미쳤으며, zirconia 도가니는 Nd 손실이 커 부적합하였고, carbon 도가니는 높은 회수율에도 불구하고 슬래그 발포 및 공정 불안정성이 문제로 확인되었다. 최종적으로 alumina 도가니는 Nd 회수율, 공정 안정성, 경제성 및 실험 적용성을 고려할 때 가장 적합한 도가니 재질로 판단되었다.

사사

본 연구는 2026년 현대자동차그룹의 지원을 받아 수행되었습니다.

PP-07

전로슬래그 팽창성 저감을 위한 스팀에이징 연구

A study on steam aging to reduce the expansibility of BOF slag

강은솔[1], 조성구[1] ,박성훈[1*]

[1]포항산업과학연구원 부산물자원화연구그룹

초록

전로슬래그는 잔존 유리석회(free CaO, f-CaO)의 수화 팽창으로 골재 활용에 제약이 있다.
본 연구에서는 전로슬래그의 체적 안정성을 조기에 확보하고자 95 °C 조건의 스팀에이징을 적용하여 처리기간 및 입도에 따른 f-CaO 함량 변화와 수침팽창 특성을 평가하였다. 4.75 mm 미만 및 4.75 – 13.2 mm 입도의 시료를 7일간 스팀에이징 처리한 결과, f-CaO 함량은 각각 3.08 % 및 7.25 %에서 0.48 % 및 1.07 %로 감소하였다. 또한, 이를 적용한 아스팔트 혼합물(SMA-10, SMA-13)의 10일 수침팽창률 역시 평균 0.22 %, 0.83 %로 도로 포장용 품질 기준을 충족하였다.

주제어 : 전로슬래그, 스팀에이징, 유리석회(f-CaO), 수침팽창, 슬래그 고부가화

서론

천연골재 자원의 고갈과 수급 문제에 따라 철강 부산물을 대체 골재로 활용하려는 필요성이 증가하고 있다. 제강공정에서 발생하는 전로슬래그(Basic oxygen furnace slag, BOF slag)는 우수한 강도와 내마모성으로 도로 및 건설용 골재 잠재력이 높으나, 잔존 유리석회(free CaO, f-CaO)의 수화에 따른 체적팽창이 장기적인 안정성을 저해하는 요인으로 작용한다.
전로슬래그의 안정화를 위해 자연에이징이 적용되고 있으나, 처리 기간이 길고 외부 환경에 따른 변동성이 크다는 한계가 있다. 따라서 안정화 기간을 단축하고 처리조건을 제어할 수 있는 공정 기술이 요구된다. 이에 본 연구에서는 고온 수증기를 이용한 스팀에이징을 적용하여 전로슬래그의 f-CaO 저감 및 팽창 안정화 효과를 평가하고자 하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 시료는 전로슬래그 중 비자착 슬래그(-20 mm)를 대상으로 하였으며, 이를 −4.75 mm와 4.75 – 13.2 mm의 두 가지 입도로 분급하여 사용하였다. 스팀에이징은 항온수조(Water bath)를 이용하여 95 °C 조건에서 2, 4, 7일간 진행하였으며, 처리 기간별 특성을 원석(as-is) 시료와 비교하였다.
f-CaO 분석은 화학적정법(KS L 5405 부속서 C)을 준용하되, 분석 시 에틸렌글리콜(Ethylene glycol, EG)에 함께 용해되는 수산화칼슘 ($Ca(OH)_2$)의 영향을 배제하기 위해 열중량분석(Thermogravimetric analysis, TGA) 결과를 환산하여 f-CaO 함량을 보정하였다. 아울러 체적 안정성을 평가하기 위해, 95 °C에서 7일간 스팀에이징한 시료를 사용하여 아스팔트 혼합물 SMA-10 및 SMA-13 각각 2 개의 시편을 제조한 후 KS F 2580 기준에 따라 80 °C 수침 조건에서 10일간 수침팽창시험을 진행하였다.

결과 및 고찰

스팀에이징 처리 결과, 전로슬래그 내 f-CaO 함량이 급감하였으며, 이를 적용한 아스팔트 혼합물의 수침팽창률 역시 도로 포장용 품질 기준(KS F 2535)을 안정적으로 만족하였다.
스팀에이징 기간에 따른 f-CaO 함량 변화를 분석한 결과, 처리 시간이 경과함에 따라 뚜렷한 감소 추세를 보였다. 4.75 – 13.2 mm 입도의 시료는 as-is 상태에서 7.25 %였던 순수 f-CaO(Corrected f-CaO)가 7일 처리 후 1.07 %로 감소하였으며, -4.75 mm 입도의 시료 역시 순수 f-CaO가 3.08 %에서 0.48 %로 저감되었다. 이는 고온의 수증기가 슬래그 내부로 침투하여 미반응

*Corresponding author : 박성훈 / sunghunpark@rist.re.kr

유리석회와의 수화반응을 효과적으로 촉진했음을 나타낸다.

Table 1. Influences of steam aging time on the f-CaO concentration of BOF slag

Particle size (mm)	Aging time (day)	f-CaO by titration (%)	$Ca(OH)_2$ contribution by TG (%)	Corrected f-CaO (%)
4.75–13.2	As-is	7.87	0.62	7.25
	2	2.45	0.44	2.01
	4	2.45	0.62	1.83
	7	2.09	1.03	1.07
< 4.75	As-is	5.16	2.09	3.08
	2	1.69	0.75	0.94
	4	1.60	0.72	0.89
	7	1.10	0.62	0.48

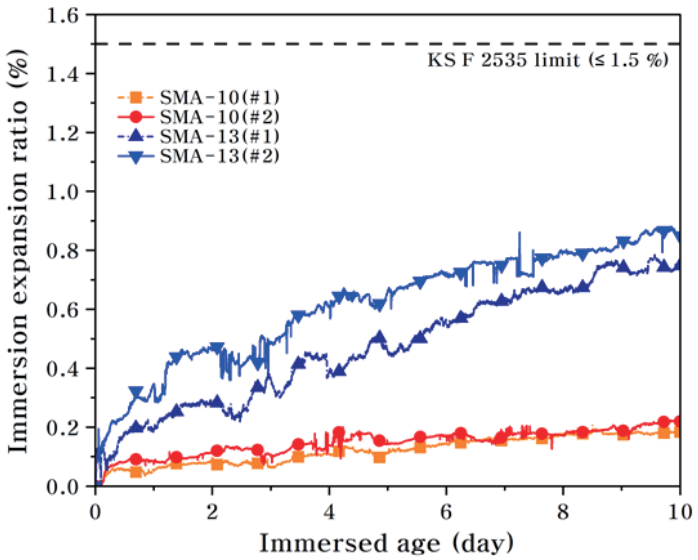


Fig. 1. Water immersion expansion ratios of SMA mixtures using 7-day steam-aged BOF slag

또한, 95 °C에서 7일간 스팀에이징한 시료를 대상으로 수침팽창시험을 진행한 결과, SMA-10 혼합물은 평균 0.22 %, SMA-13 혼합물은 평균 0.83 %의 수침팽창률을 기록하였다. 이는 9개월간 자연에이징 처리한 시료를 대상으로 수침팽창시험을 진행한 결과인 0.87 %(SMA-10) 및 1.08 % (SMA-13)와 비교했을 때, 팽창 안정성이 크게 개선된 결과이며, 도로 포장용 품질 기준(KS F 2535)에서 규정하는 입도 조정 제강 슬래그의 수침 팽창비 1.5 % 이하를 충족하는 수치이다.

결론

본 연구를 통해 95 °C 조건의 스팀에이징 공정이 전로슬래그 내 f-CaO 수화를 촉진하여 단기간에 팽창 안정성을 확보하는 데 효과적임을 확인하였다. 또한, 스팀에이징 처리한 전로슬래그는 아스팔트 혼합물에서 양호한 수침팽창 특성을 나타내어, 장기간 소요되는 기존 자연에이징 공정의 한계를 극복하고 도로 포장용 대체 골재로의 활용성 가능성을 높일 수 있음을 확인하였다. 본 기술은 향후 철강 부산물의 자원순환 확대와 전로슬래그의 고부가가치 활용에 기여할 것으로 기대된다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

포스터

순환정책



The Korean Institute of Resources Recycling

PC-01

시멘트 산업 배출 이산화탄소의 화학적 전환 실증 현황 및 사례 분석

Chemical Conversion of CO_2Emissions from the Cement Industry: Demonstration Trends and Current Status in Korea

김영진[1], 김나영[1], 김태형[1], 최문관[1], 조진상[1*]

[1]한국석회석신소재연구소 연구개발부

초록

시멘트 산업은 클링커를 제조하는 과정에서 다량의 이산화탄소(CO_2)가 발생하며, 이는 크게 연료 연소에 의한 배출과 석회석의 탈탄산 반응에 의한 공정배출로 구분된다. 탈탄산 반응에 따라 발생하는 공정배출은 시멘트 제조공정의 본질적 특성에 기인하므로, 연료 전환이나 에너지 효율 향상만으로는 감축에 한계가 있다. 따라서 시멘트 산업의 탄소중립 달성을 위해서는 연료 전환, 혼합시멘트 확대 및 공정 효율화와 함께 이산화탄소 포집, 활용 및 저장 기술의 적용이 필수적으로 검토되고 있다. 특히 시멘트 산업은 CO_2를 기반으로 하는 화학적 전환 공정과 연계하기에 유리한 산업적 특성을 가지고 있다. 시멘트 킬른 배가스는 대규모 CO_2 배출원이며, 배출원이 고정되어 있어 포집 설비 적용이 상대적으로 용이하다. 또한 시멘트 제조공정에서는 예열기, 소성로 및 클링커 쿨러 등에서 고온 및 중저온 폐열이 지속적으로 발생한다. 이러한 폐열은 주로 폐열 회수 발전, 원료 건조 또는 공정 예열 등에 활용되어 왔으나, 향후에는 CO_2 정제, 압축 보조전력, 합성가스 제조 및 메탄올 정제공정 등 CCU 공정의 에너지 요구를 저감하는 열원으로 활용될 수 있다.

프랑스 및 독일의 시멘트 산업에서는 공정 CO_2를 포집하여 화학 원료 또는 산업용 CO_2로 활용하려는 시도가 진행되고 있으며, 이러한 사례들은 시멘트 산업이 탄소 순환형 연료 및 화학원료 생산을 위한 산업적 플랫폼으로 전환될 가능성을 보여주고 있다. 국내에서도 시멘트 소성로에서 배출되는 CO_2를 포집 및 정제한 후 합성가스 개질 및 메탄올 전환에 활용하는 실증 연구를 추진하여 탄소의 화학적 전환 기술을 확보하기 위해 노력하고 있다. 본 연구에서는 시멘트 킬른 배가스 CO_2의 화학적 전환을 위한 국내외 실증 사례를 종합 분석하고, CO_2의 배출, 포집, 합성가스 제조 및 메탄올 합성 공정의 주요 기술적 요소를 도출하고자 하였다.

주제어 : 시멘트, 이산화탄소, 화학적 전환

*Corresponding author : 조진상 / chsang@kilam.re.kr

PC-02

폐플라스틱 열분해유 생산공정의 ORC 폐열회수 설비 도입에 따른 온실가스 배출 저감 효과 분석

Greenhouse Gas Reduction Assessment of an ORC Waste Heat Recovery Unit in a Waste Plastic Pyrolysis Oil Process

김민채[1], 노형주[1], 이규림[1], 황용우[2*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2]인하대학교 환경공학과

초록

폐플라스틱 열분해를 통한 재생연료유 생산은 자원순환 관점에서 주목받고 있으나, 공정 중 발생하는 저온 폐열의 상당량이 회수되지 않고 대기로 방출되고 있다. 본 연구는 연간 폐포장재 6,495톤을 처리하여 열분해유 4,200톤을 생산하는 실증 공정을 대상으로, 유기 랭킨 사이클(Organic Rankine Cycle, ORC) 폐열회수 설비 도입 유무에 따른 온실가스 배출량을 전과정평가 기법으로 비교 분석하였다. 기능단위는 열분해유 1 kg 생산으로 설정하고 현장 실측 자료와 ecoinvent v3.12를 기반으로 투입물·산출물 목록을 구축하였다. 물질수지 차분으로 산출된 비응축가스 867톤/년의 연소 배출을 화석기원 CO2로 계상하였고, ORC 설비의 제조 부담과 냉매 누출은 동급(100 kWel 공냉식, R245fa) ORC의 전과정평가 문헌값을 적용하여 설계수명에 분배함으로써 인프라 구축 부담을 시스템 경계에 포함하였다.

분석 결과 ORC 미설치 조건의 배출량은 열분해유 1 kg당 0.810 kgCO2eq로 산정되었으며, 비응축가스 연소(74.8%), 폐수 처리(12.6%), 계통전력(10.8%) 순으로 기여하였다. 공정 열수지로부터 회수 가능한 폐열은 약 258 kWth로 순발전량 159 MWh/년에 해당하며, 이 경우 배출량은 0.785 kgCO2eq/kg로 3.1% 저감되었다. 설비 사양 기준 최대 발전량(총 800 MWh/년, 순 618 MWh/년) 적용 시에는 잉여 전력의 계통 역송을 포함하여 12.0% 저감이 가능하였다. ORC 인프라 부담은 발전량 기준 8.6 gCO2eq/kWh로 전체 배출량의 0.2% 수준이었고 탄소 회수기간은 약 0.3년으로, 인프라 부담을 포함하더라도 ORC 도입의 환경적 타당성이 확인되었다.

주제어 : 열분해유, 전과정평가(LCA), 유기랭킨사이클(ORC), 폐열회수, 온실가스

서론

폐플라스틱 열분해는 물질 재활용이 곤란한 복합재질 폐포장재를 연료유로 전환하는 화학적 재활용 기술이다. 그러나 열분해 공정은 반응기 가열과 잉여가스 소각 과정에서 상당량의 고온 배기가스를 배출하며, 이 폐열은 대부분 세정탑을 거쳐 대기로 방출된다. 유기 랭킨 사이클(ORC)은 200℃ 이하 저온 폐열을 전력으로 회수하는 기술로 산업 현장 적용이 확대되고 있다.

다만 기존의 ORC 도입 효과 분석은 운영 단계의 전력 대체 편익만을 다루는 경우가 많아, 설비 제조에 수반되는 자본재 부담과 냉매 누출에 의한 온실효과가 누락되는 한계가 있다. Oehler 등(2021)은 100 kWel급 공냉식 ORC의 전과정평가에서 생애 온실가스 배출의 78%가 작동유체 R245fa의 누출에 기인함을 보고한 바 있다. 또한 설비 공급자가 제시하는 정격 사양이 실제 공정에서 확보 가능한 열원 조건과 부합하는지에 대한 검토도 충분히 이루어지지 않고 있다. 이에 본 연구에서는 국내 폐플라스틱 열분해유 생산 실증 공정을 대상으로 ORC 설비 도입 유무에 따른 온실가스 배출량을 비교하고, 공정 열수지에 근거한 설비 적정 용량과 인프라 구축 부담을 함께 정량화하고자 하였다.

연구범위 및 방법

기능단위 및 기준 흐름은 열분해유 1 kg, 시스템 경계는 폐포장재 반입부터 정제유 출하까지의 gate-to-gate 범위, 영향범주는

*Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac.kr

기후변화(GWP100)로 설정하였다. 폐포장재는 경제적 가치 없이 유입되므로 부담 없는(zero-burden) 흐름으로 처리하였고 주산물이 단일하여 할당은 적용하지 않았다. 배경 데이터는 ecoinvent v3.12, 계통전력은 국내 중전압 시장 데이터(0.670 kgCO2eq/kWh)를 적용하였다.

대상 공정은 폐포장재 6,495톤 및 첨가제 1.05톤 투입에 대하여 열분해유 4,200톤, 잔재물 583.9톤, 폐수 844.68톤이 산출되며, 차분에 해당하는 867.5톤(수율 13.4%)을 비응축가스로 산정하였다. 가스 저위발열량은 폐고분자 열분해 가스 보고 범위(42~50 MJ/kg)의 하단값 44 MJ/kg, 탄소함량은 보고 조성(메탄 50 vol% 이상, 나머지 C2~C4 탄화수소 및 수소)을 근거로 80 wt%로 가정하였다. 열분해로 소요열은 폴리올레핀 열분해 엔탈피 측정값(HDPE 2,300 J/g, PP 2,800 J/g)의 중간값 2,500 kJ/kg을 적용하였고, 로 열효율 50%와 배기 폐열 회수율(킬른 18%, 소각로 60%)은 가정값이다.

ORC 인프라 부담은 동급 공냉식 100 kWel ORC의 전과정평가 결과를 인용하여 제조·운송 20,800 kgCO2eq 및 R245fa 충전량 208 kg(GWP100 1,032, 운전 누출 1%/년, 폐기 회수손실 20%)을 설계수명 20년에 분배하였고, 동 문헌의 응축기 팬 소비전력(100 kW 중 14.5 kW)을 반영해 순발전량을 총발전량의 77.3%로 보정하였다. 시나리오는 ORC 미설치(Case A), 설비 사양 적용(Case B1), 열수지 정합(Case B2)으로 구분하였다. 주요 목록은 Table 1과 같다.

Table 1. Life cycle inventory per 1 kg of pyrolysis oil (reference flow), Case A

구분	항목	단위공정 투입·산출량	적용 데이터베이스	배출량 (kgCO2eq)
투입물	폐포장재 반입 운송	0.0773 t·km	transport, lorry 16-32 t	0.0116
투입물	베이킹소다/가성소다	0.00025 kg	market for sodium bicarbonate	0.0003
투입물	계통전력	0.1307 kWh	market for electricity, MV, KR	0.0876
산출물	비응축가스 연소 CO2	0.2065 kg	직접배출 (화석기원)	0.6059
산출물	잔재물(고상) 매립	0.1390 kg	inert waste, final disposal	0.0025
산출물	폐수(액상) 위탁처리	0.2011 kg	wastewater treatment	0.1017
—	합계	—	—	0.8096

결과 및 고찰

ORC 미설치 조건(Case A)의 온실가스 배출량은 열분해유 1 kg당 0.8096 kgCO2eq(연간 3,400 tCO2eq)로 산정되었다. 기여도는 비응축가스 연소 CO2 0.6059 kgCO2eq/kg(74.8%), 폐수 처리 0.1017(12.6%), 계통전력 0.0876(10.8%), 원료 반입 운송 0.0116(1.4%) 순으로, 열분해 공정의 온실가스 배출이 전력 사용보다 공정 자체의 탄소 흐름에 의해 결정됨을 보여준다.

공정 열수지 분석 결과 비응축가스의 총 보유열량 38,169 GJ/년 중 36,867 GJ이 열분해로 버너 연료로 소비되고 잔여 1,301 GJ이 소각되는 것으로 산정되었다. 양측 배기가스에서 150℃까지 냉각 시 회수 가능한 열량은 7,417 GJ/년(약 258 kWth)이며, ORC 변환효율 10%와 순/총 발전 비율 0.773 적용 시 순발전량은 159 MWh/년이다. 이는 설비 공급자 제시값 1,047 kWth 대비 약 25% 수준으로 정격 사양 적용에는 열원 확보에 대한 추가 검토가 필요하다.

시나리오별 결과는 Table 2 및 Fig. 1과 같다. 열수지 정합 조건(Case B2)의 배출량은 0.7847 kgCO2eq/kg로 3.1%, 설비 사양 기준(Case B1)에서는 전력 자급과 잉여 전력 69 MWh의 역송에 따른 회피 배출을 포함하여 0.7122 kgCO2eq/kg로 12.0% 저감되었다. ORC 인프라 부담은 발전량 기준 8.6 gCO2eq/kWh로 참조문헌의 동급 시스템 값(8,500시간·15년 기준 9.7 gCO2eq/kWh)과 정합하였다. 전체 배출량에서 차지하는 비중은 0.2% 미만, 탄소 회수기간은 0.26~0.35년이었다. 다만 인프라 부담의 80%가 냉매 누출에 기인하므로 저GWP 냉매 적용 시 추가 저감이 가능하다.

Table 2. Comparison of GHG emissions with and without the ORC unit

시나리오	정의	배출량 (kgCO2eq/kg)	저감률 (%)	탄소 회수기간 (년)
Case A	ORC 미설치 (폐열 전량 대기 방출)	0.8096	—	—
Case B1	ORC 설치 (설비 사양, 순 618 MWh/년)	0.7122	12.0	0.26
Case B2	ORC 설치 (열수지 정합, 순 159 MWh/년)	0.7847	3.1	0.35

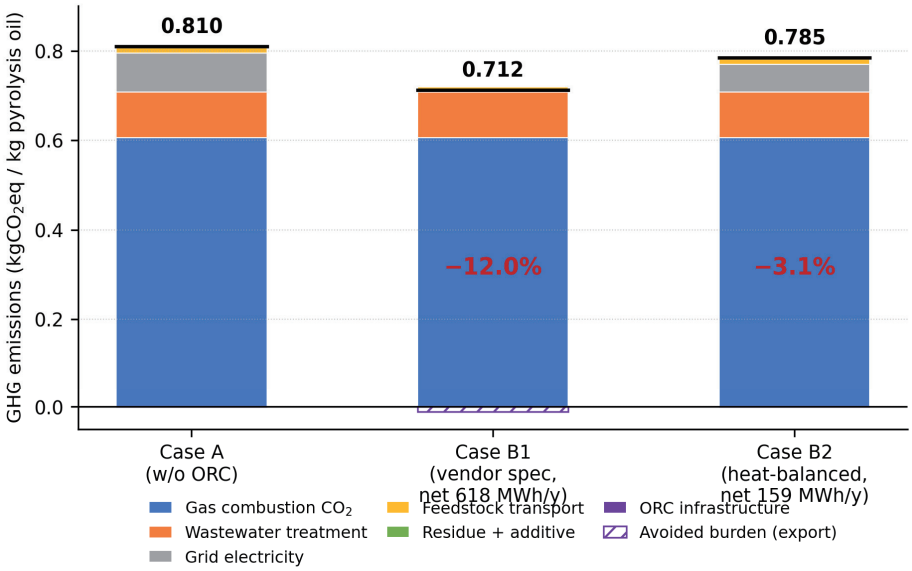


Fig. 1. Contribution analysis of GHG emissions with and without the ORC unit

결론

ORC 도입에 따른 온실가스 저감률은 공정 열수지 정합 조건에서 3.1%, 설비 사양 기준 최대 발전량 적용 시 12.0%로 산정되었다. 인프라 구축 부담은 8.6 gCO2eq/kWh로 전체의 0.2% 미만, 탄소 회수기간은 0.3년 내외였다. 본 연구는 인프라 구축 부담과 응축기 팬 소비전력까지 시스템 경계에 포함하고, 공정 열수지에 근거한 설비 적정 용량을 함께 제시하였다는 점에 의의가 있다.

사사

이 성과는 정부(기후에너지환경부)의 재원으로 한국환경산업기술원의 탈플라스틱 특성화대학원 사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

PC-03

전과정 관점의 영농폐 LDPE 발생 및 수거·재활용에 따른 환경영향 시계열 분석

Time-Series Life Cycle Assessment of the Generation, Collection and Recycling of Agricultural Waste LDPE in Korea

어진성[1], 노형주[1], 이재영[1], 황용우[2*]

[1]인하대학교 순환경제환경시스템전공, [2]인하대학교 환경공학과

초록

농업활동에서 발생하는 폐비닐은 지속적인 수거와 적정 처리가 필요한 주요 영농폐기물이며, 이 중 저밀도 폴리에틸렌(Low-Density Polyethylene, LDPE)은 시설하우스 및 멀칭용 비닐로 널리 사용되고 있다. 한국환경공단 영농폐기물 조사 결과, 국내 영농폐 LDPE(하우스용 + 멀칭용) 발생량은 2021년 201,883톤에서 2024년 183,839톤으로 8.9% 감소한 반면에, 공단 수거량은 102,018톤에서 100,220톤으로 1.8% 감소에 그쳐 수거율은 50.5%에서 54.5%로 4.0%p 상승하였다. 본 연구에서는 수거 이후 재활용 처리과정의 환경부하를 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA) 기법으로 정량화하고, 이를 연도별 수거량과 연계하여 총 환경영향의 변화를 분석하였다.

기능단위는 수거된 영농폐 LDPE 1톤의 수거 및 재활용 처리로 설정하였다. 시스템 경계는 공동집하장 이후의 수거·운송을 시작으로 폐비닐 투입, 파쇄, 1차 선별 및 이송, 2차 파쇄·분쇄, 세척, 폐수 회수·재이용, 2차 세척, 탈수 및 포장을 거쳐 플러프(Fluff)가 생산되는 단계까지로 하였다. 전과정목록은 공정별 전력사용량, 신규 용수 및 재이용수량, 약품 투입량, 폐수 발생·처리량, 폐토사·이물질 발생량 및 Fluff 생산량을 중심으로 구축하였으며, 배경 데이터는 ecoinvent v3.12를 적용하였다.

분석 결과 수거 폐LDPE 1톤당 온실가스 배출량은 195.2 kgCO2eq(Fluff 1톤 기준 314.9 kgCO2eq)로 산정되었다. 투입물별 기여도는 전력 85.8%, 수거·운송 7.7%, 폐기물 처리 3.1%, 용수·약품·폐수 1.9%, 포장재 1.5% 순이었으며, 공정별로는 세척 관련 공정(1차 세척, 폐수 회수·재이용, 2차 세척)이 43.7%로 가장 높았다. 연도별 수거량에 원단위를 적용한 총 온실가스 배출량은 2021년 19,918 tCO2eq에서 2023년 18,925 tCO2eq로 감소한 후 2024년 19,567 tCO2eq로 반등하였다. 발생량이 8.9% 감소하였음에도 총 배출량의 변동폭이 5% 이내에 머문 것은 수거율 상승으로 수거량이 유지되었기 때문이며, 이는 재활용기술 자체의 변화가 아닌 수거·처리량 변화에 따른 결과이다.

주제어 : 영농폐기물, 폐LDPE, 전과정평가(LCA), 물질재활용, 온실가스

서론

영농폐비닐은 농촌지역 환경오염의 주요 요인으로, 방치 또는 불법소각 시 대기오염물질 및 온실가스를 배출한다. 한국환경공단은 전국 수거사업소를 통해 영농폐비닐을 재질별로 수거하여 파쇄·세척·압축 후 재생원료로 공급하고 있으며, LDPE는 2024년 기준 총 발생량의 63.2%, 총 수거량의 49.4%를 차지하는 주요 재질이다.

영농폐비닐은 생활계 폐비닐과 달리 토사 부착량과 함수율이 높아 세척 부하가 크고, 이에 따른 전력 및 용수 소비가 재활용공정의 환경부하를 좌우한다. 선행 연구에서도 온실 피복필름의 재생 LDPE 생산에서 전력 소비가 최대 온실가스 기여 인자이며 세척공정이 최대 용수 수요 공정임이 보고된 바 있다. 그러나 국내 영농폐 LDPE를 대상으로 수거·재활용 공정의 전과정 환경부하를 정량화하고 이를 연도별 수거 실적과 연계한 분석은 충분히 이루어지지 않았다. 이에 본 연구에서는 영농폐 LDPE 수거·재활용 공정의 전과정목록을 구축하고, 공정별 기여도 분석과 연도별 총 환경영향 분석을 수행하였다.

연구범위 및 방법

기능단위는 수거된 영농폐 LDPE 1톤(입고 기준)의 수거 및 재활용 처리이며, 기준 흐름은 입고 폐LDPE 1,000 kg이다. 시스

*Corresponding author : 황용우 / hwangyw@inha.ac.kr

템 경계는 공동집하장 이후의 수거·운송부터 Fluff 생산·포장까지로 하였고 펠릿화 이후 공정은 제외하였다. 영향범주는 기후변화(GWP100)로 한정하였으며, 수거된 폐비닐은 경제적 가치 없이 유입되는 폐기물 투입물이므로 부담 없는(zero-burden) 흐름으로 처리하였다. 연도별 발생량 및 수거량은 한국환경공단 영농폐기물 조사 결과보고서(2021~2024년)의 최신 확정치를 적용하였다. 재활용량은 재질별 구분이 제공되지 않고 일부 연도에 이월 물량으로 수거량을 초과하므로, 재질별 확인이 가능한 수거량을 기준으로 산정하였다.

입고 조성은 LDPE 순물질 62%, 수분 18%, 토사 15%, 기타 이물질 3%, 기타 플라스틱 2%로 가정하였다. 공단 통계상 발생량이 이물질을 포함한 값으로 정의되어 있는 점을 반영한 것이다. 공정 총 전력은 250 kWh/t으로, PE 필름 세척라인의 비에너지 0.12~0.25 kWh/kg 범위 중 오염도가 높은 영농필름에 해당하는 상단값이다. 신규 용수는 오염도 높은 영농필름의 수요 범위(2.5~3.0 m3/t)의 하단값인 2.5 m3/t, 세척수 재이용률은 폐쇄순환 라인의 85~95% 범위 중간값인 90%를 적용하였다. Fluff 잔류수분은 5%, 공정손실률 5%와 약품 투입량은 가정값이다. 주요 목록은 Table 1과 같다.

Table 1. Life cycle inventory per 1 ton of collected waste LDPE (reference flow)

구분	항목	수량	단위	데이터 유형
투입물	수거 폐LDPE (기준 흐름)	1,000	kg	기능단위 정의
투입물	화물운송량	100	t·km	가정값 (평균 100 km)
투입물	전력 (P2~P9 합계)	250	kWh	문헌 범위 기반
투입물	신규 용수 / 재이용 세척수	2.5 / 22.5	m3	문헌값, 재이용률 90%
투입물	약품 (PAC, NaOH, PAM)	0.95	kg	가정값
산출물	Fluff (주산물)	620	kg	수율 62.0%
산출물	폐토사·슬러지 (함수 40%)	250	kg	물질수지
산출물	제거 이물질 / 공정손실	50 / 31	kg	물질수지
산출물	외부 방류 폐수	2.35	m3	물질수지 마감값

결과 및 고찰

수거 폐LDPE 1톤당 온실가스 배출량은 195.2 kgCO2eq, Fluff 1톤 기준으로는 314.9 kgCO2eq로 산정되었다. 투입물별 기여도는 전력이 167.5 kgCO2eq(85.8%)로 지배적이었고 수거·운송 15.0(7.7%), 폐토사·잔재물 처리 6.1(3.1%), 용수·약품·폐수 처리 3.7(1.9%), 포장재 3.0(1.5%)이 뒤를 이었다. 공정별로는 1차 세척(P5)이 38.7 kgCO2eq(19.8%)로 가장 높았고, 세척 관련 세 공정(P5, P6, P7)의 합이 85.3 kgCO2eq로 전체의 43.7%를 차지하여, 토사 부착량이 많은 영농폐비닐의 특성이 환경부하를 좌우함을 확인하였다.

연도별 결과는 Table 2 및 Fig. 1과 같다. LDPE 발생량은 2021년 201,883톤에서 2024년 183,839톤으로 8.9% 감소하였는데, 이는 하우스용 LDPE가 34.0% 감소한 영향이 크며 멀칭용은 1.1% 감소에 그쳤다. 반면 수거량은 1.8% 감소에 그쳐 수거율이 50.5%에서 54.5%로 상승하였다. 그 결과 총 온실가스 배출량은 18,925~19,918 tCO2eq 범위에서 변동폭 5% 이내에 머물렀다. 즉 발생 억제에 따른 환경영향 저감 효과가 수거율 상승에 의해 상쇄된 구조로, 재활용 단계의 총 환경부하를 줄이기 위해서는 수거량 변화뿐 아니라 공정 원단위 자체의 개선이 필요함을 시사한다.

다만 본 연구의 전력 사용량과 입고 조성은 문헌 범위 및 가정값에 기반하므로 향후 공정별 전력량 실측과 입고 시료 조성분석을 통한 검증이 필요하며, 제거 이물질을 전량 매립으로 가정하여 소각 처리 시 총 배출량이 20~30% 증가할 수 있다.

Table 2. Annual generation, collection and total GHG emissions

연도	LDPE 발생량 (톤)	LDPE 수거량 (톤)	수거율 (%)	총 배출량 (tCO2eq)
2021	201,883	102,018	50.5	19,918
2022	201,937	97,138	48.1	18,965
2023	183,311	96,936	52.9	18,925
2024	183,839	100,220	54.5	19,567

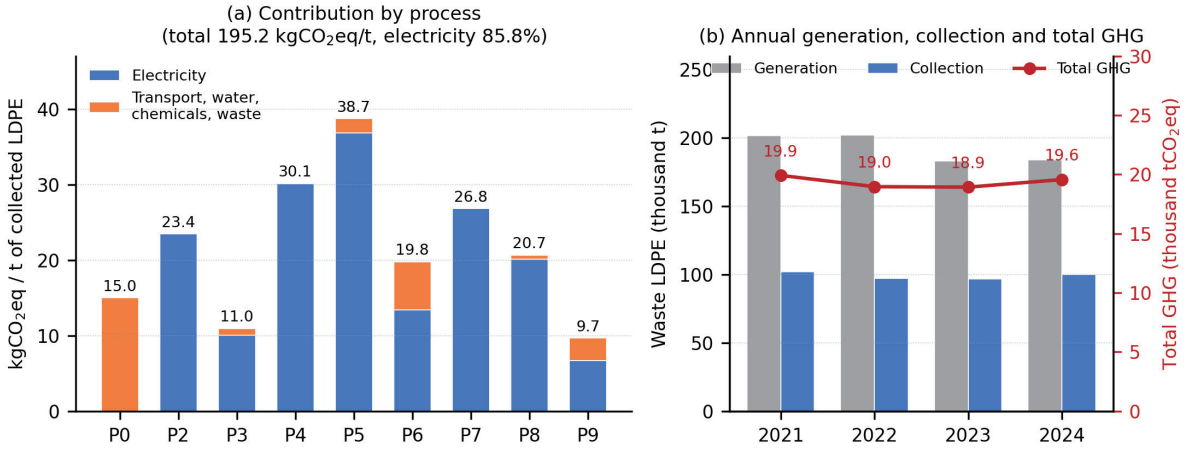


Fig. 1. (a) Process-level GHG emissions and (b) annual trends of agricultural waste LDPE

결론

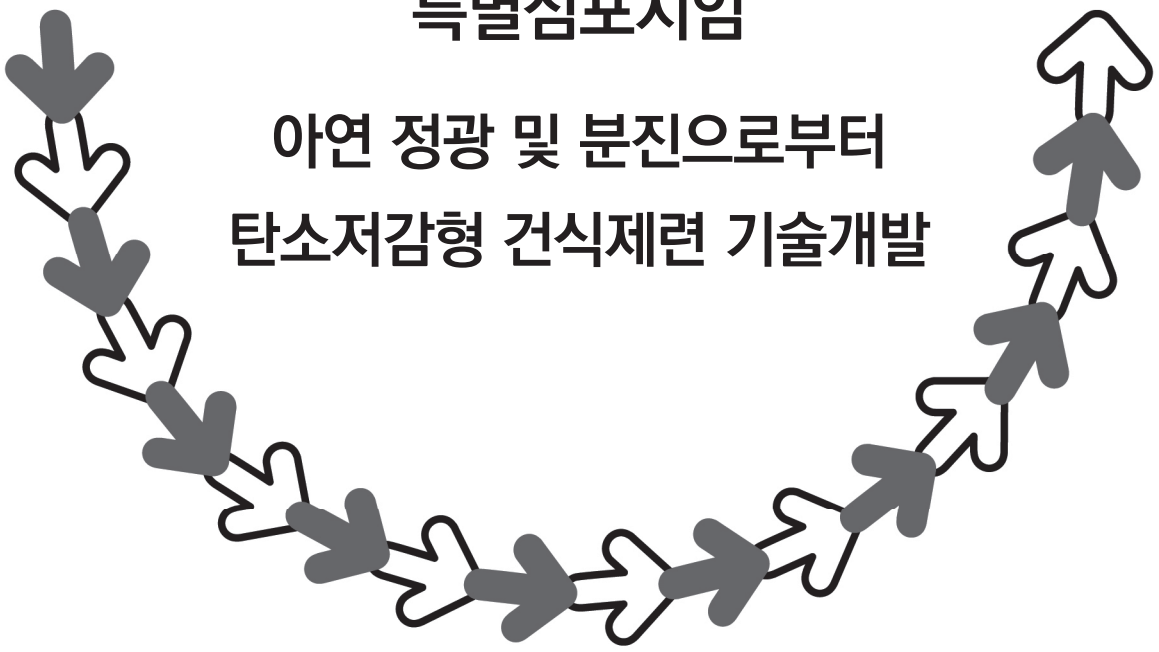
영농폐 LDPE의 수거·재활용에 따른 온실가스 배출량은 수거 폐LDPE 1톤당 195.2 kgCO2eq, Fluff 1톤당 314.9 kgCO2eq로 산정되었으며, 전력이 전체의 85.8%, 세척 관련 공정이 43.7%를 차지하였다. 2021~2024년 총 배출량은 18,925~19,918 tCO2eq 범위로, 발생량 8.9% 감소에도 수거율 상승으로 큰 변동 없이 유지되었다. 본 연구는 수거 실적과 재활용공정의 환경부하를 전과정 관점에서 연계하여 영농폐기물 관리 및 전과정 환경성평가의 기초자료를 제공한다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

아연 정광 및 분진으로부터
탄소저감형 건식제련 기술개발



The Korean Institute of Resources Recycling

TSL 스파이스 산물의 안티모니 침출거동

Leaching Behavior of Antimony from TSL Speiss Product

유경근[1*]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과

초록

본 연구에서는 TSL 공정에서 생성된 스피스(speiss)로부터 구리(Cu)와 안티모니(Sb)의 침출 효율에 미치는 염화물(Cl^-) 및 불화물(F^-) 이온의 영향을 조사하였다. 황산 침출 후 얻어진 침출 잔사에 대한 주사전자현미경(SEM) 분석 결과, 스파이스 입자 전반에 걸쳐 분포하는 그물망 형태의 CuSb 금속간화합물이 물리적 장벽으로 작용하여 Cu의 완전한 용해를 저해하는 것으로 확인되었다. 이러한 한계를 극복하기 위해 황산 침출 시스템에 Cl^- 및 F^- 이온을 첨가하였는데, 이는 할로겐화 이온이 금속과 안정한 착이온을 형성하여 용해도를 증가시키는 것으로 알려져 있기 때문이다. 2 mol/L 황산 용액에 0.1 mol/L의 Cl^-를 첨가한 경우 360분 후 99% 이상의 Cu 침출 효율을 달성한 반면, 동일 농도의 F^- 이온을 첨가한 경우에는 Cu 72.6%, Sb 69.2%로 상대적으로 낮은 침출 효율을 나타내어, Cl^-가 CuSb 금속간화합물 네트워크를 파괴하는 데 더 효과적임을 보여주었다. 침출 잔사에 대한 SEM 분석에서도 염화물 시스템에서는 스파이스 입자의 구조적 붕괴가 뚜렷하게 관찰된 반면, 불화물 시스템에서는 그물망 형태의 CuSb 구조가 대부분 그대로 유지되었음을 확인하였다. 염화물 시스템에 대한 추가 연구를 통해 교반 속도, 반응 온도, 황산 농도가 Sb의 침출 거동에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 불충분한 산 농도 조건에서 $SbCl_3$의 가수분해로 인해 생성되는 SbOCl, Sb_2O_3, Sb_2O_5와 같은 불용성 화합물로의 안티모니 재석출을 억제하기 위해서는 최소 2 mol/L의 황산 농도가 요구되었다.

주제어 : TSL, 스파이스, 안티모니, 염소이온

*Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr

아연 소광 내 Fe 영향에 따른 Pb 염화 반응 거동

Effect of Fe on the Chlorination Behavior of Pb in Zinc Calcine

정항철[1*], 장대환[1], 정우철[1], 문정식[1]
[1]고등기술연구원 소재부품연구본부

초록

아연 소광 내 Pb의 선택적 회수를 위해 NH_4Cl을 이용한 염화 반응을 수행하고, 반응 온도 및 Fe 함유상이 Pb 염화 거동에 미치는 영향을 평가하였다. 온도 및 당량 조건에 따른 Pb 염화물의 생성 및 회수 거동을 비교한 결과, 소광 내 Fe가 $ZnFe_2O_4$ 형태로 존재함에 따라 Pb의 염화 반응이 제한되어 회수율이 저하되는 문제를 확인하였다. 본 연구에서는 소광 내에 존재하는 Pb를 회수하기 위해 H_2 분위기에서 수소 환원을 통해 $ZnFe_2O_4$를 환원하고 탈철 전처리를 적용한 후 NH_4Cl 염화 반응을 수행하였다. 전처리 공정 전과 후의 Pb 염화 및 회수 거동을 비교하여 Pb 회수율 향상을 위한 반응 온도와 Fe 제거의 영향을 확인하였다.

주제어 : 아연 소광, 탈철 전처리, 수소 환원, NH_4Cl 염화 반응

서론

납(Pb)은 축전지, 방사선 차폐재 및 합금 소재 등 다양한 산업 분야에 활용되는 주요 비철금속으로, 높은 재활용성으로 인해 2차 자원으로부터의 회수 중요성이 증가하고 있다. 아연 제련 공정에서 발생하는 소광은 Zn 산화물을 주성분으로 하며 Fe와 Pb 등의 유가금속을 함유하고 있으나, Pb가 Zn 및 Fe계 산화물과 함께 존재하여 선택적 분리가 어렵다. 특히 Fe는 $ZnFe_2O_4$ 형태로 존재하여 Pb 염화 반응에 영향을 미칠 수 있다. 이에 본 연구에서는 NH_4Cl을 이용하여 온도에 따른 Pb 염화 거동을 평가하고, 수소 환원 및 탈철 전처리를 적용하여 Fe 제거 전·후의 Pb 염화 반응과 회수 거동을 비교하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 아연 소광은 국내 기업에서 공급받았으며, ICP-OES(Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer) 분석 결과 아연 소광 내 Pb 함량은 1.41wt%로 매우 낮아 XRD(X-Ray Diffractometer) 분석에서 Pb 상이 뚜렷하게 검출되지 않았다.

Table 1. Chemical composition of zinc calcine powder (wt.%)

El	Zn	Fe	Pb	Mn	S	Si	Ca
Content (%)	62.89	9.55	1.41	1.00	0.97	0.75	0.74

결과 및 고찰

아연 소광 내 Fe 성분의 제거 및 Pb 회수 가능성을 검토하기 위해 5% H_2-N_2 혼합가스 분위기에서 온도별 수소 환원 실험을 수행하였다. 반응 온도는 500~800 ℃, 반응 시간은 3 hr, 가스 유량은 300 SCCM으로 고정하였으며, 반응 후 시료의 형상 및 Pb-rich 상의 변화를 SEM-EDS를 통해 관찰하였다. 수소 환원 후 시료의 미세조직을 분석한 결과(Fig. 1), 500~600 ℃에서는 미세한 Pb-rich 상이 모재 표면 및 입자 사이에 분산된 형태로 관찰되었다. 반면 700 ℃ 이상에서는 밝은 Pb-rich 상이 조대화되면서 구형 입자 형태로 뚜렷하게 관찰되었으며, 800 ℃에서도 Pb가 농축된 구형 입자가 확인되었다. 이는 수소 환원 과정에서 PbO가 금속 Pb로 환원되고, 생성된 Pb가 고온에서 액상화된 후 표면장력에 의해 응집·구형화된 것으로 판단된다. 수소 환원에 따른 Pb의 환원 거동을 바탕으로 탈철 처리를 적용한 시료에 대해 NH_4Cl 염화 반응을 수행하여 전처리 전·후의 Pb 회수

* Corresponding author : 정항철 / hcjung@iae.re.kr

율을 비교하였다. 또한 소광 내 아연의 거동을 함께 고찰하여 Pb 의 선택적 분리 및 회수가 가능한 공정을 연구하고 그 회수율을 극대화시키기 위한 전처리 공정을 최적화 하였다.

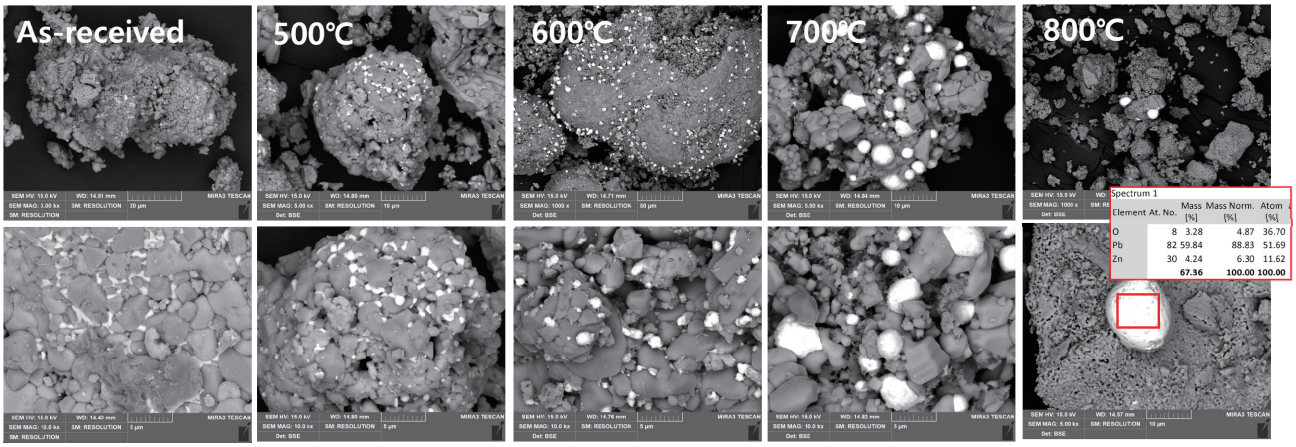


Fig. 1. SEM images of zinc calcine after hydrogen reduction at different temperatures

아연 소광 내 Pb의 선택적 회수율 향상을 위해 온도에 따른 NH_4Cl 염화 반응 거동을 평가하고, $ZnFe_2O_4$ 형태로 존재하는 Fe 의 영향을 저감하기 위한 수소 환원 및 탈철 전처리를 적용하여 전처리 전·후 Pb 염화 반응 및 회수 거동을 비교하였다.

아연 소광 분진으로부터 선택적 침출 및 반응속도론 적용 연구

Study on Selective Leaching and Reaction Kinetics Using Zinc Fuming Dust

김희선[1], 김대원[1*], 진연호[1]
[1]고등기술연구원 소재부품연구본부

초록

아연정광(ZnS)의 고온 배소 공정 중 발생하는 아연 소광 분진(Zinc Fuming Dust)은 주로 ZnO, $ZnFe_2O_4$, Zn_2SiO_4 등 다양한 결정상이 혼재되어 있다. 이러한 아연 소광 분진에는 아연이 약 62%, 철이 약 9% 등으로 구성되어 있어 아연 성분만을 선택적으로 회수하기 위한 연구가 수행되고 있다. 특히, 아연 소광 분진 내에는 $ZnFe_2O_4$와 같은 난용성 화합물이 포함되어 있어 난용성 화합물의 비중이 높은 경우 아연의 회수율이 감소하는 경향이 있다. 이에 난용성 화합물을 포함하는 아연 부산물로부터 환경 부담이 낮으면서 고효율, 고순도로 회수하는 것이 주요한 문제로 제기되었다.

따라서 본 연구에서는 무기산이 아닌 유기산을 활용하여 유기산의 농도, 반응 온도, 반응 시간 등을 변수로 실험을 진행하였다. 또한, 반응 온도 및 반응 시간별 침출율을 바탕으로 철 침출에 관하여 반응 메커니즘별 반응속도 및 활성화 에너지를 계산하고 비교하였다. 즉, 침출 과정에서 철 성분이 어떤 메커니즘을 통해 침출되는지 확인하고 그에 따른 지배적인 변수를 확인하였다.

최종적으로 모든 온도 및 시간 조건에서 아연은 약 0.5% 이하로 거의 침출되지 않았으며, 철의 경우 온도 및 시간이 증가할수록 침출율이 증가하는 경향을 보였다. 특히 반응 온도 100℃ 및 반응 시간 160분 조건에서 철 성분은 약 90% 침출되어 높은 선택도를 확인할 수 있었다. 또한, 반응 메커니즘 확인 결과 표면 화학반응이 지배적인 것으로 철 성분의 침출 거동을 확인할 수 있었다.

주제어 : 아연 소광 분진, 아연 회수, 선택적 침출, 반응속도론

감사의 글

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(소재부품기술개발사업 패키지형 RS-2024-0044834).

*Corresponding author : 김대원 / mdsimul@naver.com

비철 제련 기술의 탄소배출량 검증 체계 고도화

Enhancement of Carbon Emission Verification Framework for Non-Ferrous Smelting Technologies

조연민, 설소영, 김동윤*
(재)한국화학융합시험연구원

초록

본 연구는 아연 제품 생산 공정에서 발생하는 탄소배출량을 객관적으로 검증할 수 있는 표준 매뉴얼을 개발하여 산정 결과의 신뢰성을 제고하고, 해외 탄소 규제, 고객사 요구, ESG 정보 공시 등 다변화되는 이해관계자의 요구에 실효적으로 대응하는 것을 목적으로 한다.

특히 기존 습식 공정과 신규 개발된 건식 공정 간의 공정 특성, 제품 순도, 입도 및 부산물 할당 방식을 종합적으로 반영하였다. 또한, 기존 공정의 무연탄 대신 개발 공정에서 바이오매스를 활용함에 따른 투입물 전환 기반의 온실가스 감축 효과를 포함하여, 아연 제품 1톤당 발생하는 탄소배출량을 정밀히 검토하였다.

검증 체계 측면에서는 2차년도에 구축된 기존 공정 대상의 검증 체크리스트를 바탕으로, 3차년도에는 아연 제품의 제품군별 세부지침(PCR)을 검증하기 위한 검증 매뉴얼을 수립하여 전체 체계를 고도화하였다. 이와 함께 개발 공정의 감축량 검증 기준과 현장 데이터 수집·검토 항목을 보완함으로써 검증의 실효성을 극대화하였다.

나아가 보증수준(Assurance level) 설정 기준에 따라 기존 내부검증에 한정되었던 검증 범위를 제3자 검증까지 확장하였다. 이를 통해 산정 결과 및 현장 데이터 검토 결론을 포함하는 '내부검증의견서'와 '제3자검증의견서'를 동시에 확보함으로써, 최종 배출량 산정 결과의 적절성(appropriateness)과 비교가능성(comparability)을 수립하였다.

본 연구에서 제시한 아연 제련 공정 맞춤형 탄소배출량 검증 매뉴얼 및 고도화된 검증 체계는 향후 비철금속 산업 전반의 데이터 신뢰성 확보에 기여할 뿐만 아니라, 국내외 비철금속 제조업체의 글로벌 탄소 규제 대응력 강화 및 관련 제도적 기반을 마련하는데 기여할 것으로 기대된다.

주제어 : 비철금속, 탄소배출량, 검증매뉴얼, 내부검증, 3자검증

*Corresponding author : 김동윤 / kdy@ktr.or.kr

비철 제련 기술개발에 따른 제품(아연괴, 산화아연) 탄소배출량 산정

Calculation of Carbon Emissions for Products (Zinc Ingots, Zinc Oxide) Resulting from Non-Ferrous Smelting Technology Development

송유근, 위대형, 강병주, 박세연, 곽인호*
(주)엔디렉션

기후위기 대응과 금속자원의 안정적 확보가 중요해짐에 따라, 비철금속 산업에서는 기존 제련공정의 에너지 소비와 환경부하를 줄이기 위한 기술개발이 이루어지고 있다. 아연 제련 분야에서도 기존 습식제련 공정을 보완하기 위한 건식제련 기술이 개발되고 있으며, 아연 정광으로부터 아연괴를 생산하는 공정과 제련공정에서 발생하는 아연 함유 분진으로부터 산화아연을 회수하는 공정에 대한 연구가 진행되고 있다.
새롭게 개발되는 제련공정의 탄소저감 효과를 평가하기 위해서는 공정에 투입되는 원료 및 에너지 사용량과 공정배출을 고려하여 생산제품의 탄소배출량을 정량적으로 산정할 필요가 있다. 본 연구에서는 개발 중인 아연괴 및 산화아연 제조공정을 대상으로 시스템경계를 설정하고, 공정별 원·부원료 투입량, 에너지 사용량 및 직접배출량을 반영하여 제품 단위의 탄소배출량을 산정하였다. 또한 공정별 배출량과 기여도를 분석하여 각 제품의 탄소배출 특성과 주요 배출요인을 파악하고자 하였다.
본 연구에서 산정한 아연괴 및 산화아연의 탄소배출량은 기존 공정과의 비교를 통해 개발공정 적용에 따른 배출량 변화와 감축량을 정량적으로 평가하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Zinc, Zinc Oxide, Carbon Footprint, Dry Smelting, Life Cycle Assessment

감사의 글

본 연구는 한국산업기술기획평가원의 연구개발과제인 “아연 정광 및 분진으로부터 탄소 저감형 건식 제련 기술개발(RS-2024-00448357)”지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

* Corresponding author : 곽인호 / inho@endi.kr

커피찌꺼기 바이오차를 이용한 아연 배소 분진의 탄소열환원-재산화 기반 고순도 ZnO 회수

Spent Coffee Ground-Derived Biochar as a Renewable Reductant for High-Purity ZnO Recovery from Zinc Roasting Dust via Carbothermal Reduction–Reoxidation

심선호, 신선명, 류태공, 김선경, 정인철, 박태준*
한국지질자원연구원

Abstract

본 연구에서는 아연 분진(zinc roasting dust)으로부터 건식 환원-재산화(carbothermal reduction–reoxidation) 공정을 통해 고순도 산화아연을 선택적으로 회수하는 방안을 제시하며, 화석연료 기반 환원제인 코크스의 대체재로서 커피 찌꺼기 유래 바이오차(spent coffee ground-derived biochar)의 적용 가능성을 평가하였다. 바이오차 환원의 최적 조건은 환원제 함량20 wt.%, 환원 온도1,150°C, 환원 시간45분으로 도출되었으며, 이는 코크스 환원 최적 조건 대비 환원 시간이25% 단축된 결과이다. 1,100–1,400°C 범위의 환원 온도에서 회수 거동을 비교한 결과, 두 환원제 모두에서99.99 wt.% 이상의 고순도 산화아연이 회수되었으며, 잔류 슬래그 내ZnO 함량은 동일 온도(1,150°C)에서 코크스 환원의26.92 wt.% 대비 바이오차 환원의 경우0.52 wt.%로 약50배 감소하였다. 열중량 분석(TGA) 결과 바이오차 혼합 시료의ZnO 환원 개시 온도는 코크스 혼합 시료 대비 약 150°C 낮게 나타났으며, 이는 바이오차의 휘발분 열분해로 생성된H_2 및CO 등의 환원 가스가 저온 영역에서부터 환원에 기여하였기 때문으로 해석된다. 회수된ZnO는 환원 온도가 상승함에 따라 막대상·육각 기둥상에서 구형 또는 응집체 형태로 전이되었으며, 바이오차 환원에서는 동일한 전이가 약100°C 낮은 온도에서 관찰됨과 동시에 코크스 환원 대비 좁고 균일한 입도 분포가 확인되었다. 본 연구는 폐기물로 분류되는 아연 분진과 커피 찌꺼기를 동시에 자원화함으로써, 건식 제련 공정에서 화석연료 기반 환원제의 대체와 공정의 탄소중립성 제고에 기여할 수 있는 실용적인 자원순환 방안을 제시한다.

Keywords : High-purity ZnO recovery, Zinc roasting dust, Spent coffee grounds biochar, Alternative carbon reductant, Sustainable pyrometallurgy

*Corresponding author : 박태준 / tjpark@kigam.re.kr

소광아연으로부터 Zn 회수를 위한 Mg Turnings 및 폐태양광셀 유래 Si의 환원특성 비교

Comparative Reduction Behavior of Mg Turnings and Waste Photovoltaic Cell-Derived Si for Zn Recovery from Zinc Oxide Residue

유주원[1], 왕제필[2*]

[1]국립부경대학교 금속공학과, BB21 Plus Team, [2]국립부경대학교 융합소재공학부 금속공학전공

초록

본 연구에서는 아연 제련공정에서 발생하는 소광아연으로부터 Zn을 회수하기 위하여 Mg turnings와 폐태양광셀 유래 Si를 환원제로 적용하고, 환원제 종류·투입비·반응시간에 따른 환원 거동을 비교하였다. 원시료는 ZnO 69.06 wt%를 주성분으로 하였으며, 10 g의 소광아연을 기준으로 1,000°C의 Ar 분위기에서 화학양론비 대비 1:1, 1:2 및 1:3의 환원제 조건과 1, 2 및 3 h의 반응시간을 적용하였다. 반응 후 잔존물의 Zn 함량을 ICP-OES로 정량하여 잔존 Zn 기준 Zn 회수율을 산정하였고, 응축물은 XRF, XRD 및 SEM-EDS로 평가하였다. Mg turnings는 1:1, 1 h 조건에서 90.99%의 최고 회수율을 나타냈으나, 응축물에서 Zn 85.21 wt%와 Mg 13.12 wt%가 검출되어 Mg의 동반 휘발·응축이 확인되었다. 반면 폐태양광셀 유래 Si는 투입비와 반응시간 증가에 따라 회수율이 증가하여 1:3, 3 h에서 89.55%의 최고 회수율을 나타냈으며, 해당 응축물의 Zn 함량은 92.98 wt%였다. Si 환원 잔존물에서는 Zn_2SiO_4가 확인되어 일부 Zn의 고정화 가능성이 나타났다. 회수 Zn의 평균 입도는 Mg 및 Si 환원 조건에서 각각 30.44 μm와 49.58 μm였다. 따라서 Mg turnings는 비교적 짧은 시간에 높은 Zn 제거·회수 거동을 보였으나 Zn/Mg 분리가 요구되며, 폐태양광셀 유래 Si는 약간 낮은 회수율에도 환원제의 응축물 혼입이 적어 폐자원 기반 환원제로서 적용 가능성을 확인하였다.

주제어 : 소광아연, Mg turnings, 폐태양광셀, 아연 회수, 건식 환원

서론

아연 제련공정에서는 배소 및 후속 공정 과정에서 ZnO를 주성분으로 하는 소광아연이 발생하며, 잔존 Zn의 회수와 부산물의 자원화는 공정 효율과 순환자원 활용 측면에서 중요하다. 일반적인 ZnO의 환원에는 탄소계 및 금속 환원제가 사용될 수 있으나, 환원 반응성뿐 아니라 환원제의 비용, 안전성, 부산물 형성 및 회수 Zn의 품질을 함께 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 마그네슘 절삭 부산물인 Mg turnings와 폐태양광셀에서 회수한 Si를 환원제로 적용하였다. Mg는 ZnO에 대한 높은 환원력을 가지지만 Zn과의 휘발온도 차이가 크지 않아 동반 응축 가능성이 있으며, Si는 폐태양광 자원의 재활용 측면에서 장점이 있으나 안정한 Zn-silicate 형성 가능성이 있다. 이에 두 환원제의 Zn 환원·휘발 거동과 회수 특성을 동일한 실험조건에서 비교하였다.

재료 및 실험방법

배소 후 소광아연의 XRF 분석 결과 ZnO 69.06 wt%, Fe_2O_3 11.57 wt%, SiO_2 7.24 wt%, SO_3 4.97 wt% 등이 확인되었다. 환원반응은 $ZnO + Mg \rightarrow Zn + MgO$ 및 $2ZnO + Si \rightarrow 2Zn + SiO_2$를 기준으로 설계하였다. 소광아연 10 g에 대하여 Mg turnings는 1:1 조건에서 2.06 g, 폐태양광셀 유래 Si는 1:1 조건에서 1.31 g을 기준량으로 설정하고 각각 1:1, 1:2, 1:3 조건으로 확대하였다. 모든 실험은 수직형 전기로에서 1,000°C, Ar 분위기로 수행하였으며 반응시간은 1, 2 및 3 h로 변화시켰다. 생성된 Zn 증기는 전기로 상부 및 도가니 벽면에서 응축시켜 회수하였다. 잔존물의 Zn은 ICP-OES로 정량하고, 응축물 및 잔존물은 XRF, XRD 및 SEM-EDS로 분석하였다.

*Corresponding author : 왕제필 / jpwang@pknu.ac.kr

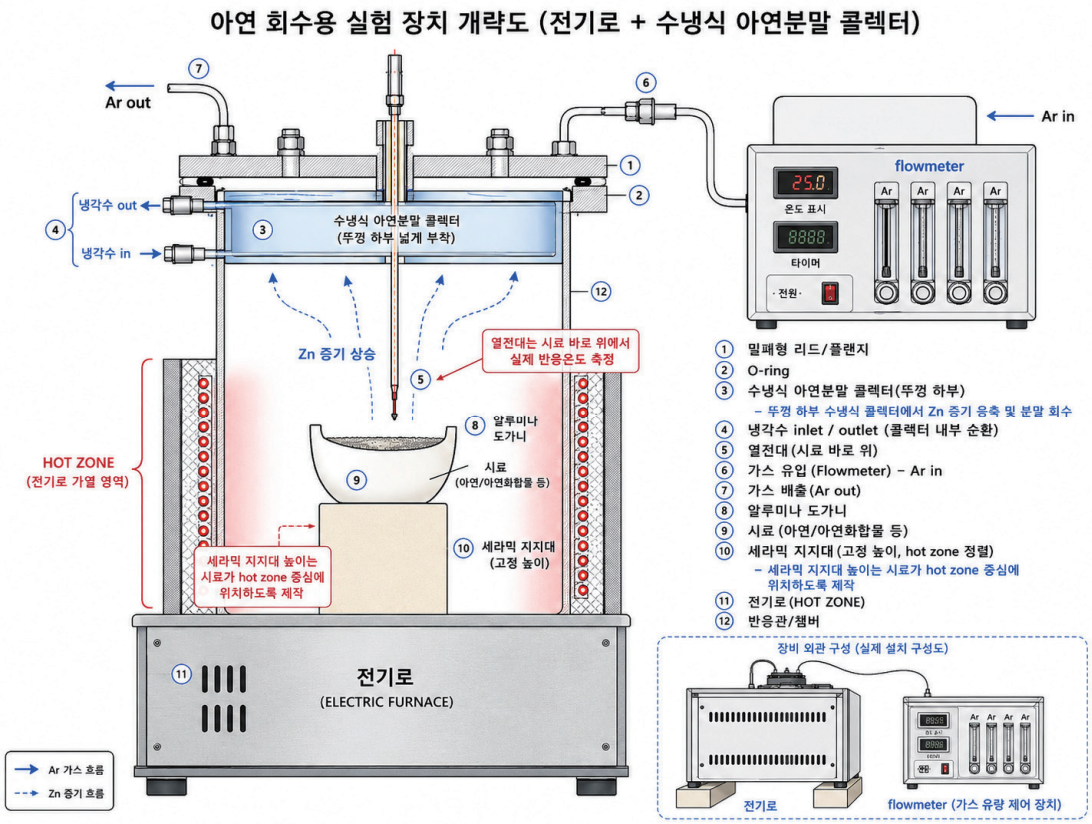


Fig. 1. Lab-scale vertical furnace and schematic for Zn reduction–volatilization experiments.

결과 및 고찰

Mg turnings를 적용한 경우 Zn 회수율은 환원제 과량 투입에 따라 오히려 감소하는 경향을 보였으며, 1:1, 1 h에서 90.99%로 가장 높았다. 1:1 조건의 회수율은 1–3 h에서 90.69–90.99%로 큰 차이가 없어, Mg 환원의 경우 반응 초기 단계에서 대부분의 ZnO 환원이 진행된 것으로 판단된다. 그러나 응축물 XRF 분석에서는 1:1, 1 h 조건에서도 Zn 85.21 wt%와 Mg 13.12 wt%가 검출되었고, Mg 투입량 증가에 따라 응축물 내 Mg가 최대 51.02 wt%까지 증가하였다. 또한 XRD 분석에서는 $MgZn_2$가 확인되어 비중 차를 이용한 Zn/Mg 분리효율을 저하시킬 가능성이 확인되었다.

폐태양광셀 유래 Si를 적용한 경우에는 Mg와 반대로 Si 투입비와 반응시간이 증가할수록 Zn 회수율이 향상되었다. 1:1 조건에서는 약 78–80% 수준이었으나, 1:3에서 83.32% (1 h), 87.21% (2 h), 89.55% (3 h)로 증가하였다. 최고 회수율 조건(1:3, 3 h)의 응축물은 Zn 92.98 wt%를 나타냈으며 Si는 검출한계 수준으로 낮아 환원제의 동반 응축은 Mg 조건보다 제한적이었다. 다만 잔존물 XRD에서 Zn_2SiO_4가 확인되었으며, 이는 생성된 SiO_2와 잔존 ZnO의 반응에 의해 안정한 복합산화물이 형성되어 일부 Zn 회수를 제한할 수 있음을 시사한다.

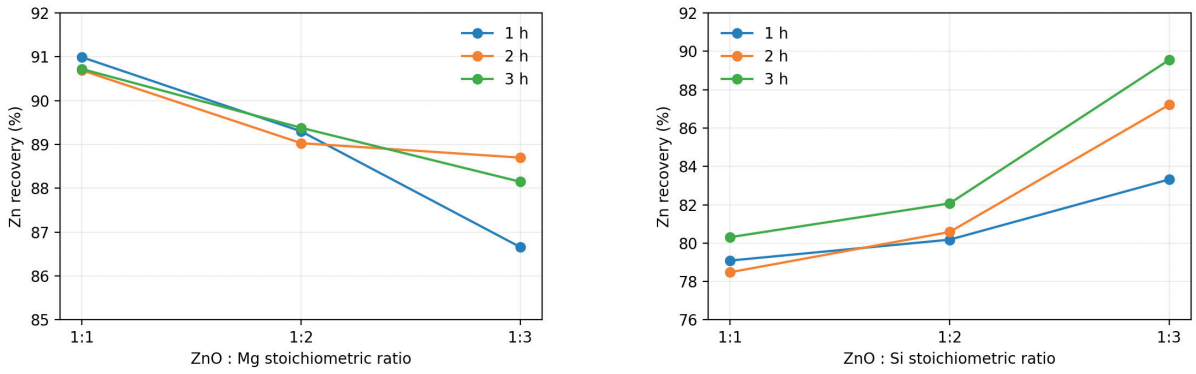


Fig. 2. Effect of stoichiometric ratio and reaction time on Zn recovery: (a) Mg turnings and (b) waste photovoltaic cell-derived Si.

Table 1. Comparison of optimum Zn recovery conditions for Mg turnings and waste photovoltaic cell-derived Si.

Reductant	Optimum condition	Zn recovery (%)	Zn in condensate (wt%)	Co-condensed reductant	Mean particle size (μm)
Mg turnings	1:1, 1 h	90.99	85.21	Mg 13.12 wt%	30.44
Waste PV-derived Si	1:3, 3 h	89.55	92.98	Si: trace / n.d.	49.58

두 환원제의 비교 결과, Mg turnings는 낮은 환원제 투입량과 짧은 반응시간에서 더 높은 Zn 회수율을 보인 반면, Mg의 동반 휘발·응축으로 인해 후단 Zn/Mg 분리공정이 요구되었다. 폐태양광셀 유래 Si는 최고 회수율이 Mg보다 약간 낮았으나, 응축물 내 Si 혼입이 제한적이었으며 폐태양광 자원의 고부가 활용이라는 장점을 갖는다. 공인기관 PSA 분석에서 회수 Zn의 평균 입도는 Mg 30.44 μm, Si 49.58 μm로 나타났으며, 두 조건 모두 2차년도 목표인 60 μm 이하를 만족하였다.

결론

소광아연의 ZnO를 대상으로 Mg turnings와 폐태양광셀 유래 Si의 환원특성을 비교한 결과, Mg turnings는 1:1, 1 h 조건에서 90.99%의 Zn 회수율을 나타내어 빠른 환원반응 특성을 보였다. 그러나 Zn과 Mg의 휘발온도가 비교적 가깝고 $MgZn_2$가 형성됨에 따라 회수 Zn의 품질 확보를 위해 Zn/Mg 분리가 필요하였다. 폐태양광셀 유래 Si는 1:3, 3 h에서 89.55%의 최대 회수율을 나타냈으며, 환원제 Si의 응축물 혼입은 제한적이었다. 다만 Zn_2SiO_4와 같은 안정상이 잔존물에 형성되어 일부 Zn 고정화가 발생할 가능성이 확인되었다. 따라서 Mg turnings는 반응속도 및 회수율 측면에서, 폐태양광셀 유래 Si는 환원제 재활용성과 응축물 내 환원제 혼입 억제 측면에서 각각 장점이 있으며, 향후 공정에서는 Zn 회수율뿐 아니라 회수물 순도와 후단 분리 부하를 함께 고려한 환원제 선택이 필요하다.

사사

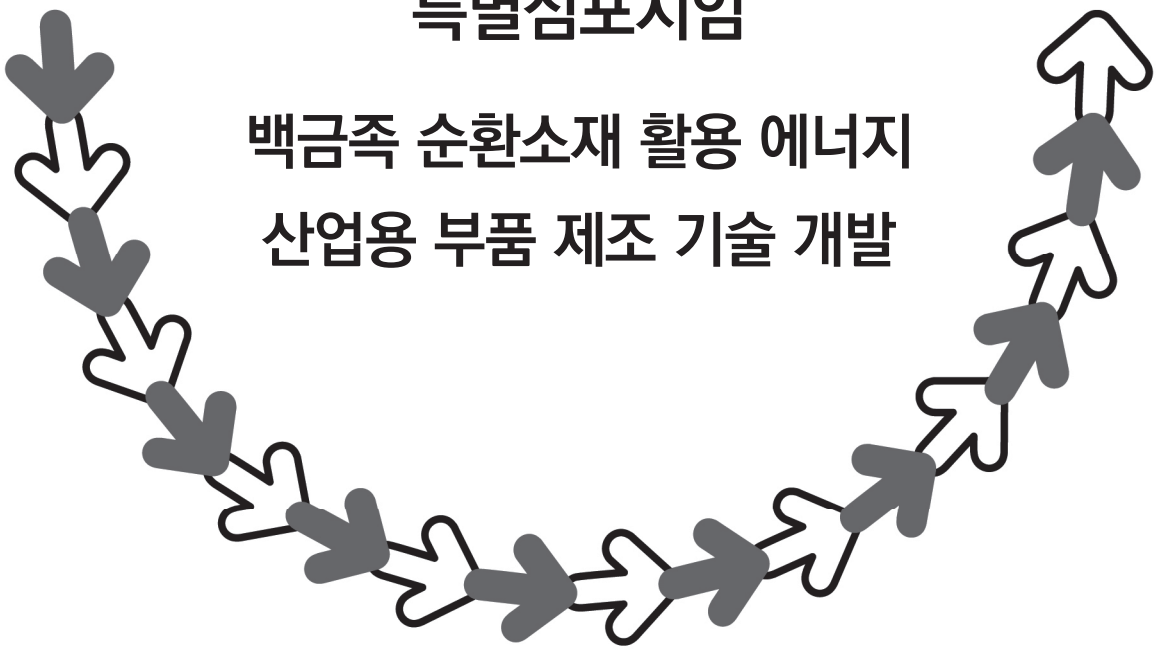
This work was supported by the Technology Innovation Program (“Development of a pyrometallurgical smelting technology using carbon reduction for the recovery of 1,000 tons/year of valuable metals from zinc concentrate”) (RS-2024-00448329), funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Republic of Korea)

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

백금족 순환소재 활용 에너지
산업용 부품 제조 기술 개발



The Korean Institute of Resources Recycling

귀금속 함유 폐촉매로부터 Pd, Pt 회수, 농축 및 분리 연구 및 실증

Recovery of Pd and Pt from Precious Metal-Bearing Spent Catalysts: Research and Demonstration

최인혁*, 소홍일, 권숙철, 구본우, 이환수

㈜에스쓰리알 기업부설연구소

팔라듐(Pd)·백금(Pt) 등 백금족 금속(PGMs)은 자동차 배기가스 정화 촉매, 석유화학, 전자산업, 그리고 최근의 수소경제까지 뒷받침하는 전략금속으로, 2024년 기준 자동차 촉매 수요는 조사기관에 따라 상이하나 평균적으로 약 60% 이상을 차지한다. 그러나 생산은 남아공(백금 70~75%)과 러시아(팔라듐)에 극도로 편중돼 있어 공급망 리스크가 커 두 금속 모두 핵심광물로 분류된다. 이 때문에 폐촉매·전자스크랩에서 금속을 되찾는 2차 회수가 가격 변동에 대응하는 실질적 공급원으로 커지고 있다. 귀금속 함유 폐촉매로부터 Pd, Pt를 회수·농축·분리하는 고효율 공정 확립은 자원순환을 넘어 공급망 리스크 완화 측면에서도 의미가 크다.

본 연구는 Pd, Pt가 함유된 폐촉매로부터 건·습식 공정을 연계한 포집·농축·분리 기술의 단위공정을 개발하고, 이를 실증 규모에서 구현하여 연구개발 단계와 동등한 수준의 회수 성능(Pd, Pt 회수율 99% 이상)을 확보하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 Cu를 포집금속으로 활용하고 원료 조성에 기반한 슬래그 조성을 최적화하여 Pd, Pt를 Cu에 우선적으로 포집시켰으며, 이 과정에서 원료의 입도, 성형체 형성, 포집금속 첨가량, 슬래그 점도 조절 등 포집 효율에 영향을 미치는 변수들을 함께 고려하여 포집 효율을 최적화하고자 하였다. 이후 Cu는 고온산화공정을 통해 슬래그(CuO_x)로 선택적으로 제거하였고, 이 과정에서 Pd, Pt는 Cu 잉곳 내에 농축되었으며, 산소분압과 조업 온도에 따른 백금족 금속의 손실 경로를 함께 파악하고자 하였다. 이렇게 농축된 Cu 잉곳은 양극으로 사용해 전해용해함으로써 Pd, Pt는 양극 슬라임 형태로 회수하였다. 마지막으로 회수한 Pd, Pt 함유 슬라임은 Pd 산화공정을 통해 Pd를 선택적으로 산화시킨 뒤, 후속 침출공정에서 유해화학용매 사용을 최소화할 수 있는 마일드한 조건의 선택적 침출 공정을 연구하였다.

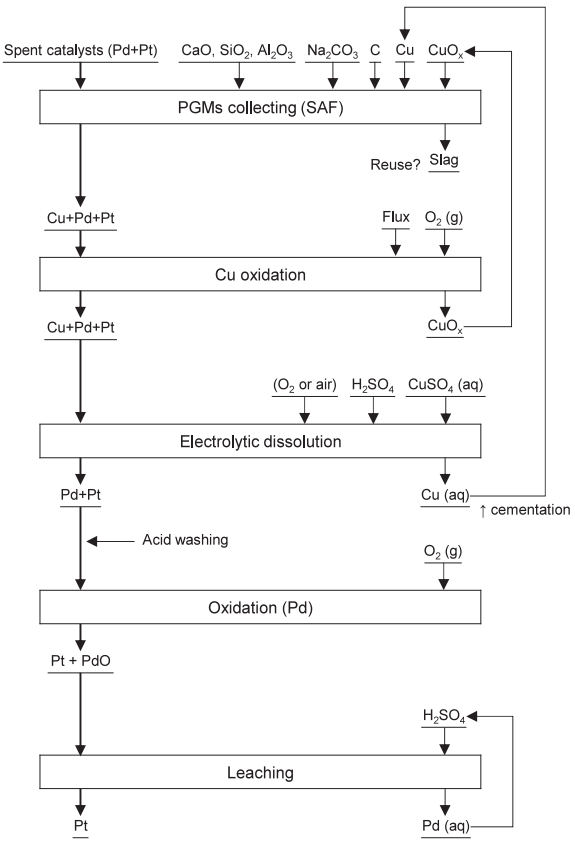


Fig. 1. Process flow diagram for recovery of Pd and Pt from spent catalyst

*Corresponding author : 최인혁 / ichoi@s3r.co.kr

백금 회수 공정 최적화 및 파일럿 구축 기술개발

Optimization of a Platinum Recovery Process and Development of a Pilot-Scale System

이희수, 정상진*
㈜대흥엠앤티

초록

폐촉매 등 백금 함유 원료로부터 백금을 효율적으로 회수하기 위해서는 원료의 전처리 및 침출 조건 최적화와 함께 대용량 처리를 위한 공정 설계 및 운전 기술 확보가 필요하다. 본 연구에서는 백금 회수 공정의 대용량화를 목적으로 파일럿 설비를 구축하고, 탈탄(Ashing) 및 침출 공정의 운전조건을 최적화하였다. 또한 Lab-scale 실험을 통해 침출 반응 중 과산화수소(H_2O_2) 및 염산(HCl) 중간 투입에 따른 백금 침출 거동을 분석하였다.

탈탄 공정에서는 원재료의 적층 두께에 따른 탈탄 특성을 평가하고, 단계별 승온 조건을 적용하여 비산을 최소화하면서 균일한 탈탄이 이루어질 수 있는 조건을 검토하였다. 그 결과 탈탄 후 원재료의 무게 감량은 최대 76%로 나타났으며, 탈탄 과정에서의 Pt loss는 약 0.4~3% 범위로 확인되었다. 또한 탈탄율을 향상시키면서 비산률은 1% 이하로 유지하였다. 탈탄율 증가가 백금 회수에 직접적으로 비례하지 않는 특성을 고려하여, 탈탄에 따른 비산 및 백금 회수 특성을 종합적으로 고려한 운전조건 설정이 필요한 것으로 판단되었다. 파일럿 규모에서는 전처리 및 백금 회수 설비를 구축하고 100 kg/batch 조건에서 시운전을 수행하였으며, 백금 회수율 약 92%를 확인하였다.

Lab-scale 침출 실험에서는 H_2O_2 및 HCl의 중간 투입에 따른 백금 침출 거동을 평가하였다. H_2O_2 중간 투입을 통해 침출율이 향상되는 경향을 확인하였으며, 3 vol% 조건에서 최종 침출율은 약 96%로 나타났다. 또한 HCl 중간 투입을 통해 침출 과정에서 감소하는 염산 농도를 보완한 결과, 기존 대비 침출율이 약 0.7% 향상되었으나, 염산 농도 보완에 따른 침출율 개선 효과는 상대적으로 크지 않은 것으로 확인되었다. H_2O_2와 HCl 중간 투입을 병행한 경우에는 최종 침출율 약 97%를 확보하였다.

본 연구를 통해 백금 회수 파일럿 설비를 구축하고 시운전을 완료하였으며, 탈탄 및 침출 공정의 주요 운전조건을 도출하였다. 특히 H_2O_2 중간 투입을 통한 산화 반응 촉진과 HCl 중간 투입을 통한 산 농도 보완을 적용하여 백금 침출율을 향상시킬 수 있음을 확인하였으며, 향후 파일럿 공정의 안정화 및 대용량 백금 회수 공정 최적화를 위한 기초 조건을 확보하였다.

* Corresponding author : 정상진 / chung@dhmnt.co.kr

백금족-3

백금족 자원순환 고도화를 위한 친환경 침출·전해 및 전자구조 기반 촉매 스크리닝 기술

Eco-Friendly Leaching, Electrolytic Recovery, and Electronic Structure Based Catalyst Screening for Advanced Platinum Group Metal Resource Circulation

배무기*, 최영중, 정인철, 김수경, 이현주
한국지질자원연구원 자원활용연구본부

초록

2차 자원(폐촉매)으로부터 백금족 금속을 회수하는 기존 공정은 고농도 염산(5 M HCl) 침출에 의존하여 산 사용량과 폐액 처리 부담이 크다. 본 연구에서는 폐촉매(Pt 787, Pd 450 mg/kg)를 대상으로 70 ℃, 고액비(S/L) 1:25, 6시간 조건에서 HCl 농도를 5 M에서 2 M로 단계적으로 저감하고, citric acid 및 methanesulfonic acid(MSA)를 0.5~0.25 M 첨가한 조건, TCCA(0.05 M)를 병용한 산화침출 조건, NaCl·NH4Cl로 Cl^- 농도를 보충한 대조군을 비교하여 저산도 침출 특성을 규명하였다. 또한 폐촉매를 600~700 ℃에서 공기 중 열산화하여 PdO를 형성시킨 뒤 2 M HCl로 침출하는 방식으로 Pd/Pt 선택침출 가능성을 검증하고, 저산도·유기산 잔류 조건이 후속 전해회수에 미치는 영향을 3전극계(작업전극: glassy carbon, 상대전극: Pt, 기준전극: Ag/AgCl)를 이용한 CV, LSV, CA, CP 측정으로 평가하고 있다. 예비실험(5 M HCl 기준)에서는 HCl 단독 조건에서 Pt 64.6 %, Pd 21.7 %의 침출률을 보였으며, 0.5 M MSA와 0.05 M TCCA를 병용한 산화침출 조건에서는 Pt 침출률이 98 %이상 향상된 반면, citric acid 첨가는 오히려 침출률을 저하시키는 경향을 나타내어 유기산의 역할을 침출 촉진제보다는 산 저감 수단으로 재해석할 필요성이 확인되었다. 이를 토대로 저산도 조건에서의 침출·선택침출·전기화학적 특성평가를 진행하고 있으며, 이와 병행하여 전자밴드구조 계산을 통한 백금 촉매·지지체 후보소재의 금속성 예측 스크리닝과 소결·에칭 공정 최적화를 통한 지지체 신소재 합성도 함께 수행하였다.

주제어 : 백금족 금속, 폐촉매, 저산도 침출, 전해회수, 촉매/지지체 스크리닝

*Corresponding author : 배무기 / muki.bae@kigam.re.kr

산화 정련 공정을 통한 폐 PGM 촉매 구리합금의 귀금속 농축 거동 연구

Enrichment Behavior of Precious Metals in Copper Alloys Recovered from Spent PGM Catalysts via Oxidative Refining

김영민, 황인성, 한승연, 이자성, 김용환*
한국생산기술연구원

전 세계적으로 탄소중립 및 친환경 에너지 전환이 가속화되면서, 자동차 배기가스 정화용 촉매와 수소 연료전지를 중심으로 한 차세대 핵심 산업에서 백금족 금속(PGMs)의 수요가 빠르게 증가하고 있다. 그러나 천연자원의 부존 희소성과 지정학적 편재성으로 인해 이러한 원료의 공급망 취약성이 심화되고 있다. 이에 따라 해외 원료 의존도를 낮추고 핵심광물의 안정적인 공급망을 확보하기 위하여, 폐PGM 촉매와 같은 2차자원으로부터 고부가가치 유가금속을 회수·농축하는 고효율 기술 개발에 대한 산업계 및 학계의 관심이 크게 집중되고 있다.

본 연구에서는 고온 환원용융 공정을 통해 1차적으로 회수된 Cu계 합금을 활용하였다. 특성 분석 결과, 회수된 합금 내에는 Au, Ag, Pd, Pt 등의 귀금속과 함께 Fe, Si와 같은 원소가 함유되어 있음을 확인하였다. 합금 내 잔류하는 Fe 및 Si는 침출 공정에 어려움을 주기 때문에, 이러한 불순물을 제거하고 귀금속의 농축률을 높이기 위해 산화정련 공정을 적용하였다. 산화공정은 산소가스를 주입하여 1200 °C 부터 1400 °C 사이에서 진행되었다.

이를 통해 온도 및 시간에 따라 Au, Ag, Pd, Pt 등의 금속이 최대 7배 농축되는 경향을 확인하였다. 이를 바탕으로 유가금속의 순도 및 회수 거동을 규명함으로써 고온 산화정련 공정에 대한 기초 데이터를 확보하였다.

* Corresponding author : 김용환 / yhkim@kitech.re.kr

산화 온도 및 시간에 따른 Pd-Pt 합금의 PdO 형성 거동

Effects of Oxidation Temperature and Time on PdO Formation Behavior in Pd–Pt Alloys

권주혁, 윤유정, 박헌수*
㈜엔에이치리사이텍컴퍼니 기술연구소

초록

본 연구에서는 후속 Pd의 선택적 침출을 위한 전처리로 Pd-Pt 합금에 PdO 산화층을 형성하고, 산화 온도와 시간이 산화층의 조성 및 두께에 미치는 영향을 조사하였다. 실험 결과, 600 ℃ 이상에서 표면의 Pd는 대부분 PdO 형태로 전환되었다. PdO 산화층은 산화 시간이 48 h 이상일 때
1 ㎛ 이상이 형성되었고, 산화층 내 Pt 조성은 감소하였다. 이를 통해 Pd-Pt 합금은 산화 온도와 시간을 제어함으로써 Pt가 고갈된 PdO 산화층을 형성할 수 있는 것으로 평가되었다.

주제어 : 팔라듐, 백금, 산화, 합금, Core-shell

서론

Pd와 Pt는 자동차 배기가스 저감 촉매로 널리 사용되며, 수요 증가와 공급망 편중으로 폐자원에서 회수 중요성이 지속적으로 증가하고 있으나, 낮은 산 반응성으로 인해 다량의 산화제가 적용됨으로서 폐액 증가와 비선택적 침출 문제가 발생하고 있다[1]. 한편, Pd-Pt 합금은 산화하면 Pd가 표면으로 이동한 뒤 O와 반응하여 PdO 산화층을 형성하고, Core 쪽으로 Pt-rich 영역을 형성한다[2]. 이러한 Core-shell 구조는 침출 시 Pd와 Pt의 선택성에 유리하게 작용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 O_2 분위기에서 산화 온도와 시간에 따라 Pd-Pt 합금에 형성되는 PdO 산화층 layer의 조성 분포와 두께 변화를 평가하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에서 시편은 Pd-Pt 모합금(Pd:Pt = 2:1)을 약 1.0-1.5 cm 크기로 절단하여 사용하였다. 산화 온도 실험은 300～700 ℃에서 6 h, 산화 시간 실험은 700 ℃에서 6～144 h 동안 수행하였다. 산화 후 시편의 Pd, Pt 및 O의 분포는 SEM-EDS mapping으로 확인하였으며, 시편의 단면은 Line-scanning을 통해 PdO 산화층의 두께와 경계면 조성 변화를 분석하였다.

결과 및 고찰

합금 산화 시편의 표면 조성은 EDS로 분석하고, 검출된 산소가 모두 PdO 형성에 기인한다고 가정하여 Pd의 산화 정도를 산정하였다. 그 결과, 600 ℃ 이상의 온도에서 표면의 Pd는 대부분 PdO로 전환된 것으로 나타났고(Fig. 1(a)), 산화 온도가 300 ℃에서 700 ℃로 증가함에 따라 표면 Pt 원자 농도는 11.15%에서 2.44%까지 감소하였다(Fig. 1(b)). 이러한 결과를 통해 온도 상승에 따라 표면의 PdO-rich 영역이 발달하고 Pt가 상대적으로 고갈됨을 알 수 있었다.

* Corresponding author : 박헌수 / hspark@nhrecytech.com

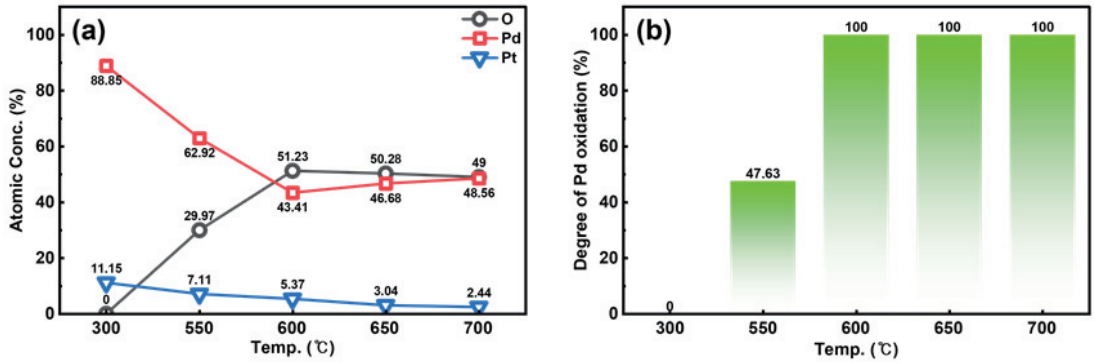


Fig. 1. Effect of oxidation temperature on (a) atomic concentration, and (b) degree of Pd oxidation on surface.

산화 시간에 따른 산화층 형성 영향을 분석한 결과, 48 h 산화 시편 단면의 SEM-EDS mapping에서 Pd와 O의 분포가 공존하는 PdO-rich 구역과 Pt-depleted 범위가 동일한 영역에서 나타남을 확인하였다(Fig. 2(a)). Line scan으로 산화층 두께를 분석한 결과, 48 h 이상 산화 반응한 시편에서 약 1 ㎛ 이상의 산화층이 비교적 뚜렷하게 관찰되었다. 이 결과는 산화 시간이 증가함에 따라 Pd 및 Pt의 표면 분리와 선택적 산화가 일어난 것을 의미한다. 이러한 경향은 산화 온도가 673 K에서 873 K로 증가함에 따라 Pd가 선택적으로 산화되어 안정적인 PdO층을 형성한다고 보고한 기존 연구 결과와도 일치한다[2].

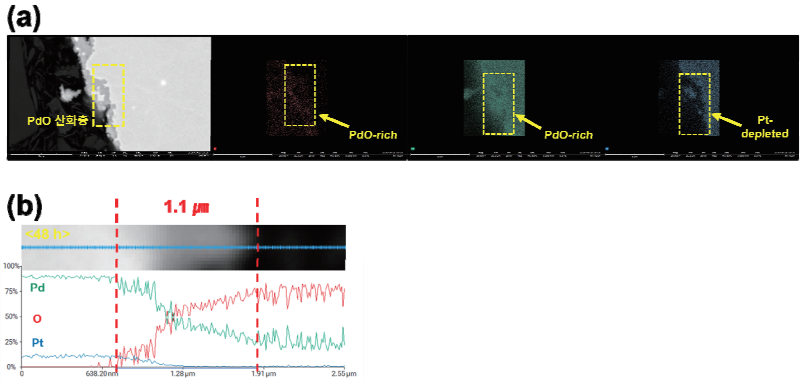


Fig. 2. Pd-Pt alloy oxidized at 700 ℃ for 48 h; (a) SEM-EDS mapping, and (b) Line scan.

결론

본 연구는 산화 시간 및 온도 변화에 따라 Pd-Pt 합금의 표면 산화 및 조성을 분석하였다. 600 ℃ 이상 온도에서 Pd와 O는 농축된 산화층을 안정적으로 형성하였고, 48 h 이상 산화한 시편은 1 ㎛ 이상의 산화층이 확인됨에 따라 산화 시간이 증가할수록 산화층이 지속적으로 성장하는 것으로 나타났다. 이에 따라, Pd-Pt 합금으로부터 Pd는 선택적 산화가 가능하고, 제조된 Pd 산화물은 선택적인 침출을 통해 Pd와 Pt를 분리할 수 있는 전처리 공정으로서 적용 가능성이 매우 높은 것으로 평가되었다.

참고문헌

[1] Nguyen, V. N. H., Song, S. J. and Lee, M. S., 2022 : Separation of palladium and platinum metals by selective and simultaneous leaching and extraction with aqueous/non-aqueous solutions, Hydrometallurgy, 208, 105814.

[2] Li, T., Bagot, P. A. J., Marquis, E. A., et al., 2013 : Atomic engineering of platinum alloy surfaces, Ultramicroscopy, 132, pp.205-211.

순환자원 기반 백금·팔라듐 촉매 전구체 합성 공정 연구

Material Recovery and Synthesis of Platinum and Palladium Catalyst Precursors from Recycled Resources

박재량*, 강유빈, 안낙균
고등기술연구원 신소재공정센터

초록

본 연구에서는 귀금속 촉매의 순환자원화를 목적으로 백금(Pt) 및 팔라듐(Pd)을 연료전지용 촉매 전구체로 재소재화하기 위한 합성 공정을 검토하였다. 적용 분야와 합성 용이성, 염소 잔류 가능성 및 촉매 제조 적합성을 고려하여 염화백금산, 수산화백금계, 에탄올아민 백금 착물, 염화팔라듐, 질산팔라듐 및 팔라듐아세테이트를 주요 후보로 선정하고, 금속 스폰지의 용해-농축-결정화 및 리간드 치환 기반 합성 조건을 비교하였다.

염화백금산은 염산-과산화수소계에서 왕수 공정과 유사한 결정상 및 열거동을 보였으며, 수산화백금계 중간체는 NaOH 당량비 16 이상에서 형성이 확인되었다. 질산팔라듐 제조에서는 HNO_3 3당량, 60 ℃, 1 h 조건에서 높은 용해 특성을 보였고, 과산화수소 첨가에 따른 침출량 변화는 제한적이었다. 합성 질산팔라듐은 XRD에서 비정질 특성을 나타냈으며 FT-IR에서 질산이온 특성 피크가 확인되었다. 또한 질산팔라듐 용액에 초산을 이용한 리간드 치환을 적용하여 팔라듐아세테이트 합성 가능성을 확인하였다.

주제어 : 순환자원, 백금, 팔라듐, 촉매 전구체, 재소재화

서론

백금과 팔라듐은 연료전지 및 환경·화학 촉매 분야에서 폭넓게 사용되는 대표적 백금족 금속으로, 사용 후 촉매 등으로부터 회수된 귀금속을 다시 촉매 제조용 화합물로 전환하는 재소재화 기술의 중요성이 증가하고 있다. 특히 촉매 제조 공정에서는 금속 자체보다 용해성, 리간드 종류 및 불순물 특성이 제어된 전구체가 요구되므로, 회수 금속을 염화물·질산염·수산화물 및 유기산염 형태로 안정적으로 전환하는 공정 기술이 필요하다.

본 연구는 순환자원 활용 Pt/Pd 전구체의 후보군을 선정하고, 각 화합물의 합성 경로와 핵심 공정변수를 검토하여 전구체 제조의 기초 공정 조건을 확립하는 것을 목적으로 하였다.

재료 및 실험방법

Pt 및 Pd 금속 스폰지를 출발원료로 사용하여 산 용해, 농축, 결정화 및 건조 공정을 수행하였다. 염화백금산은 염산과 과산화수소를 이용한 용해 후 농축·결정화하였고, 수산화백금계는 염화백금산 용액에 NaOH를 첨가하여 중간체를 형성한 뒤 질산으로 pH를 조절하여 전환하였다. 질산팔라듐은 Pd 스폰지의 질산 용해 조건을 HNO_3 당량, 반응온도 및 반응시간에 따라 비교하였으며, 팔라듐아세테이트는 질산팔라듐 용액에 초산을 투입하여 리간드 치환 후 회수하였다.

*Corresponding author : 박재량 / iam0285@iae.re.kr

Table 1. Target Pt/Pd catalyst precursors and synthesis routes

대상 전구체	주요 합성 경로	주요 평가 항목
염화백금산	Pt 용해 → 농축/결정화	XRD, 열거동
수산화백금계	H_2PtCl_6 + NaOH → 중간체 → HNO_3 전환	당량비, pH, XRD
에탄올아민 백금	수산화백금계 → MEA 착화/농축	용해·농축 거동
염화팔라듐	Pd 용해 → 농축/결정화	결정상, 재현성
질산팔라듐	Pd + HNO_3 → 농축/건조	XRD, FT-IR
팔라듐아세테이트	$Pd(NO_3)_2$ + CH_3COOH → 리간드 치환	XRD, 반응조건

결과 및 고찰

백금계 전구체 합성에서 염산-과산화수소를 사용한 경우 왕수로 제조한 염화백금산과 유사한 결정상이 확인되었으며, 열중량 분석에서도 상용 염화백금산과 유사한 열거동이 관찰되었다. 농축 및 결정화 온도에 따라 결정성 차이가 나타나므로 후속 공정에서는 해당 조건의 정밀 제어가 필요하다. 수산화백금계 전환은 염화백금산과 NaOH 반응을 통해 중간체 형성을 확인하였고, Pt:NaOH 당량비 16 이상에서 안정적으로 형성되었다. 이후 2 M HNO_3로 pH 3까지 조절하여 수산화백금계 생성물로의 전환 가능성을 확인하였다.

팔라듐계에서는 질산팔라듐 합성 조건 비교 결과 HNO_3 첨가량이 낮을수록 상대적으로 높은 Pd 용해량이 나타났으며, 검토 범위에서는 HNO_3 3당량 조건이 가장 우수하였다. 과산화수소 첨가량에 따른 용해량 차이는 크지 않았다. 반응온도와 시간은 60 ℃, 1 h 조건에서 높은 침출량을 나타냈으며, 고온 반응에서는 PdO 형성 가능성을 고려할 필요가 있다. 합성 질산팔라듐은 강한 흡습성과 비정질 XRD 패턴을 보였고, FT-IR에서 질산이온 특성 피크가 확인되었다.

팔라듐아세테이트는 질산팔라듐 용액에 초산을 이론량보다 과량 투입하는 리간드 치환법으로 합성하였다. 초산 10당량, 80 ℃, 1 h 반응 후 에탄올 세척 및 진공건조한 시료의 XRD 패턴이 문헌 데이터와 유사하게 나타나 합성 가능성을 확인하였다. 이를 바탕으로 Pt 계는 염화백금산-수산화백금계-에탄올아민 착물로, Pd 계는 염화팔라듐-질산팔라듐-팔라듐아세테이트로 확장 가능한 전구체 포트폴리오를 구축할 수 있으며, 순환자원 적용 시 불순물 관리와 반복 합성 재현성 확보가 핵심 과제로 판단된다.

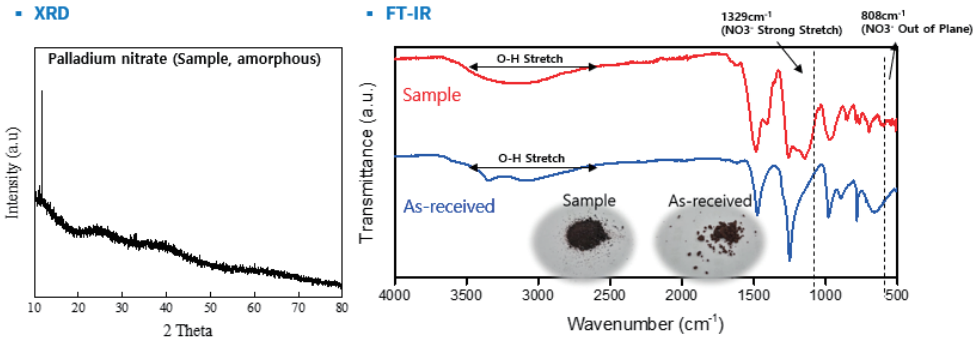


Fig. 1. XRD and FT-IR characterization of synthesized palladium nitrate.

결론

순환자원 기반 Pt/Pd의 촉매 전구체 합성 공정 연구를 통해 염화백금산의 대체 산화, 용해 공정, 수산화백금계 중간체의 NaOH 당량 조건, 질산팔라듐의 질산 첨가량, 온도, 시간 조건 및 팔라듐아세테이트의 리간드 치환 합성 가능성을 확인하였다.

백금족-7

리싸이클 귀금속 활용한 연료전지용 고성능 촉매 소재 설계 및 특성 평가

Design and Characterization of High-Performance Fuel Cell Catalysts Utilizing Recycled Precious Metals

양대수*, 최소원, 박현열
㈜코렌스알티엑스 기술연구소

백금은 고분자전해질막 연료전지의 산소환원반응 촉매로 필수적인 소재이나, 국내 공급의 대부분을 수입에 의존하고 있어 수소경제 확산 과정에서 원가와 공급 안정성이 주요 제약 요인으로 작용하고 있다. 이에 폐연료전지 전극과 석유화학 폐촉매로부터 회수한 백금족 금속을 다시 연료전지 촉매로 순환시키는 자원순환형 공급 체계가 요구되며, 회수 금속이 실제 산업에 사용되기 위해서는 정제 순도의 확보와 함께 이를 원료로 제조한 촉매가 상용 촉매 수준의 성능을 구현하는지에 대한 검증이 필요하다. 본 연구에서는 폐연료전지 전극 및 폐촉매로부터 회수·정제된 백금 화합물을 전구체로 활용하여 연료전지용 Pt/C 촉매를 합성하였다. 촉매 합성에는 물의 방사분해로 생성되는 수화전자와 라디칼을 환원종으로 이용하는 전자빔 환원법을 적용하여, 화학 환원제 없이 상온에서 균일한 백금 나노입자를 형성하였다. 이 방법은 공정 부산물이 적고 합성 시간이 짧아 친환경적인 촉매 제조 공정으로의 확장에 유리하다. 또한 순환자원 유래 전구체의 미량 불순물과 조성 편차에 대응하기 위해 라디칼 스캐빈저 농도와 전자빔 조사 선량을 제어하여 입자 크기와 분산도를 조절하였으며, 흑연화 및 고압 분산 처리를 통해 탄소 담지체의 결정성과 기공 구조를 설계하였다. 합성된 촉매는 물리·화학적 특성 분석과 반쪽전지 전기화학 평가를 통해 상용 전구체 기반 촉매와 비교하였고, 막전극접합체로 제작하여 단위전지 구동 특성을 평가하였다. 이를 통해 회수 백금이 전구체 합성부터 촉매 제조, 전극 제작 및 연료전지 구동에 이르는 전 과정에 활용될 수 있음을 확인하였으며, 리싸이클 귀금속의 연료전지 촉매 산업 적용 가능성과 향후 과제를 논의하고자 한다.

*Corresponding author : 양대수 / yangds@irtx.co.kr

이리듐, 루테늄의 분리를 위한 용매추출 기초 연구

A literature review on solvent extraction for separation of iridium and ruthenium

이상현[1], 김혜인[2], 정현수[1], 김현주[1], 안재우[3], 안준모[1*]

[1]전북대학교 자원에너지공학과, [2]한국지질자원연구원 자원회수본부, [3]대진대학교 반도체융합공학과

초록

이리듐(Ir)과 루테늄(Ru)은 수전해 및 전기화학 공정에 사용되는 치수안정성 전극(Dimensionally Stable Anode,DSA)의 주요 촉매 소재이다. 하지만, 제한적인 자원 매장량으로 인해 폐전극으로부터의 재활용이 중요하다. 본 연구에서는 폐 DSA 전극 침출액으로부터 Ir과 Ru을 선택적으로 회수하기 위한 용매추출 공정을 검토하였다. 침출액 내 공존 불순물인 Fe와 Ti을 우선적으로 제거하기 위해 PC88A를 이용한 선추출을 수행하였으며, 해당 조건에서 Fe와 Ti을 각각 >99% 제거할 수 있었다. 이후, raffinate에 잔존하는 Ir과 Ru의 분리 실험 결과, Cyanex 921, Aliquat 336 추출제만으로는 두 금속의 완전한 분리에 한계가 있는 것으로 나타났다. 따라서, Ir 과 Ru 분리를 위한 문헌 조사를 수행결과, Cyanex 923 이용한 추출 및 탈거 공정에서의 분리가 필요함을 확인하였다.

주제어 : Iridium, Ruthenium, 폐치수안정성전극, 습식제련, 용매추출, 탈거

서론

탄소중립 목표와 수소경제의 확산에 따라 그린수소 생산이 확대되면서, 수전해 장치의 핵심 촉매 소재인 이리듐(Ir)과 루테늄(Ru)의 수요 증가가 전망된다. 그러나 전 세계 Ir과 Ru 생산량은 각각 91%와 94%가 남아프리카 공화국에 집중되어 있어 공급망 불안정성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 2차 금속 자원으로부터 Ir과 Ru의 회수는 자원 확보 및 공급 안정성 측면에서 중요하다. Ir, Ru를 포함한 백금족 금속(PGM)의 재활용에는 습식제련 공정이 적용되며, 강한 무기산 사용의 한계를 보완하기 위한 유기산 침출 연구가 진행되고 있다. 또한 PGM 침출액으로부터 Ir과 Ru을 분리하기 위해 용매추출 공정이 적용되지만, 두 금속의 추출단에서의 선택적 분리는 여전히 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 Ir, Ru 함유된 메탄술폰산(MSA) 침출액으로부터 두 금속을 분리하기 위한 용매추출 공정을 연구하였다 .

실험 방법

알칼리 용융된 폐치수안정성 전극 스크랩을 700℃에서 알칼리 용융 후 1.5 M MSA와 1.0 M HCl 이 혼합된 침출액을 이용하여 80℃, 광액농도 5% 조건에서 24시간 침출하여, Ir, Ru 포함된 침출액을 확보하였다. 이 후, 침출액 내 Ti, Fe 사전 제거를 위해, PC88A를 이용하여 추출하였다. 이 후, 추출 여액 대상, Cyanex 921 및 Aliquat 336 추출제를 이용하여, Ir 과 Ru의 분리를 위한 추출을 수행하였다. 두 추출제 용매추출능 비교 시, 상 조절제로 10% (v/v)의 TBP (tributyl phosphate)도 첨가하였다. 모든 용매추출은 O/A=1.0, 25℃에서 수행되었다.

실험 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 알칼리용융된 폐 DSA의 1.5 M MSA & 1.0 M HCl 침출액내 금속 농도는 Ir 175.3 mg/L, Ru 73.2 mg/L, Ti 149.2 mg/L, 그리고 Fe 649.5 mg/L로 분석되었다. 침출액 내 Ti과 Fe를 제거하기 위해 PC88A를 이용한 용매추출을 수행한 결과, 0.5 M PC88A에서 Ir과 Ru의 추출률은 각각 0%와 1%인 반면, Ti와 Fe는 모두 >99% 추출되었다. 하지만, Ir 과 Ru 의 분리를 위한 용매추출 실험 결과, Aliquat 336은 Ir 27% Ru 65%를 추출하였으며, Cyanex 921은 Ir 42%, Ru 20%를 추출하여, 두 추출제를 이용하여, 용매추출단에서는 완벽한 분리가 아려움을 확인하였다.

* Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

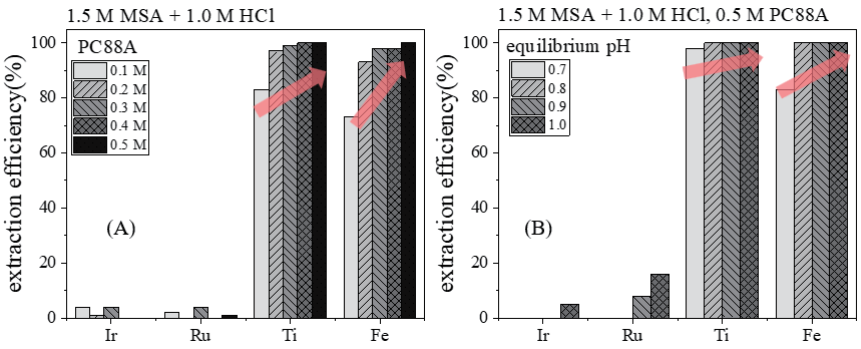


Fig. 1. 1.5 M MSA + 1.0 M HCl 침출액에서 (a) PC88A 농도 변화 및 (b) 0.5 M PC88A 조건에서 평형 pH 변화에 따른 Ir, Ru, Ti 및 Fe의 추출 거동.

Table 1. 이리듐 및 루테늄의 용매추출 및 탈거에 관한 선행연구

Feed	Extractnat	Extraction Conditions	Extraction efficiency (%)	Stripping Conditions	Stripping efficiency (%)	Ref
[HCl]1 M Ru, Ir, Os 100 mg/L	15 vol% Cyanex 923/Toluene	O/A = 1 25 ˚ C 15 min	Pt > 99.2% Ru 82.6% Ir > 8%	0.1 M ascorbic acid + 0.5 M HCl O/A =1 50 ˚ C, 15 min	Ru 57% Ir 100%	Otgonbayar et al. (2024)
[HCl] 2 M Rt, Ru, Ir 100 mg/L	15 vol% Cyanex 923/Diesel	O/A = 1 25 ˚ C 15 min	Pt > 99.2% Ru 87.0% Ir 11.9%	0.5 M Thiourea O/A = 1 25 ˚ C, 15 min	Pt 61.6% Ru 41.6% Ir 5.0%	Otgonbayar et al. (2023)
[HCl] 1 M Ru, Ir, Rh 50 mg/L	2% Cyanex 921/kerosene	O/A = 1 25 ˚ C 20 min	Ir >60% Ru 16% Rh 0.57%	H2O	Ir > 95%	Kedari et al. (2005)

따라서, 문헌 조사를 통해, 염산계 침출액 내 Ir, Ru 분리 개선 가능성을 검토하였다. 사례 분석 결과, 추출단에서 Cyanex 923을 이용 시, Ru 80% 이상을 달성하였으며, Ir 추출률 12% 미만이었다. 또한, Thiourea를 이용한 탈거 시 Ru의 선택적 탈거와 Cyanex 921을 이용한 추출 후 H_2O를 이용한 탈거를 통해, Ir의 선택적 탈거가 보고되었다. 따라서, 용매추출단에서 Cyanex 923을 이용한 추출과 탈거단에서의 Thiourea 및 H_2O을 이용하여 각각 Ru, Ir 선택적 탈거가 가능함을 확인하였다.

결론

알칼리용융된 폐전극 스크랩의 MSA & HCl 침출액 대상, Ir, Ru 용매추출을 수행하였으며, PC88A를 이용하여 불순물 Ti, Fe의 99%이상 선 추출을 달성하였다. 또한, Ir, Ru 분리를 위해 연구를 수행하였으며, 추출단에서의 Cyanex 923 추출제 적용과 탈거단에서의 Ir, Ru 의 분리 가능성을 확인 하였다.

사사

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('RS-2024-00435506').

DSA 전극스크랩으로부터 이리듐 자원의 회수 및 이리듐 전구체 화합물 제조 기술에 관한 연구

Recovery of Iridium Resources from DSA Electrode Scrap and Fabrication Technology of Iridium Precursor Compounds

김인태[1], 공수진[1], 서덕형[1], 박민서[1,2], 하다혜[1], 윤호상[1*]
[1]성일하이메탈(주), [2]전북대학교 자원에너지공학과

초록

수소 및 그린에너지 산업의 급성장에 따라 핵심 촉매로 사용되는 이리듐(Ir)의 수요가 급증하고 있으나, 전량 수입에 의존하고 있어 폐전극 스크랩으로부터 고순도 이리듐을 회수하는 자원순환 기술 개발이 시급하다. 본 연구는 폐전극 스크랩을 대상으로 건·습식 혼합 및 알칼리 용융 공정을 거쳐 3N5급 이상의 고순도 이리듐 금속 분말 및 전구체 화합물(H_2IrCl_6, $IrCl_3$, $IrCl_4$) 제조 기술을 확립하고, 전력 소비를 5% 이상 저감할 수 있는 치수안정성 전극(DSA)의 상용화 기반을 구축하는 것을 목적으로 한다. 공정 최적화를 통해 최종 이리듐 회수율 63.93% 이상 및 순도 99.88%를 달성하였으며, Pilot 설비 가동 조건을 확립하여 양산화 가능성을 검증하였다.

주제어 : 이리듐, 자원순환, 전구체화합물, 치수안정성전극

서론

수소 및 그린에너지 산업의 급성장과 함께 연료전지/수전해 및 염소·산소 발생용 전극의 핵심 촉매로 사용되는 백금족 금속, 특히 이리듐(Ir)의 수요가 급격히 증가하고 있다. 이리듐은 지중 매장량이 극히 제한된 희귀 금속으로 전량 수입에 의존하고 있어, 사용이 종료된 폐전극 스크랩으로부터 고순도 이리듐을 회수하고 이를 고부가가치 화합물 및 고성능 전극 소재로 자원순환(Circular Economy)하는 기술 개발이 시급하다.

본 연구는, 폐전극 내 포함된 이리듐 순환자원을 건·습식 혼합 및 알칼리 용융 공정을 통해 고순도화하고, 전구체 화합물(H_2IrCl_6, $IrCl_3$, $IrCl_4$) 제조 기술을 확립함과 동시에, 전력 소비를 5% 이상 저감할 수 있는 고내구성 치수안정성 전극(DSA, Dimensionally Stable Anode) 제조 기술의 상용화 기반을 구축하는 데 그 목적이 있다.

재료 및 실험방법

D사로부터 확보한 폐전극 스크랩 원료에 대한 XRF 및 ICP 분석 결과, Ir 함량이 약 4,660ppm 수준으로 확인되었으며, 주요 모재 성분으로 TiO_2 및 Fe, Ru, Cr 등의 불순물이 혼입되어 있음을 XRD 및 ICP 분석을 통해 규명하였다.

원료 내 이리듐 농축율을 높이기 위해 황산 침출을 이용하여 Ti계 모재를 제거한 후 Na_2O_2 등을 융제로 사용한 알칼리 용융·침출을 수행하였다. 이후 NH_4Cl 침전을 이용한 정제와 $(NH_4)_2IrCl_6$ 형성을 거쳐 수소/열처리 환원공정으로 Ir 분말을 제조하였다. DSA 전극용 전구체로 $IrCl_3$ 및 $IrCl_4$를 제조하였으며, 열분석을 통해 화합물의 열적 거동과 이리듐의 함량을 확인하였다.

결과 및 고찰

DSA는 3차 황산침출 후 모재 제거율이 64% 수준이었으며, 원료 내 Ir 함량은 4,660ppm에서 8,498ppm으로 농축되었다. 알칼리용융 공정에서 Ir폐기물 : NaOH : Na_2O_2 투입 몰비가 1 : 20 : 7.5로 증가할 때 Ir 침출율은 85%로 가장 좋았으며, 침출 후 수득된 Ir은 회수율 63.93%, 순도 99.88%로 확인되었다. 회수된 Ir은 H_2IrCl_6를 거쳐 $IrCl_3$ 및 $IrCl_4$로 제조할 수 있었으며, 수득된 이리듐 화합물의 열분석을 통해 $IrCl_3$、nH_2O n = 2~3, $IrCl_4$、nH_2O n = 1~2 임을 확인하였으며, 수득된 이리듐 화합물의 IPA 용해도를 확인하였다.

*Corresponding author : 윤호상 / nayoon@sungeel.com

결론

본 연구를 통해 폐전극 스크랩 내 이리듐의 친환경적 모재 제거, 알칼리 용융 및 고효율 침출·정제 공정을 성공적으로 확립하였으며, 3N5급 이리듐 금속 분말 및 3N급 이리듐 전구체 화합물 제조 기술을 고도화하였다.

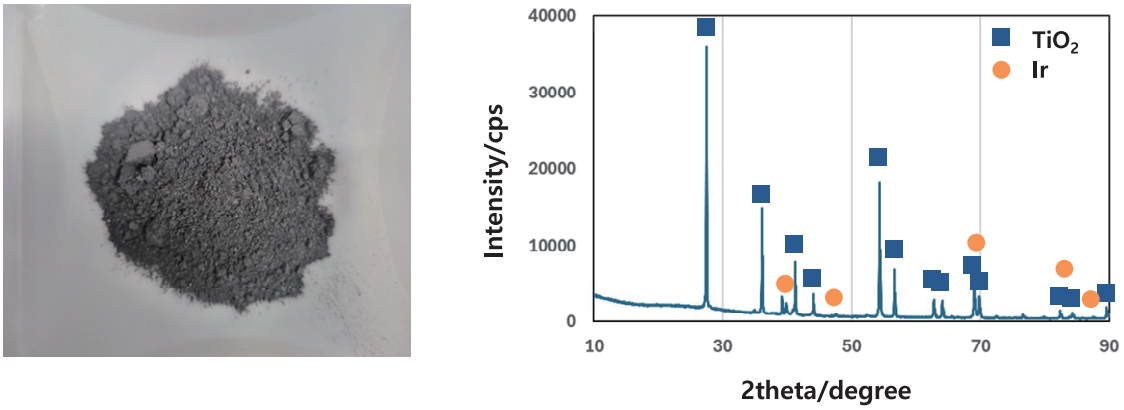


Fig. 1. Ir 스크랩 원료의 모습과 XRD Pattern

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('RS-2024-00435506')

이리듐 재자원화를 위한 건식 박리 및 후처리 연구

Dry Delamination and Post-Treatment for Iridium Recycling

이승욱[1], 이초롱[1*], 유연정[1], 장원영[1]

[1]㈜동아특수금속

초록

이리듐 (Ir)은 우수한 전기화학 특성으로 치수안정성 전극 (DSA) 등 다양한 산업 분야에 활용되고 있으나, 높은 가격과 제한적인 공급원으로 인해 사용 후 전극으로부터의 회수 및 재자원화가 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 폐치수안정성 전극으로부터 이리듐을 회수하고 고순도화하기 위한 건식 박리 및 후처리 공정을 개발하고자 하였다.

이리듐 코팅 스크랩 형상은 tube, plate를 대상으로 열처리 조건에 따른 코팅층의 박리 거동을 분석하여 형상별 건식 박리 조건을 도출하고, 공정 규모 확대를 통해 양산 적용 가능성을 검토하였다. 건식 박리 후 회수된 이리듐 함유 분말은 전극 모재인 타이타늄이 주성분이며, 철, 크롬, 실리콘 등 불순물을 포함하고 있어 산세처리를 통해 불순물을 1차 제거한 후 수소열처리를 적용하여 고순도화 하고자 하였다.

그 결과 tube 및 plate 스크랩의 형상별 최적 열처리 조건에서 각각 75%, 90% 이상의 박리율을 확보하여 최저/최고 임계 온도 구간을 확보하였으며, 양산 적용을 위한 최적 박리 조건을 확립하였다. 회수된 이리듐 분말의 고순도화를 위해 분말 조성의 대부분을 차지하는 모재 유래 타이타늄을 우선 제거하고자 HF 기반 산세 처리를 적용하였다. HF 및 HNO_3 농도와 유지시간을 공정변수로 설정하였으며, HF 농도와 유지시간이 증가할수록 타이타늄 및 철 함량이 감소하는 경향을 확인하였다. 이후 잔존 이리듐 산화물의 금속 환원을 목적으로 수소열처리를 수행하였다. 이를 통해 스크랩 형상에 따른 효과적인 건식 박리 조건을 확립하고, 건식 박리 – 산세처리 – 수소 열처리로 연계되는 이리듐 회수 및 고순도화 공정의 적용 가능성을 확인하였다.

주제어 : 이리듐, 건식 박리, 산세처리, 수소열처리, 재자원화

* Corresponding author : 이초롱 / lcl@dongaspecial.co.kr

백금족-11

전해질 침투 방지용 산화물 박막을 이용한 DSA 전극 내구성 향상 연구

Enhancement of DSA Electrode Durability Using a Metal Oxide Thin Film as an Electrolyte Barrier Layer

남상훈, 장혜림, 신경선, 유희종, 김영준*

㈜테크윈 소재사업부

초록

치수안정성 전극(Dimensionally Stable Anode, DSA)은 전해 공정에서 높은 전기화학적 안정성과 우수한 촉매 활성을 나타내지만, 장시간 운정 시 전해질의 코팅층 내부 침투 및 기재와 촉매층 계면에서의 부식 및 열화로 인해 전극의 수명이 저하되는 문제가 있다.

본 연구에서는 전해질의 침투를 억제하고 DSA 전극의 장기 내구성을 향상하기 위하여 valve 금속인 Nb를 이용하여 티타늄 기판의 보호층으로 사용하기 위하여 열 산화법을 이용하여 박막을 두께별로 형성한 후 상부에 Ir 기반의 촉매층을 형성하여 하부 보호층의 두께에 따른 전극의 전기화학적 내구성을 비교 평가하였다. 실험 결과, NbOx의 두께가 100nm 형성되었을 때, crack network 형성으로 응력이 분산되고 Ir 촉매 용액의 손 쉬운 침투로 인한 높은 기계적 강도를 보유하여 박리가 억제되고 티타늄 모재의 안정성이 향상되어 40% 이상의 내구성 향상을 확인하였다.

주제어 : 이리듐, 내구성, 치수안정성 전극, 금속 산화물

서론

치수안정성 전극(Dimensionally Stable Anode, DSA)은 우수한 전기화학적 활성과 내식성을 바탕으로 다양한 전해 공정에서 불용성 전극으로 널리 사용되고 있다. 특히 Ti 기판에 촉매층을 형성한 DSA 전극은 산성 전해질 환경에서도 우수한 전기화학적 특성을 나타내지만, 장시간 운전 시 촉매층의 열화와 함께 촉매층과 Ti 기재 사이의 계면에서 열화가 발생하여 전극의 내구성이 저하될 수 있다.

DSA 전극의 장기 열화에는 촉매 성분의 용출뿐만 아니라 촉매층 내부의 기공이나 미세 결함을 통한 전해질의 침투가 영향을 미칠 수 있다. 침투한 전해질은 촉매층 하부의 Ti 기판 및 계면과 반응하여 계면의 안정성을 저하할 수 있으며, 이러한 현상이 지속될 경우 촉매층의 접착력 저하와 박리로 이어질 가능성이 있다. 따라서 촉매층과 Ti 기재 사이에 전해질의 침투를 억제할 수 있는 보호층을 도입하는 것은 DSA 전극의 장기 내구성을 향상하기 위한 효과적인 방법이 될 수 있다.

본 연구에서는 전해질 침투를 억제하기 위한 하부 보호층으로 니오븀 산화물(NbOx) 박막을 Ti 기판과 Ir 기반의 촉매층 사이에 적용하였다. 특히 NbOx 박막의 두께를 주요 변수로 설정하여 박막 두께에 따른 DSA 전극의 전기화학적 내구성 변화를 평가하였다. 이를 통해 NbOx 박막의 적용이 전해질의 기재 방향 침투 및 계면 열화를 억제하여 전극의 내구성 향상에 미치는 영향을 확인하고, 효과적인 보호층 두께 조건을 도출하고자 하였다.

재료 및 실험방법

Ti 기판은 촉매층과의 밀착성 향상을 위하여 물리화학적 표면처리를 이용하여 수 마이크로미터의 조도를 형성하였다. 하부 보호층으로 NbCl5를 이용하여 열 산화법으로 50~200 nm의 두께를 갖도로 제작하였으며, 그 위에 촉매층으로는 IrCl3、xH2O, TaCl5를 이용하여 최적 혼합비로 혼합한 용액을 이용하여 열 산화방법으로 코팅하였다.

내구성 평가는 황산 전해질에서 일정 전류밀도(200A/dm^2, ASD)를 인가하여 수행되었다.

* Corresponding author : 김영준 / kyjcrow@techwin.co.kr

결과 및 고찰

그림 1은 Ti 기판 위에 NbOx 하부층의 두께가 전극의 장기 내구성에 미치는 영향을 평가하기 위해 시간 경과에 따른 전압 변화를 측정하였다. NbOx 하부층이 없는 기준 시편(Ref.)은 1,141시간의 수명을 나타냈지만, NbOx 하부층을 100 및 200 수준으로 도입한 시편은 각각 1,667시간, 1,427시간으로 향상된 내구성을 확보하였다. 특히 Nb 100 시편은 기준 시편 대비 약 46% 향상된 전압 안정성을 보여 최적의 수명 개선 효과를 입증하였다. 그러나 Nb 50 시편의 경우, 오히려 기준 시편보다 30% 감소한 820시간 만에 수명종료가 관찰되었다.

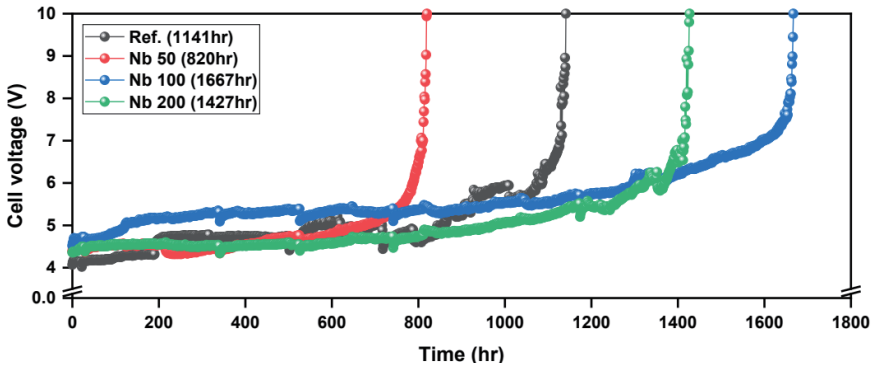


Fig. 1. Durability test of DSA electrodes with various NbOx thin film thicknesses

NbOx 두께에 따라 내구성 거동이 상이하게 나타나는 원인을 규명하고자, 수명 시험 전 Ti 기판 위에 코팅된 NbOx 하부층의 초기 표면 미세구조를 SEM으로 분석하였다. 그림 2 SEM 이미지 결과 Nb 50 시편의 경우 하부 Ti 기판의 전처리 공정에서 기인한 특유의 반구형 표면 형상에 그대로 투영되어 드러남이 확인되었으며, 이는 50 수준의 얇은 두께로는 기판의 물리적 요철을 완전히 덮기에 불충분함을 보여준다. 이에 따라 기판 요철의 피크와 골을 따라 국부적인 응력이 발생하였으며, 불연속적인 계면의 결함 밀도가 증가한 것으로 판단된다. 기준 전극의 경우 Ta과 Ti 기판 간의 높은 화학적 친화도로 인해 요철 구조 내에서도 일정 결합력 이상을 유지한 반면, Nb 50 시편은 얇고 불완전한 NbOx 층이 오히려 계면 안정성을 저해하는 원인으로 작용하여 촉매층의 조기 박리와 기판 산화를 가속화한 것으로 보인다.

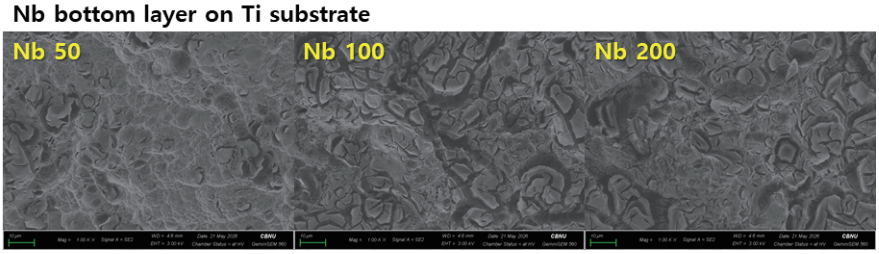


Fig. 2. SEM images of NbOx/Ti morphology as a function of NbOx thickness

반면, NbOx 두께가 100 이상으로 증가함에 따라 이러한 기판의 반구형 형상이 효과적으로 평탄화되면서 연속적이고 조밀한 보호막을 형성하였다. 결론적으로, Nb 100 시편은 촉매층의 물리적 박리를 억제하는 고정 효과와 전해질 침투를 차단하는 보호막 기능을 동시에 완수할 수 있는 임계 두께를 만족함으로써 전극의 장기 내구성을 극대화하는 데 기여한 것으로 확인되었다.

결론

열 산화법을 이용하여 Ti 기판과의 전해질 침투를 방어하고 촉매층과의 결합력을 강화하는 하부층으로 NbOx 박막의 최적 두께를 도출하였으며, 이에 따라 전극의 내구성을 약 45% 향상하는 결과를 도출하였다.

백금족-12

이리듐계 치수안정성 전극의 표면형상에 따른 전기화학적 특성 평가

Effect of Surface Morphology on the Electrochemical Characteristics of Iridium-Based Dimensionally Stable Electrodes

박성철[1], 장진만[1], 이원식[1], 김민서[1,2], 김재환[1,3], 정찬엽[1,4], 손성호[1*]

[1]한국생산기술연구원 신산업부품화연구부문, [2]인하대학교 화학공학과, [3]고려대학교 신소재공학부, [4]인하대학교 신소재공학과

초록

인쇄회로기판(Printed Circuit Board, PCB)의 고집적화에 따라 전해도금 공정에서 기존의 용해성 구리 양극이 전극의 형상이 일정하게 유지되어 균일한 전류분포 확보와 장시간 안정적인 공정 운영이 가능한 치수안정성 전극(Dimensionally Stable Electrode, DSE)으로 대체되고 있다. 그러나 기존의 평판 티타늄 기지체는 촉매 산화물 코팅층이 형성되는 표면적이 제한되어 고전류밀도 조건에서 인가전압이 상승하고 소비전력이 증가하는 문제가 있다.

본 연구에서는 평판 티타늄과 기공 크기가 서로 다른 다공성 티타늄을 기지체로 하여 이리듐-탄탈럼 산화물을 열분해법으로 코팅한 이리듐계 치수안정성 전극을 제조하고, 기지체의 표면형상이 코팅층 형성과 전기화학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다. 기지체의 기공 크기와 표면 기공률은 실체현미경과 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)으로 정량화하였고, 코팅층의 표면 형상과 조성 및 분포는 SEM과 에너지분산형 X선 분광법(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS)으로 분석하였다. 그 결과, 다공성 티타늄 기지체에서는 기공 내부 표면을 포함한 전체 표면에 이리듐과 탄탈럼이 균일하게 분포하였으며, 코팅층의 이리듐과 탄탈럼 비율은 전구체 용액의 조성비와 유사하였다. 전기화학적 특성은 PCB 전해도금 공정과 동일한 황산구리 전해액에서 Potentiostat를 이용한 선형주사전압법(Linear Sweep Voltammetry, LSV)으로 측정하여 평판 전극과 다공성 전극의 양극 전위를 비교하였다. LSV 측정 결과, 동일 전류밀도에서 다공성 전극의 인가전압은 평판 전극보다 낮게 나타났으며, 기공 크기에 따라서도 인가전압에 차이를 보였다.

주제어 : 치수안정성 전극, 다공성 티타늄, 이리듐 산화물, 전해도금, 전기화학적 특성

사사

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('RS-2024-00435506')

*Corresponding author : 손성호 / shson@kitech.re.kr

양극전기도금법에 의한 Ir 산화물 전극 형성 거동에 관한 연구

Investigation of Iridium Oxide Electrode Formation Behavior via Anodic Electrodeposition

전하윤[1], 김혜령[1], 김민영[1], 이규환[1,2*]

[1]한국재료연구원 에너지 · 환경재료연구본부, [2]과학기술연합대학원대학교

초록

치수안정성 양극은 우수한 전기화학적 활성과 내구성으로 다양한 전기화학 공정에 활용되고 있지만 양극 제조에 사용되는 열분해법은 고온 및 반복적인 코팅 공정이 요구된다. 또한, 기판의 sandblasting 전처리는 기판 손상 및 분진 발생 문제를 수반할 수 있다.

본 연구에서는 이를 개선하기 위해 양극전기도금법을 적용하여 전류밀도와 전착 시간에 따른 IrO_x 코팅층의 형성 거동을 분석하고, sandblasting 전처리 유무에 따른 Ti 기판의 코팅층 특성을 비교하였다. 실험 결과, 낮은 전류밀도에서 상대적으로 균일하고 밀착성이 우수한 IrO_x 코팅층이 형성되었으며, 0.2 A dm^{-2}의 초기 전착 후 0.1 A dm^{-2}로 후속 성장시키는 2-step 조건에서 가장 안정적인 코팅 특성을 나타냈다. 또한, sandblasting을 적용하지 않은 기판에서는 코팅층의 밀착성이 저하되어 sandblasting-free 공정 구현을 위한 추가적인 표면 개질이 필요한 것으로 판단되었다.

주제어 : 치수안정성 양극, Ir 산화물(IrOx), 전기도금법, 표면처리

서론

치수안정성 양극은 Ti와 같은 금속 기판에 IrO_x, RuO_x 등의 전기촉매 코팅층을 형성한 전극으로, 높은 전기화학적 활성과 우수한 내식성 및 장기 안정성으로 인해 수전해 및 수처리 등 다양한 전기화학 공정에 활용되고 있다. 일반적으로 치수안정성 양극의 촉매 코팅층은 전구체를 Ti 기판에 도포한 후 고온에서 열처리하는 열분해법을 통해 제조되지만, 반복적인 코팅 및 고온 열처리가 요구되어 공정 시간과 에너지 소비가 증가할 수 있다. 또한, Ti 기판과 코팅층 사이의 접착력을 확보하기 위해 sandblasting 공정을 적용하는 경우가 많으나, 기판 표면의 물리적 손상과 분진 발생 등의 문제가 있어 이를 대체할 수 있는 전처리 기술이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 비교적 낮은 온도에서 IrO_x 코팅층을 형성할 수 있는 양극전기도금법을 적용하고, 전류밀도 및 전착 시간에 따른 IrO_x 코팅층의 형성 거동을 분석하였다. 또한, sandblasting 처리 유무에 따른 코팅층 특성을 비교하여 sandblasting-free 공정의 적용 가능성을 검토하였다.

재료 및 실험방법

$IrCl_4$, H_2O_2, oxalic acid 및 K_2CO_3를 이용하여 pH 10.5의 IrO_x 용액을 제조하고, 이를 40 ℃에서 72시간 반응시켜 전착액을 준비하였다. Sandblasting 처리 및 미처리 Ti 기판 모두 10% oxalic acid에서 2시간 초음파 전처리한 후 10% H_2SO_4로 산세 처리하였다. 전착 과정에서 Pt mesh를 상대전극으로 사용하였으며, 전극 간격을 1.7 cm로 유지하고 전해액을 320 rpm으로 교반하였다.

결과 및 고찰

Ti 기판의 양분극 거동(그림 1)을 확인한 결과, sandblasting 처리 유무에 관계없이 유사한 양분극 거동을 나타냈다. 전류밀도에 따른 IrO_x 전착 특성을 비교한 결과, 높은 전류밀도에서는 빠른 코팅층 형성이 가능하였으나 세척 및 테이프 시험 후 박리 현상이 증가하는 경향을 보였다. 반면, 0.2 A dm^{-2}의 낮은 전류밀도에서는 상대적으로 균일한 코팅층과 우수한 밀착성이 확인

*Corresponding author : 이규환 / lgh1636@kims.re.kr

되었다. 이를 바탕으로 초기층 형성과 후속 성장을 분리하기 위한 2-step 양극전기도금법을 적용하였다. 1st step에서는 0.2 A dm^{-2} 조건이 0.5 A dm^{-2} 이상의 조건보다 우수한 밀착성을 나타냈으며, 2nd step에서는 0.05 A dm^{-2}보다 0.1 A dm^{-2} 조건에서 코팅층의 유지 및 피복 상태가 우수하였다. 따라서 0.2 A dm^{-2}에서 초기 전착 후 0.1 A dm^{-2}로 후속 성장시키는 2-step 조건이 IrO_x 코팅층의 균일도와 밀착성을 확보하는 데 가장 적합한 것으로 판단하였다(그림 2). 향후 해당 전류밀도 조건으로 총 전하량 증가에 따른 코팅 두께와 밀착성의 상관관계를 분석하여 안정적으로 확보 가능한 최대 코팅 두께를 확인할 예정이다. 또한, sandblasting 미처리 Ti 기판에서 코팅층의 밀착성이 저하되는 한계가 확인됨에 따라, ALD를 통해 Ti 기판에 TiN 전처리층을 형성하고 동일한 IrO_x 전착 조건을 적용하여 코팅층의 특성을 비교함으로써 sandblasting-free 공정의 적용 가능성을 평가할 예정이다.

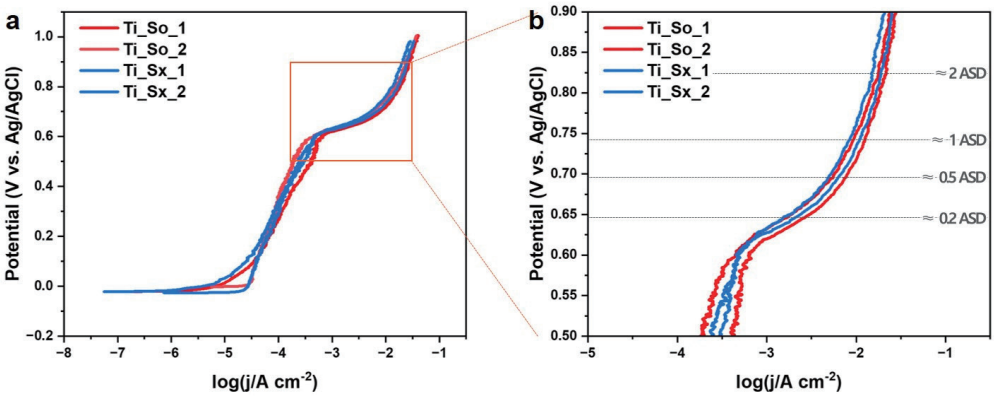


Fig. 1. (a) Polarization curves of sandblasted (Ti_So) and non-sandblasted (Ti_Sx) Ti substrates. (b) Enlarged view of the selected potential region in (a).

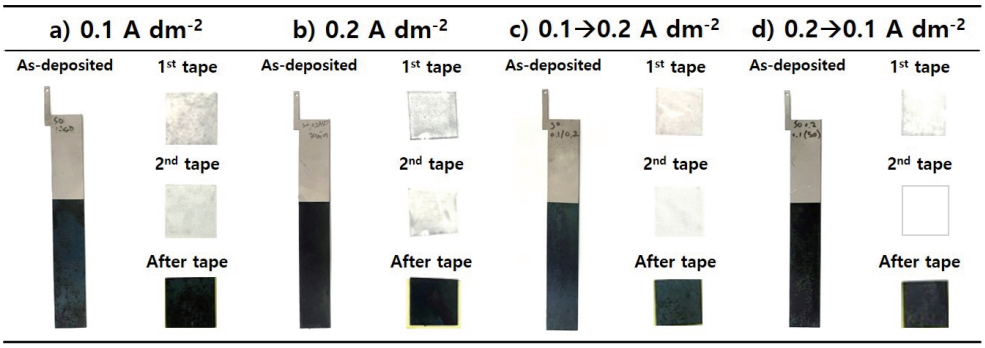


Fig. 2. Photographs of IrO_x-coated Ti substrates prepared by (a, b) single-step and (c, d) two-step electrodeposition under different current-density conditions. The as-deposited substrates, the first and second tape-test results, and the substrates after testing are shown.

결론

양극전기도금법을 통해 Ti 기판 표면에 IrO_x 코팅층을 형성하였다. 전류밀도 제어를 통해 코팅층의 균일도와 밀착성을 최적화하였으며, 전착 후 시편 사진과 테이프 시험을 통해 전착 조건에 따른 코팅 특성을 확인하였다.

다공성 Ir 코팅 전극 실험 환경 조성 및 성능 평가

Experimental Setup and Performance Evaluation of Porous Iridium-Coated Electrodes

이진아[1], 유문상[1*]
[1](주)심텍, 연구개발그룹

초록

이리듐(Ir) 계열 불용성 전극은 구리 전해도금 공정에서 우수한 내식성과 안정성으로 널리 사용되고 있으나, 전극 코팅 품질에 따른 공정 효율 변화에 대한 정량적 평가 기준은 부족한 실정이다. 본 연구에서는 전력저감형 고내성 이리듐계 전극 개발 및 평가를 위한 기반 구축을 목적으로, 전극 코팅 품질에 따른 전력 소모량 및 첨가제 소모량 간의 연관 관계를 분석할 수 있는 평가 환경을 구축하였다. 도금 공정 중 적산전력 측정 시스템과 첨가제 농도 분석 체계를 구축하여 상용 이리듐계 전극을 기반으로 전류밀도 및 도금 타겟 조건에 따라 전력량 및 첨가제 농도 및 도금 특성을 분석하여 전극 상태와 공정 성능 간의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 전극 코팅 품질 평가를 위한 전력 및 첨가제 소모량 기준을 수립할 수 있는 기반을 마련하였다. 구축된 평가 시스템은 향후 개발되는 전력저감형 다공성 이리듐계 전극과 상용 전극 간의 성능 비교에 활용될 예정이며, 실제 양산 장비 환경에서의 전력 절감 효과 및 경제성 검증에 기여할 것으로 기대된다.

주제어 : 이리듐, 도금, 전력 소비량, 첨가제 소비량, 전극 코팅 품질

서론

구리 전해도금 공정은 반도체 패키지 기판 공정의 핵심 기술 중 하나이며, 공정 효율은 불용성 양극의 성능에 크게 영향을 받는다. 현재 이리듐 계열 전극은 우수한 내식성과 긴 수명 특성으로 인해 패키지 기판 양산 현장에서 널리 적용되고 있다. 그러나 전극 코팅 품질 변화에 따른 전력 소비 및 첨가제 소모 특성에 대한 체계적인 평가 기준은 부족한 상황이다. 특히 전력 사용량 증가는 생산 비용과 직결되며 첨가제 소모량 증가는 도금 전체 공정 안정성과 유지 비용에 큰 영향을 미친다. 따라서 전극의 코팅 품질과 공정 효율 간의 상관관계를 정량적으로 분석하는 측면은 중요하다. 본 연구에서는 전력저감형 고내성 이리듐계 전극 개발을 위한 기반 연구로서 상용 전극의 성능 데이터를 확보하고, 전력 및 첨가제 소모량 기반의 성능 평가 기준을 수립하기 위한 실험 환경을 구축하였다.

재료 및 실험방법

실험은 실제 양산 설비에서 수행하였다. 양극으로는 상용 이리듐계 불용성 전극을 사용하였으며, 전류밀도 및 도금 타겟을 변수로 설정하여 실험을 진행하였다.

전극 코팅 품질에 따른 공정 영향을 평가하기 위하여 도금 장비에 적산전력 측정 장치를 구축하여 공정 중 누적 전력 소비량을 실시간 기록하였다. 또한 각 실험 조건에서의 도금액 내 첨가제 농도 (Brightener, Carrier, Leveler) 분석을 위한 평가 체계를 구축하여 공정 전후의 첨가제 소모량을 분석하였다.

각 도금 조건별로 전력량 및 첨가제 농도에 대한 데이터를 확보하여, 이를 바탕으로 전극 상태와 공정 효율 간의 상관관계를 분석하였다. 확보된 데이터는 향후 개발 전극 평가를 위한 기준 데이터로 활용하였다.

*Corresponding author : 유문상 / msyou@simmtech.com

Table 1. 전류밀도에 따른 도금두께 타겟 조건

LEG	1	2	3	4	5	6	7
ASD	0.6	0.6	0.6	1.2	1.2	1.2	1.2
도금 두께 타겟	5	15	25	5	15	25	63

결과 및 고찰

도금 공정 중 적산전력 측정 결과, 전류밀도 및 도금타겟이 증가함에 따라 누적 전력량 및 첨가제 소모량이 증가하는 경향을 확인하였다.

특히 첨가제 농도 분석 결과, 도금두께가 늘어날수록 첨가제 농도가 감소하는 경향을 확인하였다. 또한 전력 소비량과 첨가제 소모량의 변화 거동을 통해 공정 조건 및 전극 상태가 도금 반응에 영향을 미칠 가능성을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 전극 코팅 품질 변화에 따른 전기화학 반응 효율 및 첨가제 소비 특성 간의 상관관계 분석을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

본 연구를 통해 상용 이리듐계 전극의 전력 소비량 및 첨가제 소모량 데이터베이스를 구축하였으며, 전극 코팅 품질 평가를 위한 정량적 기준 수립 가능성을 확인하였다. 또한 향후 개발될 전력저감형 이리듐계 다공성 전극의 성능을 객관적으로 비교할 수 있는 평가 환경을 확보하였다.

특히 기존 전극 대비 전력 절감 효과를 검증하기 위해서는 실험실 수준 평가뿐만 아니라 양산 장비 수준의 검증이 필요하며, 본 연구에서 구축한 평가 체계는 이러한 검증의 기반 기술로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

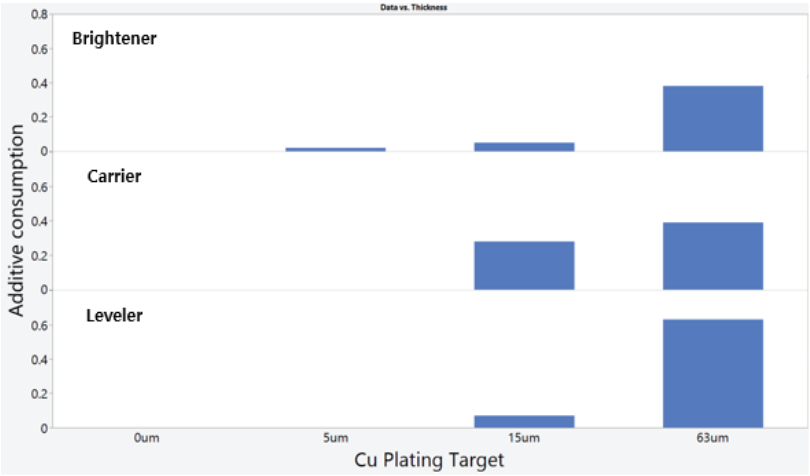


Fig. 1. 전기 도금 두께 타겟에 따른 첨가제 소모량 분석

결론

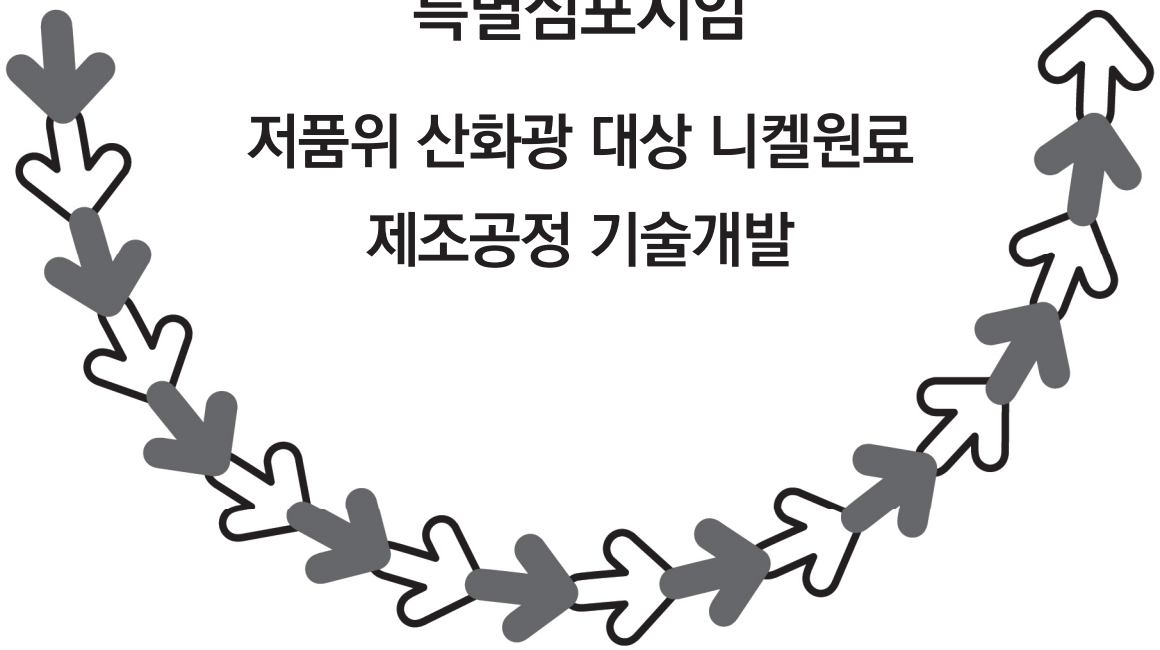
본 연구에서는 이리듐계 전극 코팅 품질에 따른 전력 소비량 및 첨가제 소모량 간의 연관 관계를 분석하기 위한 평가 환경을 구축하였다. 적산전력 측정 시스템과 첨가제 농도 분석 체계를 통해 상용 이리듐계 전극의 공정 데이터를 확보하였으며, 전력 및 첨가제 소모량 기반의 성능 평가 기준 수립 가능성을 확인하였다. 또한 전극 상태와 공정 효율 간의 상관관계를 분석할 수 있는 데이터베이스를 구축하였다. 구축된 평가 환경은 향후 개발되는 전력저감형 고내성 이리듐계 전극의 성능을 상용 전극과 비교·평가하는 데 활용될 예정이며, 실제 양산 장비에서의 전력 절감 효과 검증 및 상용화 기반 마련에 기여할 것으로 기대된다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

저품위 산화광 대상 니켈원료 제조공정 기술개발



The Korean Institute of Resources Recycling

효율적인 니켈선광을 위한 파분쇄 설비의 기술개발

Technology development of crushing and grinding equipment for efficient nickel beneficiation

김진주[1*], 기형호[1], 이창선[1], 채경호[1], 이수민[1]
[1]삼영플랜트, 17541 경기도 안성시 대덕면 시미실길158

니켈 선광에서 파·분쇄(Comminution)의 핵심 이론은 단순히 광석을 작게 만드는 것이 아니라, 니켈에 함유한 광물과 맥석을 선택적으로 해리(Liberation)시켜 후단 선광에서 회수율과 품위를 높이는 것입니다. 니켈 산화광(Limonite/Saprolite 계열)을 대상으로 한다면 황화니켈광과는 파·분쇄 조건이 상당히 다릅니다.

기본적인 파 · 분쇄 원리

광석은 일반적으로 다음 순서로 처리합니다.
원광 → 조쇄 → 중쇄 → 세쇄 → 분쇄 → 해리 → 선광
파쇄와 분쇄의 목적은 크게 3가지입니다
1) 입도감소(후속 설비가 처리할 수 있는 크기로 만듦), 2) 단체분리(니켈 광물과 맥석을 서로 분리), 3) 선택적해리(과도한 분쇄 없이 필요한 부분만 해리)
가장 중요한 개념은 단체분리도(Liberation)입니다. 입도를 무조건 작게 하는 것이 좋은 것이 아니라, 니켈 광물이 맥석으로부터 충분히 해리되는 최소 입도까지 분쇄하는 것이 효율적입니다.

니켈광석 유형별 파분쇄 중요한 점

니켈 산화광은 황화광과 달리 니켈이 하나의 독립된 결정광물로 존재하지 않고, Fe 산화·수산화물이나 Mg-silicate 계열 광물 등에 치환·흡착된 형태로 존재하는 경우가 많습니다.
1) 황화광 (Sulfide Ore: 펜틀랜드광, 황철광 등)
부유선광(Flotation)에 최적화된 유용 광물의 단량체 해리
2) 라테라이트 산화광 (Laterite Ore: 사프로라이트, 리모나이트 등)
니켈이 풍부한 미세 입자와 저품위 마그네슘/규산염 거친 입자의 효율적 분리.
따라서 황화니켈처럼 단순히 "니켈광물 ↔ 맥석"의 완전한 해리를 목표로 하면 오히려 과분쇄(over-grinding)가 발생할 수 있습니다.
본 연구진은 상기의 특성등을 고려한 적절한 시설을 설치하기 위하여 자원보유국의 현장에 파쇄, 분쇄 설비를 구축하여 안정적인 원료공급망을 확보하기위해 파쇄기, 분쇄기 및 이송설비의 개발 및 설비를 구축하기 위하여 연구를 진행하고 있습니다. 선광설비의 효과적인 선별과정을 거치기 위해서는 전 설비인 파쇄 (죠, 1차, 2차 콘, 선별설비)를 포함한 분쇄설비 (볼밀, 로드밀)의 적절한 mass balance가 이루어 지도록 설계되어 생산성, 효율성 및 운영관리의 편리성을 감안한 설비를 구축하기 위해 연구개발을 진행하고 있습니다

Key words : Nickel oxide ore, Nickel sulfide ore, Beneficiationhook, Continuous process, Actual-proven technology

사사

본 연구는 2025년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 “저품위 니켈광 고도산광 및 사업화를 위한 현장실증 선별공절개발”을 수행한 연구결과입니다. (No. RS-2025-02314475)

*Corresponding author : 김진주 / sy4840@hanmail.net

탄자니아 린디지역 니켈 자원 확보를 위한 기초탐사

The Survey on the Securing of Nickel Resources in Tanzania

김흥원*, 윤주선, 이종진
㈜문무 기업부설연구소

우리나라 광물 수입 의존도는 중국 의존도가 절대적이고 특히, 반도체, 배터리, 첨단장비, 재생에너지 설비에 필수적으로 들어가는 핵심광물 33종의 수입 의존도는 99.9%에 달하는 현실에서 수입다변화, 해외자원개발, 재자원화 등 공급망 안정화 전략이 핵심과제로 제시되고 있으며 이러한 흐름속에서 최근 아프리카 지역에 관심이 집중되고 있다.
동아프리카 니켈 밸트(EANB)에 해당되는 탄자니아는 향후 아프리카 내 니켈 프로젝트 주도국으로 부상하고 있으며 흑연공급망 재편에 따라 흑연 개발 프로젝트가 활발히 이루어지고 있는 남부 린디지역은 Ntaka Hill Project와 같은 니켈광 개발이 재개되고 있다. 따라서 탄자니아 내 니켈자원의 잠재력을 평가하고 이를 활용하기 위한 연구가 필요하다.
본 연구는 탄자니아 내 니켈자원 확보를 목표로 현장 실증연구를 실시하여 니켈 정광을 생산하는 것을 주요 목표로 하고 있다. 접근성, 인프라구축 용이성 검토를 위한 광역지질조사와 Kibutuka지역 광구의 니켈자원 개발을 위한 기초 물리탐사를 바탕으로 환경영향평가(EPP)를 진행하고 트랜칭 탐사를 진행하였다. 화학분석 및 표면조사를 기반으로 추가 정밀 시추탐사 계획을 진행하여 실증화 연구를 위한 파일럿 플랜트 구축 방안을 준비하였다. 또한. 향후 실증화 시험을 위한 인프라, 파일럿 플랜트 구축 및 시험을 통한 실증화 연구 결과를 바탕으로 린디지역 니켈자원 개발을 확장하여 국내 공급망 기여 방안을 준비하고자 한다.

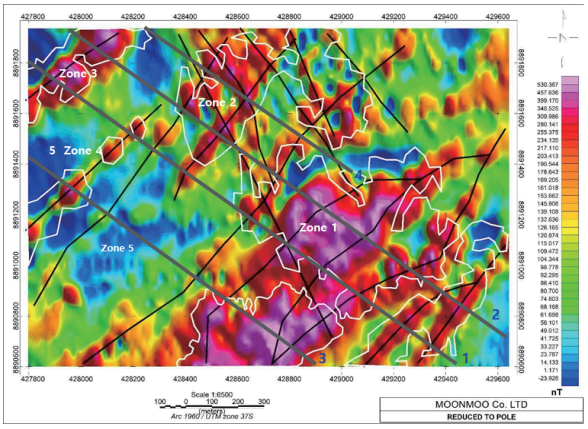


Fig. 1. Magnetic Anomalies and Trenching Lines.



Fig. 2. Trenching Survey.

사사

본 연구는 2025년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 “저품위 니켈광 고도산광 및 사업화를 위한 현장실증 선별공절개발”을 수행한 연구결과입니다. (No. RS-2025-02314475)

*Corresponding author : 김흥원 / ttommykimm@naver.com

탄자니아 니켈광 선별 기술 최적화 및 복합 선별 공정 개발

Beneficiation Optimization and Integrated Separation Process Development for Nickel Ores from Tanzania

전호석[1,2*], 고병헌[1], 홍길상[1], 김성민[1], 이경현[1,3], 최희경[1,2], 최성보[1]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부 자원회수연구센터, [2]과학기술연합대학원대학 자원공전공,

[3]조선대학교 대학원 첨단에너지자원공학과

니켈(Ni)은 우수한 내식성, 내열성 및 기계적 특성을 바탕으로 스테인리스강, 특수합금 등 다양한 산업 분야에 활용되는 주요 금속 자원이다. 최근에는 전기자동차 및 에너지저장장치 산업의 성장에 따라 리튬이온전지 양극재의 핵심 원료로서 그 중요성이 더욱 증가하고 있으며, 안정적인 니켈 자원 확보와 저품위 니켈광의 효율적인 활용을 위한 선광 기술 개발의 필요성이 높아지고 있다.

니켈 광상은 생성 환경과 광물학적 특성에 따라 크게 황화광과 산화광으로 구분되며, 광상 유형에 따라 니켈의 존재 형태와 수반 광물의 특성이 상이하여 서로 다른 선별 전략이 요구된다. 황화광은 니켈 황화광물과 철 황화광물의 표면특성 및 자성 차이를 이용한 부유선별과 자력선별이 주로 적용되는 반면, 산화광은 니켈이 철 산화물 및 규산염 광물 등과 복합적으로 존재하여 물리적 선별만으로 선택적인 농축이 어려운 특징을 가진다.

본 연구에서는 탄자니아에서 산출되는 니켈 황화광 및 산화광을 대상으로 광종별 특성에 따른 단위 선별 기술을 적용하고, 주요 공정조건의 최적화 및 복합 선별 공정의 적용 가능성을 평가하였다. 황화광의 경우 부유선별 및 습식 자력선별을 각각 수행하여 주요 선별조건을 검토하였으며, 단위공정 결과를 바탕으로 복합 선별 공정을 검토하였다. 그 결과, 부유선별 후 자력선별을 연계한 공정에서 최종 Ni 품위 17.7%, 회수율 80.6%의 선별 결과를 얻어 단일 공정 대비 효과적인 니켈 농축이 가능함을 확인하였다.

산화광의 경우 입도별 Ni 분포 특성을 평가하였으며, 부유선별을 통한 니켈 농축 가능성을 검토하였다. 입도분석 결과, Ni이 미립 구간에 상대적으로 농축되는 특성을 확인하였으며, 부유선별을 통해 원광 대비 Ni 품위 향상이 가능함을 확인하였다.

이러한 결과를 통해 탄자니아 니켈광은 황화광과 산화광의 광물학적 특성에 따라 차별화된 선별공정의 적용이 필요하며, 단위 선별 기술의 최적화 및 복합공정을 통해 니켈의 선택적 농축 가능성을 확인하였다.

사사

본 연구는 산업통상부(MOTIR)의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No.RS-2025-02314475, 저품위 니켈광 고도선광 및 사업화를 위한 현장 실증 선별공정 개발).

*Corresponding author : 전호석 / hsjeon@kigam.re.kr

고 배율 광학시스템 기반 광물 파분쇄 공정 모니터링 기술개발

High Magnification Optical System Based Process Monitoring Technology for Crushing and Grinding Ore

이준하[1], 김병학[1*]
[1]한국생산기술연구원

초록

파분쇄 공정의 입도는 니켈광 등 자원개발을 위한 선별공정에서 선광 효율을 결정하는 중요한 공정으로 분류된다. 기존의 파분쇄 공정 입도 측정방식은 검사자가 샘플을 활용하는 방식의 측정시험으로 측정정확도의 신뢰성이 낮으며, 실시간 공정 제어에 한계 사항이 존재한다. 본 연구는 고배율 광학시스템으로 파분쇄 입자의 크기·형상과 분포 변화를 정량적으로 모니터링하는 영상 분석 기술을 제안한다. 분쇄 니켈광 현미경 영상에서 Segment Anything Model(SAM)의 자동 마스크 생성 기능을 이용해 학습 데이터 없이 입자별 인스턴스 세그멘테이션 마스크를 획득한다. 이후 Upsample Anything을 적용하여 SAM의 저해상도 임베딩으로 인해 불분명한 윤곽을 원본 영상의 엣지와 미세 형상 정보에 맞게 정밀화하고, 인접하거나 형태가 불규칙한 입자의 경계를 명확하게 복원한다. 제안 방식은 픽셀 단위 라벨링과 조건별 재학습 부담을 줄이는 동시에 개별 입자의 면적·형상 정보를 일관되게 산출할 수 있는 기반을 제공한다. 이를 통해 입도 변화를 안정적으로 추적하고, 파분쇄 조건 최적화와 공정 품질 관리에 활용하고자 한다.

주제어 : 자원개발, 니켈광 선별공정, 골재 입도 분석, 객체 분할 모델, 파쇄, 분쇄

사사

본 연구는 2025년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 “저품위 니켈광 고도산광 및 사업화를 위한 현장실증 선별공정개발”을 수행한 결과입니다. (No. RS-2025-02314475)

*Corresponding author : 김병학 / bhkim81@kitech.re.kr

저품위 니켈광 공정 및 공급망 데이터 분석을 위한 시뮬레이션 알고리즘 개발

Development of a Simulation Algorithm for Process and Supply Chain Data Analysis of Low-Grade Nickel Ore

주민석[1], 정호영[1*]

[1]국립부경대학교 에너지자원공학과

초록

본 연구에서는 저품위 니켈광의 원료 공급 및 운송에서부터 선광, 제련, 공정폐기물 처리 및 제품 공급에 이르는 전체 생산체계를 연계한 이산사건 시뮬레이션(discrete-event simulation, DES) 기반 통합모델을 구축하였다. 모델은 원료 및 중간산물을 기본 단위로 하여 공급망과 생산공정을 이동하는 과정에서 원료 특성, 물질 흐름, 재고 및 설비 운영상태가 갱신되도록 구성하였다. 선광공정에서는 파쇄·분쇄 및 선별에 따른 제품의 양과 품질변화를 반영하고, 이를 후속 제련공정의 투입조건으로 연결하였다. 제련공정은 탈철, 고압산침출(HPAL), 불순물 제거, 용매추출 및 황산니켈 제조과정을 고려하였으며, 선광 및 제련과정에서 발생하는 공정폐기물의 흐름도 후속 처리공정과 연계하였다. 또한 원료 및 주요 자원의 공급변동, 운송 및 설비 중단, 재고수준과 공정 처리능력 변화 등을 시나리오로 구성하여 처리량, 설비 이용률, 대기, 병목 및 생산 안정성의 변화를 분석하였다. 이를 통해 개별 공정의 성능뿐만 아니라 공정 간 물질 흐름과 공급망 조건이 전체 생산시스템에 미치는 영향을 통합적으로 평가할 수 있는 분석체계를 구축하였다.

주제어 : 저품위 니켈광, 공정·공급망 통합분석, 이산사건 시뮬레이션, 시나리오 분석

서론

저품위 니켈광의 활용에서는 원광의 품위와 물리·화학적 특성이 선광공정의 성능뿐만 아니라 후속 제련공정의 처리조건과 최종 제품 생산에 영향을 미친다. 또한 선광 및 제련과정에서 발생하는 광미, 슬래그 및 침출잔사 등의 공정폐기물은 후속 처리공정과 연계되어 전체 물질 흐름에 영향을 줄 수 있다. 이와 함께 원료 및 부원료의 공급변동, 운송지연, 재고수준 및 설비 처리능력과 같은 공급망·운영조건은 전체 생산체계의 안정성을 결정하는 주요 요인이다.

따라서 개별 공정의 성능을 독립적으로 평가하기보다 원료 공급에서 선광, 제련, 폐기물 처리 및 최종 제품 공급까지의 물질 및 운영 흐름을 하나의 시스템으로 연계하여 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 이러한 공정 및 공급망의 상호작용을 분석하기 위한 DES 기반 통합모델을 구축하였다.

본론

통합모델은 원료 공급·운송 → 선광 → 제련 → 제품 공급의 주 생산흐름과, 선광 및 제련에서 발생하는 공정폐기물의 발생·저장 및 후속 처리 흐름을 연계하도록 구성하였다. 각 공정의 입·출력과 중간재고를 연결하고, 설비를 처리용량을 가지는 자원으로 정의하여 설비 점유, 대기 및 공정 간 물량 적체를 반영하였다. 주요 모델링 대상과 분석지표는 Table 1과 같다.

* Corresponding author : 정호영 / hyjeong@pknu.ac.kr

Table 1. 통합 DES 모델의 주요 구성요소 및 분석지표

구분	모델링 대상	주요 변수 및 분석지표
공급망	원광/부원료 공급, 운송, 재고	공급량, 품질, 재고, 운송·공급 변동
선광	파쇄, 분쇄, 분급, 선별	처리량, 품위, 질량수율, 회수율
제련	탈철, HPAL, 불순물 제거, 용매추출, 황산니켈 제조	금속 회수, 시약, 처리량, 제품 생산
폐기물	광미, 슬래그, 침출잔사 발생·저장 및 처리 연계	발생량, 저장량, 처리조건, 공정 제약
통합운영	공정 간 이송, 설비 및 제품수요	이용률, 대기, 병목, 생산 안정성

선광공정에서는 원광 특성과 공정조건에 따라 산출되는 제품의 양과 품질을 추적하고 이를 제련공정의 투입조건으로 연결하였다. 제련공정에서는 선광 산물을 대상으로 탈철, HPAL 및 후속 정제·제품 제조과정의 물질 흐름을 반영하였다. 또한 선광 및 제련공정에서 발생하는 폐기물의 발생량과 저장조건을 후속 처리공정과 연계함으로써 생산공정과 폐기물 처리 사이의 물질 흐름을 함께 고려하였다.

공급망 및 공정 운영조건의 영향을 분석하기 위해 원료 및 부원료 공급변동, 운송 및 설비 중단, 원료 품질변화, 재고 및 공정 처리능력 변화 등을 시나리오로 적용하였다. 각 조건에 대해 재고 확보, 대체조달, 공정 운영조정 및 조기복구 등의 대응전략을 고려하고 시스템의 처리량, 설비 이용률, 대기, 병목 및 생산 안정성을 비교하였다.

분석 결과, 공급 및 공정변동의 영향은 개별 공정의 처리능력뿐만 아니라 중간재고와 공정 간 완충능력에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 또한 선광제품의 양과 품질변화가 후속 제련공정의 운영에 영향을 미치며, 공정폐기물의 발생 및 저장조건도 전체 시스템의 운영제약으로 작용할 수 있음을 확인하였다. 따라서 개별 공정의 효율뿐만 아니라 공급망 및 전·후단 공정의 상호작용을 함께 고려한 통합적인 운영분석이 필요한 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 저품위 니켈광의 원료 공급 및 운송에서부터 선광, 제련, 공정폐기물 처리 및 제품 공급에 이르는 생산체계를 연계한 DES 기반 통합모델을 구축하였다. 공정별 입·출력과 운영조건을 공급망과 연결함으로써 한 공정에서 발생한 변화가 후속공정과 전체 생산시스템에 미치는 영향을 분석할 수 있는 구조를 마련하였다. 다만 현재 모델의 일부 세부공정과 공정 간 인계조건은 공개자료, 기본 공정모델 및 가정된 입력조건을 바탕으로 구성되어 있어 실제 생산공정의 운영특성을 완전히 재현하는 데에는 한계가 있다. 향후 실제 선광·제련·폐기물 처리 및 공급망 자료를 확보하여 주요 입력변수와 공정 간 연계조건을 단계적으로 보정하고, 공급량, 운송시간, 설비고장 및 원료 특성의 변동성을 보다 현실적으로 반영할 예정이다. 이를 통해 전체 생산체계의 병목과 취약성 및 운영·대응전략을 분석할 수 있는 통합 의사결정 지원모델로 확장하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 과제임. (과제번호: RS-2025-02314475)

니켈광/매트 습식공정기반 미립화 및 침출연구

Hydrometallurgical study on particle size reduction and leaching of Nickel sulfide ore and matte as raw materials

이승훈[1*], 박찬우[1], 손진영[1]
한일화학공업(주)[1)]

초록

니켈황화광 및 황화니켈매트를 원료로 활용하여 습식비드밀을 통한 미립화공정을 수행하고, 이를 통해 회수된 미립화 분말을 기반으로 고압산침출을 적용하여 침출효율을 평가하였다. 미립화 고정의 경우, 우선 조분쇄 단계를 거친후, 비드밀 설비(0.3mm 비즈, 20 pass, 6.8 m/sec 조건)를 활용하여 비표면적 24 ~ 40 m2/g을 갖는 미립화 분말을 제조하였다. 이후 고압반응기를 활용한 침출조건으로써, 변동인자로 황산농도를 7, 8, 9, 10M 의 농도로 변화시켰으며, 고정인자로 고압침출시, 황화광내 황의 융착방지를 위한 첨가제로 lignosulfonate를 3w% 첨가하고, 150도 8시간 조건에서 침출실험을 진행하였다. 그 결과 황산농도가 증가할수록 침출율이 향상되는 결과를 보였으며, 첨가제 사용시 침출율이 추가로 개선되는 경향을 나타내었다. 또한 니켈황화광 보다는 황화니켈매트의 침출효율이 보다 향상된 결과를 나타내었다. 본 연구의 진행결과는 황화광 형태의 기반원료 전처리 및 침출조건최적화에 중요한 기술적 자료로 활용될수 있으며, 또한 2차년도 과제수행목표인 A-HPAL system-1 공정설계 및 실증화 설비구축을 진행하는데 있어 기반자료 활용하고자 한다.

주제어 : 니켈황화광, 황화니켈매트, A-HPAL system

사사

본 연구는 2025년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 “니켈고압산침출 기술개발 및 고순도 황산니켈 제조기술개발”을 수행한 연구결과입니다. (No. RS-2025-02633233)

* Corresponding author : 이승훈 / tiptopper39@hanzinc.com

니켈매트 황산침출에 대한 3가철이온의 영향

Effect of Ferric Ion on the Sulfuric Acid Leaching of Nikel Matte

유경근[1*], 김대령[1]

[1]국립한국해양대학교 에너지자원공학과

초록

본 연구에서는 건식제련공정에서 중간산물로 발생하는 매트로부터 황산을 사용하여 매트 내 니켈을 침출하고자 하였다. 황산침출에서 사용되는 산화제의 종류는 산소와 3가 철이온 등이 있으며 산소를 산화제로 사용할 때는 가압의 조건이 유리하므로 본 연구에서는 가압하지 않고 3가 철이온을 산화제로 사용하였다. 이에 본 연구는 매트 황산침출 중 매트 내 니켈과 구리에 대한 3가 철이온 농도의 영향에 대해 조사하였으며 니켈 매트와 구리 매트를 침출하여 매트 내 니켈과 구리의 비율이 달라도 유사한 경향을 보이는지 확인하였다. 황산농도가 증가함에 따라 니켈과 구리의 비율 상관없이 니켈의 침출 효율이 증가하였고 3가 철이온 농도가 증가할수록 구리의 침출 효율이 증가하였다. 산화제로써 3가 철이온의 반응 여부를 확인하기 위해 산화환원전위를 측정하였으며 산화환원전위가 감소함에 따라 3가 철이온이 산화제로 반응했음을 확인하였다. 3가 철이온이 산화제로 투입되어 니켈의 침출 효율이 향상될 것으로 예상했으나 구리의 침출 효율이 증가한 원인은 침출 반응 중 갈바닉 반응이 발생한 것으로 판단된다. 3가 철이온이 존재하는 황산 용액 내에서 매트의 니켈황화물이 갈바닉 반응에 의해 전자통로 역할을 하여 구리황화물의 침출효율을 향상시키는 것으로 판단되었다.

주제어 : 황산침출, 니켈, 3가철이온, 갈바닉반응

*Corresponding author : 유경근 / kyoo@kmou.ac.kr

탄자니아산 니켈광의 니켈농축 및 미세분말화 공정 연구

A Study on the Nickel Concentration and Fine Powder Production Processes for Nickel Ore from Tanzania

배성욱[1], 김명석[1], 신재홍[1], 서석준[1,*]
[1]한국생산기술연구원 국가희소금속센터

초록

저품위 니켈광으로부터 고효율·저에너지·환경 유해물질 저감형 공정을 통해 고순도 니켈 분말을 제조하기 위해 본 연구에서는 맥석 성분을 분리하는 smelting 공정과 매트 중 철을 제거하는 converting 공정 및 전기화학적 미세분말화 공정으로 구성된 니켈 전주기적 공정을 설계하고자 하였다. 이를 위해 탄자니아산 니켈광을 대상으로 두 단계 건식 공정의 조건을 도출하고, 탈철에 적합한 슬래그 첨가제를 선정하고자 하였다. 실험을 통해 탄자니아산 니켈광의 용융 개시 온도는 1230 ℃로 확인되었으며, smelting 공정에서 원료 중 철의 약 35 %를 제거하였다. 농축된 저품위 니켈 매트를 대상으로 성분분석과 열역학 계산을 수행하여 완전 액상으로 존재하는 온도 영역을 확인하고, 탈철 공정 온도를 1500 ℃로 설정하였다. SiO_2계 슬래그에서는 탈철이 진행됨에 따라 FeO 농도가 증가하여 슬래그 점도가 상승하고 FeO 용해도가 한계에 도달하는 문제가 예상된다. 이를 완화하기 위해 Na_2O, CaF_2, Li_2O, K_2O 및 B_2O_3를 첨가제 후보로 선정하여 열역학 계산과 슬래그 물성 평가를 수행하였다. 그 결과 B_2O_3가 가장 높은 FeO 용해능과 낮은 슬래그 점도를 나타내어 매트-슬래그 분리에 가장 유리한 것으로 평가되었다. 또한 두 단계 건식공정을 통해 제조된 고품위 니켈 매트를 양극산화반응을 유도하는 미세분말화 공정을 적용한 결과, 약 102㎚의 $Ni(OH)_2$ 분말이 형성됨을 확인하였다. 본 연구 결과는 니켈 정련 공정의 탈철 효율 및 니켈 농축 향상과 미세분말 제조를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

주제어 : 저품위 니켈광, 공정폐기물, 입도분포, 자원화

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02634555)

* Corresponding author : 서석준 / sjseo@kitech.re.kr

고순도 니켈정제 효율 향상을 위한 니켈 매트 침출액 내 미량 코발트, 망간의 선별적 분리 거동 연구

Selective Separation Behavior of Trace Cobalt and Manganese in Nickel Matte Leachate for Enhanced High-Purity Nickel Refining Efficiency

이진영[1*], 강희남[1], 이태혁[1], 장윤재[1]
[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부

초록

본 연구는 니켈 매트 침출액으로부터 고순도 니켈 정제 효율을 극대화하기 목적으로, 침출액 내에 공존하는 미량의 코발트 및 망간 등 불순물의 선별적 분리 거동을 체계적으로 규명하고자 하였다. 고순도 니켈 생산 과정에서는 미량 금속 성분들의 상호 간섭을 제어하고 선택적으로 분리하는 것이 최종 제품의 순도를 확보하는 핵심 과제이다. 이를 위해 구리 및 철과 같은 선행 불순물을 단계별 전처리 공정을 통해 철저히 제거함으로써 후속 분리 공정의 효율을 높였다. 특히 본 연구에서는 기존의 개별 원소별 회수 공정 대신 높은 A/O 비(A/O ratio) 조건을 적용하여, 유기상 내에 미량 성분을 고농도로 농축·회수하는 전략을 도입하였다. 이를 통해 향후 적정 농도 영역에서 효율적인 분리 회수가 가능하도록 설계하였으며, 용매추출 공정 전반의 조작 효율성을 대폭 향상시켰다. 결과적으로 주요 회수 대상인 니켈의 손실을 방지하고 전체적인 회수 효율을 향상시키는 공정 체계를 확립하였으며, 향후 연속 공정에서의 최적화 및 경제성 평가에 관한 추가 연구를 진행할 예정이다.

주제어 : 황화니켈매트, 용매추출, 불순물제어

사사

본 연구는 2025년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 “니켈고압산침출 기술개발 및 고순도 황산니켈 제조기술개발”을 수행한 연구결과입니다. (No. RS-2025-02633233)

* Corresponding author : 이진영 / jinlee@kigam.re.kr

산화광-10

탈철니켈매트 내 니켈 침출률 향상에 관한 연구

Study on the Enhancing Nickel Leaching Efficiency from Fe-Depleted Nickel Matte

이준섭[1*], 강동준[1], 김해곤[1], 김혜림[1]
[1]한국광해광업공단 기술연구원

국내 주요산업인 전기차, 이차전지 산업의 성장으로 주원료 중 하나인 니켈(Nickel)의 안정적인 공급망 구축이 중요하다. 특히 고품위 니켈 광석 고갈 및 자원민족주의의 대두로, 저품위 광석 개발이 활발히 이루어지고 있으며, 저품위 광석에서 니켈을 효율적으로 추출해내기 위해 정광제조-니켈매트제조-습식제련법을 통해 니켈을 생산하는 공정 개발이 진행중이다. 본 연구에서는 탈철니켈매트 내 니켈 침출률 향상을 위해 상압 조건에서 기초 침출 특성을 조사하였다.
본 연구에서는 시중 니켈매트 1종을 수십 마이크로 단위로 미분쇄한 시료와 공동연구기관인 한국생산기술연구원에서 전기화학적 분말화(Electrochemically Assisted Powderization; EA-P)공정을 통해 생산된 시료 1종으로 실험을 진행하였다. 상압침출실험을 통해 최적조건을 도출하고자 하였으며, 황산농도, 산소투입여부, 광액농도 등을 주요 변수로 두어 실험을 하였으며, 해당 실험을 통해 90% 이상의 침출률을 확보하고자 하였으며, 본 연구의 결과는 향후 공정설계 및 가압침출의 기초자료로 활용하고자 한다.

주제어 : Nickel matte, Leaching Efficiency, Enhancement

사사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02314475)

* Corresponding author : 이준섭 / taengjum@komir.kr.kr

니켈매트 활용, 분리막 전해침출을 통한 고순도 황산니켈 수용액 제조기술 개발

Development of a High-Purity Nickel Sulfate Solution Process via Membrane-Assisted Electro-Leaching of Nickel Matte

조주영[1*], 강용호[1], 황봉준[1], 남용준[1]
[1](주)한라캐스트

초록

본 연구는 니켈 정광으로부터 니켈 황화물을 제조하고 이를 이용하여 황산니켈 결정을 제조하는 기술개발에 있어서 니켈 황화물 제조 및 황산니켈 수용액으로부터 황산니켈 농축 결정화 기술을 개발하고자 한다. 본 차년도는 전체 연구의 2차년도 기술개발로서 황산니켈 결정을 얻기 위한 수용액 제조를 위해 상용화된 Ni matte를 활용하여 전해침출 및 고순도화를 통해 황산니켈 수용액을 제조하는 원천기술을 개발하였고 농축 결정화를 통해 황산니켈 샘플을 제조하고자 하였다.

상용화 Ni-Matte의 성분을 분석하였으며 이를 가공 후 분리막 전해침출 하였으며 전해에 따른 목표비중 도달 여부를 확인하였으며 저품위 니켈광과 용해량을 비교하였다. 또한 전류밀도, 황산수용액 농도, 전해시간에 따른에 따른 용해효율을 확인함으로써 침출 조건을 최적화 하였다.

이후 약전해 및 용매추출 등의 고순도화 공정을 통해 고순도 황산니켈 수용액을 제조하였으며 이를 농축 및 결정화 함으로써 황산니켈 결정을 얻었고 순도 분석을 통해 Lab scale 에서의 샘플 제조 가능성을 확인하였다.

Keywords : Ni matte, Electro-Leaching, Membrane Separation, Nickel Sulfate, Crystallization

감사의 글

이 연구는 2026년도 기후에너지환경부 및 한국에너지기술평가원 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2025-02314475)

* Corresponding author : 조주영 / jycho@hlcast.co.kr

탄자니아 니켈광 광미의 물리화학적 특성 및 니켈 존재형태 평가

Physicochemical Characterization and Nickel Speciation of Nickel Mine Tailings from Tanzania

배상용[1], 주원정[2], 김재현[1], 정은혜[1,2*]

[1]서울대학교 에너지시스템공학부, [2]서울대학교 에너지자원신기술연구소

초록

본 연구에서는 탄자니아 니켈 광산에서 발생한 산화광 및 황화광 광미를 대상으로 물리화학적 특성과 니켈의 존재형태를 평가하였다. 황화광 광미는 선광공정에서 발생한 미세 입자 시료이며, 산화광 광미는 선광 전 체가름 과정에서 제외된 비교적 조립질의 시료이다. 입도분석 결과, 황화광 광미는 95.1%가 75 μm 이하의 미세 분획으로 구성되었으며, 산화광 광미는 2 mm 이상의 조립질 분획이 45.33%로 높은 비율을 차지하였다.

시료의 물리화학적 특성을 규명하고, 니켈 자원회수 및 산업소재로의 활용 가능성을 평가하기 위해 전함량 분석, XRF, XRD 및 원소분석을 수행하였다. XRF 분석 결과 산화광 광미는 SiO_2, Fe_2O_3, NiO가 주성분으로 나타나 Si와 Ni를 비교적 많이 포함하는 것으로 확인되었다. 반면 황화광의 경우 SIO_2, Fe_2O_3, SO_3이 주성분이며 Ni 함량은 산화광 광미보다 낮았다. XRD 분석 결과, 산화광은 quartz, clinochlore, dolomite, magnesite등이 존재하여 Si-Mg-Fe 계열 규산염 및 탄산염 광물 중심의 조성을 가지며, 뚜렷한 nimite피크가 관찰되어 Ni이 규산염 광물 형태로 존재함이 확인되었다. 황화광의 경우 pyrrhotite, epsomite등 철 황화광물 및 황산염 광물 조성이 확인되었다.

다음으로 유해성 및 용출 가능성을 평가하기 위해 산화광, 황화광 광미를 대상으로 TCLP, KSLT 용출시험을 수행하였다. 주요 중금속 Pb, Cu, As, Cd, Cr의 용출 농도를 평가한 결과, 강산성 조건(pH 2.88)의 TCLP 시험에서 두 광미 모두 대상 중금속이 불검출되어 규제 기준을 만족했으나, 약산성 조건(pH 5.8-6.3)의 KSLT 시험에서 황화광 광미의 Cu 용출농도는 7.70mg/L로 규제 기준을 초과하였다. 이는 황화광 광미의 Cu 용출 저감을 위한 별도의 처리 공정 검토가 필요함을 시사한다.

왕수분해 기반 전함량 분석을 진행하여 광미 내 원소분석을 수행했으며, Tessier 연속추출을 통해 Ni를 포함한 주요 금속의 존재형태를 교환성, 탄산염 결합성, Fe/Mn 산화물 결합성, 유기물/황화물 결합성 및 잔류성 분획으로 구분하였다. 이를 통해 산화광 및 황화광 광미의 입도와 광물학적 특성에 따른 금속 거동을 비교하고, 니켈 자원회수 및 관리 전략 수립을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

주제어 : 탄자니아 니켈광, 산화광, 황화광, 공정폐기물, 자원회수

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02634555)

* Corresponding author : 정은혜 / echung@snu.ac.kr

탄자니아 니켈광 광미의 공정 조건에 따른 유가금속 침출 특성 평가

Evaluation of Valuable Metal Leaching Behavior from Tanzanian Nickel Ore Tailings under Various Process Conditions

이다경[1], 강희원[1] 김정우[1], 김현중[1*]
한양대학교 자원환경공학과[1]

Abstract

니켈 자원의 안정적인 확보와 저품위 자원의 효율적인 활용을 위해, 니켈광의 선광 공정에서 발생하는 광미의 재자원화에 대한 관심이 증가하고 있다. 광미에는 선별 및 회수 공정 이후에도 Ni, Co 등의 유가금속이 잔류할 수 있으며, 이들의 추가 회수를 위해서는 광미의 광물학적 특성과 유가금속의 존재 형태 및 분포를 고려한 전처리와 침출 공정의 적용이 필요하다. 이에 본 연구에서는 탄자니아 니켈광에서 발생한 황화광 및 산화광 광미를 대상으로 공정 조건에 따른 유가금속의 침출 특성을 평가하였다. 이를 위해 광물학적·화학적 특성 분석을 통해 주요 광물상, 원소 조성 및 입도별 유가금속 분포 특성을 확인하였다. 황화광 광미의 경우, 주요 광물상인 자황철석(pyrrhotite)의 산화 조건에 따른 Ni 및 Co의 침출 특성을 평가하고, 후속 침출 공정의 적용 가능성을 검토하였다. 산화광 광미의 경우, 건식 및 습식 체질을 통한 입도별 Ni 및 Co의 분포를 확인하고 대표 구간의 침출 특성을 평가하였다. 본 연구를 통해 탄자니아 니켈광 광미 내 유가금속의 분포 및 침출 특성을 파악하고, 광미 유형별 적절한 전처리 및 침출 조건을 검토함으로써 유가금속 회수 및 광미 재자원화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Key words : Nickel ore, Tailings, Valuable metals, Metal distribution, Leaching behavior

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2025-02634555)

* Corresponding author : 김현중 / kshjkim@hanyang.ac.kr

산화광-14

니켈광물 공정폐기물 재활용을 위한 DEM 기반 혼합 공정 모델 개발 및 혼합 특성 분석

Development of a DEM-Based Mixing Process Model and Analysis of Mixing Characteristics for Recycling Nickel Mineral Process Waste

이한솔[1], 이경현[1,2], 김광목[1,2], 최준현[1,2], 이훈[1,2*]

[1]한국지질자원연구원 자원활용연구본부, [2]과학기술연합대학원대학교 자원공학과

초록

본 연구에서는 니켈광 선광·제련 공정에서 발생하는 공정폐기물의 재활용 공정 적용을 위해 DEM(Discrete Element Method) 기반 혼합공정 시뮬레이션 모델을 구축하고, 주요 공정조건에 따른 입자 혼합 및 분산 특성을 분석하고자 하였다. 실제 재활용 공정에서 운용 중인 산업용 혼합기를 대상으로 설비 형상과 운전조건을 조사하고, 이를 기반으로 혼합공정 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 혼합 대상 물질은 니켈 공정폐기물과 결합재이며, 각 물질의 입도분포와 밀도 등의 물성을 해석 조건에 반영하였다. 혼합공정의 주요 변수로 혼합기 회전속도와 재질 혼합비(공정폐기물-결합재)의 혼합비로 선정하였으며, 조건 변화에 따른 입자 거동과 혼합 특성을 비교·분석하였다. 혼합 성능은 혼합기 내부의 공간적 입자 분포와 혼합지수를 이용하여 평가하였으며, 시간에 따른 혼합 균일도 변화와 각 성분의 분산 특성을 분석하였다. 이를 통해 실제 공정조건을 반영한 혼합공정 내 입자 거동과 혼합 특성을 정량적으로 평가할 수 있는 DEM 기반 해석 방법을 제시하였다. 본 연구 결과는 향후 니켈 공정폐기물 재활용을 위한 혼합공정의 운전조건 평가 및 공정 최적화를 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : 니켈광, 재활용, 공정폐기물, 혼합공정, DEM

사사

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02634555)

* Corresponding author : 이훈 / hoonlee@kigam.re.kr

탄자니아 니켈광 광미를 활용한 건설자재 개발에 관한 기초연구

A Study on the Development of Construction Materials Using Nickel Ore Tailings from Tanzania

윤성진[1*], 이영원[1], 이종주[1], 박수현[2]
[1]㈜대웅 기술연구소, [2]㈜지안산업 기술연구소

초록

본 연구에서는 탄자니아 니켈 광산에서 발생한 산화광 광미(선광 찌꺼기)를 건설자재 원료로 활용하기 위해, 잔골재 대체 가능성과 결합재 배합별 강도 발현 특성 및 수화생성물 특성을 검토하였다. 이를 위해 니켈 광미의 입도 특성을 분석하고, 보통 포틀랜드시멘트(OPC), 고로슬래그 미분말(SP), 플라이애시(FA) 등을 조합한 다양한 배합의 결합재를 제조하여 재령별 압축강도 시험과 SEM-EDS 미세구조 분석을 실시하였다. 건설자재 성능 평가를 위한 결합재:잔골재비는 1:1, 물-결합재비(W/B)는 50%로 고정하였으며, 잔골재로는 니켈 광미 또는 대조군으로 일반 규사를 사용하였다. 공시체의 압축강도는 재령 3일, 7일, 28일에 측정하였고, 각 배합의 수화생성물 및 미반응 입자의 형상과 조성은 주사전자현미경(SEM) 및 에너지 분산형 X선 분광법(EDS)으로 분석하였다.

입도 분석 결과, 니켈 광미의 입경은 약 300 ∽ 2,000㎛ 범위에 분포하였으며, 특히 700 ∽ 1,000 ㎛ 부근에 집중되어 있어 잔골재 대체에 적합한 입도 분포를 갖는 것으로 확인되었다. OPC 100% 배합 및 SP와 FA 혼합 배합의 재령 28일 압축강도는 광미와 규사 사용 시 동등한 수준으로 나타났다. 특히 SP와 FA계 경화체는 규사 배합 대비 우수한 강도를 나타내어, 광미의 골재 부착성 및 물리적 충전성이 우수함을 입증하였다. 미세구조 분석 결과, 시멘트계 경화체에서는 C-S-H 겔과 $Ca(OH)_2$ 수화물의 생성과, 광미와 결합재 사이의 계면이 치밀하게 형성되어 있음을 관찰하였다. 또한, SP와 FA계 경화체에서는 치밀한 C-(A)-S-H 및 에트링가이트 복합 수화물이 조직을 형성하여 우수한 강도 발현에 기여하였다. 결과적으로 탄자니아 산화광 광미는 잔골재로 적용 시 일반 규사와 동등하거나 그 이상의 압축강도를 발현하여, 천연 잔골재 대체재로서의 높은 가능성을 확인하였다.

주제어 : 탄자니아 니켈광, 광미, 선광 찌꺼기, 재활용, 건설자재

사사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-02634555)

* Corresponding author : 윤성진 / jiniyoon9@gmail.com

니켈산화광 광물찌꺼기의 비소흡착 특성평가

Evaluating of Arsenic Adsorption Characteristics of Nickel Oxide Ore Tailings

최의규, 이영재, 김행운, 박제현*
한국광해광업공단 기술연구원

초록

니켈광은 산화광과 황화광으로 구성되며, 대표적인 산화광은 laterite광으로 니켈 제련 원료로 많이 사용된다. 일반적으로 표층으로부터 심도에 따라 ferricrete, limonite, nontronite, saprolite 형태로 연속적으로 분포하며, 크게 Limonite Ore, Smectite Ore, Saprolite Ore으로 구분된다. 이 중 Limonite Ore 은 Fe 함량이 매우 높고 Mg 함량이 낮아 산을 이용한 고온고압침출공법(HPAL, High Pressure Acid Leaching)을 통해 Ni을 회수하며, 이러한 공정에서 발생되는 공정부산물(광물찌꺼기)은 상대적으로 높은 함량의 Fe 를 함유하고 있다.

위와 같은 니켈 산화광의 처리 공정에서 발생하는 공정부산물은 채광량의 90% 이상으로 넓은 부지의 적치장이 소요되며, 장기간 적치 시 침출수 발생 및 유실 등으로 2차 오염 유발 우려가 있어 지속적인 광산개발 활동을 저해한다.

본 연구에서는 해당 광물찌꺼기의 함철 특성을 활용하여 비소흡착 소재로의 활용 가능성을 평가하였다. 니켈산화광 광물찌꺼기의 성분분석(ICP-OES) 결과 Fe 함량은 29.2%로 확인되었으며, 함철 특성을 이용한 수처리용 흡착제로의 활용 가능성 평가를 위해 미립의 광물찌꺼기를 Granule 형태로 성형하였다. 수중에서 광물찌꺼기의 Granule 형태 유지를 위해 무기바인더와 응집제를 배합하여 흡착제를 성형하였으며, 장기간 수중에서 형태가 유지되는 것을 확인 후 비소흡착 실험을 실시하였다. 비소흡착 특성은 수처리 공정에서 공침 후 잔류되는 비소 농도를 고려하여, 1ppm 농도의 비소 용액에 1g/L 흡착제를 넣어 반응시간에 따른 용액 내 비소 함량을 분석하여 제거율을 계산하였다. 실험 결과 24시간의 반응 시 비소 제거율은 68.52%로 니켈산화광 광물찌꺼기의 비소흡착 특성은 확인되었으며, 향후 Granule 제조시 중화공정에서 발생되는 Fe 슬러지 혼합 등 흡착능 개선을 위한 추가 연구를 통해 공정부산물의 비소흡착제로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

주제어 : 니켈광, 습식제련, 공정부산물, 소재화, 흡착제

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. RS-2025-02634555).

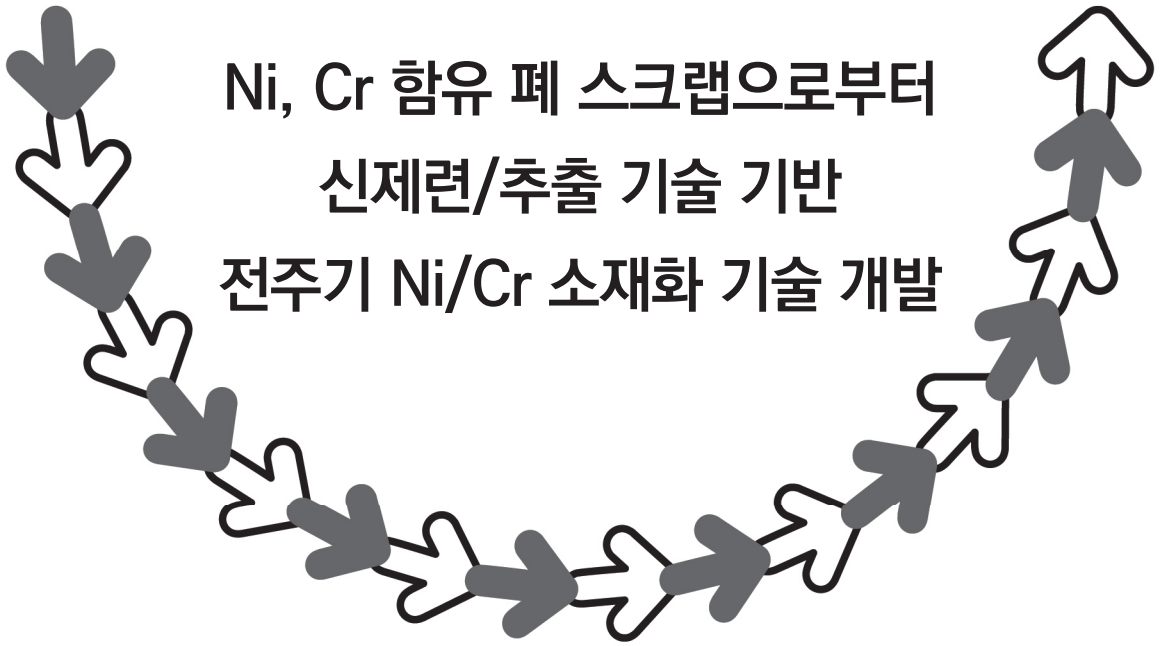
* Corresponding author : 박제현 / jayhp@komir.or.kr

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

Ni, Cr 함유 폐 스크랩으로부터 신제련/추출 기술 기반 전주기 Ni/Cr 소재화 기술 개발



The Korean Institute of Resources Recycling

저품위 STS 스크랩으로부터 황산니켈 제조를 위한 Bench Scale 침출·정제 공정 최적화

Bench Scale Leaching and Purification Process Optimization for Nickel Sulfate Production from Low Grade STS Scrap

강용호[1*], 박경태[2], 김홍인[3], 이종혁[4], 강정신[5], 최진섭[6], 송민섭[7]

[1](주)한라캐스트, [2]한국생산기술연구원, [3]한국지질자원연구원, [4]한국나노오트, [5]서울대학교, [6]인하대학교, [7]코스모신소재

초록

이차전지 산업의 급성장에 따라 황산니켈 수요가 증가하고 있으나, 국내 니켈 원광 부재 및 자원 보유국의 수출 규제로 인해 안정적 원료 확보가 어려운 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 발생 저품위 STS 스크랩(Ni 약 10 wt%)을 원료로 활용하여, 기존 고온·고압 건식 공정의 한계를 극복하는 저온·상압 기반 습식 침출·정제 공정 기술을 개발하고자 하였다. 3차년도에는 각 단위 공정의 bench scale 최적화를 중점적으로 수행하였다. 분리막 직접 침출 bench scale(100 L, 30 kg 이상/batch) 장치를 구축하여 황산 농도, 온도, 전류밀도 등 주요 운전 변수에 따른 침출 거동을 평가하고 연속 운전 조건을 확보하였다. 이온교환수지 bench scale(20 L/batch) 장치를 통해 침출액 내 Fe, Cr, Mn 등 불순물의 선택적 제거 효율을 검증하였으며, 용매추출 bench scale(1단 기준 2 L) 다단 추출 조건을 최적화하여 고순도 Ni 용액을 확보하였다. 농축·결정화 Lab scale에서는 냉각속도, 농축비 등 공정 변수를 도출하여 황산니켈 결정의 순도 및 수율을 확인하였다. 현재 각 단위 공정의 bench scale 연계 운전을 통해 전체 공정 통합 검증을 수행하고 있다.

Keywords : STS scrap, Hydrometallurgy, Recovery of valuable metals, Recycling. Electrolytic leaching

감사의 글

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00469049)

* Corresponding author : 강용호 / robokang@hlcast.co.kr

폐스크랩 기반 고순도 전해니켈 회수 및 MLCC용 초미립 나노분말 합성 공정 최적화

Process Optimization for High-Purity Electrolytic Nickel Recovery and Ultra-Fine Nano-Powder Synthesis for MLCC from Waste Scrap

심문수[1*], 김지용[1], 강민석[2], 심재진[3], 유병욱[4], 강희수[5]

[1]㈜엔에이치리사이텍컴퍼니, [2]창성, [3]한국생산기술연구원, [4]한국재료연구원, [5]포항산업과학연구원

초록

본 연구에서는 Ni·Cr 함유 폐스크랩으로부터 고순도 전해니켈과 MLCC 내부전극용 80 nm급 초미립 나노분말을 제조하는 소재화 일관 공정의 3차년도 개발 성과를 보고한다. 주관기관을 중심으로 50L급 전해제련 장치의 전해질 공급 농도, pH 및 인가 전력을 최적화하여 순도 99.9% 이상의 전해니켈 회수 공정을 확립하였으며, 스케일업을 위한 200L급 파일럿 전해조의 전극 배열 및 단락 방지 설계를 도출하였다. 이와 연계하여 전기화학 전산모사 검증, 불용성 양극 선정 및 음극 대체재 검토를 병행하였다. 한편, 스크랩 잔사 유래 습식 1차 결정으로부터 고순도 황산니켈(≥99.5%) 및 염화니켈(≥96%)로의 전환 공정을 최적화하였다. 이를 원료로 벤치급 반응기에서 반응 농도·온도 및 환원 거동을 정밀 제어하여 80 nm급 분말 합성 공정을 확립하였고, 소결억제제 균일 코팅과 고순도화 열처리를 적용해 탄소 등 잔류 불순물을 효과적으로 저감하였다. 본 성과는 전량 수입에 의존하던 고순도 전해니켈과 전자용 분말의 국산화 및 상용 스케일업을 위한 핵심 기반 기술을 확보했다는 데 의의가 있다.

주제어 : 전해니켈, 전해제련, 니켈나노분말, MLCC

* Corresponding author : 심문수 / simms@nhrecytech.com

니켈화합물 활용 고활성 니켈 분말 제조를 위한 카보닐 공정 기술 개발 및 촉매특성 평가

Development of Carbonyl Process Technology for Producing Highly Active Nickel Powder Using Nickel Compounds and Evaluation of Catalytic Properties

이장수[1*], 이서환[1], 최상훈[2], 김호병[2], 김인호[3], 신재홍[4], 김영재[5], 이근재[6]
[1]비씨엔씨(주), [2]고등기술연구원, [3]엔에이티엠, [4]한국생산기술연구원, [5]인하대학교, [6]단국대학교

초록

고수요가 예상되는 이차전지용 에너지 소재 및 촉매용 고활성 니켈을 일부 원료 보유국의 개발 제한, 수출 규제 등으로 공급 제한 가능성과 가격 급등에 대응하기 위해 Ni-Cr 함유 스크랩 으로부터 회수한 니켈 화합물 활용 친환경 핵심 금속 회수·재자원화 제조기술 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 Ni-Cr 함유 스크랩을 활용하여 건/습식 기반 기존기술의 한계를 원천적으로 극복하는 공정 개발을 도전적으로 실시하여, 카보닐화 반응기의 임펠러 속도에 따른 혼합 특성을 시뮬레이션하였고, 니켈 화합물의 열분해 전 건조 전처리 유무에 따른 니켈 산화물의 생성 거동 및 수소 환원 특성을 비교 평가하여, 건조 조건이 후속 수소 환원 공정에 미치는 영향을 규명하였으며, 카보닐 니켈 분말 제조를 위해 10 g/batch lab-scale 카보닐화 열분해 연속 공정 장비를 구축하고 공정 테스트를 수행하여 주요 운전 조건을 확보하였다. 1 kg/batch lab-scale 카보닐 공정장비를 구축하여, 공정 운전 검증 및 시스템 고도화를 수행하였다. 또한 니켈의 카보닐화 속도 개선을 위해 반응기 내부 교반 및 촉매활용방안을 연구하였으며, 교반 속도 변화에 따른 니켈 카보닐화 전환율을 정량적으로 평가하였고, H2S 촉매가스 투입에 따른 니켈 카보닐화 반응율 평가를 위한 기초연구를 수행하였다.

촉매 특성을 평가하기 위하여, 자력을 이용해 금속 니켈 촉매를 전극에 물리적으로 증착한 뒤, 니켈 올살레이트 착물을 활용하여 촉매 입자간 계면 결합을 향상 시켰으며, 촉매의 미세구조와 수소제조용 촉매 특성을 평가하였다.

주제어 : 니켈, 카보닐니켈, 니켈촉매, 고활성니켈, 수소환원

감사의 글

이 연구는 2026년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(RS-2024-00469049)

*Corresponding author : 이장수 / leejs@bcnc.co.kr

니켈, 크롬 함유 폐스크랩 내 니켈/크롬 추출 및 소재화를 위한 신제련/추출 공정 기술 개발

Development of New Metallurgy and Extraction Process Technology for Nickel/Chromium Recovery and Materialization from Ni Cr Waste Scrap

강용호*
한라캐스트

초록

니켈(Ni)과 크롬(Cr)을 포함하는 스테인리스 스틸(STS) 스크랩의 약 5 %는 오염·도색 등의 문제로 고철로 분류되어 저가로 해외에 수출되고 있다. 한편, 이차전지, MLCC, 촉매 등 산업의 성장에 따라 니켈 수요가 급증하고 있으나, 국내 원광 부재 및 자원국의 수출 규제로 안정적인 원료 확보가 어려운 상황이다. 이에 본 연구에서는 저품위 STS 스크랩으로부터 신제련/추출 기술을 활용하여 전주기적 Ni/Cr 소재화 기술을 개발하고자 한다.

본 과제는 총괄 및 3개 세부과제로 구성되며, 1세부에서는 건/습식 공정을 통한 Cr 분리회수 및 황산니켈·황산철·크롬화합물 제조 기술을, 2세부에서는 카보닐 공정을 활용한 고활성 니켈 분말 제조 및 촉매 특성 평가 기술을, 3세부에서는 전해니켈 제련 및 MLCC용 초미립 니켈 나노분말 제조 기술을 각각 개발하고 있다. 총괄에서는 스크랩 수급 안정화를 위한 수입검사 및 MOU 체결을 완료하고, 워크샵을 통해 세부 간 협력 방안을 수립하였다.

3차년도 연구에서 1세부는 분리막 직접 침출 bench scale 장치를 구축하여 연속 운전 조건을 확보하였고, 이온교환수지 및 용매추출 bench scale 최적화를 통해 불순물을 선택적으로 제거하여 고순도 Ni 용액을 확보하였으며, 농축·결정화 공정 변수를 도출하였다. 2세부는 lab-scale 카보닐화-열분해 연속 공정 장비를 구축하여 운전 검증 및 시스템 고도화를 수행하였고, 교반속도·촉매가스 조건에 따른 카보닐화 전환율을 평가하였으며, 니켈 촉매의 수소제조 특성을 검증하였다. 3세부는 전해제련 장치의 운전 조건을 최적화하여 고순도 전해니켈 회수 공정을 확립하고 파일럿 전해조 설계를 도출하였으며, 고순도 황산니켈·염화니켈 전환 공정 최적화 및 80 nm급 MLCC용 니켈 나노분말 합성 공정을 확립하였다. 현재 각 단위 공정의 bench/pilot scale 연계 운전을 통해 전체 공정 통합 검증을 수행하고 있다.

* Corresponding author : 강용호 / robokang@hlcast.co.kr

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

금속부산물을 활용한 탄소저감형 합금강 전구물질 제조 기술 개발

The Korean Institute of Resources Recycling

철강 열간압연공정에서 발생한 밀스케일(FeO) 및 석회부산물(CaO)을 활용한 탈인제 개발을 위한 원료 선정 및 탈인능 시뮬레이션

Raw Material Selection and Simulation of Dephosphorization Performance for a Dephosphorizer by Using byproduct

박찬근[1], 이창민[1*]
렘코 기술연구소[1]

초록

철강산업의 탄소중립과 자원순환을 실현하기 위해서는 기존 천연원료를 철강공정에서 발생하는 부산물로 대체하는 기술 개발이 요구된다. 용선 탈인공정에서 사용되는 탈인제는 주로 CaO 와 FeO로 이루어져 있다. CaO는 석회석 소성 과정에서 CO_2가 발생하며 FeO 원료 역시 원료의 채굴, 이송, 소결 과정에서 대량의 CO_2가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 철강 공정에서 발생하는 부산물을 활용하여 자원 순환형 CaO-FeO 계 탈인제를 개발하고자 한다.

주제어 : 부산물, 탈인제, 밀스케일, 석회부산물, 탈인반응

서론

철강 산업은 대표적인 에너지 다소비 산업으로서 탄소중립을 달성하기 위해 에너지 저감과 함께 원료 및 부원료의 탄소배출 저감이 요구되고 있다. 최근에는 슬래그, 슬러지, 분진 등을 활용한 다양한 부산물을 활용하여 기존 공정에 사용되고 있는 부원료를 대체하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 용선 탈인공정에서 활용되는 CaO, FeO의 제조 및 원료 생산 과정에서 탄소배출을 저감하기 위해 철강 공정 부산물의 활용이 필요하다.

재료 및 실험방법

본 연구에는 철강 열간 압연 공정에서 발생한 밀스케일을 FeO계 원료로 사용하고, CaO계 석회 부산물을 CaO 공급원으로 사용하였다. 각 부산물은 XRF 분석을 통해 화학 조성과, XRD 분석을 통해 상을 분석하였다. 밀스케일은 주로 FeO, Fe_3O_4로 이루어져 있으며 미량의 Al_2O_3, SiO_2, MnO 성분을 포함한다. CaO계 부산물은 CaO, $CaCO_3$, SiO_2, MgO, Al_2O_3, Fe_2O_3를 포함한다.

Table 1. Chemical composition of millscale

샘플명	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	MnO	MgO	Al_2O_3	ZnO	CuO	Cr_2O_3	SO_3	P_2O_5	Na_2O
BD 스케일	97.70	0.09	0.96	0.76	0	0	0	0.07	0.27	0.04	0.05	0
봉강 스케일	97.30	0.12	0.83	0.80	0.01	0	0.01	0.07	0.32	0.03	0.1	0.16

* Corresponding author : 이창민 / leecm@remco.co.kr

Table 2. Chemical composition of dust

샘플명	CaO	Fe_2O_3	SiO_2	MnO	MgO	Al_2O_3	ZnO	Cr_2O_3	SO_3	P_2O_5
부원료 집진 분진	58.22	12.72	7.23	4.29	10.2	4.15	0.06	2.27	0.34	0
석회소성 집진분진1	97.46	0.43	0.47	0.05	0.6	0.21	0.01	0.01	0.60	0
석회 집진분진2	97.48	0.48	0.66	0.04	0.8	0.25	0.01	0.02	0.09	0
제강 분진	60.68	20.74	3.27	2.00	3.2	1.96	2.28	0.12	3.94	0.02

Table 3. Experimenal conditions

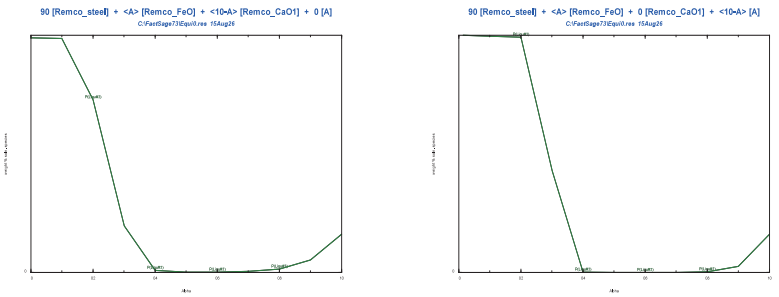
실험조건	
온도	1450°C
용선 조성	Fe-4wt%C-0.5wt%Si-0.5wt%Mn-0.3wt%P-0.05wt%S
용선 함량	90g
플럭스 함량	10g

Table 4. Chemical composition of Dephosphorizer

탈인제 조성				탈인제 조성			
	FeO 원료(BD)	CaO 원료 1 (부원료)	CaO 원료 2 (싸이클론 집진)		FeO 원료(BD)	CaO 원료 1 (부원료)	CaO 원료 2 (싸이클론 집진)
0	0	10	X	0	0	X	10
1	1	9		1	1		9
2	2	8		2	2		8
3	3	7		3	3		7
4	4	6		4	4		6
5	5	5		**5**	**5**		**5**
6	6	4		6	6		4
7	7	3		7	7		3
8	8	2		8	8		2
9	9	1		9	9		1
10	10	0		10	10		0

결과 및 고찰

그림 1의 탈인제 조성에 따른 용강내 인 함량을 나타내었다. CaO-FeO계 탈인제에서 FeO 함량이 증가함에 따라 용강 내 인 함량이 감소하는 영향을 나타냈다. 그러나 FeO 함량이 일정 수준 이상으로 증가할 경우 오히려 탈인율이 감소하는 경향을 보였다. 따라서 CaO-FeO 탈인제의 최적 FeO 함량 및 조성에 따른 탈인 거동에 대한 추가적인 연구가 필요하다.



(a) 부원료 (b) 석회 소성 분진

Fig. 1. Phosphorous content in molten steel varying Dephosphorizer

결론

본 연구에서는 철강공정에서 발생하는 CaO 및 FeO계 부산물을 활용한 자원순환형 CaO-FeO계 탈인제 개발을 목적으로 FactSage 열역학 계산을 수행하여 부산물별 용선 탈인 거동을 비교하였다.

폐 Mg 탈황제의 CaO 코팅이 탈황능에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of CaO Coating on the Desulfurization Behavior of Waste Mg Powder

정재윤[1], 강유빈[1], 채홍준[1*]
고등기술연구원[1]

초록

Mg는 소량 첨가로도 탈황능이 높으나, 원료 단가가 높고 비점과 밀도가 낮아 취입 시 기화·부상 손실로 이용효율이 저하된다. 본 연구에서는 아토마이징 공정에서 발생한 상품성 저하 Mg 분말을 원료로 활용하고, 유성밀로 CaO를 기계적 코팅하여 기화 속도 제어 및 체류시간 확보를 도모하였다. 코팅 분말은 SEM-EDS·XRD로 코팅층을 평가하였으며, 고황 철계 모합금에 lance 취입하여 미코팅 분말과 탈황률 및 탈황 속도상수를 비교하였다. 또한 슬래그 분석으로 황화물 생성 거동을 확인하여 CaO 코팅층의 영향을 검토하였다.

서론

Mg는 황에 대한 화학적 친화력이 커 안정한 MgS를 형성하며, 소량 첨가만으로도 높은 탈황능을 나타내는 탈황제이다. 그러나 CaO계 등 범용 탈황제에 비해 원료 단가가 높고 국제 시세 변동 폭이 커 사용에 제약이 있다. 또한 Mg는 비점이 제강 온도보다 낮고 밀도가 용융 철계 합금보다 현저히 낮다. 이 때문에 취입 시 급격한 기화와 부상 손실이 발생하여 탈황제 이용효율이 저하된다.

본 연구에서는 원료 측면의 제약을 완화하기 위해, 아토마이징 공정으로 Mg 분말을 제조하는 과정에서 발생하는 상품성 저하 분말을 탈황제 원료로 활용하고자 하였다. 해당 분말은 분말 형태로 회수되므로 별도의 분쇄 공정 없이 코팅 공정에 적용할 수 있다. 아울러 분말 표면에 CaO를 기계적으로 코팅하여 Mg의 기화 속도를 제어하고 용탕 내 체류시간을 확보함으로써 탈황능을 개선하고자 하였다.

재료 및 실험방법

아토마이징 공정에서 발생한 상품성 저하 Mg 분말과 CaO 분말을 유성밀로 기계적 코팅하였다. 코팅 조건은 회전속 300 rpm, 밀링 시간 1h, 볼-분말비 200:1, Mg:CaO 혼합비 9:1, 7:3, 5:5, 3:7 변수로 하였다. 제조된 분말은 SEM-EDS 단면 관찰과 XRD 분석으로 코팅층 형성 거동을 평가하였다.

탈황 실험은 초기 황 농도를 0.5 wt%로 조정한 Fe-S계 모합금을 유도로에서 1640 °C로 용해한 후, lance 취입 방식으로 탈황제를 첨가하여 수행하였다. 반응 시간별로 시료를 채취하여 황 농도를 측정하였으며, 미코팅 폐 Mg 분말을 대조군으로 하였다. 반응 후 SEM-EDS와 XRD로 분석하였다.

* Corresponding author : 채홍준 / hjchae@iae.re.kr



Fig. 1. Mechanical coating via planetary ball milling

결과 및 고찰

유성밀 코팅 조건(회전속도, 밀링 시간, 볼-분말비, Mg:CaO 혼합비)에 따른 CaO 코팅층의 형성 거동과 피복 상태를 SEM-EDS 단면 관찰과 XRD 분석으로 비교하였다. 탈황 실험에서는 미코팅 폐 Mg 분말과 CaO 코팅 분말의 반응 시간별 황 농도 변화를 비교하고, 최종 탈황률과 탈황 속도상수를 통해 코팅 적용에 따른 탈황능 변화를 분석하였다. 또한 반응 후 슬래그의 황화물 생성 거동을 분석하여, CaO 코팅층이 Mg의 기화 거동과 탈황 반응에 미치는 영향을 고찰하였다.

결론

본 연구에서는 아토마이징 공정에서 발생한 상품성 저하 Mg 분말을 탈황제 원료로 활용하고, 유성밀을 이용한 CaO 기계적 코팅으로 Mg의 기화·부상 손실을 완화하여 탈황능을 개선하고자 하였다. 코팅 조건에 따른 코팅층 형성 거동과, 코팅 유무에 따른 탈황률·탈황 속도상수 및 슬래그 내 황화물 생성 거동을 비교·분석하였다. 본 연구는 상품성이 떨어지는 Mg 분말의 탈황제 활용 가능성을 검토하고, 코팅 조건 최적화를 위한 기초 자료를 제공하는 데 의의가 있다.

전기로 제강 공정의 Scope 1~3 탄소배출 모니터링을 위한 데이터·분석 플랫폼

A Data and Analytics Platform for Monitoring Scope 1–3 Carbon Emissions in Electric Arc Furnace Steelmaking

강성은, 친 시에, 임성우, 김윤미, 김기한*

㈜인이지

초록

본 연구는 전기로 제강 공정의 직접배출, 구매 전력 간접배출 및 주요 상류배출을 모니터링하기 위한 데이터·분석 플랫폼을 제시한다. 플랫폼은 개발·검증 단계이며, 탄소배출 산정 방법은 KTL 확인을 거쳐 확정할 예정이다. heat별 투입·생산·공정 이력을 배출계수와 연계하고, 대시보드, 공정 분석, 인벤토리 및 계수 버전 관리 기능을 구성하였다. 전력사용량 예측은 예상 간접배출과 실측 차이의 검토를 보조한다. 전과정 관점의 산정 경계와 데이터 한계를 명시하며, 확정 배출량 대신 플랫폼의 데이터 연계 구조와 주요 검증 과제를 제시한다.

주제어 : 전기로 제강, Scope 1~3, 탄소배출 모니터링, CBAM, 전력사용량 예측

서론

전기로 제강 공정의 탄소배출 관리는 공정 내 직접배출과 구매 전력, 원부자재 생산에 따른 배출을 함께 검토해야 한다. 본 연구는 세아창원특수강 2제강 공정을 대상으로 ISO 14044를 참조한 전과정 관점의 탄소배출 평가를 지원하는 플랫폼을 제시한다. 현재 개발·검증 단계이며, 산정 방법은 KTL 확인 전의 후보 조건으로 관리한다. 본 원고는 구현된 기능과 검증 과제를 다루며, 확정 배출량이나 현장 운영 성과를 제시하지 않는다.

산정 범위와 검토 기준

귀속적 전과정평가를 검토 틀로 삼아, 공정 경계는 원료 장입부터 빌릿 주조까지의 gate-to-gate, 산정 경계는 구매 원부자재의 상류배출을 포함하는 cradle-to-gate로 구분한다. 기능단위는 양품 주조 빌릿 1 t를 기준으로 검토하되, 생산중량의 절단손실 반영 여부와 적용 분모는 확인 중이다. 영향지표는 100년 지구온난화지수(GWP100)로 설정하며 적용 평가보고서 판본을 명시해야 한다. 스크랩의 이전 생애 상류부담 배분과 제품 잔류탄소 차감은 후보 조건으로 비교하고, 투입 스크랩과 산출 부산물의 배분 원칙을 일관되게 확정할 필요가 있다.

배출원은 Scope 1·2와 주요 상류배출로 구분한다. 상류배출은 구매 원부자재 생산(Category 1)을 중심으로 다루며, 운송(Category 4) 등은 자료·계수 확보 여부에 따라 범위를 명시한다. 직접배출 검토 항목은 연료 연소, 탄소재 산화, 전극 산화이며, 잔류 탄산염 분해와 제품 반출 탄소의 처리도 함께 검토한다. 전극 소모량은 실측값이 아닌 계측 전력과 문헌상 소모율을 이용한 추정값으로 구분한다. 구매 전력 산정은 현재 EAF·LF 계측 범위를 대상으로 하며, 미계측 보조전력의 제외는 과소산정 요인이 될 수 있다. 전력계수의 값·단위·출처·연도는 미확정이며, 위치기반·시장기반 적용과 이중보고 지원 여부도 확인 과제이다.

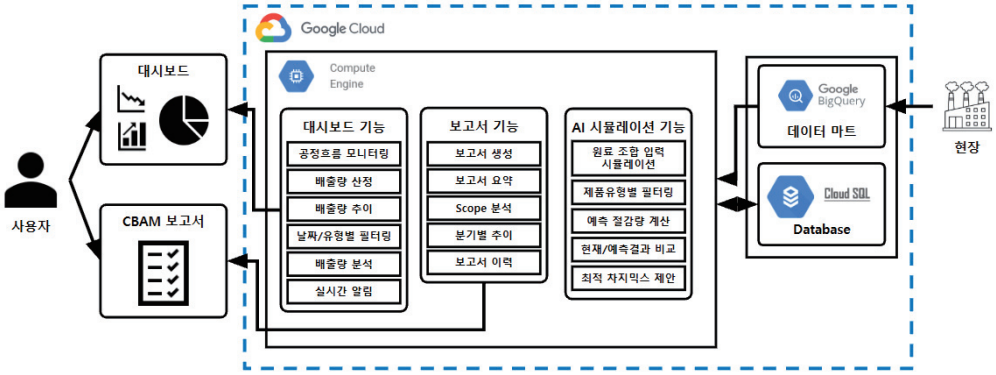
데이터 흐름과 검증

heat별 원부자재·에너지 투입량, 생산량 및 공정 이력을 수집하고, 자재 코드·단위와 배출계수를 연결하여 공정·강종·기간별로 집계한다. 중복 산정 검증에서는 동일 활동·배출단계에 대한 코드·계수의 중복 연결과 합계열·구성항목의 동시 합산을 점검 대상으로 삼는다. 미확인 자재와 누락자료는 배출이 없는 항목과 구분해야 한다. 생산량 누락 heat의 배출은 총량에 포함하

* Corresponding author :김기한 / kihan@ineeji.com

되 원단위에서는 제외하고, 제외 건수와 집계 범위를 표시한다.

플랫폼 주요 기능



대시보드와 공정 관리 기능은 배출량 추이, 원단위, 투입·산출 및 heat별 공정 이력을 조회하도록 구성하였다. 배출 분석은 공정·원재료·강종별 기여도를 비교하고, 연간 인벤토리는 확보된 자료 범위의 Scope별 집계를 제공한다. 계수 관리 기능은 출처·단위·잠정 여부·버전 조회와 변경 계수에 따른 재계산을 지원하도록 구현하였다. 재현성 검증에서는 활동자료와 적용 계수 버전을 함께 확인한다.

CBAM은 별도 보고 활용 기능으로 다룬다. 현재 분기 집계 기반의 초안·이력 관리와 Excel·PDF 내보내기는 내부 자료 준비용이며, 본격 시행기의 연간 신고에 바로 대응하는 기능으로 간주하지 않는다. 제품별 내재배출량은 Scope 합계와 구분하여 해당 규정의 산정 경계에 맞추어 재구성해야 한다.

전력사용량 예측의 보조적 활용

전력예측은 조업 전 확보 가능한 투입·공정 정보를 이용하여 예상 전력과 실측값의 차이를 검토하는 보조 기능이다. 예상 전력에 배출계수를 적용한 값은 조건부 간접배출 시나리오로 활용하며, 확정 실적과 구분한다. 성능 검증은 시간순 학습·평가 분리와 강종 평균 등 기준모델 비교를 통해 수행하고, 대상 기간·표본 수·오차지표가 확인된 결과만 제시한다. 전력예측은 전과정 관점의 배출 관리에 활용하며 CBAM 산정 범위와 구분한다.

결론

본 플랫폼은 공정자료와 배출계수, 산정 조건 및 모니터링 기능을 연결하는 개발·검증 단계의 연구 기반이다. 향후 KTL과 산정법·배분·분모·계수 기준을 확정하고, 배출원별 실측·추정 구분과 누락·중복 검증을 보완하여 배출량 관리와 감축 의사결정에 활용하고자 한다.

폐배터리 부산물 기반 재활용 니켈 생산공정의 전과정 온실가스 배출량 평가

Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from recycled nickel production using secondary battery by-products

차준호[1], 박찬규[1*]
[1]한국산업기술시험원 기후환경본부

초록

니켈은 스테인리스강과 합금강의 주요 원료이나 채굴·제련·정제 과정에서 상당한 환경부하가 발생하므로, 폐배터리 부산물로부터 니켈을 회수하여 철강 원료로 활용하는 방안에 대한 정량적 환경성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 폐배터리 2차 부산물과 철강공정에서 발생한 산세 슬러리를 이용하는 재활용 니켈 생산공정을 대상으로 전과정평가를 수행하고자 한다. 폐배터리 부산물과 산세 슬러리는 이전 제품 시스템에서 폐기물로 배출된 물질로 간주하여 이전 공정의 환경부하는 할당하지 않고, 회수공정과 운송 및 폐기물 처리에서 발생한 환경부하를 반영하였다.

주제어 : 전과정평가, 재활용 니켈, 폐배터리 부산물, 산세 슬러리, 철강산업

그림 초록

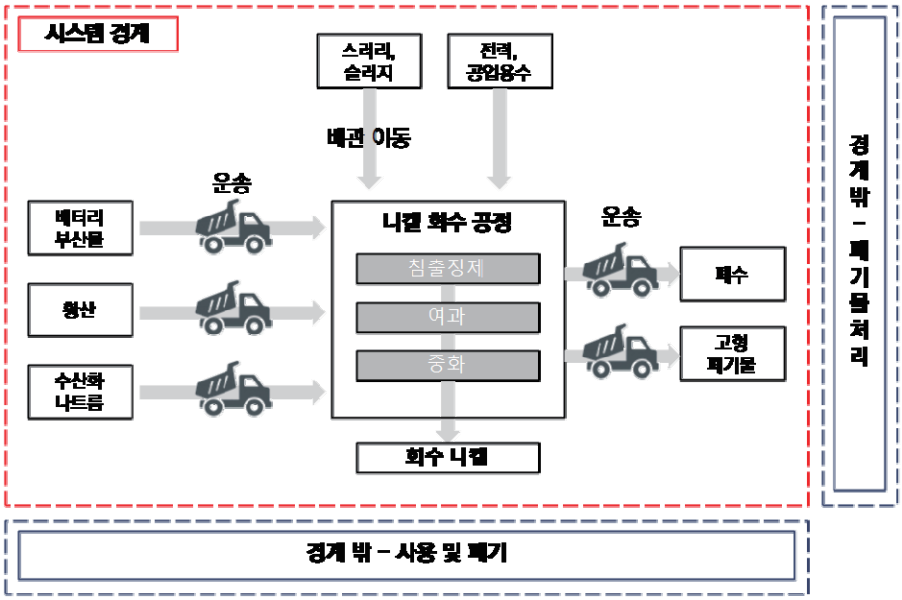


Fig 1. 시스템 경계

재료 및 실험방법

1. 기능단위 및 시스템 경계

기능단위는 대상 공정에서 생산된 재활용 니켈 1 kg으로 설정하였다. 시스템 경계는 원료 및 보조물질의 생산·운송부터 니켈 회수공정을 거쳐 재활용 니켈이 생산되는 시점까지의 cradle-to-gate 범위로 정의하였다. 평가항목에는 폐배터리 부산물, 산세 슬러리, 황산, 수산화나트륨, 전력, 공업용수, 원료 운송과 폐수·고형폐기물 처리를 포함하였다. 자본재, 연구개발, 임직원 통근 및 행정업무 등 제품 생산과 직접적인 관련성이 낮은 항목은 제외하였다.

* Corresponding author : 박찬규 / pcg6189@naver.com

2. 재활용 및 할당 방법

대상 공정에서 경제적 가치를 갖는 주요 산출물은 재활용 니켈이며, 폐수와 폐수오니는 외부 처리가 필요한 폐기물로 분류하였다. 이에 따라 회수공정에서 발생한 환경부하는 재활용 니켈에 귀속하였다. 폐배터리 부산물과 산세 슬러리는 이전 제품 시스템에서 발생한 폐기물로 간주하여 이전 공정의 환경부하는 할당하지 않는 cut-off 접근법을 적용하였다. 다만, 해당 폐기물의 운송과 니켈 회수공정에 투입된 이후 발생하는 물질·에너지 사용 및 폐기물 처리의 환경부하는 포함하였다.

3. 데이터 수집 및 영향평가

활동자료는 2025년 10월부터 2026년 6월까지 대상 사업장의 ERP, 원료 구매자료, 생산실적 및 계측자료를 이용하여 수집하였다. 직접 측정되지 않은 물질 흐름은 원료 투입량, 제품 생산량 및 폐기물 발생량을 이용한 물질수지로 보완하였다. 사업장 1차 데이터를 우선 적용하고, 원료와 에너지의 상위흐름 배출계수는 국가 LCI DB와 Ecoinvent를 활용하였다. 국내 데이터가 존재하는 경우 이를 우선 적용하고, 부재한 경우 기술적·시간적·지리적 대표성이 높은 글로벌 데이터를 선정하였다.

항목별 온실가스 배출량은 활동자료에 해당 배출계수를 곱하여 산정하고, 총배출량을 재활용 니켈 생산량으로 나누어 kg CO_2-eq/kg-Ni로 제시한다. 또한 전력, 황산, 수산화나트륨, 공업용수, 원료 운송 및 폐기물 처리의 배출 기여도를 분석하여 주요 환경부하 요인을 도출한다. 산정 결과는 향후 천연 니켈 원료를 재활용 니켈로 대체할 때의 온실가스 감축 가능성과 저탄소 철강제품 생산전략을 평가하기 위한 기초자료로 활용할 예정이다.

결론

니켈 회수공정을 통한 자원 재활용의 환경영향 중 이산화탄소 배출에 대한 영향을 정량적으로 계산하여 공정의 환경적 이점을 설명할 기초자료를 정리하였고, 이를 통해 지속적인 개발, NDC, 자원 회수와 같은 세계적인 이슈에 대응하는 기술 개발에 당위성을 제공함을 목표로 한다. 재활용된 니켈은 약 1.08 kg $CO_{2\text{-}eq}$/ kg-NI로 기존 Fe-Ni, Me-Ni에 비해 상당히 낮은 GWP를 확인할 수 있다. 이러한 결과는 니켈 회수공정을 운영함이 탄소배출에 대한 환경 부하를 줄이고 원료의 재활용을 통해 경제적 이점을 확보할 수 있는 근거로 활용될 수 있다.

로터리 킬른을 이용한 Zn dust recycling 열역학 해석

Thermodynamic analysis of Zn dust recycling using Rotary Kiln process

정인호*, Marie-Aline Van Ende, 최운오, 노병일,
서울대학교 재료공학부

초록

전기로 Zn dust에서 Zn 금속 회수를 위해 로터리 킬른 공정을 일반적으로 사용하고 있으며, 이러한 금속 회수 공정에서는 복잡한 산화/환원/기화 등의 열역학 반응들이 일어난다. 따라서 로터리 킬른 프로세스의 최적화를 위해서는 이러한 복잡한 다원계 열역학 반응을 정확히 이해할 필요가 있다. 본 연구에서는 FactSage 열역학 계산을 통해서 전기로 Zn dust에서 Zn을 회수하는 로터리 킬른 프로세스에 대해서 복잡한 열역학적 해석을 수행하였다. 본 열역학 계산 결과에 따르면 Zn을 기화해서 회수하기 위한 적절한 공정조건을 예측할 수 있고, 최적 공정을 위해서 로터리 킬른의 조업변수인 charge mix의 조성 및 양, 그리고 유입 공기의 양 등에 대한 조업 가이드 라인을 제시할 수 있다.

주제어 : 전기로 Zn 분진, 로터리 킬른, 열역학 계산, FactSage

서론

금속계 부산물들의 재활용을 위해서 로터리 킬른 프로세스가 일반적으로 사용되고 있다. 로터리 킬른에서는 부산물의 환원을 통해서 금속 물질을 얻도록 공정을 설계하고 있다. 일반적으로 이러한 환원공정은 부산물의 종류, 온도 및 산화분위기에 따라서 복잡한 열역학 반응을 수반하므로 킬른의 최적조건을 도출하는 것이 쉽지 않다. 본 연구에서는 로터리 킬른을 이용해서 Zn dust를 환원하는 공정에 대해서 열역학적으로 해석하여 킬른내에서 온도 및 산소 분위기의 조절의 중요성에 대해서 분석하고자 하였다.

EAF Zn dust 로터리 킬른 공정

대략적인 로터리 킬른 프로세스의 모식도를 그림 1에 도시하였다. 일반적인 전기로 Zn dust의 조성은 20SiO2-40FeO-26CaO-2ZnO(wt.%) 이다. 로터리 킬른 프로세스에서는 전기로 Zn dust와 coal을 적정량 섞어서 주입한 후 온도를 약 1200도 정도까지 올리면서 환원 및 기화 반응을 유도할 수 있도록 설계되어 있다. 특히 그림1에서 보는 바와 같이 킬른 배출구 근처에서 air를 강제적으로 불어주어 미사용된 coal이 air와 반응하여 최종 생성물의 온도를 높이게 하고 이때 발생하는 높은 온도의 가스 (CO-CO2-N2-O2)는 킬른 내부로 유입되어 전체적으로 전기로 dust의 온도 상승, 수분 제거, Coal과 반응을 통한 환원성 분위기를 유지 및 Zn dust의 환원 반응을 유도할 수 있도록 공정이 설계되어 있다.

따라서 전체적으로 charge (EAF dust+Coal)의 mix ratio, 시간당 charge 투입량, 시간당 air blowing 양 등의 모두 최적화 되어야만 최대의 Zn의 회수 및 최종 산출물인 슬래그가 킬른의 내벽에 sticking 없이 쉽게 discharging 될 수 있도록 공정을 유도할 수 있다. 하지만 대부분의 로터리 킬른 프로세스는 이러한 공정 최적화를 trial and error 방식으로 접근하고 있어서 경제적이지 못하다. 또한 charge의 조성의 변화에 따라서 공정을 쉽게 변경하지 못하므로 내부의 반응을 정확히 이해하여 조업조건을 최적화할 수 있는 가이드를 제시하는 연구가 필요하다.

* Corresponding author : 정인호 / in-ho.jung@snu.ac.kr

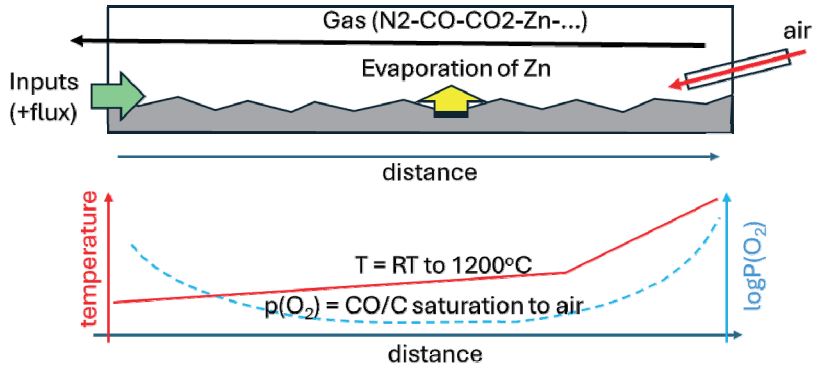


Fig 1. EAF dust의 재활용을 위한 로터리 킬른 프로세 개략도.

FactSage 열역학 소프트웨어 및 데이터베이스

FactSage는 1970년대부터 만들어진 열역학 계산 프로그램으로서 그림 2에서 보여지는 바와 같이 Pyrometallurgy 및 Hydrometallurgy에 적용할 수 있는 다양한 열역학 데이터베이스를 보유하고 있다. 특히 본 연구의 재활용 공정에 대해서는 coal과 Zn dust 산화물과 이로부터 환원중 발생할수 있는 금속상 등이 고려되어야 하고 또한 air를 비롯한 CO, CO2, Zn 등의 가스상 등을 고려하여 열역학 계산을 수행하여야 한다.
이를 위해서 본 연구에서는 FTOxid, FactPS, FSStel 등의 데이터베이스가 사용되었다. 또한 보다 정교한 열역학 계산을 위해서 Steelmaking Consortium in-house database (SFCA) 데이터베이스도 사용되었다.

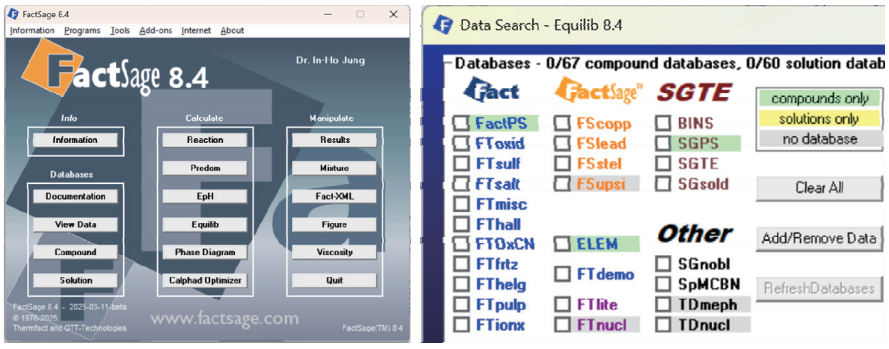


Fig 2. FactSage 열역학 소프트웨어와 데이터베이스

열역학 분석 결과 및 로터리 킬른 공정해석

본 연구에서는 다음과 같은 가정을 세우고 계산을 수행하였다.
(i) 로터리 킬른내에서 온도는 입구쪽 낮은 온도에서 출구쪽 약 1200도 정도까지 상승함.
(ii) 장입물은 Zn dust와 flux (CaO)의 혼합물인 ZnO-Fe2O3-CaO-SiO2 임.
(iii) 100g의 장입물 (26CaO-40Fe2O3-20SiO2-14ZnO)과 10g의 N2를 반응시킴. coal의 양은 알려져 있지 않으므로 산소의 양을 직접 계산에 넣는 대신, 산소분압을 직접 조절하는 방법으로 시나리오별 계산을 수행함. 로터리 킬른 부위별로 온도를 정확히 알지 못하므로, 위치-온도의 상관관계는 무시함.

산소분압을 대략 10^{-10} atm과 10^{-20} atm 으로 고정하고 온도에 따른 상변화와 Zn의 분포를 계산한 결과를 그림 3과 4에 각각 도시하였다. 계산결과에서 보듯이 상변화와 Zn의 분포 모두 산소분압에 따라서 변화가 심하다. 이러한 이유는 ZnO에서 Zn의 증발은 주위 CO 및 CO2의 분위기에 따라 달라지기 때문임. 이러한 CO 및 CO2 분위기는 산소분압을 결정함으로 산소 분압에 따라서 Zn의 증발 경향이 달라지기 때문이다. 즉 낮은 산소분위기에서 더 빠른 Zn의 증발이 발생할 수 있다.

$$ZnO(s) + CO(g) = Zn(g) + CO2(g) \quad (1)$$

$$CO(g) + 1/2O2(g) = CO2(g) \quad (2)$$

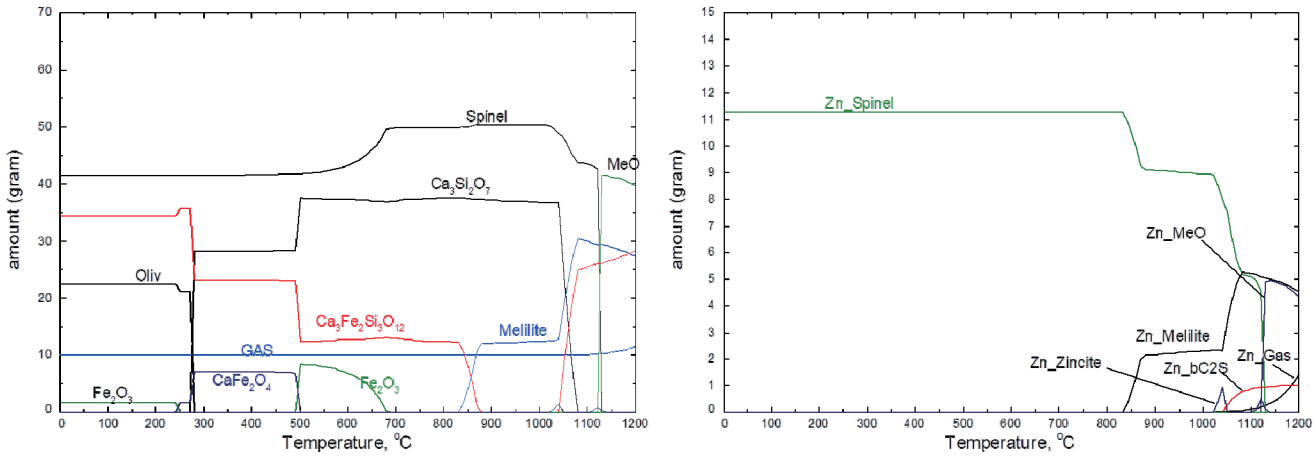


Fig 3. 장입물의 온도변화에 따른 상변화 및 Zn의 분포변화 계산 결과: logPO2(atm) = -10.

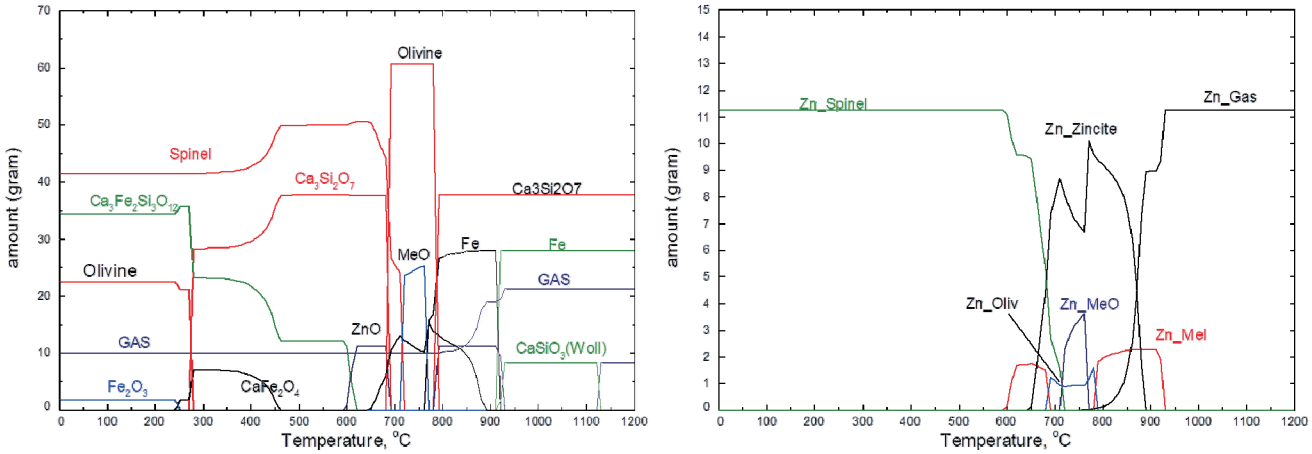


Fig 4. 장입물의 온도변화에 따른 상변화 및 Zn의 분포변화 계산 결과: logPO2(atm) = -20.

위 계산결과에 따르면 산소분위기가 logPO2(atm) = -10 (그림 3) 에서는 1200도 온도에서도 Zn의 증발이 충분히 일어나지 못한다. 하지만 산소분압을 더 환원분위기로 하여 logPO2(atm) = -20 (그림 4)이 되면 950도 부근에서 모든 ZnO의 증발이 일어나 가스로부터 Zn의 회수가 가능함을 알 수 있다.

일반적으로 EAF Zn dust를 처리하고 있는 로터리 킬른에서는 장입물내 포함된 Zn 대부분을 가스 형태로 증발시켜 로터리킬른에서 가스와 함께 배출하게한 후에 다시 온도를 낮추면서 응축하여 회수하고 있다. 즉 열역학 계산 결과에 따르면 현재 사용하는 로터리 킬른의 중간-출구 근처 약 900~1000도 구간에서 장입물중 포함된 coal과 CO 가스에 의해서 충분한 환원 분위기가 유지되고 이를 통한 Zn의 증발이 일어나는 것으로 해석할 수 있다.

로터리 킬른의 출구부에서 air를 주입하게 되면 장입물중 남은 coal과 반응하여 $C+1/2O_2(g)= CO(g)$ 반응에 의한 열을 발생하여 온도를 높일수 있다. 또한 이러한 환원성 분위기에서는 그림 4에서 보듯이 일부 FeO가 Fe로 먼저 환원되고 이러한 Fe는 다시 $Fe+1/2O_2(g) = FeO$의 산화반응을 유발하여 추가 열량을 제공할 수도 있다. 이러한 열량이 너무 많아지면 로터리 킬른에서 배출되는 최종 물질의 온도가 1250도 이상으로 올라갈 수 있고 이때 액상 슬래그가 발생할 가능성도 있다. 가령 장입되는 Zn dust중의 Zn은 모두 증발하여 회수되었다고 가정하면, 나머지 dust는 Fe oxide, CaO, SiO2가 된다. 이러한 세가지 산화물을 가정하여 그림 5에서는 air 분위기에서 1200 1250, 1300도의 상태도를 계산하였다. 본 계산 결과에 의하면 1250도 부터는 액상 슬래그가 발생할수 있음을 알수 있다. 이러한 액상 슬래그는 킬른 내부의 내화물과 반응하여 배출이 어려워지고 또한 내화물 용손도 일으킬 수 있으므로 너무 과도한 온도 상승은 방지하여야 한다. 즉 초기 장입물에 넣는 coal의 양이 과도하지 않게 적절하게 조절되어야 함을 알 수 있다.

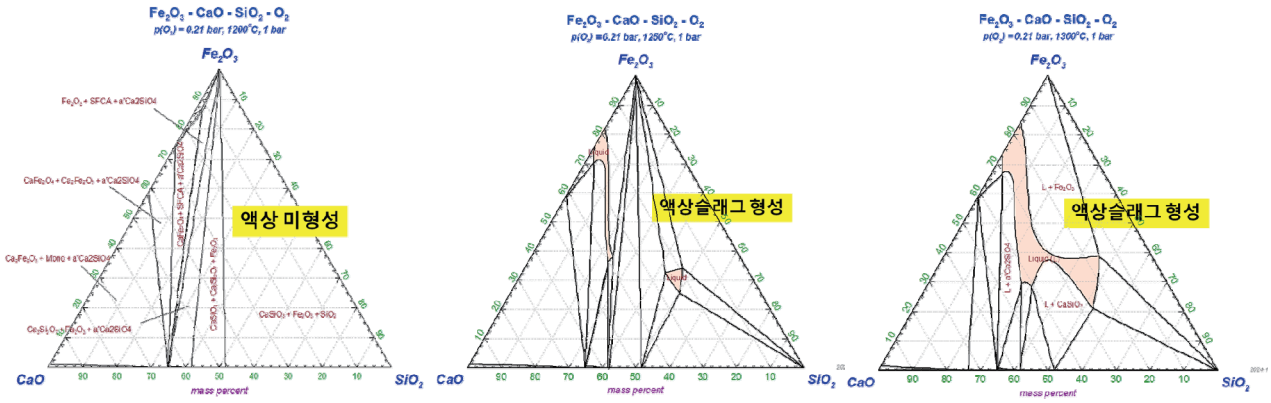


Fig 5. Fe2O3-CaO-SiO2 시스템의 air 상태에서 1200, 1250, 1300도에서 상태도 계산결과.

결론

본 연구에서는 EAF Zn dust를 로터리 킬른을 이용해서 재활용하는 공정의 여러 반응 및 조업조건을 이해하기 위해서 FactSage 프로그램을 이용한 정교한 열역학 분석을 수행하였다. 본 열역학 해석을 통해서 다음과 같은 결과를 얻을수 있었다.

(1) EAF Zn dust는 로터리 킬른 공정중에 환원반응이 일어나게 되고 900도 이상에서 Zn(g)가 발생하여 Zn recovery가 가능하게 됨. 이를 위해서 초기 장입물에 충분한 coal을 투입해야 한다.

(2) 킬른의 최종 슬래그는 액상상태가 되면 조업 안정성이 저하되므로 최대 온도는 1200도 정도로 유지하여야 함. 이러한 온도를 유지하기 위해서 coal의 최대 투입량과 공기의 양이 결정되어야 한다.

Ni-Cr 함유 부산물 자원화 기술 개발

Development of Recycling Technology for Ni-Cr Containing By products

정용수[1*], 김희원[1], 홍순곤[2], 성민경[3]
포항산업과학연구원[1], 포항소재산업진흥원[2], 베페사징크코리아[3]

초록

스테인리스 제강 분진은 Ni 1.0wt% 이상 함유해 니켈 광석 대체가 가능하나, 미분 형태여서 Cr(Ⅵ)·Hg·Pb 제거와 조립화가 필요하다. 이에 로터리 킬른(R/K) 전처리 환원 공정을 실험실·상용 규모로 순차 검증했다. 탄소계 환원제(고정탄소 약 80wt%)로 1,200·1,250℃ 환원 시 M-Fe 0.73→50.2%, T-Ni 0.61→0.96%로 증가하고, Cr(Ⅵ)는 Cr(Ⅲ)로 환원, Hg·Pb는 휘발 제거(불검출)됐다. 약 500톤 상용 R/K 시험에서는 미크론 분진이 5~10mm로 조립화되고 평균 Ni 2.17wt%, Cr 10.90wt%, Zn 저감을 확인했다. 제조된 Ni-Cr 합금철 전구체는 페로합금 공정에서 니켈 광석 대체제로 문제없이 적용됐다.

주제어 : Ni-Cr 분진, 로터리 킬른, 전처리 환원, 조립화, 페로합금 전구체

서론

Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Cr, Fe-Ni 등 페로합금은 합금강 제조에 필수적인 원료이나, 페로합금 제조 공정은 다량의 에너지를 소비하며 합금강 제품의 탄소발자국을 증가시킨다. 따라서 합금 원소를 함유한 제강 부산물을 대체 원료로 전환하면 원료 의존도와 탄소배출을 저감할 수 있다.

스테인리스 제강 분진은 Ni을 1.0 wt% 함유하여 니켈 광석 대체 자원으로서의 잠재력이 있다. 그러나 미분 형태이므로 페로합금 공정에 활용하기 위해서는 적합한 형태로의 조립화가 필요하고, Cr(Ⅵ), Hg, Pb 등은 재활용 전 제거 또는 안정화가 요구된다. 즉, 유가 성분인 Ni-Cr과 유해 원소가 미분 내에서 공존하는 것이 본 부산물 활용의 핵심 문제이다.

이에 본 연구에서는 원료 특성 분석과 예비 환원 조건 도출, 실험실 규모 검증, 상용 로터리 킬른 적용, 페로합금 공정 활용으로 이어지는 현장 지향적 개발 체계를 구성하고, R/K 전처리 환원을 통해 Ni-Cr 함유 분진을 페로 합금용 전구체로 활용하는 기술을 검토하였다.

재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 원료는 스테인리스 제강 공정에서 발생한 Ni-Cr 함유 부산물 3종(A,B,C)이다. XRF 분석 결과 시료 A와 B는 Fe_2O_3, 48.5~49.8wt%, Cr_2O_3 8.2~10.5wt%, NiO 0.73~0.81 wt%, ZnO 9.2~13.3wt%를 함유하였고, 시료 C는 CaO 39.4wt%, Cr_2O_3 13.0wt%, NiO 3.20wt%로 상이한 조성을 나타내었다. 유해성 분석에서는 Cr(Ⅵ) 8.31~11.85mg/L, Hg 0.0030~0.0308mg/L, Pb 0.145~2.855mg/L로 측정되어 허용 기준 (Cr(Ⅵ)<1.5mg/L, Hg<0.005,mg/L Pb<3mg/L)을 초과하였다.

Table 1. Chemical composition of Ni-Cr containing by-products (XRF, wt%)

Sample	Na_2O	Al_2O_3	SiO_2	MgO	K_2O	ZnO	Cr_2O_3	CaO	MnO	Fe_2O_3	NiO
A	1.7	1.2	7.4	1.1	1.0	9.2	10.5	7.2	4.6	49.8	0.81
B	2.1	1.1	6.4	1.4	1.1	13.3	8.2	6.9	4.6	48.5	0.73
C	-	-	3.4	3.6	-	-	13.0	39.4	3.1	26.1	3.20

실험실 규모 환원 시험은 로터리 킬른을 모사하고 온도에 따른 환원 거동을 확인하기 위하여 수평형 관상 환원로를 사용하였

* Corresponding author : 정용수 / jysoo2000@rist.re.kr

다. 시료는 환원 시험을 위해 원통형으로 성형하였으며, 환원 온도는 1,200 및 1,250℃로 하였다. 환원제는 현재 R/K에서 사용 중인 것과 동일한 종류를 사용하였으며, 고정탄소(FC) 79.97wt%, 회분 14.14wt%, 휘발분 5.89wt%, S 0.31wt%였다. 환원 전후 시료는 ICP-OES로 T-Fe, M-Fe, T-Cr, T-Ni, Zn, P를 분석하고 C/S 분석을 병행하였으며, Cr(Ⅵ), Hg, Pb에 대한 유해성 분석을 수행하였다.

현장 시험은 제강사에서 발생한 Ni-Cr 함유 부산물 약 500톤을 확보하여, 1일 약 30톤씩 전처리 업체의 상용 로터리 킬른에 공급하는 방식으로 진행하였다. 반입 원료는 전량 Ni, Cr, Fe, Zn, P에 대해 ICP-OES 및 XRF로 분석하였고, 환원·조립화 생성물은 시간대별로 채취하여 성분 및 유해성을 분석하였다. 생성된 Ni-Cr 전구체 약 248톤은 페로합금 공정에 니켈 광석 대체재로 투입하여 적용성을 평가하였다.

결과 및 고찰

실험실 규모 시험에서 Fe, Cr, Ni 산화물의 환원이 확인되었다(Table 2). 시료 A는 M-Fe가 원료 0.73%에서 1,200℃ 49.2%, 1,250℃ 50.2%로 증가하였고, T-Cr은 6.83wt%에서 11.40wt%, T-Ni은 0.61wt%에서 0.96wt%로 증가하였다. 시료 B도 M-Fe 0.66wt% → 52.3wt%, T-Ni 0.55wt% → 0.86wt%로 유사한 경향을 나타내었다. 시료 C의 경우 M-Fe는 2..28wt%에서 5.30wt% 수준으로 증가폭이 작았으나, T-Ni은 3.47wt%에서 4.42wt%로 증가하였다. Zn은 시료 A에서 7.76wt% → 0.07wt%, 시료 B에서 11.6wt%→ 0.09wt%, 시료 C에서 0.18wt% → 0.01wt% 이하로 저감되었다.

Table 2. Chemical composition of Ni-Cr by-products before and after reduction (ICP-OES, wt%)

Sample	Condition	T-Fe	M-Fe	T-Cr	T-Ni	Zn
A	원료	35.7	0.73	6.83	0.61	7.76
	1,200℃	49.8	49.2	9.60	0.86	0.12
	1,250℃	51.0	50.2	11.4	0.96	0.07
B	원료	34.6	0.66	5.06	0.55	11.6
	1,200℃	50.5	47.5	7.35	0.75	0.11
	1,250℃	57.0	52.3	9.04	0.86	0.09
C	원료	16.3	2.28	11.3	3.47	0.18
	1,200℃	17.4	5.33	11.6	3.83	0.01
	1,250℃	19.0	5.30	11.3	4.42	<0.01

환원 후 시료의 Cr(Ⅵ), Hg, Pb는 모두 불검출(ND)로 허용 기준을 만족하였으며, Cr(Ⅵ)는 Cr(Ⅲ)로 환원되고 Hg와 Pb는 휘발에 의해 제거되었다. 이로부터 로터리 킬른 전처리 환원이 중금속 제거, 미립자 조립화, Ni 품위 상승을 동시에 달성할 수 있음을 확인하였다.

현장 시험에 사용된 반입 원료의 평균 조성은 P사 Ni 2.52wt%, Cr 10.7wt%, Fe 25.6wt%였고, S사 Ni 1.43wt%, Cr 6.15wt%, Fe 14.8wt%였다(ICP-OES 기준). R/K 환원 후 미크론 크기의 분진은 5~10mm 범위의 입자로 조립화되었으며, 생성물의 평균 조성은 Ni 2.17wt%, Cr 10.89 wt%, Fe 22.4wt%, Zn 0.11wt%로, R/K 전처리 환원 과정에서 Zn이 크게 저감되었다. 이를 통해 상용 로터리 킬른에서 전처리 환원, 조립화 및 제품 품위 향상이 동시에 이루어짐을 확인하였다.

유해성 분석 결과, Cr(VI)는 환원 전 8.21~12.01mg/L에서 환원 후 0.17~0.41mg/L로 저감되었고, Hg와 Pb는 모두 ND로 나타났다(Table 3). 상용 로터리 킬른 시험을 통해 조립화와 중금속 제거의 실현 가능성이 확인되었으며, 제조된 Ni-Cr 전구체를 페로합금 공정에 적용한 결과 니켈 광석 대체재로서의 활용 가능성이 확인되었다. 또한 전처리 환원 공정과 페로합금 공정 모두에서 조업상 문제는 관찰되지 않았다.

Table 3. Heavy metal contents before and after R/K pre-reduction (Unit : mg/L)

Sample	Cr(Ⅵ) (Before → After)	Hg (Before → After)	Pb (Before → After)
A	8.21 → 0.17	0.0305 → ND	1.257 → ND
B	10.35 → 0.25	0.0030 → ND	0.124 → ND
C	12.01 → 0.41	0.0271 → ND	2.372 → ND
허용치	<1.5	<0.005	<3.0

결론

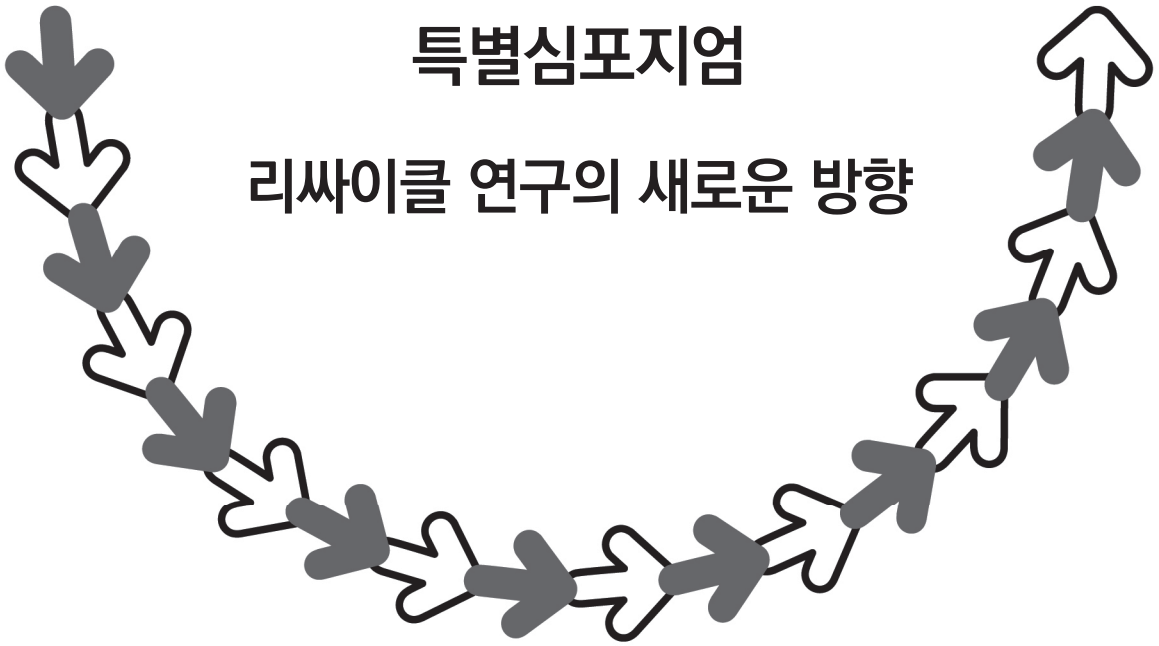
Ni-Cr 함유 분진을 대상으로 로터리 킬른 전처리 환원을 적용한 결과, Fe, Cr, Ni 산화물이 환원되고 미분이 조립화 되었으며 Cr(Ⅵ), Hg, Pb가 제거 또는 안정화되어 페로합금 제조 공정에 활용할 수 있음을 확인하였다. Ni-Cr 함유 분진 공급 → R/K 환원에 의한 전구체 제조 → 페로합금 공정에서의 전구체 활용으로 구성된 자원화 체계의 적용 가능성을 상용 규모에서 검증하였다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

리싸이클 연구의 새로운 방향



The Korean Institute of Resources Recycling

침출액으로부터 고순도 금속 회수를 위한 고선택도 및 고회수율 전기증착 기술

From Leachate to High-Purity Metals: Selective Electrodeposition beyond the Purity–Yield Trade-off

김귀용[1,2*]

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과[1], 울산과학기술원 탄소중립대학원[2]

초록

코발트와 니켈은 환원전위가 유사하여 전기증착 기반 분리가 어렵고, 회수가 진행될수록 순도가 저하되는 순도-회수율 상충 문제가 있다. 본 발표에서는 두 금속의 환원전위와 전착 거동에 영향을 미치는 인자를 살펴보고, 특히 전해질 화학종 제어를 통한 선택도 조절 전략을 소개한다. 공융용매 기반 공정을 NMC 침출액에 적용하여 니켈(순도 99.1%, 회수율 99%)과 코발트(순도 98.7%, 회수율 98.5%)를 순차 회수하였으며, 용매 4회 재사용과 염소 산화환원 기반 재정제로 순도를 각각 99.99%, 99.92%까지 향상시켰다.

주제어 : 전기증착, 니켈, 코발트, 공융용매, 폐리튬이온전지

서론

전기증착은 분리와 회수를 동시에 수행할 수 있고 용액 조성 변화가 작아 용매 재사용이 가능하다. 그러나 코발트(-0.28 V vs. SHE)와 니켈(-0.257 V vs. SHE)은 표준환원전위가 거의 같아, 일반적인 수계 전해질에서는 두 금속이 함께 석출된다. 또한 Nernst 식에 따라 목적 금속의 농도가 감소하면 환원전위가 음의 방향으로 이동하여 경쟁 이온의 공전착이 증가하므로, 회수율을 높일수록 순도가 저하되는 순도-회수율 상충 관계가 나타난다. 그러나 실제 전착 거동은 표준환원전위만으로 결정되지 않으며, 금속 이온의 화학종, 전극 계면, 온도, 전해셀 구성 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 본 발표에서는 이러한 인자들이 코발트와 니켈의 전착 선택도에 미치는 영향을 살펴보고, 특히 금속 이온의 화학종을 제어하여 두 금속에 서로 다른 전하와 전착 거동을 부여하는 전략을 중심으로 고선택도와 고회수율을 동시에 확보하는 방안을 제시하고자 한다.

결과 및 고찰

코발트와 니켈의 전착 선택도는 표준환원전위보다 금속 이온의 화학종에 의해 크게 좌우된다. 일반 수계 전해질(0.1 M Li_2SO_4, 0.1 M LiCl)에서는 두 금속이 모두 양이온성 수화 착물로 존재하여 전착 시작 전위가 구분되지 않지만, 고농도 염화물(10 M LiCl)에서는 코발트가 음이온성 $CoCl_4^{2-}$, 니켈이 양이온성 $[Ni(H_2O)_5Cl]^+$를 형성하여 시작 전위가 분리되었다. 이러한 전하 차이는 양전하 고분자(PDADMA)를 이용한 계면 개질을 통해서도 선택도 조절에 활용할 수 있었다.

이 화학종 제어 개념을 공융용매(ethaline, choline chloride + ethylene glycol)로 확장하였다. Ethaline 내에서 코발트는 $CoCl_4^{2-}$, 니켈은 $Ni(EG)_3^{2+}$로 존재하여 전착 전위가 크게 분리되었고, 85 °C, -0.45 V (vs. Ag^+/Ag)에서 Ni/Co 원자비가 약 160에 도달하였다. 여기에 셀 구성과 상대전극 반응을 함께 설계하여, 단일 전착 단계에서 니켈/코발트 분리계수 3,000 이상을 달성하였다. 이를 NMC111 침출액에 적용하여 니켈(순도 99.1%, 회수율 99%)과 코발트(순도 98.7%, 회수율 98.5%)를 순차 회수하였으며, 공융용매 4회 재사용 동안에도 회수율 85% 이상, 순도 90% 이상이 유지되었다(Fig. 1). 회수된 금속은 염소 산화환원 기반 재정제를 통해 니켈 99.99%, 코발트 99.92%까지 순도가 향상되었다. 또한 사용된 공융용매로부터 약 1 M의 염산을 재생하여 침출에 재사용하였고, 실제 산업용 블랙매스 침출액으로부터 $CoSO_4/NiSO_4$ 전구체 원료 용액을 확보함으로써 본 기술의 실용화 가능성을 확인하였다.

* Corresponding author : 김귀용 / kwiyongk@unist.ac.kr

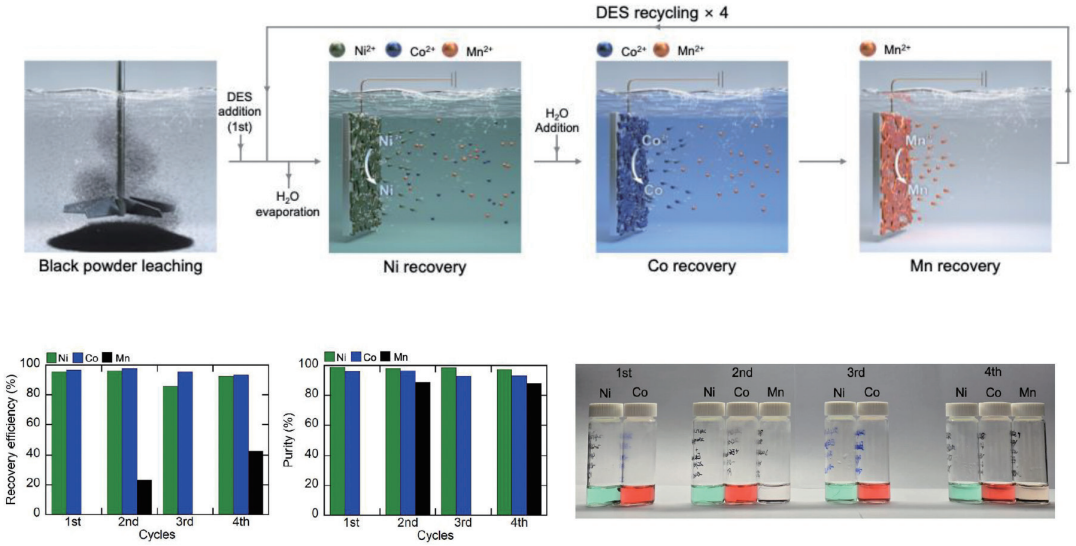


Fig. 1. Sequential electrochemical recovery of Ni, Co, and Mn from NMC black powder leachate with DES recycling: process schematic (top), and recovery efficiency, purity, and recovered products over four DES reuse cycles (bottom).

결론

본 발표에서는 환원전위가 유사한 코발트와 니켈의 전착 선택도에 영향을 미치는 화학종, 계면, 온도, 전해셀 구성 등의 인자를 살펴보았으며, 특히 전해질 화학종 제어가 두 금속에 서로 다른 전하와 전착 거동을 부여하는 효과적인 전략임을 확인하였다. 이를 기반으로 한 공융용매 공정에 전해셀 구성과 염소 산화환원 기반 재정제를 결합하여 고선택도와 고회수율을 동시에 확보하였다. 또한 용매 재사용과 염산 재생을 통해 용매추출 기반 공정 대비 약품 사용과 폐액 발생을 저감할 수 있는 가능성을 확인하였으며, 실제 산업용 블랙매스 침출액으로의 적용을 통해 전기화학 기반 분리·회수 공정의 실용화 가능성을 제시하였다.

공융용매를 활용한 친환경적인 이차전지 리사이클링 기술

Eco-Friendly Recycling of Rechargeable Batteries Using Deep Eutectic Solvents

이현국[1], 이지현[2], 홍현선[2], 김재엽[1*]
건국대학교 화공생명에너지공학부[1], 성신여자대학교 청정신소재공학과[2]

초록

폐리튬이온전지의 유가금속 회수 및 양극재 재생을 위해 염화콜린-구연산(ChCl-CA) 기반 공융용매(DES)를 활용하였다. 폐전지 블랙매스로부터 리튬, 니켈, 코발트 및 망간을 99% 이상 침출하였으며, 철과 구리의 동반 침출은 제한적이었다. 침출액의 전이금속과 리튬을 각각 옥살산염과 인산염으로 회수하고, 회수물 내 주요 불순물 금속의 함량이 낮음을 확인하였다. 또한 전이금속 전구체를 활용하여 층상 구조의 니켈·코발트·망간계 양극재를 재합성함으로써, 금속 침출부터 회수 및 소재 재생까지 연계한 공정의 적용 가능성을 제시하였다.

주제어 : 공융용매, 폐리튬이온전지, 블랙매스, 유가금속 회수, 양극재 재생

서론

전기자동차 및 에너지저장장치의 보급 확대에 따라 폐리튬이온전지의 발생량 증가와 핵심 금속자원의 안정적인 확보가 중요한 과제로 대두되고 있다. 폐전지에 함유된 리튬, 니켈, 코발트 및 망간을 회수하여 재사용하는 기술은 폐기물 저감과 자원의 순환 이용 측면에서 중요하다. 기존의 무기산 기반 습식제련(hydrometallurgy)은 유가금속 회수에 널리 활용되고 있으나, 약품 사용과 부식 및 폐수 처리에 따른 부담을 줄이기 위한 대체 침출 공정의 개발이 요구된다.

공융용매(deep eutectic solvent, DES)는 수소결합 받개(hydrogen bond acceptor, HBA)와 수소결합 주개(hydrogen bond donor, HBD)의 상호작용에 의해 구성 성분보다 녹는점이 낮아지는 용매계이다. 구성 성분과 조성에 따라 산도, 점도 및 금속 이온과의 배위 특성을 조절할 수 있어 금속 회수용 침출 매체로 주목받고 있다. 특히 염화콜린(choline chloride, ChCl)-구연산(citric acid, CA) 기반 공융용매는 유기산의 산성 작용기와 금속 배위 능력을 활용할 수 있어 폐양극재의 유가금속 침출에 적용할 수 있다.

본 연구에서는 ChCl-CA 기반 공융용매를 이용하여 폐전지 유가금속을 침출하고, 침전 회수와 양극재 재합성을 연계하였다. 실제 폐전지 유래 블랙매스(black mass)를 대상으로 목표 금속의 침출과 불순물의 거동을 확인하고, 회수된 금속의 양극재 원료 재활용 가능성을 평가하였다.

재료 및 실험방법

ChCl-CA 기반 공융용매를 침출 매체로 사용하였으며, 상용 코발트산리튬($LiCoO_2$, LCO)을 모델 양극재로 활용하여 침출 거동을 검토하였다. 이후 폐리튬이온전지 유래 니켈·코발트·망간계(Ni-Co-Mn, NCM) 블랙매스에 적용하였다. 용매와 시료를 가열·교반하면서 반응시킨 후, 여과를 통해 침출액(leachate)과 고체 잔사(solid residue)를 분리하였다. 침출액의 금속 농도는 유도결합플라즈마 원자방출분광법(ICP-AES)으로 분석하였으며, 원료에 포함된 각 금속의 양을 기준으로 침출률을 산출하였다.

침출액에 포함된 니켈, 코발트 및 망간은 옥살산염 공침(oxalate co-precipitation)을 통해 혼합 전구체로 회수하였다. 전이금속 회수 후 여액에 남은 리튬은 인산염 침전(phosphate precipitation)을 통해 인산리튬(Li_3PO_4)으로 회수하였다. 회수된 전이금속 혼합 전구체는 열처리를 통해 혼합 산화물로 전환한 후, 상용 탄산리튬(Li_2CO_3)과 혼합·소성하여 NCM 양극재를 재합성하였다. 침출 전후 시료의 형상과 원소 분포는 주사전자현미경 및 에너지분산형 X선 분광법(SEM/EDS)으로 관찰하였다. 회

*Corresponding author : 김재엽 / jykim24@konkuk.ac.kr

수물과 재합성 양극재의 결정구조는 X선 회절분석(XRD)으로 확인하였으며, 회수 전후 전이금속의 화학 상태는 X선 광전자 분광법(XPS)으로 분석하였다. 전체 공정의 개략도는 그림 1에 나타내었다.

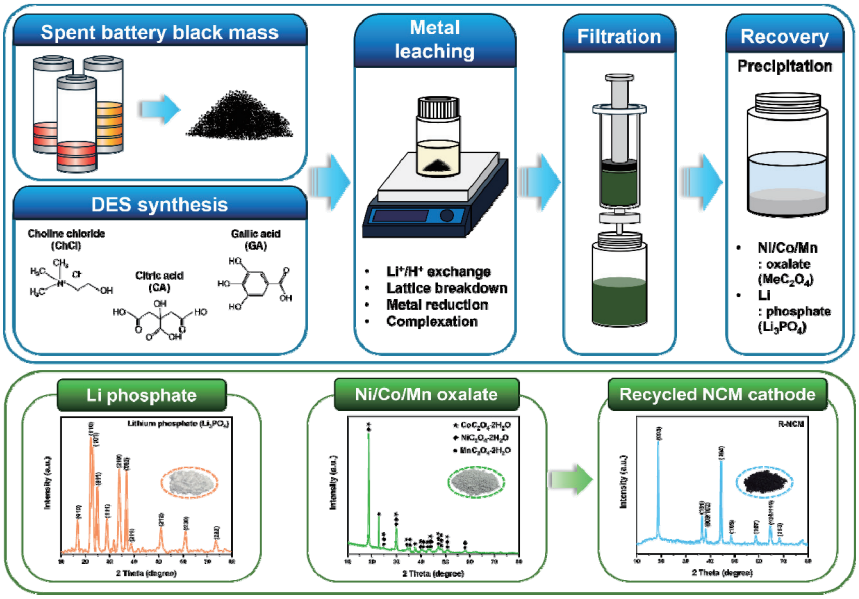


Fig. 1. 공융용매를 이용한 폐이차전지 블랙매스의 유가금속 침출·회수 및 양극재 재생 공정 개략도.

결과 및 고찰

공융용매 기반 침출 실험에서 반응 온도와 시간에 따라 양극재의 금속 용출이 달라졌으며, 선정된 조건에서 모델 양극재인 LCO의 리튬과 코발트 침출률은 모두 99% 이상이었다. 실제 폐전지 유래 NCM 블랙매스에서도 리튬, 니켈, 코발트 및 망간의 침출률이 각각 99% 이상으로 나타났다. 이는 탄소계 성분과 공정 유래 불순물을 포함하는 블랙매스에서도 목표 유가금속의 침출이 가능함을 보여준다.

침출 전후 블랙매스의 SEM/EDS 분석에서는 양극재 성분의 용출에 따른 형상 및 원소 분포 변화가 관찰되었다. 침출 후 잔사는 표면이 거칠고 다공성인 형태를 나타냈으며, 니켈, 코발트 및 망간의 원소 신호가 크게 감소하였다. 반면 탄소와 일부 알루미늄 성분은 잔사에 남아 있었다. 침출액의 ICP-AES 분석에서도 철과 구리는 거의 검출되지 않았고, 알루미늄은 소량 용출되었다. 이러한 결과는 목표 금속의 침출과 함께 주요 불순물의 동반 용출을 제한할 수 있음을 보여준다.

침출액으로부터 회수한 니켈·코발트·망간 혼합 침전물에서는 전이금속 옥살산염의 특성 회절 피크가 확인되었다. 회수 전구체의 니켈·코발트·망간 조성비는 원료 블랙매스의 조성비와 유사하여, 침출과 공침 과정에서 전이금속 간 조성이 비교적 잘 유지되었다. 전이금속 분리 후 리튬은 인산리튬으로 회수되었으며, 회수물의 철, 구리 및 알루미늄 등 주요 불순물 금속은 각각 1 wt% 미만으로 확인되었다.

XPS 분석 결과, 원료 양극재에서 혼합 산화 상태로 존재하던 전이금속은 회수된 옥살산염에서 주로 2가 상태로 관찰되었다. 이는 침출·침전 과정을 거쳐 양극재 내 금속이 재활용 가능한 전구체 형태로 전환되었음을 뒷받침한다. 해당 전구체를 열처리하고 리튬원과 반응시킨 결과, 재합성 시료에서 층상 NCM 양극재의 특성 회절 피크가 확인되었다. 따라서 본 공정은 유가금속의 분리·회수뿐 아니라 양극재 제조용 원료로의 재이용까지 연결할 수 있는 가능성을 나타냈다.

결론

ChCl-CA 기반 공융용매를 활용하여 폐리튬이온전지의 유가금속 침출, 침전 회수 및 양극재 재생을 연계하였다. NCM 블랙매스에서 리튬, 니켈, 코발트 및 망간을 99% 이상 침출하였으며, 주요 불순물의 동반 용출과 회수물 내 혼입은 제한적이었다. 회수된 전이금속 전구체로부터 층상 NCM 양극재를 재합성함으로써, 폐전지 금속자원의 회수와 소재 재생을 연계하는 공융용매 기반 리사이클링 공정의 적용 가능성을 확인하였다.

폐리튬이온배터리 재활용을 위한 유기산 기반 대체침출 연구

Fundamental studies of organic acid leaching for sustainable recycling of spent lithium ion batteries

안준모*, 정혜원, 이제승, 원정환, 정현수
전북대학교 자원 · 에너지공학과

초록

본 연구에서는 폐리튬이온배터리의 친환경 재활용을 위해 .습식제련공정에서 기존의 무기산계 침출제를 대체할 유기산계 침출 연구를 수행하였다. 본 연구에서 하이니켈계 NCM 블랙매스 침출을 위해, 메탄술폰산 (methanesulfonic acid, MSA)을, LFP 배터리 재활용을 위한 기초 연구로 글리신 (Glycine)을 대체 침출제로 적용하였다. 메탄술폰산을 이용한 하이니켈계 침출을 통해, 기존 황산을 대체할 수 있었다. 또한, 메탄술폰산 침출계에서 대체 환원제로 농업부산물 적용으로, 고가의 과산화수소를 대체 적용과 고부가가치화가 가능하였다. 메탄술폰산 침출액 대상 종전의 용매추출 공정 가능성도 검증하였으며, Ni, Co, Mn 공추출로 용매추출 공정 단순화도 가능하였다. 한편, 글리신을 이용하여 LFP 블랙매스 모사샘플 침출 시, Li 회수를 감소시키는 Al을 침출단에서 선택적 배제가 가능하였다. 또한, 블랙매스 내의 각종 활물질 및 기재의 영향도 확인하였으며, 흑연의 존재 시, Li 침출이 감소하였다. 따라서, 대체산화제로 과황산나트륨($Na_2S_2O_8$)을 적용하여, Li 침출률 99% 이상 달성하면서 Fe 포함 각종 불순물의 침출을 배제할 수 있었다.

키워드 : NCM 배터리재활용, LFP 배터리재활용, 메탄술폰산, 글리신, 선택적 침출, 공추출

서론

전세계 탄소중립 기조로, 화석연료를 대체할 저탄소형 에너지원에 대한 수요가 요구되며, 리튬이온배터리의 사용량 증가가 예상된다. 이에, 폐리튬이온배터리 발생량 증가도 예상된다. 리튬이온 배터리는 성능과 용량에 따라 양극활물질 내 금속원료 종류가 달라지며, NCM (Nickel, Cobalt, Manganese) 배터리의 경우 Li, Ni, Co, Mn 이, LFP (lithium iron phosphate) 배터리는 Li, Fe P 가 포함되어있다. 해당 금속들은 공급망 문제를 야기할 수 있어, 핵심광물(Critical Minerals)로 분류가 되며, 안정적인 원료공급과 폐배터리 처리에 따른 환경문제를 해결하기 위해 배터리 재활용이 필수적이다. 배터리 재활용 시 습식제련 공정에서 상용 침출제로 사용되는 무기산은 독성 및 폐수 발생 등의 환경 문제를 유발할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 유기산기반 침출제인 메탄술폰산 (methanesulfonic acid)와 글리신 (Glycine)을 이용하여 하이니켈 NCM 배터리, LFP 배터리 재활용 연구를 수행하였다.

실험방법 및 재료

본 연구에 하이니켈 NCM 블랙매스 (Ni 함량>40%) 침출 연구를 위해, 국내 폐배터리 재활용 업체로부터 샘플을 확보하였다. 본 샘플로 메탄술폰산 침출연구를 수행하였으며, MSA 농도, 과산화수소 농도, 광액농도, 온도 영향 실험을 수행하였다. 또한, 과산화수소 대체를 위해, 환원제로 보리짚을 전북특별자치도의 농가에서 확보 후 분쇄하여 연구를 수행하였다. 메탄술폰산 침출액 대상 용매추출 가능성 검증을 위해, MSA 기반 금속 수용액 대상, 침전 후 4.0 g/L Mn 이 Preloading 된 D2EHPA로 Al, Cu를 선 추출 하였다. 이 후, Ni, Co, Mn의 공추출 후 탈거를 수행하여, NCM 전구체 용액 제조 연구도 수행하였다. 한편, LFP 재활용 연구를 위해, LFP 양극활물질에 C, Al_2O_3, CuO를 투입하여 블랙매스를 모사한 샘플을 제조하였다. 이 후, 글리신 & 과산화수소 농도, 광액 농도, pH, 온도에 따른 침출영향을 확인하였다. 이 후, Li의 탄산리튬 침전 연구도 수행하였다.

*Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

실험 결과 및 고찰

하이니켈 NCM 블랙매스 대상, 광액농도 2%, 침출온도 80℃에서, MSA 및 과산화수소 농도를 0.3 M – 1.5 M 로 증가 시, 침출률이 증가함을 확인하였다. 한편, 1.5 M MSA 및 1.0 M 과산화수소 보다 높은 농도조건에서는 이미 침출률 Ni, Co, Mn, Li >99%) 이상 확보한 것을 확인하였다. 이 후 대체 환원제로 보리짚을 투입 시 투입량 증가에 따라 Ni, Co 침출률이 증가하였다. 0.5 g/g NCM black mass 조건에서 Ni, Co 침출률이 각각 61%, 72%에서 83%, 88%로 증가하였다. 또한, Citric acid를 투입하여 Ni, Co 침출률을 92%, 95%를 달성하였으며, 이는 기존 동조건 황산 침출보다 금속별 약 10% 높았다.

최적조건에서의 침출액 조성을 토대로 MSA기반 금속 수용액의 정제분리 실험을 수행하였다. 침출액 내 Al, Fe, Cu를 사전에 pH4.0에서 NaOH로 침전 제거 시, 99% Fe, Al 제거가 가능하였다. 여액 내 Cu 추출을 위해, 4.0 g/L Mn을 D2EHPA에 Preloading 하였으며, 최종적으로 94%의 추출률을 달성하였다. 수용액상 Ni, Co, Mn, Li 의 공추출을 1.0 M D2EHPA를 이용하여 수행하였으며, Ni, Co, Mn 96%, 97%, 99%를 달성하였고 공추출된 Li는 추출된 유기상의 세정을 통해 98%세정하였다. 이 후, 0.5 M 황산으로 Ni, Co, Mn 99% 탈거를 달성하였다.

LFP 양극활물질을 글리신으로 침출한 결과 최적 침출조건인 1.5 M Glycine, 1.0 M H_2O_2, 초기 pH 6, 25℃, 20 g/L에서 99.5% Li, 1.2% Fe 를 달성하였다. 또한, 모사 블랙매스 조건에서 과산화수소를 과황산나트륨으로 대체함으로서, 25℃ 조건에서 60분 이내 99.9%의 Li, Cu, > 0.1%의 Fe, Al 침출되었으며, 18.5%의 Li 선택성을 보였다. 침출액 내 Cu는 NaHS를 이용하여 25℃, $[Cu^{2+}]:[S^{2-}]$=1:1 조건에서 99.9% 침전되었으며 여액 대상, 탄산리튬 제조를 위한 실험 결과 Li은 80℃, $[Li^{+}]:[Na_2CO_3]$=1:3 조건에서 74.1% 침전되었다.

결론

하이니켈 NCM 배터리 재활용을 위해 MSA - 과산화수소를 이용하여 침출하였으며, 황산대비 높은 침출률을 보였다. 또한, MSA침출계에서 대체환원제인 보리짚 적용 시, Ni, Co 92, 95% 침출률을 보여, 적용 가능성을 확인하였다. 최종적으로, 메탄술폰산 침출액 내 불순물 금속은 Mn preloaded D2EHPA로 추출이 가능하였고, 1.0 M D2EHPA 공추출을 통해 Ni,Co,Mn 양극재 전구체 수용액 제조를 완료하였다. Glycine-H_2O_2 시스템에서 LFP 침출실험 결과, 99.5% Li 침출률과 92.9%의 Li 선택성을 보였다. 흑연, Cu_2O와 Al_2O_3를 첨가한 경우, Glycine-$Na_2S_2O_8$ 시스템에서 99.9% Li, Cu 침출률과 18.5%의 Li 선택성을 보였다. 공침출된 Cu는 NaHS를 첨가하여 99.9%의 침전하였으며, Li은 Na_2CO_3를 첨가하여 74.1% 침전하였다. 이러한 결과를 통해 본 연구는 다양한 배터리 재활용에 유기산계 침출제 적용 가능성을 제시하였다.

사사

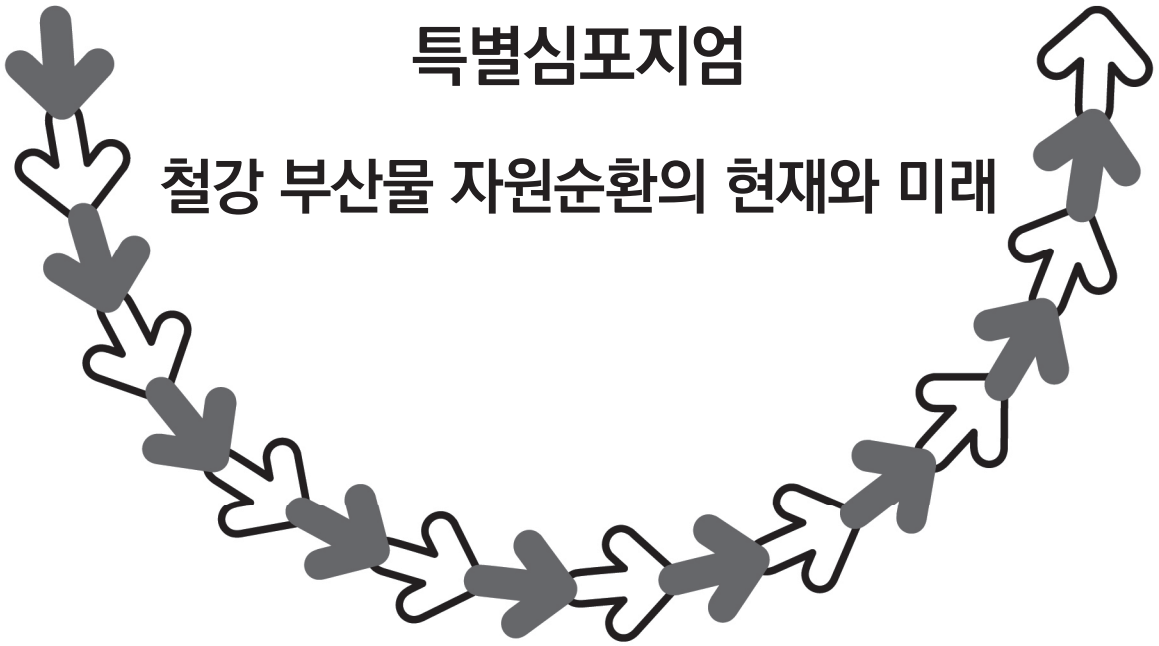
이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 연구개발 특구진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-25444020). 또한, 이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. RS-2023-00212245).

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

철강 부산물 자원순환의 현재와 미래



The Korean Institute of Resources Recycling

철강 부산물 자원순환의 현재와 미래

○ 개요

· 내용 : 철강 슬래그의 재활용 현황과 정책적 과제, 건설소재 활용 및 광물탄산화·유가금속 회수 등 고부가가치 자원순환 연구

· 목적 : 철강산업, 건설산업, 연구기관 및 학계 전문가 간 기술 교류를 통해 슬래그 기반 자원순환 산업의 경쟁력 강화와 지속가능한 활용 방향 모색

· 일시 : 2026.10.19.(목) 14:00~17:40 (대전 인터시티호텔 5층 에메랄드룸)

○ 주요 내용

· 철강공정 변화에 따른 슬래그 발생 특성 이해 및 미래 활용 전략
· 슬래그 재활용 실태, 환경 안전성 및 활용 확대를 위한 정책 방향
· 아스콘, 콘크리트, 보차도용 블록 등 건축 및 토목용 골재로서 슬래그의 사용성 및 확대 전략
· 시멘트 산업 탄소중립을 위한 슬래그 기반 비탄산염 원료 및 대체재 활용 기술
· 슬래그 활용 광물탄산화 기반 CCU 기술(직접 및 간접 탄산화 기술)
· 철강부산물 기반 유가금속 회수 기술 및 미래 자원순환 전략

○ 세부 일정

시간	발표 제목	발표자
14:00～14:30	탄소중립 시대, 철강 슬래그 자원순환의 패러다임 전환	조종오 실장(현대제철)
14:30～14:50	철강 슬래그의 재활용 현황 및 정책 과제	남정임 실장(한국철강협회)
14:50～15:10	건설용 골재로서 슬래그의 주요 특성 및 적용 사례	홍성인 책임(현대제철)
15:10～15:30	친환경 고속도로 건설 위한 슬래그 활용 방안 및 향후 계획	김홍삼 실장(도로교통연구원)
15:30～15:50	시멘트 산업 탄소중립을 위한 슬래그 비탄산염 원료 활용 기술	최재원 책임(아세아시멘트)
15:50～16:10	친환경 콘크리트 혼합재로써 전로슬래그의 재활용 활성화 방안 고찰	류근우 선임(실크로드시앤티)
16:10～16:30	휴식	-
16:30～16:50	철강부산물 활용 광물탄산화 기반 CCU 기술 개발 및 적용 방안	남성영 책임(현대제철)
16:50～17:10	간접탄산화 기술을 이용한 슬래그 기반 고순도 탄산염 제조 기술 개발	조환주 실장(지질자원연구원)
17:10～17:30	철강부산물 기반 유가금속 회수 및 기술 개발 동향	문석윤 교수(서울과기대)
17:30～17:40	세션 주요 논의사항 및 향후 과제	차광서 팀장(현대제철)

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

자원순환 연구의 길의 열다 :
안재우 교수의 학문과
미래세대의 도전

The Korean Institute of Resources Recycling

기조강연

사용후 리튬이온배터리 자원회수를 위한 습식제련 기술과 미래 과제

Hydrometallurgical Resource Recovery from Spent Lithium-Ion Batteries : Technologies and Future Challenges

안재우[1*]
대진대학교[1]

초록

전기자동차(EV) 및 에너지저장시스템(ESS)의 보급 확대에 따라 리튬이온배터리(Lithium-ion Battery, LIB)의 수요가 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따른 사용후 배터리의 효율적인 처리와 유가자원 회수 기술의 중요성이 크게 부각되고 있다. 사용후 리튬이온배터리에는 Li, Ni, Co, Mn, Cu 등 다양한 유가금속이 함유되어 있어 이를 선택적으로 회수하고 고순도 원료로 재생하는 기술은 핵심광물의 안정적 공급과 순환경제 구축을 위한 중요한 기반기술로 평가된다. 특히 습식제련 공정은 비교적 낮은 온도에서 운전이 가능하고 높은 금속 회수율과 선택적 분리가 가능하다는 장점으로 인해 사용후 배터리 재활용 분야에서 핵심 공정으로 적용되고 있다.

일반적인 습식제련 공정은 사용후 배터리의 방전, 해체 및 파쇄 등의 전처리 공정을 거쳐 회수된 블랙매스를 대상으로 산 침출을 수행한 후, 침전, 용매추출, 이온교환 및 결정화 등의 분리·정제 공정을 통해 개별 금속을 회수하는 방식으로 구성된다. 최근에는 기존의 Ni 및 Co 중심 회수에서 벗어나 Li의 고효율 회수, LFP계 배터리와 같이 변화하는 원료 조성에 대한 대응, 고순도 금속염의 직접 제조와 공정 부산물의 자원화에 대한 연구가 확대되고 있다. 또한 용매추출 및 이온교환 기술과 더불어 전기투석, 바이폴라막 전기투석 등의 전기화학적 분리기술을 연계하여 공정 중 발생하는 염류로부터 산과 염기를 재생하고, 시약 사용량과 폐수 발생량을 저감하려는 공정 통합 연구도 주목받고 있다.

향후 사용후 배터리 습식제련 기술은 단순한 금속 회수율 향상을 넘어 선택성, 공정 단순화, 에너지 소비, 시약 재사용, 폐수 및 폐기물 발생 저감 등을 종합적으로 고려한 방향으로 발전할 필요가 있다. 또한 배터리 화학계와 원료 특성 변화에 유연하게 대응할 수 있는 고선택성 분리기술과 각 단위공정 간의 최적 연계가 요구된다. 궁극적으로는 금속뿐만 아니라 전해액, 산·염기 및 공정수까지 재자원화하여 배터리 제조공정으로 환원할 수 있는 폐쇄형 자원순환 시스템을 구축하는 것이 사용후 리튬이온배터리 재활용 기술의 중요한 미래 과제가 될 것으로 판단된다.

* Corresponding author : 안재우 / jwahn@daejin.ac.kr

폐리튬이온배터리 전해액의 순환 자원화를 위한 감압 여과-용매추출 연계 분리·정제 공정 개발

Development of an Integrated Vacuum Filtration-Solvent Extraction Separation and Purification Process for Circular Resource Recovery of Spent Lithium-Ion Battery Electrolyte

홍승택[2], 장재혁[1], 김준희[1], 윤연영[2], 안재우[1*]
[1]대진대학교 신소재공학과, [2]대진대학교 의생명과학과

초록

에너지 저장 장치 및 전기자동차의 보급 확대에 따라 폐리튬이온배터리 자원 회수의 중요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 폐전해액을 대상으로 진공 감압 여과와 용매추출을 연계한 정제 공정을 검토하였다. 진공 감압 여과를 통해 응축상, 여과액 및 여과 잔재물로 분리하였으며, 여과 잔재물에서 유가금속 성분을 확인하였다. 또한 DCM을 이용한 순차 추출을 통해 여과액 내 EC, EMC 및 DMC의 회수 가능성을 확인하였다. 이를 통해 폐전해액 내 유기용매 및 유가금속을 분리·회수할 수 있는 기초 공정의 적용 가능성을 제시한다.

주제어 : 리튬이온배터리, 폐전해액, 전해액 재활용, 진공 감압 여과, 용매추출

서론

리튬이온배터리의 사용량 증가와 함께 폐리튬이온배터리의 발생량은 지속적으로 증가하고 있으며, 폐배터리에 포함된 유가금속과 전해액의 안전하고 효율적인 회수 기술이 요구되고 있다. 기존의 폐리튬이온배터리 재활용 연구는 주고 Li, Ni, Co 등의 유가금속 회수에 집중되고 있으며, 전해액에 포함된 유기용매의 회수 및 재활용에 관한 연구는 상대적으로 제한적이다. 전해액은 리튬염과 다양한 유기물질로 구성되어 있어 이를 적절히 분리·회수할 경우 자원 활용 및 폐기물 저감 측면에서 의미가 있다.

본 연구에서는 폐배터리 처리 공정에서 발생한 폐전해액을 대상으로 진공 감압 여과 및 용매추출을 적용하였다. 이를 통해 폐전해액을 응축상, 여과액 및 여과 잔재물로 분리하고 각 분리 산물의 유기물질 및 금속 성분을 분석하였다. 또한 여과액에 대해 DCM(dichloromethane)을 이용한 순차 추출을 실시하여 EC(etheylene carbonate), EMC(ethyl methyl carbonate) 및 DMC(diemtheyl carbonate)의 회수 가능성을 평가하고 각 분리 산물의 후속 재활용 가능성을 검토하였다.

재료 및 실험방법

폐전해액 시료는 폐배터리의 염수방전, 파·분쇄 및 열처리 공정 후 냉각 과정에서 발생한 증기를 응축하여 회수한 시료를 사용하였다. 금속 성분을 ICP-AES, 불소는 Ion chromatography, 유기 성분은 NMR을 이용하여 분석하였다.

폐전해액은 진공 감압 여과하여 응축상, 여과액 및 여과 잔재물로 분리하였다. 각 분리 산물의 조성을 분석하여 유기물질 및 금속 성분의 분포를 확인하였다. 여과 잔재물은 FE-SEM/EDS를 이용하여 성분을 분석하였다.

여과액에 포함된 유기물질의 선택적 회수를 위해 DMC, Hexane 및 DCM을 추출 용매로 비교하였다. 추출 용매 선정 결과를 바탕으로 DCM을 사용하여 여과액을 1-4차까지 순차 추출하였다. 또한, EC, EMC 및 DMC를 첨가한 표준 혼합물을 제조하여 동일한 조건에서 반복 추출함으로써 각 유기물질의 회수 가능성을 평가하였다.

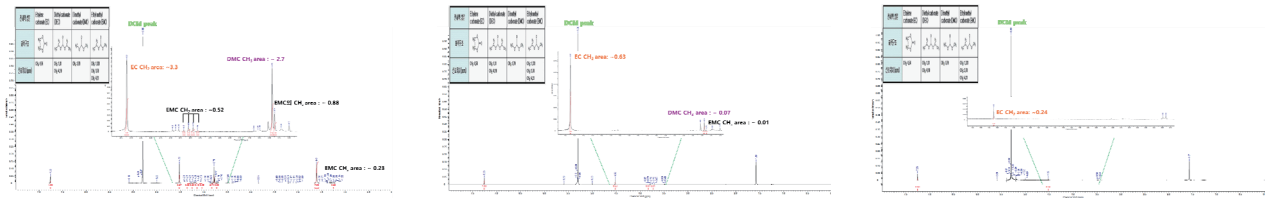
* Corresponding author : 안재우 / jwahn@daejin.ac.kr

결과 및 고찰

진공 감압 여과 결과 폐전해액을 응축상, 여과액 및 여과 잔재물로 분리할 수 있었다. 여과액에서는 원액에 포함되어 있던 금속 성분이 크게 감소하였으며, 대부분의 금속 성분은 여과 잔재물에 분포하는 것으로 나타났다. 응축상에서는 상대적으로 휘발성이 높은 DMC와 EMC가 주요 성분으로 확인되어 유기물질 회수 가능성을 확인하였다.

여과 잔재물의 SEM-EDS 분석 결과 탄소가 주요 성분으로 확인되었으며, Ni, Co, Mn 및 Cu 등의 유가금속 성분도 함께 존재하는 것으로 나타났다. 따라서 해당 잔재물은 후속 침출 공정에 투입하여 유가금속을 회수하기 위한 원료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

여과액에 대한 추출 용매 비교 결과, 각 추출 용매에 따라 추출되는 유기물질 성분에 차이가 나타났다. 특히 DCM을 이용한 경우 EC, EMC 및 DMC가 모두 추출되어 세 가지 carbonate 계 유기물질 회수를 위한 추출 용매로 적합한 것으로 확인되었다. DCM을 이용한 순차 추출에서는 EMC와 DMC가 초기 추출 단계에서 대부분 회수되었으며, EC는 반복 추출을 통해 추가적으로 회수되는 경향을 나타냈다 (Fig. 1.). 또한 표준혼합물을 이용한 회수시험을 통해 EC, EMC 및 DMC의 실질적인 회수 가능성을 확인하였다.



(a) 1st extraction (b) 2nd extraction (c) 3rd extraction

Fig. 1. Phase separation results after solvent extraction of the filtrate.

이상의 결과를 바탕으로 폐전해액을 진공 감압 여과하여 각 분리 산물로 1차 분리한 후, 여과액에 DCM 용매추출을 적용하는 공정을 제안하였다. 추출 후 유기상은 DCM을 증류하여 재사용하고, 분리된 유기물질은 재활용 공정에 활용할 수 있으며, 여과 잔재물은 후속 침출 공정을 통해 유가금속을 회수하는 방향으로 연계할 수 있다.

결론

폐전해액에 진공 감압 여과와 DCM 용매추출을 적용하여 유가금속과 유기물질의 분리 및 회수 가능성을 확인하였다. 이를 통해 폐전해액의 효율적인 분리 및 후속 재활용 공정으로의 연계 가능성을 검토하고 제시할 수 있었다.

친환경 금속광물자원의 습식제련을 위한 대체 침출 시스템 연구

Comprehensive studies of hydrometallurgical system for the environmentally sustainable metallurgy from primary metals resources

안준모[1*], Jaeheon Lee[2]

[1]전북대학교 자원 · 에너지공학과, [2]Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines

초록

저품위 황화광물 및 제련부산물 대상, 친환경 습식제련공정 구축을 위해 대체 침출 시스템을 적용하여 유가금속 회수 및 유해물질 저감 연구를 수행하였다. 저품위 황화광물 중 황동광($CuFeS_2$)은 전 세계 구리 매장의 약 70%를 차지하고 있으며, 습식제련공정으로 약 20%의 구리가 생산되고 있다. 하지만, 종전의 황산-3가철 시스템으로 황동광 침출 시, 황동광 표면에 부동태(passivation) 현상으로 인해, 구리 침출이 감소하는 현상이 발생한다. 따라서, 황동광 부동태를 줄이면서 구리의 침출률 증가를 위해, 대체침출제인 메탄술폰산(Methanesulfonic acid, MSA)을 이용한 침출 연구를 수행하였다. 메탄술폰산의 황동광 침출 기작확인을 위해, 침출제 및 산화제 농도, 광액 농도, 침출 온도 인자 영향을 확인 후 kinetic modeling을 통해, 반응기작을 검증하였다. 또한, 황동광 침출 시, 메탄술폰산과 함께, 대체 산화제인 과산화수소 (H_2O_2), 중크롬산 이온 ($Cr_2O_7^{2-}$), 질산 이온 (NO_3^-) 적용가능성도 검증하였다.

한편, 구리의 건식 제련 공정 중 전해정련 공정의 탈동공정에서 발생하는 슬라임 내에는 유가금속 외에도 비소가 포함이 되어 있다. 종전의 알칼리 침전의 경우, 많은 비소포함 슬러지 발생량과 슬러지 내의 높은 As 용출율로 슬러지 내 유가금속 침출 및 비소의 안정화 연구가 필요하다. 따라서, 유가금속 침출 개선 및 비소의 안정화를 위해, 메탄술폰산을 이용한 비소 화합물의 침출과 Scorodite 침전 연구를 수행하였다. 비소화합물 침출을 위해 메탄술폰산 농도, 산화제 농도, 광액 농도, 침출 온도 영향을 확인하였다. 이 후, 확보한 침출액 내 Scorodite 침전을 위해 Fe/As 비, 침전 온도, 침전 pH의 영향인자를 검토하였다.

친환경 습식제련을 위해, 미생물을 이용한 연구도 수행하였다. 철산화 미생물과 황산화 미생물을 이용하면, 저품위 광물 내 생물화학적 황산화 반응에 의해, 물리적으로 황화광물 내 갇힌 금 회수가 수월해질 수 있다. 따라서, 저품위 황화광물 내 금의 친환경적, 그리고 경제적인 방법으로 제련하기 위해 종전의 정광 산화배소(Roasting) 및 가압산화(Pressure Oxidation, POX) 반응을 대체할 미생물 바이오산화(Biooxidation) 연구도 수행하였다. 저품위 금광 내 황화광물 산화를 위해, 두 Biooxidation 공정인, Tank Biooxidation 과 Sand Farming 의 비교 연구를 수행하였다. 또한, 종전의 Roasting 과 Pressure oxidation 공정과 금 회수 효율 및 경제성 평가까지 수행하여 미생물 적용 금 제련공정의 가능성을 검증하였다.

키워드 : NCM 배터리재활용, LFP 배터리재활용, 메탄술폰산, 글리신, 선택적 침출, 공추출

*Corresponding author : 안준모 / jahn@jbnu.ac.kr

자원순환-3

배터리 핵심소재의 고순도 회수를 위한 용매추출 공정

Solvent Extraction Process for the High-Purity Recovery of Critical Battery Materials

김홍인*, 손정수, 김수경, 양동효, 심현우, 제진영
한국지질자원연구원

최근 전기차의 수요가 증가함에 따라 전기자동차는 자동차 산업에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 전기자동차와 에너지저장장치의 보급 확대에 따라 사용 후 리튬이온배터리 발생량이 증가하면서 리튬, 니켈, 코발트 및 망간과 같은 배터리 핵심소재의 안정적인 확보와 순환 이용이 중요해지고 있다. 사용 후 배터리의 습식제련 공정에서는 침출용액에 유가금속뿐만 아니라 철, 알루미늄, 구리 등 다양한 불순물이 함께 존재하므로, 고순도 배터리 원료를 제조하기 위해서는 금속 간 선택적 분리·정제 기술이 필요하다.

사용 후 리튬이온배터리의 침출용액으로부터 배터리 핵심소재를 고순도로 회수하기 위한 용매추출 공정이 필수적이다. 용매추출 공정 설계에서는 금속별 추출거동을 분석하고, 추출제 종류, 평형 pH, 유기상과 수상의 부피비(O/A ratio) 뿐만 아니라 추출, 세정 및 탈거 단계의 운전조건을 최적화하고, 다단 향류식 용매추출 공정을 설계해야 한다.

불순물 제거 단계에서는 철, 알루미늄 및 구리를 선택적으로 분리하고, 이후 코발트와 망간을 니켈 및 리튬으로부터 단계적으로 회수할 수 있도록 공정을 구성할수 있다. 특히 금속 이온의 평형 pH 차이와 추출제의 선택성을 활용하여 유가금속의 손실을 최소화하면서 불순물 제거율과 목적 금속의 분리효율을 향상 시킬 수 있다. 탈거 공정을 통해 회수된 금속 농축액은 황산염 용액으로 전구체용 황산니켈 또는 황산코발트로 제조되어 배터리 소재 제조용 원료로 활용할 수 있다.

사용 후 배터리 침출용액으로부터 고순도 핵심소재를 생산하기 위한 용매추출 공정의 연속식 믹서-세틀러, 추출제 재사용, 유기상 손실 저감 및 폐수 발생 최소화에 관한 연구를 통해 공정의 경제성과 환경성을 종합적으로 향상할 필요가 있다.

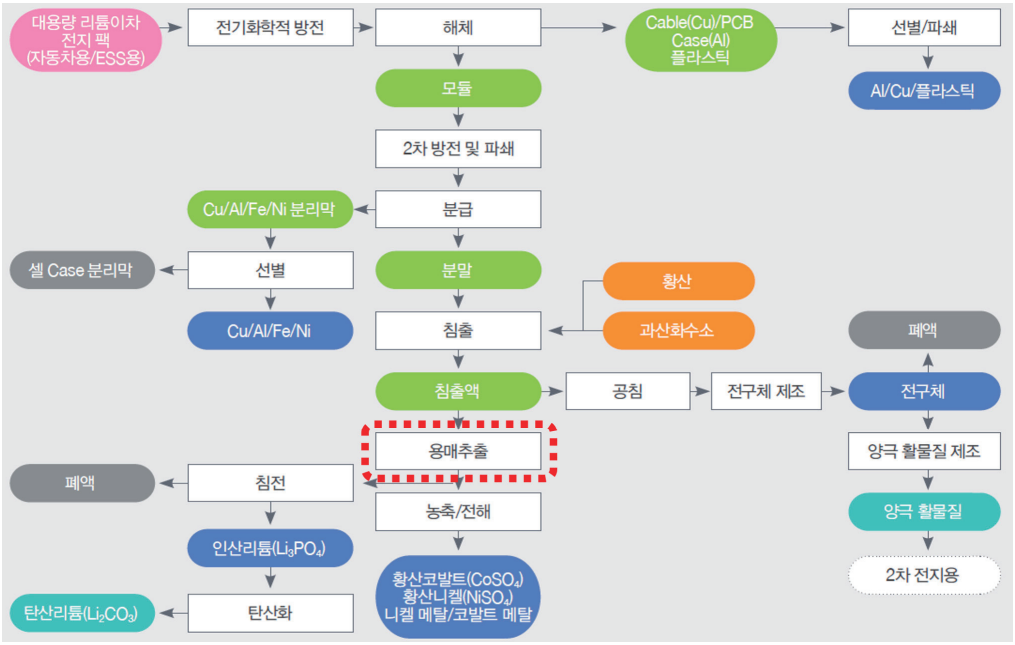


Fig1. 전기 자동차용 폐리튬이온전지 재활용 공정도

* Corresponding author : 김홍인 / hi@kigam.re.kr

마이크로웨이브를 활용한 폐리튬이온전지에서 리튬의 선택적 침출 및 Li_2CO_3 회수

Selective Lithium Leaching and Li_2CO_3 Recovery from Spent Lithium-Ion Batteries Using Microwave-Assisted Treatment

안낙균[1], 김기현[1], 박경수[1*]
[1]고등기술연구원 융합소재연구센터

초록

폐리튬이온전지의 재활용 과정에서 리튬의 선택적 회수는 후속 분리·정제 공정을 단순화하고 유가금속의 손실을 최소화할 수 있다는 점에서 중요하다. 본 연구에서는 마이크로웨이브 기반 오토클레이브 공정을 이용하여 $(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl, NH_4OAc를 적용한 리튬 선택적 침출 특성을 평가하였다. 침출 온도, 반응 시간, H_2O 부피 및 당량비를 주요 변수로 설정하여 리튬과 전이금속의 침출 거동을 비교하였으며, 반응 후 ICP 분석을 통해 금속별 침출률을 산출하였다.

실험 결과, 세 종류의 암모늄 화합물 모두 적절한 조건에서 약 99% 이상의 높은 리튬 침출률을 나타냈으며, 니켈, 코발트, 망간의 침출률은 0.05% 이하로 억제되어 높은 리튬 선택성을 확인하였다. 특히 $(NH_4)_2SO_4$, 와 NH_4OAc는 220 ℃에서 1시간 반응으로 약 99% 이상의 리튬 침출률을 달성하였으며, NH_4Cl은 동일 온도에서 2시간의 반응이 필요하였다. 최적 조건에서 얻어진 침출액은 리튬 농도 20-25 g/L까지 농축한 후 90 ℃에서 $NaCO_3$를 첨가하여 Li_2CO_3를 침전·회수하였으며, XRD 분석을 통해 Li_2CO_3의 생성을 확인하였다. 이를 통해 마이크로웨이브 기반 암모늄 침출 공정이 폐리튬이온전지로부터 전이금속의 용출을 최소화하면서 리튬을 선택적으로 회수하고, 후속 침전 공정을 통해 Li_2CO_3로 전환할 수 있는 재활용 공정으로 활용될 수 있음을 확인하였다.

주제어 : 리튬, 폐리튬이온전지, 선택적 침출, 재활용, 오토클레이브

서론

리튬은 전기자동차(EV)와 에너지저장시스템(ESS) 산업의 성장에 따라 수요가 지속적으로 증가하고 있는 이차전지 핵심 자원이다. 특히 리튬은 LFP 및 NCM 계열 양극재의 주요 원료로 사용되며, 원료 확보 경쟁과 공급망 불안정성이 심화됨에 따라 사용 후 리튬이온전지로부터 리튬을 효율적으로 회수·재활용하는 기술의 중요성이 증가하고 있다. 그러나 기존의 황산 및 염산 기반 습식제련 공정은 다량의 시약 사용, 장비 부식 및 폐수 발생 등의 한계가 있으며, 리튬과 전이금속이 함께 침출됨에 따라 후속 분리·정제 공정이 요구된다.

이에 본 연구에서는 다양한 암모늄 화합물과 마이크로웨이브 기반 오토클레이브 공정을 적용하여 폐리튬이온전지로부터 리튬의 선택적 침출 가능성을 평가하였다. $(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl, NH_4OAc를 대상으로 침출 온도, 반응 시간, H_2O 부피, 당량비에 따른 리튬과 전이금속의 침출 거동을 비교하였으며, 최적 조건에서 얻어진 침출액으로부터 Na_2CO_3 침전을 통해 Li_2CO_3 를 회수하고자 하였다.

재료 및 실험방법

리튬의 선택적 침출을 위한 환원제로는 3가지 암모늄 화합물 ($(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl, NH_4OAc)을 선정하여 침출 특성을 비교·평가하였다. 폐리튬이온전지 분말과 암모늄 화합물을 100 mL 반응기에 투입한 후 마이크로웨이브 기반 오토클레이브를 이용하여 침출 실험을 수행하였다. 침출 과정에서는 승온속도를 2 ℃/min으로 고정하였으며, 침출 온도, 반응 시간 및 H_2O 부피를 주요 실험 변수로 설정하였다.

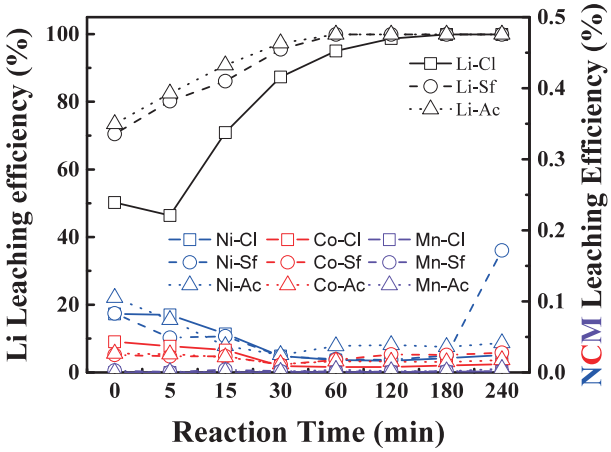
반응이 끝난 후 샘플은 고액분리하였고, 정제수로 잔사를 추가적으로 세척 후 ICP 분석을 통해 금속별 침출률을 계산하였다.

*Corresponding author : 박경수 / kspark@iae.re.kr

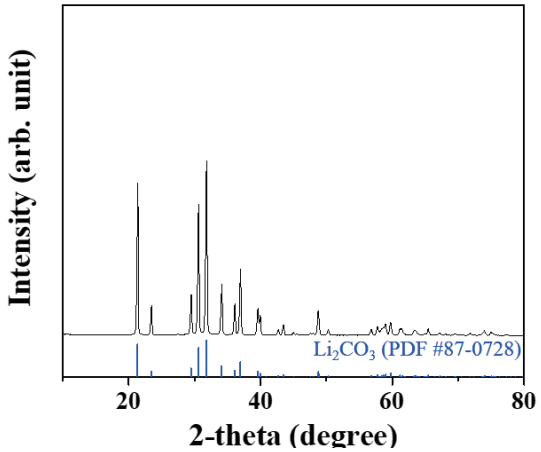
최종적으로 최적 조건에서 얻어진 침출액을 20~25 g/L의 리튬 농도로 농축한 뒤, 90 ℃ 조건에서 Na_2CO_3를 침전제로 투입하여 탄산리튬을 합성하였고, 회수된 고체 산물은 XRD와 ICP 분석을 실시하였다.

결과 및 고찰

다양한 암모늄 화합물을 이용한 침출 실험 결과, $(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl, NH_4OAc, 모두 특정 조건에서 약 99% 이상의 높은 리튬 침출률을 나타냈으며, 니켈, 코발트, 망간의 침출은 매우 낮은 수준으로 억제되어 리튬에 대한 높은 선택성을 확인하였다. $(NH_4)_2SO_4$, NH_4OAc는 220 ℃에서 1시간 반응시킬 경우 약 99% 이상의 리튬 침출률을 나타냈고 NH_4Cl의 경우 2시간의 시간이 필요하였다. 이 때 니켈, 코발트, 망간의 침출률은 0.05% 이하로 유지되었다.
최적 조건에서 얻어진 리튬 함유 침출액을 가열 농축한 후 Na_2CO_3를 첨가하여 백색 침전물을 회수하였으며 XRD 분석을 통해 해당 생성물이 Li_2CO_3 임을 확인하였다.



[반응 시간에 따른 금속들의 침출률]



[최종 회수된 분말의 XRD 분석 결과]

결론

마이크로웨이브 기반 암모늄 오토클레이브 공정은 폐리튬이온전지로부터 유가 자원(전이금속)의 손실을 최소화하면서 리튬만을 회수할 수 있는 기술임을 확인하였다. $(NH_4)_2SO_4$, NH_4Cl, NH_4OAc 등 다양한 암모늄 화합물이 리튬의 높은 선택성과 니켈, 코발트, 망간의 침출률은 억제시켜 첨가제로 유효함을 확인하였다.
전이금속 침출이 원천 차단된 용액을 활용함으로써 복잡한 정제 공정 없이 고순도 Li_2CO_3 제조가 가능함을 확인하였고, 이는 차세대 친환경 폐배터리 재활용 상용화에 기여할 것으로 기대된다.

자원순환 시대의 용매추출: 산업의 요구와 대응전략

Solvent Extraction in the Era of Resource Circulation: Industrial Needs and Response Strategies

이고기[1]*, 홍영란[1], 김병규[1], 박주황[2], 장승규[2]
포항산업과학연구원(RIST) 신소재공정연구소[1], 포스코에이치와이클린메탈 품질기술부[2]

초록

사용 후 배터리로부터 니켈, 코발트, 리튬 등 유가금속을 회수하는 습식제련 공정에서 용매추출은 불순물 제거와 금속 간 분리·정제를 담당하는 핵심 기술이다. 본 발표에서는 리사이클링 상업공정의 조업 과정에서 용매추출에 대한 산업의 요구가 공정 안정화, 공정 단축·원가경쟁력 확보, 설비 고도화, 환경 이슈 대응으로 변화해 온 과정과 이에 대응한 포항산업과학연구원(RIST)의 기술개발 사례를 소개한다. 아울러 대진대학교 안재우 교수와의 협업을 돌아보고, 자원순환 시대 용매추출 기술의 방향을 제시하고자 한다.

주제어 : 용매추출, 이차전지 리사이클링, 동시추출, 원심추출기, TOC

서론

사용 후 배터리 발생량 증가와 재생원료 사용 의무화 논의로 이차전지 리사이클링은 핵심광물 공급망 안정화의 주요 방안으로 부상하였다. 국내에서도 블랙파우더로부터 망간, 코발트, 니켈, 리튬을 회수하는 리사이클링 상용공정이 가동되고 있다. 이 공정에서 용매추출은 제품 품질과 회수율, 원가와 환경 부하를 좌우하는 핵심 단위공정으로, 조업 단계에 따라 산업의 요구도 변화하였다.

산업의 요구 변화와 대응전략

① **공정 안정화 :** 가동 초기 산업의 최우선 과제는 용매추출 공정의 빠른 안정화로서 원료 조성 변동에 따른 침출액 품질 변화, 상분리 지연 및 크러드(crud) 생성, 불순물 거동 등 현장 문제를 분석하고, 조업 조건 최적화를 통해 안정적인 제품 품질 확보를 지원하였다.

② **공정 단축 및 원가경쟁력 향상 :** 안정화 이후 공정 단축과 원가경쟁력 향상이 요구됨에 따라, 복수의 유가금속을 함께 추출하는 동시추출 공정과 결정화 공정을 생략할 수 있는 용액제품 판매 방안을 연구하였다.

③ **설비 고도화 :** 기존 박스형 믹서세틀러는 구조가 단순하고 운전이 용이한 반면, 넓은 설치 면적과 많은 유기상 충진량, 긴 상분리 시간이 한계로 지적된다. 이에 원심추출기 등 고효율 추출 설비의 적용 방안을 검토하고, 생산성 향상과 유기상 손실 저감을 위한 설비 고도화 방안을 연구하였다.

④ **환경 이슈 대응 :** 최근에는 추출 후 수상에 유기물 미세액적이 혼입되거나 유기물이 용해되어 폐수의 TOC(총유기탄소)가 증가하는 문제가 새로운 과제로 부각되었다. 이에 수상 내 유기물의 발생 원인과 거동을 파악하고, 유기물 미세액적 혼입 저감 및 유기물 제거 방안을 연구하고 있다.

⑤ **산학연 협력 :** 현장 대응형 기술개발에는 추출 평형, 분리 메커니즘 등 기초 현상의 이해가 필수적이었으며, 기초연구를 활발히 수행해 오신 대진대학교 안재우 교수 연구실과 꾸준히 협업하며 현장 문제의 원인 규명과 해결 방안을 함께 모색해 왔다.

결론

용매추출에 대한 산업의 요구는 상황에 따라 변화해 왔으며, 연구소는 단계별 기술개발로 이에 대응하였다. 자원순환 시대의 용매추출은 경제성과 환경성을 함께 만족하는 통합 공정기술로 진화하고 있어 기업·연구소·대학 간 협력이 더욱 중요하다.

* Corresponding author : 이고기 / yikoki@rist.re.kr

LFP 배터리 시장 성장과 재활용 산업의 대응

Growth of the LFP Battery Market and the Recycling Industry's Response

조연철[1*], 이아름[1], 최희영[1]
성일하이텍(주) 기업부설연구소[1]

초록

리튬인산철(LFP) 배터리는 코발트·니켈이 필요 없는 원가 구조와 안전성을 바탕으로 전기차 및 에너지저장장치(ESS) 시장에서 수요가 급격히 확대되고 있으며, 2025년 기준 글로벌 셀 수요의 60%를 차지할 정도로 배터리 화학종 전환을 주도하고 있다. 그러나 LFP 생산은 중국에 절대적으로 집중되어 있어(CAM 생산 기준 84%, LFP 셀·CAM 기준 99%), 향후 발생할 대규모 사용후 배터리(2040년까지 약 2.1TWh 전망) 물량 역시 원료 확보와 재활용 인프라 측면에서 지역적 편중 문제에 직면할 것으로 예상된다.

본 연구는 LFP 배터리 시장의 성장 동향과 이에 대응하는 재활용 산업의 현황을 시장·기술·가치평가 세 측면에서 분석한다. 특히 리튬 회수 중심의 습식제련(Hydrometallurgy) 공정이 주도하는 현재의 기술 구조에서 벗어나, 직접재생(Direct Recycling) 및 대안적 가치평가 모델(gate fee 등)이 LFP 재활용의 경제성을 개선할 수 있는 가능성을 검토한다. 이를 통해 LFP 재활용 산업이 아직 중국 중심의 초기 단계에 머물러 있으며, 비중국 지역의 기술 자립과 새로운 비즈니스 모델 구축이 향후 산업 성장의 핵심 과제임을 제시하고자 한다.

주제어 : LFP 배터리, 리튬인산철, 재활용, 소재화

*Corresponding author : 조연철 / ycjo@sungeelht.com

수소산업의 폐자원과 순환자원화 공정의 소개

Waste Resources and Circular Resource Recovery Processes in the Hydrogen Industry

김인태[1], 공수진[1], 주성연[1], 서덕형[1], 김지훈[1], 조의현[1], 박민서[1, 2], 하다혜[1], 오창관[1], 윤호상[1*]

[1]성일하이메탈(주), [2]전북대학교 자원에너지공학과

초록

수소경제의 확대와 함께 PEM 연료전지 및 수전해·전해 설비의 보급이 증가하면서 백금족금속(PGM)의 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 그러나 백금족금속은 국내 수요의 대부분을 수입에 의존하는 희소금속으로, 사용 후 재활용 및 소재화하는 순환자원화 기술의 확보가 중요하다. 본 연구에서는 수소산업에서 발생하는 대표적인 두 폐자원인 백금(Pt)과 이리듐(Ir)을 사용 후 PEM 연료전지 스택의 MEA와 폐치수안정성전극(DSA, Dimensionally Stable Anode)을 대상으로 자원을 회수하고 소재화하는 공정을 검토하였다. 연료전지 재활용 공정은 무산소 열분해, 친환경 Pt 습식침출, 전구체 제조 공정을 적용하였으며, 무산소 열분해는 500℃, 6시간 조건에서 소성 대비 CO_2 발생이 약 82% 저감되었다. Pt 고순도화 공정에서는 94.88%의 회수율과 99.95%의 순도를 확보하였다. 한편 DSA 재활용 공정은 Ti 모재 제거, 알칼리 용융·침출, 정제 및 환원으로 공정을 적용하였으며, Ir 회수율 63.93%, 순도 99.88%를 확인하였다. 회수된 Pt는 H_2PtCl_6, $H_2Pt(OH)_6$를 거쳐 에탄올아민 백금 용액 촉매 전구체 화합물로 제조하였고, Ir은 $IrCl_3$ 및 $IrCl_4$ 등의 화합물로 DSA 전극용 전구체로 제조하였다. 본 연구는 수소산업 폐자원의 고부가가치 PGM 회수와 소재의 재자원화, 탄소중립 및 국내 PGM 산업 경쟁력 향상에 기여할 수 있을 것으로 예상한다.

주제어 : 백금, 이리듐, 자원순환, 연료전지, 수소산업

서론

탄소중립과 수소경제의 확대는 연료전지와 수전해 설비의 보급을 촉진하고 있으며, 이에 따라 핵심 소재인 PGM의 안정적인 공급망 확보가 중요한 과제로 부상하고 있다. 특히 PEM 연료전지의 MEA에는 Pt 촉매가 사용되고, 수전해 및 전해 공정에 활용되는 DSA에는 Ir계 산화물 코팅층이 적용된다. 수명이 종료된 부품에 잔존하는 PGM은 상대적으로 높은 품위를 가진 도시광산 자원으로 활용할 수 있으므로, 단순 폐기보다 회수·정제·소재 재투입으로 연결되는 순환체계 구축이 필요하다. 본 발표에서는 이러한 관점에서 폐 PEM 연료전지와 폐 DSA를 대상으로 Pt와 Ir을 회수하는 두 가지 순환자원화 공정의 구성과 주요 연구성과를 소개한다.

재료 및 실험방법

연료전지 재활용에서는 사용 후 PEM 연료전지 스택에서 회수한 MEA를 주요 원료로 사용하였다. MEA는 무산소 분위기의 탄화로에서 500℃, 6시간 동안 열분해하여 탄소계 담지체를 제거하고 Pt를 함유한 ash로 농축하였다. 이후 열분해 ash를 대상으로 HNO_3, H_2O_2 및 $NaClO_3$ 와 같은 산화제로 습식 침출 조건을 비교하여 Pt 침출 특성을 확인하였다. 회수 Pt는 정제 후 H_2PtCl_6, $H_2Pt(OH)_6$를 거쳐 에탄올아민 백금 용액 전구체 화합물로 제조하고, Polyol법을 이용하여 Pt/C 촉매를 제조·평가하였다.

DSA 재활용에서는 Ti 기지체에 Ir계 산화물 코팅층이 형성된 폐전극 스크랩을 원료로 사용하였다. 황산침출을 이용하여 Ti계 모재를 제거한 후 Na_2O_2 등을 융제로 사용한 알칼리 용융·침출을 수행하였다. 이후 NH_4Cl 침전을 이용한 정제와 $(NH_4)_2IrCl_6$ 형성을 거쳐 800~900℃ 환원공정으로 Ir 분말을 제조하였다. DSA 전극용 전구체로 $IrCl_3$ 및 $IrCl_4$를 제조하였으며, 열분석을 통해 화합물의 열적 거동을 확인하였다.

*Corresponding author : 윤호상 / nayoon@sungeel.com

결과 및 고찰

연료전지 재활용 공정에서 MEA의 무산소 열분해 후 CO_2 발생량은 소성 대비 82% 감소하였다. 220장의 MEA(총 731g)를 처리한 결과 약 305.6g의 ash가 얻어졌고, ash 내 Pt 함량은 37,618ppm으로 농축되었다. 산화제별 Pt 침출 실험에서는 HNO_3, H_2O_2 및 $NaClO_3$를 적용했을 때 각각 96.10%, 94.24%, 95.52%의 회수율을 나타내었다. 후속 고순도화 공정을 통해 최종적으로 94.88% 회수율로 순도 99.95% Pt를 수득하였다. 또한 회수된 Pt를 이용해 촉매 전구체 화합물을 제조하였으며, Pt/C 촉매는 백금담지량 31.75 ~ 39.76%로 입도크기가 2.20 ~ 11.84nm 수준으로 제조되었다.

DSA는 3차 황산침출 후 모재 제거율이 64% 수준이었으며, 원료 내 Ir 함량은 4,660ppm에서 8,498ppm으로 농축되었다. 알칼리용융공정에서 Ir폐기물 : NaOH : Na_2O_2 투입 몰비가 1 : 20 : 7.5로 증가할 때 Ir 침출율은 85%로 가장 좋았으며, 침출 후 수득된 Ir은 회수율 63.93%, 순도 99.88%로 확인되었다. 회수된 Ir은 H_2IrCl_6를 거쳐 $IrCl_3$ 및 $IrCl_4$로 제조할 수 있었으며, 동시에 재활용 소재를 이용한 DSA 전극의 평가를 진행하였다.

결론

수소산업의 확대에 따라 발생량이 증가할 것으로 예상되는 Pt와 Ir의 자원 회수와 재자원화 공정에 대해 폐 PEM 연료전지와 폐 DSA를 이용하여 확인하였다. 본 연구에서 연료전지 재활용은 무산소 열분해와 친환경 습식침출, 고액분리 및 전해회수를 연계하여 Pt를 고순도로 회수하고 촉매 전구체로 재제조하는 Closed-Loop 공정의 가능성을 확인하였다. DSA 재활용은 Ti 모재 제거와 알칼리 용융·침출, 정제·환원 공정을 통해 고순도 Ir을 회수하고 이를 화합물 및 전극 소재로 연결하는 순환자원화 기반을 확보하였다. 궁극적으로 이러한 기술은 수소산업에서 발생하는 폐자원을 국내 PGM 소재 공급망으로 재편입시키는 순환경제 모델로 발전할 수 있으며, 희소금속 자원안보 강화와 탄소중립, 국내 수소산업의 소재·부품 경쟁력 확보에 기여할 것으로 기대된다.

Table 1. LCA 평가를 통한 온실가스 배출량 비교

구분		합계	공정 배출	보조물질	용수	에너지	폐기물처리	증감율(%)
Average	기존	2,262.96	0.60	346.60	0.05	1,915.67	0.04	-32.7%
		100.00%	0.03%	15.32%	0.00%	84.65%	0.00%	
	개선	1,522.03	0.01	274.33	0.23	1,245.84	1.62	
		67.26%	0.00%	18.02%	0.02%	81.85%	0.11%	

용매추출제 합성 공정 및 적용

Synthesis Processes and Applications of Solvent Extractants

문용수[1], 장연희[1*]
[1]㈜이에이포스 연구소

초록

㈜이에이포스는 Purification(정제)을 핵심가치로 삼고 자체 합성·제조 기술을 기반으로 코발트 추출제, 리튬 추출제, 코발트·니켈 공추출제 및 희소금속 추출제 등을 개발하고 있다. 본 발표에서는 각 추출제의 합성공정과 구조적 특성, 유가금속 분리·회수 공정의 적용 방향을 소개한다. 목표금속과의 상호작용 및 유기상 내 거동을 고려한 분자 설계를 바탕으로 합성·정제 조건을 검토하고, 추출 성능과 용해도, 상분리성 등을 평가한다. 축적된 합성 기술과 공정 개발 역량을 활용하여 습식제련 공정의 재활용 및 희소금속 회수 분야로 적용을 확대하고, 용매추출제 국산화와 자원순환 공정의 효율 향상 및 핵심소재 공급망 안정화에 기여하고자 한다.

주제어 : 유가금속 회수, 자원순환, 용매추출제, 추출제 합성, 리튬 추출

서론

전 세계적으로 양극활물질의 수요가 매우 빠르게 증가하고 있으며 중국 정부의 VAT 환급 정책 변경과 희토류 관련 제품의 수출통제 강화로 용매추출제의 가격 상승과 공급이 불안정한 실정이다. 그러므로 고선택성 킬레이팅 용매추출제의 국산화는 자원순환 경제 실현을 위한 기반 기술이라고 할 수 있다.

금속 함유 공정액에서 유가금속을 회수하기 위해서는 목표 금속과 원수 조성에 적합한 화학구조를 가지는 용매추출제가 필요하다. 추출제의 합성 분자구조와 순도는 금속 추출 거동에 중요한 영향을 미치며, 미반응 원료와 부산물은 용해도 및 상분리 특성을 변화시킬 수 있다. 따라서 목표 물질의 합성부터 정제, 품질분석 및 추출평가를 연계한 기술 개발이 중요하다. ㈜이에이포스는 코발트·니켈 공추출제, 리튬추출제 및 희소금속 추출제 등의 개발을 위하여 분자 디자인부터 스케일업을 위한 공정 최적화를 수행하고 있다. 본 발표에서는 인산계 추출제의 합성공정과 제조규모 확대 결과를 제시하고 금속별 적용 방향을 논의한다.

실험 방법

용매추출제의 구조는 금속과 상호작용하는 작용기와 유기상 내 용해성을 부여하는 소수성 부분을 함께 고려하여 검토하였다. 리튬추출제의 경우는 인 중심의 산성 유기인계 구조를 가지며, 금속과 상호작용하는 산소 함유 작용기와 유기상 내 용해성에 영향을 미치는 알킬기를 포함하도록 일액형 분자구조를 디자인하였다. 또한, 코발트·니켈추출제는 금속추출의 분리도를 높이면서 고추출율을 가지도록 공정에서 라디칼 개시 속도와 알킬화 반응의 propagation 속도를 함께 제어하였다. 고순도 합성을 위하여 원료의 전처리 공정을 진행하였으며 합성 후에는 수세와 상분리 등의 후처리 및 정제공정을 적용하여 잔류 성분을 제거하였다. 공추출제의 합성에서는 친수성기와 알킬기의 비율을 변경하면서 안정된 계면 분리가 이루어질 수 있도록 분자구조를 선정하였다. 합성 분자구조를 선정하기 위해서는 추출거동과 추출율과의 관계도 확인하였다.

* Corresponding author : 장연희 / yhjang@ea-phos.com

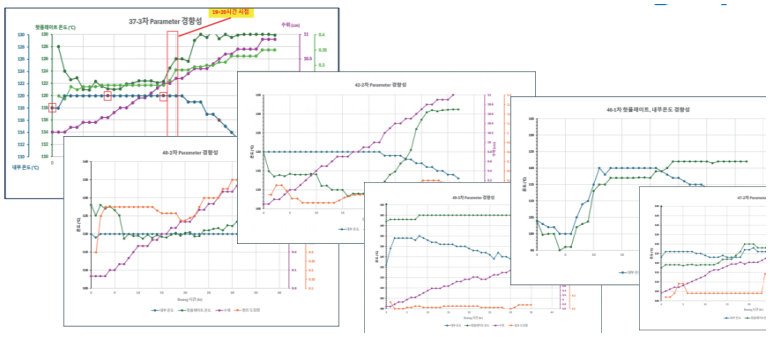


Fig. 1. 추출제의 합성 온도 프로파일 분석

실험실 합성조건을 바탕으로 100 L & 150L반응기를 이용한 파일럿 제조를 수행하였다. 제조 스케일 증가를 위하여 혼합·열전달 변화를 고려하여 원료 투입, 교반·냉각 및 후처리 조건을 검토하며 공정변수를 최적화하였다.

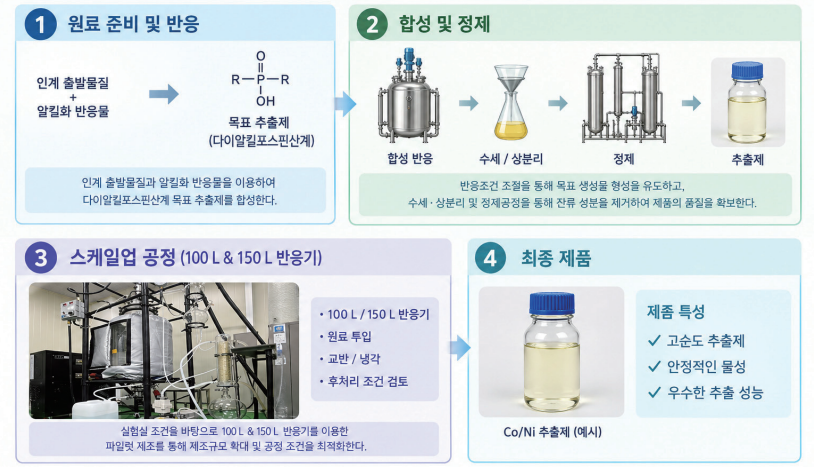
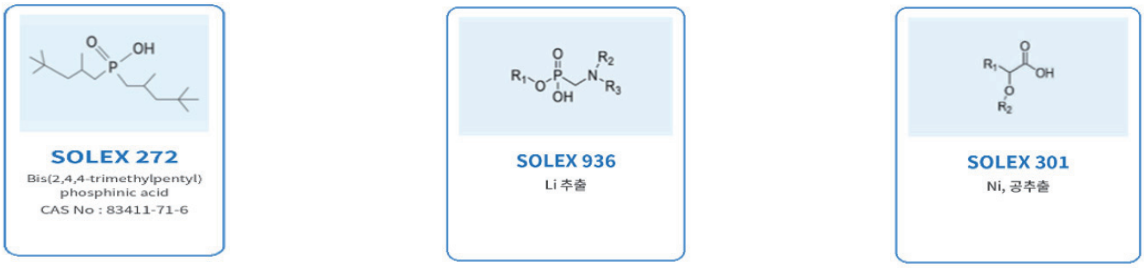


Fig. 2. 추출제의 합성 공정 흐름도

결론 및 고찰

대상 금속의 특성과 공정 조건을 고려하여 용매추출제의 구조를 설계하고, 금속별 특성에 적합한 합성·정제공정을 개발하였다. 합성 과정에서는 반응조건과 원료 투입조건 등을 조절하여 목표 생성물의 형성을 유도하였으며, 수세·상분리 및 정제공정을 통해 제품의 품질을 관리하였다. 이러한 과정을 통해 유가금속용 용매추출제의 자체 합성 및 제조 기반을 확보하였다. 합성된 추출제는 고순도 분석 결과에 따라 높은 추출률과 안정된 유기상 분리를 보였다.



(a)Co-Extractant(SOLEX 272) (b)Co-Extractant(SOLEX 272) (c)CO/Ni-Extractant(SOLEX 301)

Fig. 3. ㈜이에이포스 개발 용매추출제 구조 및 적용 대상 금속

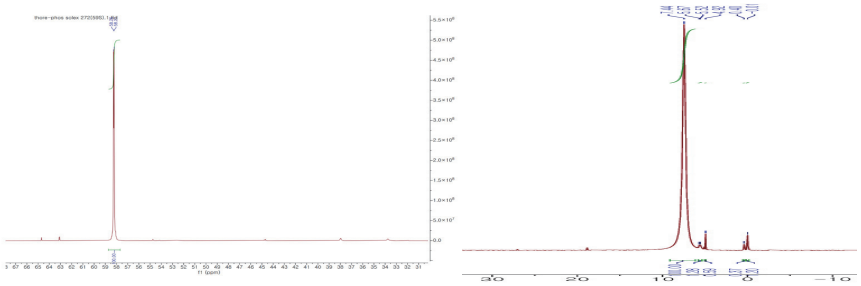


Fig. 4. NMR analysis of the synthesized extractant

㈜이에이포스는 개발된 추출제의 제조 및 품질관리 기술을 고도화하고, 자체 합성·제조 및 적용평가 역량을 바탕으로 금속별 추출제 개발과 폐배터리 재활용을 비롯한 유가금속 및 희소금속 회수 공정으로의 적용 범위를 확대하고자 한다. 이를 통해 용매추출제의 국산화와 자원순환 공정의 효율 향상에 기여하고자 한다.

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

순환경제형 미활용 흑연 고부가 소재화 기술개발사업

The Korean Institute of Resources Recycling

「순환경제형 미활용 흑연 고부가 소재화 기술개발사업」특별심포지엄

◈ 개요

• 순환경제형 미활용흑연 고부가 소재화기술개발사업 특별심포지엄

◈ 과제 내용

• CO_2활용 전단유동 기반 미활용 흑연 신 정제기술 개발
- 미활용 흑연 전처리 등급화 기술
- CO_2 활용 전단 유동 정제 기술
- 불순물 유가소재화 및 폐수 제품화 기술

• 정제 흑연의 저탄소 공정 활용 고품질 기능성 흑연/그래핀 제조기술 및 산업 응용기술 개발
- 정제흑연의 흑연/그래핀 제조 및 등급화
- 박리흑연/그래핀 특성화 및 기능화
- 산업적용 평가 및 시제품화

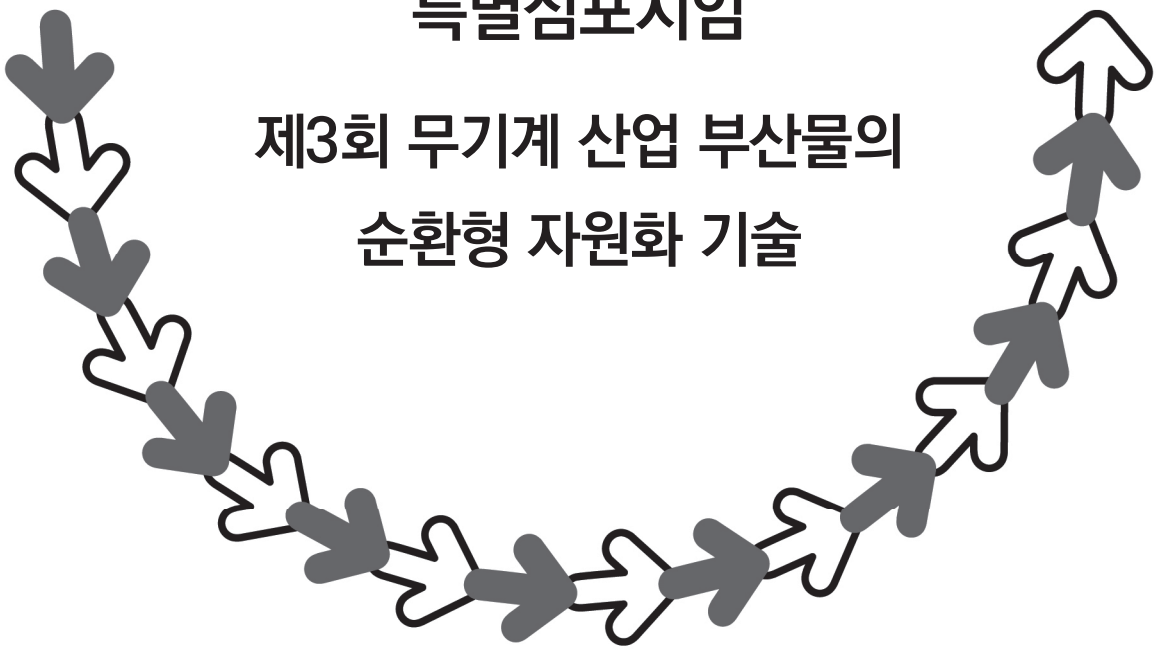
• LCA/PCF 수행
- PCF 기반 CO_2 감축효과 분석
- 공정분석 기반 LCA 수행 및 검증 체계 구축

Recycling Korea
2026 Daejeon

제65회 학술발표대회

특별심포지엄

제3회 무기계 산업 부산물의 순환형 자원화 기술



The Korean Institute of Resources Recycling

핵심광물 공급망과 국내 자원순환 산업의 연계 방향

정은진[1*]
[1]한국산업기술기획평가원

최근 글로벌 공급망의 불확실성과 자원안보 경쟁이 심화되면서, 리튬, 니켈, 코발트, 희토류 및 백금족 금속 등 핵심광물의 안정적 확보는 국가 제조업 경쟁력을 좌우하는 핵심 요소로 부상하고 있다. 특히 이차전지, 반도체, 미래 모빌리티, 재생에너지 등 첨단산업은 핵심광물 확보에서 시작하여 소재/부품/장비, 최종제품 생산으로 이어지는 안정적인 산업 공급망을 필요로 한다. 따라서 핵심광물은 그 자체보다 국내 소부장 산업의 성장과 부가가치 창출을 견인하는 산업 Value Chain의 출발점이라는 의미가 크다.

우리나라는 높은 제조경쟁력을 보유하고 있으나 주요 핵심광물의 해외 의존도가 높아 원료 공급 단계의 불안정성이 산업 전반으로 확산될 가능성이 크다. 이에 핵심광물 공급망 전략은 해외 자원 확보에만 머무르지 않고, 확보된 광물을 국내에서 정제·련하고 고순도 소재로 전환하여 부품·장비 및 최종제품으로 연결하는 소부장 산업 기반과 함께 추진되어야 한다. 즉, 광물?정제·련?소재?부품·장비?제품으로 이어지는 전주기 산업생태계의 구축이 중요하다.

동시에 산업 Value Chain은 제품 생산에서 끝나서는 안 된다. 폐배터리, 전자스크랩, 폐촉매 및 공정 부산물 등은 단순한 폐기물이 아니라 국내에서 다시 확보 가능한 핵심광물 자원이다. 이들로부터 리튬, 니켈, 코발트, 희소금속 및 백금족 금속을 회수하여 다시 소재산업에 투입함으로써 광물?소재?부품·장비?제품?폐자원?재생광물?소재로 이어지는 선순환 구조를 구축할 수 있다. 천연광물이 산업 Value Chain의 시작점이라면, 폐자원은 이를 지속가능하게 순환시키는 두 번째 원료 공급원이라 할 수 있다.

본 발표에서는 핵심광물 확보와 국내 소부장 산업의 연계 구조를 살펴보고, 폐자원을 제2의 핵심광물 공급원으로 활용하여 공급망의 완결성을 높이기 위한 기술적, 산업적 방향을 제시하고자 한다. 궁극적으로 광물과 폐자원은 국내 소부장 산업을 움직이는 '마중물'이며, 이 두 자원축을 연결하는 선순환형 공급망 구축이 우리나라 첨단산업의 지속가능한 경쟁력을 결정하는 핵심 요소가 될 것이다.

*Corresponding author : 정은진 / ejjung1@keit.re.kr

반도체 CMP 공정의 자원순환 이슈와 기술 동향

Resource Circulation in CMP: Material Recycling of Slurry

이강천*
광운대학교 전자재료공학과

초록

화학적 기계적 평탄화(CMP)는 반도체 제조 공정 중 소재 이용 효율이 가장 낮은 단계에 속한다. 연마 패드에 공급된 슬러리 가운데 실제 웨이퍼 평탄화에 기여하는 것은 극히 일부이며, 나머지는 수 초 내에 희석된 폐액 형태로 배출된다. 여기서 흔히 간과되는 점은 이 폐액이 화학적으로 열화된 것이 아니라 대부분 희석된 상태라는 것이며, 이것이 슬러리 회수가 기술적으로 성립할 수 있는 근거가 된다. 연마입자 수급, 용수 사용, 폐기물 처리가 단순한 원가 항목에서 공정 운영의 제약 조건으로 옮겨가면서 슬러리 회수에 대한 관심도 높아지고 있다.

본 발표에서는 CMP 슬러리의 소재 재활용 분야에서 지금까지 실증된 내용을 세 가지 경로로 나누어 정리한다. 첫째는 배출 슬러리의 성상을 보정하여 직접 재투입하는 방식, 둘째는 연마입자를 회수하여 재농축하는 방식, 셋째는 원소 단위로 회수한 뒤 재합성하는 방식이다. 대표 사례는 실리카계, 금속계, 세리아계 슬러리에서 선별하며, 이들 슬러리는 연마입자와 첨가제가 재사용 과정을 견디는 정도에서 상당한 차이를 보인다. 이어서 재생 슬러리가 아직 표준 공정으로 자리잡지 못한 이유를 입자 표면화학의 열화, 웨이퍼에서 유래한 용존 성분의 축적, 입도분포의 변화 측면에서 논의하고, 회수 가능성을 연마입자 설계 단계의 요구사항으로 다루는 최근 접근을 대비하여 소개한다. 마지막으로 재생 슬러리의 실질적인 판정 기준은 제거율이 아니라 결함 수준이라는 점을 제시한다.

주제어 : CMP, 연마슬러리, 연마입자, 자원순환, 소재재활용

서론

반도체 제조에서 CMP는 다층 배선과 소자 구조를 구현하기 위한 필수 평탄화 공정이며, 공정 노드가 미세화될수록 적용 단계 수가 계속 늘어나고 있다. 그러나 CMP는 소모성 물질의 투입량 대비 유효 활용률이 낮은 공정으로, 공급된 슬러리의 상당 부분이 연마에 기여하지 못한 채 배출된다는 점은 오래전부터 지적되어 왔다.

슬러리 폐액은 연마입자와 함께 분산제, 산화제, pH 조절제, 착화제 등의 첨가제를 포함하며, 여기에 웨이퍼와 패드에서 유래한 제거 생성물이 혼입된다. 다만 린스 단계에서 크게 희석될 뿐 구성 성분 자체가 완전히 소모되거나 분해되는 경우는 제한적이며, 이 때문에 농축과 성상 보정만으로도 상당 부분 기능을 회복시킬 수 있다는 관찰이 여러 연구에서 공통적으로 보고되었다. 이는 슬러리 재활용을 폐기물 처리의 문제가 아니라 소재 회수의 문제로 다룰 수 있게 하는 출발점이다.

한편 재활용의 난이도는 슬러리 종류에 따라 크게 달라진다. 연마입자의 종류, 첨가제의 구성, 제거 생성물의 성질이 서로 다르기 때문이며, 특히 입자 표면의 화학적 상태가 제거 메커니즘에 직접 관여하는 경우에는 물리적 회수만으로 성능이 회복되지 않는다. 본 발표는 이러한 차이를 중심으로 실증 사례와 기술 동향을 정리하고, 재생 슬러리 도입을 가로막는 실질적 장벽을 규명하는 것을 목적으로 한다.

결론

CMP 슬러리의 소재 재활용은 배출 슬러리의 직접 재투입, 연마입자의 회수와 재농축, 원소 회수 후 재합성이라는 세 가지 경로로 정리할 수 있으며, 각 경로는 슬러리 종류에 따라 적용 가능성과 성숙도가 크게 다르다. 기술적 장벽은 회수 자체보다 회수 이후의 품질 회복에 집중되어 있으며, 연마입자 표면화학의 열화, 용존 성분의 축적, 입도분포의 변화가 주요 요인이다.

*Corresponding author : 이강천 / kclee@kw.ac.kr

따라서 재생 슬러리의 판정 기준은 제거율 회복 여부가 아니라 결함 수준의 동등성 확보 여부가 되어야 하며, 이를 담보하기 위해서는 입도분포와 대입자 수, 표면 전위에 대한 인라인 계측이 전제되어야 한다. 아울러 회수 가능성을 연마입자 설계 단계에서부터 요구사항으로 반영하는 접근이 향후 유효한 방향이 될 것으로 판단된다.

탈황 폐촉매에서 바나듐의 건식 제련 회수

Pyrometallurgical Recycling of Vanadium from Spent Hydrodesulfurization Catalysts

박동휘[1*], 이준호[2], Morita Kazuki[3], 정인호[4]

[1]고려대학교 첨단소재부품연구소, [2]고려대학교 신소재공학과, [3]도쿄대학교 재료공학과, [4]서울대학교 재료공학과

초록

탈황 폐촉매에는 유가 금속인 바나듐이 포함되어 있어 폐촉매에 포함된 불순물을 제거하고 선별적으로 회수할 필요가 있다. 기존에는 염배소-습식 침출법이 가장 대표적으로 사용하는 회수법이었으나, 침출 공정에서 발생하는 중금속을 포함한 산성 폐액의 미처리 방류 시 환경오염이 심화되는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존의 습식 침출법의 대체 방안으로 탈황 폐촉매 내 바나듐의 용융 구리 건식 회수를 실험적으로 평가하였다. 산화 배소 공정이 끝난 폐촉매에 규산 칼슘을 첨가한 뒤 고온에서 용융 구리와 반응시켜 용융 슬래그에 포함되었던 산화바나듐을 구리 합금 중으로 회수하였다.

주제어 : 탈황 폐촉매, 바나듐, 건식 회수

서론

바나듐은 철강, 화학, 배터리 및 항공 산업에서 사용되는 고부가 금속이다. 그러나 자연상에 존재하는 바나듐은 다양한 광석에 미량 포함되어 안정적인 화합물을 형성하고 있어 직접적으로 생산하기보다는, 각종 공정의 부산물로부터 추출하는 간접적인 방식으로 생산하고 있다. 최근 바나듐 레독스 플로우 배터리를 비롯해 다양한 산업에서 바나듐의 수요가 증가하고 있어, 다양한 부산물 및 폐기물로부터 바나듐의 회수가 필요하다.

바나듐 탈황 폐촉매는 대표적인 바나듐 회수원 중 하나로, 회수법으로 칼슘 및 나트륨 염배소 후 산침출 방법을 가장 많이 사용하고 있다. 산을 이용한 습식 공정은 바나듐을 비롯한 유가 금속의 회수율이 높으나, 침출 후 발생하는 폐액의 환경오염 문제와 높은 후처리 비용이 단점으로 꼽힌다. 따라서 본 연구에서는 비교적 유해 폐기물 발생이 적은 건식 회수 방법에 관해 연구를 진행하였으며, 회수 방법은 저자가 이전에 진행했던 연구 결과[1)]에서 착안하였다.

재료 및 실험방법

산화 배소 후 탈황 폐촉매 조성과 유사한 $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$ 기반 슬래그와 구리를 고온에서 반응시킨 뒤 냉각시켜 바나듐을 석출시키고 슬래그와 구리의 조성을 측정하였다.

결과 및 고찰

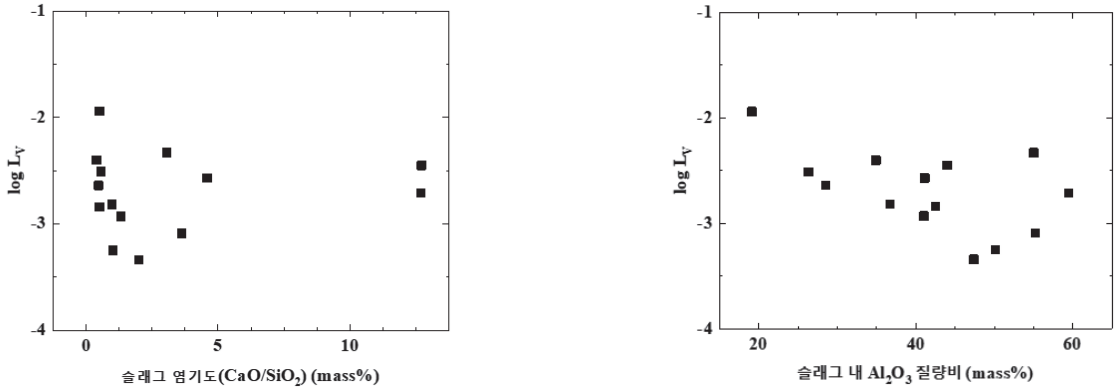
용융 구리와 $CaO\text{-}SiO_2\text{-}Al_2O_3$ 기반 슬래그를 반응시킨 뒤 각 조성을 측정하였으며, 바나듐의 회수율을 정량적으로 평가하기 위해 슬래그 중 바나듐과 구리 중 바나듐의 질량 백분율을 이용하여 바나듐의 분배비를 계산한 뒤 그림 1에 그래프로 슬래그 염기도와 슬래그 중 Al_2O_3의 질량비에 대해 도시하였다. 사용한 바나듐의 분배비 계산 식은 아래와 같다.

L_V = 슬래그 중 바나듐(mass%)/구리 중 바나듐(mass%)

반응 결과 슬래그 중에 포함되었던 산화바나듐을 99.9 % 이상 구리 합금 중으로 회수하였다. 바나듐의 분배비는 슬래그 염기도에 대해 뚜렷한 경향성을 보이지 않았으며, 슬래그 내 Al_2O_3 질량비에 대해서는 약 50%에서 가장 낮은 분배비를 보였으며

*Corresponding author : 박동휘 / xmds1993@gmail.com

Al_2O_3 질량비가 감소하거나 증가함에 따라 증가하는 경향성을 보였다.



(a) 슬래그 염기도에 대한 경향성 (b) 슬래그 중 Al2O3 질량비에 대한 경향성

Fig 1. CaO-SiO_2-Al_2O_3 기반 슬래그와 용융 구리 중 바나듐의 분배비

결론

용융 구리를 이용하여 탈황 폐촉매 내 바나듐의 건식 회수 방법을 실험적으로 평가하였다. 실험을 통해 슬래그 중에 포함된 대부분의 산화바나듐이 용융 구리 중으로 회수되었다.

참고문헌

[1] Park, D. (2026). *Thermodynamics of VOx in the CaO-Al_2O_3-SiO_2-VO_x slag system for suppressing V loss during steelmaking processes* [Doctoral dissertation, The University of Tokyo].

스크랩 기반 EAF 강의 강-산화물 계면에서의 구리 농화상 형성 및 안정성에 관한 연구

조민서[1], 이준호[1*], 김하은[1], 박지우[1], 이주영[1], 김도훈[1], 최연지[1]
[1]고려대학교

철강 산업은 기존의 철광석 중심 생산 방식에서 전기로를 활용한 스크랩 기반 제철로의 구조적 전환을 겪고 있다. 전기로는 철 스크랩을 주원료로 사용하여 온실가스 배출량을 감축할 수 있으나, 철강의 재활용 과정 중에 산화 저항성이 비교적 높은 트램프 원소가 스크랩 내에 축적된다. 특히 구리는 상대적으로 고농도로 존재하며, 열처리 공정에서 산화물이 아닌 형태로 강재와 산화 스케일의 계면에서 구리 농축상을 형성한다. 이 액상이 결정립계를 따라 침투하면 표면 적열 취성이라는 결함을 유발하며, 스크랩 기반의 강판재 생산에 제약이 된다.
본 연구에서는 국내 전기로 제강사에서 철 스크랩을 원료로 생산한 철근의 화학 조성을 분석하여 현 시점에 국내에서 유통되는 스크랩 내 트램프 원소의 농축 정도를 파악하였다. 또한, 해당 샘플로 고온 산화 실험을 진행하여 강과 산화 스케일의 계면에 구리 농화상의 생성 여부를 확인하였다. 이를 바탕으로 열역학 계산으로 트램프 원소가 고온의 강/스케일 계면에서 생성되는 구리 농화 액상의 양에 미치는 영향을 조사하였으며, 새로운 구리 당량식 및 임계값을 제안하였다.

주제어 : 스크랩, 트램프 원소, 표면 적열 취성, 구리 당량식

*Corresponding author : 이준호 / joonholee@korea.ac.kr

EoL LIB로부터 유가금속 회수를 위한 공정 연구

Process Research for critical metals recovery from EoL LIB

하륜[1], 권효정[1], 신현우[1], 강영조[1*]
동아대학교[1]

초록

전기 자동차 시장의 폭발적인 성장으로 리튬 이온 배터리 (LIB) 의 생산량이 크게 증가하면서 공정 스크랩이나 End-of-Life (EoL) 배터리에서 유가금속을 경제적이고 친환경적으로 회수하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 폐 LIB의 황산 침출 후 침출액 내 Ni, Co, Mn 등 유가금속을 용매추출을 통해 분리할 수 있는데, 이는 각 원소마다 적합한 용매를 개별적으로 사용할 필요가 있고 공정 단계도 복잡하다. 이에 본 연구는 다단계 용매추출 공정의 복잡성을 극복하고자, 전해환원 방식을 도입하여 유가금속의 선택적 회수 및 공정 단순화를 도모하였다. 특히 전해조건에 따라 전해환원 과정에서 형성되는 금속 증착물이 변화할 수 있다는 점에 주목하였다. 이러한 물리적 형태 차이는 음극판으로부터의 탈착 공정을 단순화할 수 있을 뿐만 아니라, 후속 황산 재용해 공정에서의 금속 용해 효율과 선택적 분리 가능성에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 연구는 전류밀도, pH 등 공정 조건에 따라 증착물의 구조적 특성과 물리적 형태를 제어하고, 이를 통해 합금 회수와 재용해 효율 향상을 동시에 달성할 수 있는 가능성을 평가하였다.

주제어 : 리튬이온배터리, 폐배터리 재활용, 유가금속 회수, 황산침출, 전해환원

서론

최근 글로벌 탄소중립 기조와 함께 전기 자동차(EV) 산업이 급격히 성장하면서, 수명이 다한 폐 리튬이온 배터리의 친환경적 재활용은 자원 안보와 환경 보호 측면에서 필수적인 과제로 자리 잡았다. 현재 폐배터리의 양극재 블랙파우더(Black powder)를 황산 등으로 침출한 후, 용액 내에 존재하는 N, Co, Mn 등의 유가금속을 회수하기 위해 주로 용매추출법(Solvent Extraction)을 활용하고 있다. 그러나 용매추출법은 각 원소에 적합한 유기 용매를 개별적으로 적용해야 하며, 다단의 추출 및 탈거 공정을 거쳐야 하므로 초기 투자비와 운영비가 높고 폐액 처리의 부담이 크다는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 전해환원(Electroreduction) 공정이 주목받고 있다. 전해 공정은 전자의 수수 작용만을 이용하므로 추가적인 화학 물질의 사용을 최소화할 수 있다. 그러나 다성분계 침출액에서 전해환원을 진행할 경우, 금속 이온 간의 표준환원전위 차이 및 확산층 내 물질 전달 속도에 따라 전착물의 순도와 물리적 형태가 민감하게 변화한다. 음극판에 전착된 금속 박막을 회수하기 위해 물리적인 스크래핑(Scraping) 등 추가적인 탈착 공정이 요구되며, 이는 공정 자동화를 저해하고 경제성을 하락시키는 주요 원인으로 작용한다.

재료 및 실험방법

본 연구에서는 황산 침출액 내 유가금속의 전해환원 회수 가능성을 평가하기 위해, 황산니켈($NiSO_4$), 황산코발트($CoSO_4$), 황산망간($MnSO_4$) 기반의 침출 용액을 사용하였다. 용액은 실제 폐 LIB 조성을 고려하여 황산농도를 조정한 뒤, 24시간 동안 교반하여 안정된 금속 이온 용액을 제조하였다. 전해환원 실험은 제조된 용액에 Pt mesh를 양극으로, STS plate를 음극으로 구성한 전해 셀에서 수행하였다.

결과 및 고찰

SEM-EDS 분석을 통해 Ni과 Co는 음극 박막에서 금속 형태로, Mn은 양극 잔사 분말(c)에서 산화물 형태로 회수됨을 입증하

*Corresponding author : 강영조 / youngjok@dau.ac.kr

였다. 특히 도금 박막의 단면 분석 결과, 음극 계면부(a)는 Ni이, 용액과 맞닿은 표면부(b)는 Co가 주를 이루는 층상 구조가 확인되었다. 이는 표준환원전위가 상대적으로 높은 Ni(-0.25V)이 계면에서 우선 환원되고, 점차 확산층 내 Ni 이온이 고갈됨에 따라 Co(-0.28V)의 환원이 가속화되는 열역학 및 동역학적 메커니즘에 기인한다.

Table 1. SEM-EDS by electroplated film and residual powder

		Ni	Co	Mn	O
0.4A	10m	51.11	47.44	0.13	1.32
	60m	24.52	74.24	0.14	1.10
1.2A	10m	51.57	44.67	0.62	3.15
	60m	23.03	73.90	0.71	2.37

(a) initial layer of electroplated film

		Ni	Co	Mn	O
0.4A	10m	17.14	82.04	0.74	0.08
	60m	18.29	74.23	0.83	6.64
1.2A	10m	17.56	81.24	0.28	0.92
	60m	21.10	66.32	2.36	10.22

(b) final layer of electroplated film

		Ni	Co	Mn	O
0.4A	10m	1.26	1.14	65.67	31.60
	60m	0.59	0.91	63.75	34.74
1.2A	10m	1.96	1.25	68.10	28.69
	60m	0.79	0.47	66.82	31.92

(c) residual powder

또한, 회수되는 박막의 두께는 환원 시간에 비례해 선형 증가했으며, 전해환원 후 30분 교반 시 발생하는 전단 응력을 활용해 자발적 탈각이 가능함을 확인하였다.

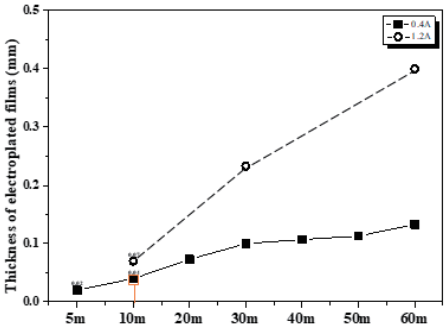


Fig.1. Thickness of electroplated films

결론

본 연구에서 전해 조건에 따른 전착 거동을 분석한 결과, 전류와 환원시간이 증가할수록 입자의 수지상 성장이 관찰하였다. 특히, 전착 박막의 임계 두께를 정밀하게 제어함으로써, 전해 후 박막이 분리되는 자발적 탈각을 통해 후처리 공정이 생략 가능한 최적의 단위 환원시간을 도출하였다. 또한 용액 내 반응한 Ni, Co는 99% 이상 음극에 고순도 합금상으로 전착된 반면, Mn은 양극에서 산화물 형태로 분리됨을 확인하였다. 이러한 증착물의 물리적 형태 제어 및 고순도 합금상 확보는 후속 황산 재용해 공정에서의 금속 용해 효율과 선택적 분리 가능성을 극대화하는데 영향을 미친다.

사사

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한
연구 과제입니다. (No. RS-2024-00401917)

무기계 부산물을 활용한 폐배터리의 업싸이클링 기술

Upcycling of Spent Lithium-Ion Batteries Using an Inorganic Byproduct

이주혁[1], 김영재[1*], 권오서[1], 전상현[1], 최지원[1]
인하대학교 신소재공학과[1]

초록

본 연구에서는 습식제련 공정의 무기계 부산물인 망초(Na_2SO_4)를 활용한 고온환원 열처리로 폐배터리의 리튬을 황화리튬(Li_2S) 형태로 선회수하였다. 이후 잔류 리튬을 추가 침출하였으며, 두 침출 단계를 통한 회수율은 정량된 리튬 기준 약 99%였다. 또한, 고온환원 열처리를 부유선별 전처리로도 활용하여 리튬 선침출 잔사에서 흑연을 회수한 결과, 추정 탄소의 약 90%가 부유 산물로 회수되었다. 이를 바탕으로 두 회수 공정의 연계 가능성을 검토하였다.

주제어 : 리튬 선회수, 황화리튬, 부생 망초, 부유선별, 흑연 음극재

서론

기존의 사용 후 리튬이차전지 습식 재활용 공정에서 양극재 내 유가금속과 흑연 음극재를 회수하는 부분은 리튬 손실과 환경 부하 관점에서 개선이 요구되고 있다. 유가금속을 회수하는 공정에서 리튬은 최종 단계에서 회수되므로 단계 공정 중 손실에 따른 리튬의 회수율 한계가 존재하며, 폐수 처리 중 발생하는 무기계 부산물인 망초(Na_2SO_4)의 처리 역시 환경적 문제로 대두되고 있다. 흑연 음극재의 경우 부유 선별을 통한 회수가 활발히 연구되고 있으나, PVDF 바인더와 SEI 층 분해를 위한 별도의 열처리 공정이 에너지 및 비용 부담으로 작용한다.

본 연구에서는 블랙 파우더(Black powder)와 부생 망초를 황화 배소하여 리튬을 황화 리튬(Li_2S) 등의 형태로 선 회수하였다. 또한 황화 배소 공정을 음극재 회수를 위한 부유 선별의 전처리 공정으로 활용함으로써, 리튬 선 회수와 흑연 음극재 회수를 통합하는 공정을 제안하였다.

결과 및 고찰

열역학적 평형 상태 계산 결과를 바탕으로 황화리튬 합성을 위한 공정 조건을 설정하고, 실시간 배가스 분석을 통해 합성 반응 경로를 검토하였다. 합성된 황화리튬은 에탄올 침출을 통해 선택적으로 회수하였으며, 잔사 내 잔류 리튬은 증류수로 추가 침출하였다. 정량된 리튬의 약 99 %가 두 침출 단계를 통해 회수됨을 확인하였으며, X선 회절 분석 및 주사전자현미경을 통해 합성된 Li_2S의 결정상과 그 형상을 확인하였다.

황화 배소 및 리튬 선침출 후 남은 수침출 잔사는 부유 선별 원료로 투입하여 흑연을 분리·회수하였으며, 탄소와 양극재 유래 금속의 분포 및 품위를 평가하였다. X선 광전자 분광법으로 부유선별 원료의 표면 화학적 특성을 확인하고, 분자 동역학 시뮬레이션으로 표면 관능기의 종류 및 분포 농도에 따른 흑연과 물 간의 접촉각 변화를 계산하였다.

흑연 표면의 화학 특성에 대한 분석 결과를 바탕으로 황화 배소 및 리튬 회수 단계에서의 열처리 및 수침출 조건에 따른 양극재 및 음극재의 분리 거동을 고찰하고, 최종적으로 리튬 선회수와 후속 흑연 음극재 회수 공정의 연계 가능성을 평가하였다.

결론

부생 망초를 활용한 황화 배소 및 침출 공정으로 리튬을 선회수하고, 해당 열처리를 후속 부유선별의 전처리로 단계로 활용하여 음극재 내 흑연 분리·회수와의 연계 가능성을 확인하였다.

* Corresponding author : 김영재 / youngjae@inha.ac.kr

폐플라스틱을 활용한 무기 부산물계 Bunsenite(NiO)의 환원 메커니즘 연구

Reduction Mechanism of Inorganic By-product Bunsenite(NiO) via Waste Plastics

조모현[1*], 김세호[1], 이원형[1], 조연하[1], 홍석우[1], 정두효[1]

[1]고려대학교 신소재공학과

초록

전통적 환원제인 흑연과 달리 폴리에틸렌(PE)은 저온 열분해를 통해 활성 환원종을 생성하는 대체 환원제로 주목받고 있다. 본 연구는 PE와 흑연을 이용해 분센아이트(NiO) 분말의 환원 거동 및 미세조직 변화를 조사했다. 300–700 °C 구간의 승온 환원 실험과 700 °C 등온 유지 실험을 함께 수행했다. 흑연 및 수소 환원 시편은 열적 소결로 현저한 입자 성장이 관찰된 반면, PE 환원 시편은 700 °C 유지 후에도 작은 입자 크기를 유지했다. 이는 PE 열분해 시 형성된 탄소성 보호층이 금속 간 병합을 억제했기 때문으로 판단된다.

주제어 : 분센아이트 (NiO), 폴리에틸렌, 환원, 소결

* Corresponding author : 조모현 / mohyun0726@korea.ac.kr

Recycling Korea 2026 Daejeon

2026년도 추계정기총회 및 제65회 학술발표대회

2026. 10. 14.(수) - 16.(금) / 호텔 인터시티

(사)한국자원리싸이클링학회 The Korean Institute of Resources Recycling

· 주소 : 서울 강남구 테헤란로7길 22 한국과학기술회관 1관 1106호
· Tel : 02)3453-3541/3542
· Fax : 02)3453-3540
· Homepage : www.kirr.or.kr
· E-mail : kirr@kirr.or.kr
· 인쇄처 : (주)에이퍼브, 02)2274-3666

Build the 1st
새로움의 기초가 되다

흔들림 없는 핵심역량과
환경중심의 가치 창출을 바탕으로
늘 고객과 소통하겠습니다.

SP NATURE
주식회사 에스피네이처



건설기초소재사업


레미콘


골재


분체

환경자원사업


철스크랩


철강부산물


소각·건조


시멘트대체연료


항만물류

건설기초소재사업 서울시 강남구 영동대로731 신영빌딩 7층 (주)에스피네이처 02-6270-0246
환경자원사업 경북 포항시 남구 서원재로 66 (주)에스피네이처 054-278-6774

www.spnature.co.kr

DAEHEUNG

변화와 혁신을 두려워하지 않는 기업
더불어 함께 성장하는 기업



사회적 가치

Building a better future for humanity through Eco-friendly recycling

경제적 가치

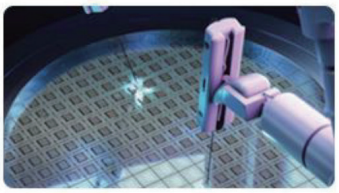
Continuous growth through new value creation

환경적 가치

Leading the Eco-friendly recycling business with core technology

DAEHEUNG

Our Business



전기전자스크랩

전자회로기판류, 전자부품
Wafer, Semiconductor
PC, 통신장비, 증계기



비철금속스크랩

Cable, Mill Berry
Lead Frame
비철금속, 특수금속류



회수기 사업

PCB, Pd, Catalyst
도금폐액



폐촉매 및 전극

리튬이온 Battery, Automobile Fuel Cell
석유화학촉매, 자동차촉매 등.

(주)대흥엠앤티
DAEHEUNG M&T CO.,LTD

대표자 : 한재현 / 사업자등록번호 : 135-81-30283 / 전화번호 : 031-232-2167~8 / 팩스번호 : 031-323-2170

1사업장 : 경기도 용인시 처인구 이동읍 서리로 129 (17127)
2사업장 : 경기도 용인시 처인구 이동읍 경기동로 1088
3사업장 : 경기도 화성시 장안면 무봉길 129 (18574)
베트남지사 : A01, 3rd floor, The sun building, Me Tri street, Me tri Ward, Nam Tu Liem District, Hanoi city Vietnam.

http://dhmnt.inckorea.net

Leading an age of power
from TAEHYUNG

태형리싸이클링
www.tae-hyung.co.kr

GREEN PROMISE

태형리싸이클링이 **미래**와 **환경** 그리고 **사람**이 함께하는 세상을 **약속**합니다.



성일하이메탈(주)는
유한자원을 무한자원으로 만들어
인류 사회에 공헌합니다.

성일하이메탈(주)
SungEel HiMetal

자원 회수



화합물 소재화


염화 팔라듐(고상)


염화 팔라듐(액상)


황산 팔라듐(고상)


황산 팔라듐(액상)


테트라아민 팔라듐 클로라이드(고상)


테트라아민 팔라듐 클로라이드(액상)


테트라아민 팔라듐 하이드로겐 카보네이트


초산 팔라듐


테트라키스(트리페닐포스핀) 팔라듐


비스(디베질덴아세톤) 팔라듐


염화백금산 6수화물


염화백금산 수용액


에탄올아민 백금 용액


염화 루테늄


염화 이리듐

우수환경산업체
LEADING ENVIRONMENTAL COMPANIES

RESPONSIBLE MINERALS INITIATIVE

Registered ISO 9001:2008 / ISO 14001:2004

KOSHA
KOREA OCCUPATIONAL SAFETY & HEALTH AGENCY

성일하이메탈(주)
주소 : 전라북도 군산시 군산산단로 143-15
전화 : 063)440-0512, 팩스 : 063)466-9203

Everyday Everywhere

배터리 미래를 설계하는 글로벌 리튬 소재 리더

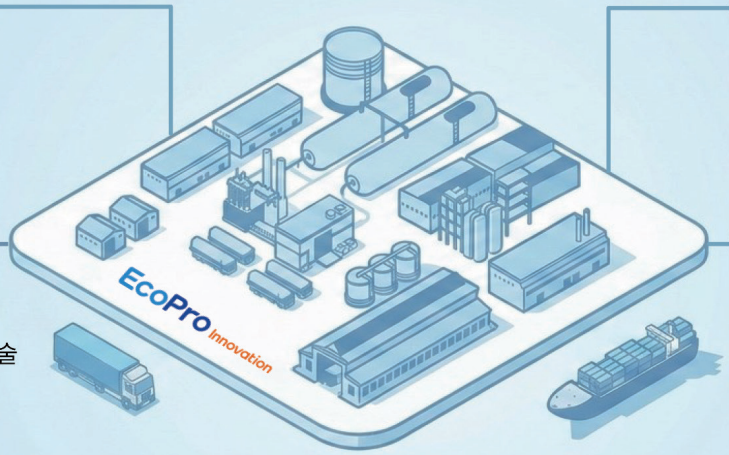


초격차 기술력

- 글로벌 최고 수준 리튬 제련·정제 기술 보유
- 리튬 제조 기술 내재화 성공

미래 배터리 소재

- 전고체전지 소재 기술(Li_2S)
- 초박막 리튬 메탈 음극 제조 기술 (Ultra-Thin Lithium Foil)



배터리급 수산화리튬

- 국내 최초 Batt. LiOH 양산 성공
- 유럽 리튬 생산 거점 구축

리튬 공급망 다원화

- 저품위 리튬 원료 제련 기술
- 안정적인 리튬 자원화 기술

리튬 자원부터 차세대 배터리의 핵심 소재까지 오늘의 배터리를 넘어 미래를 앞당깁니다



EcoPro Innovation
에코프로 이노베이션

경상북도 포항시 북구 흥해읍 영일만산단로 74
054-720-3699
www.ecopro.co.kr/sub01030204

MTIG
Material Technical Innovation Group

원자재 제조부터 재활용 기술까지
사회적, 환경적 가치의 우선과 끊임없는 혁신으로
타이타늄의 대중화를 이끄는 기업




Dental


IT

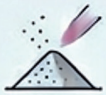

Industrial


Metal 3D Printer



TITANIS


Lifestyle

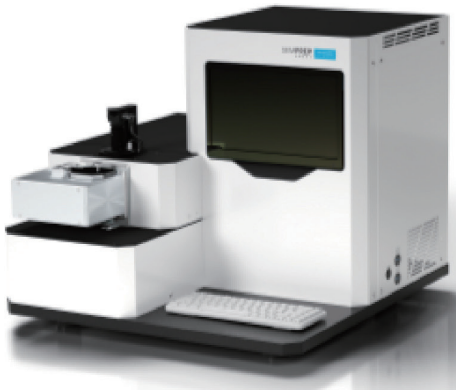

AM Powder RF Plasma System

본　　사 _ 서울특별시 강남구 논현로98길 34 201호
화성공장 _ 경기도 화성시 만세구 장안면 석포로 185
TEL _ 02-540-3617 / FAX_ 02-540-3616
TEL _ 031-358-3617 / FAX_031-358-3616
Material Technical Innovation Group Homepage_ www.mtig.co.kr

[PKoLAB]
한국입자분석연구소



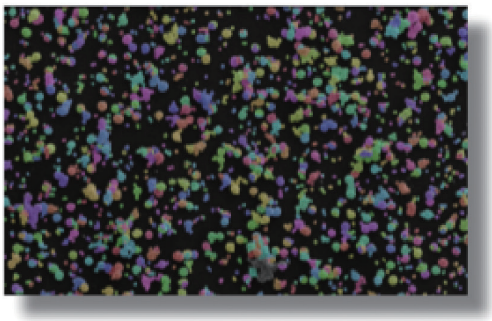




현미경 입자분석 솔루션 No.1

한국입자분석연구소
PKoLAB

한국입자분석연구소는 Thermo Fisher Phenom의 한국 공식 대리점으로써 Table Top 전자현미경의 판매 및 유지 보수, 교육까지 지원하고 있습니다.
또한 자동화 전자현미경 기술을 이용하여 마이크로 입자, 이물질에 대한 분석 솔루션을 제공하며, 배터리 소재 분석 및 환경 미세먼지들의 분석 솔루션을 제공합니다.

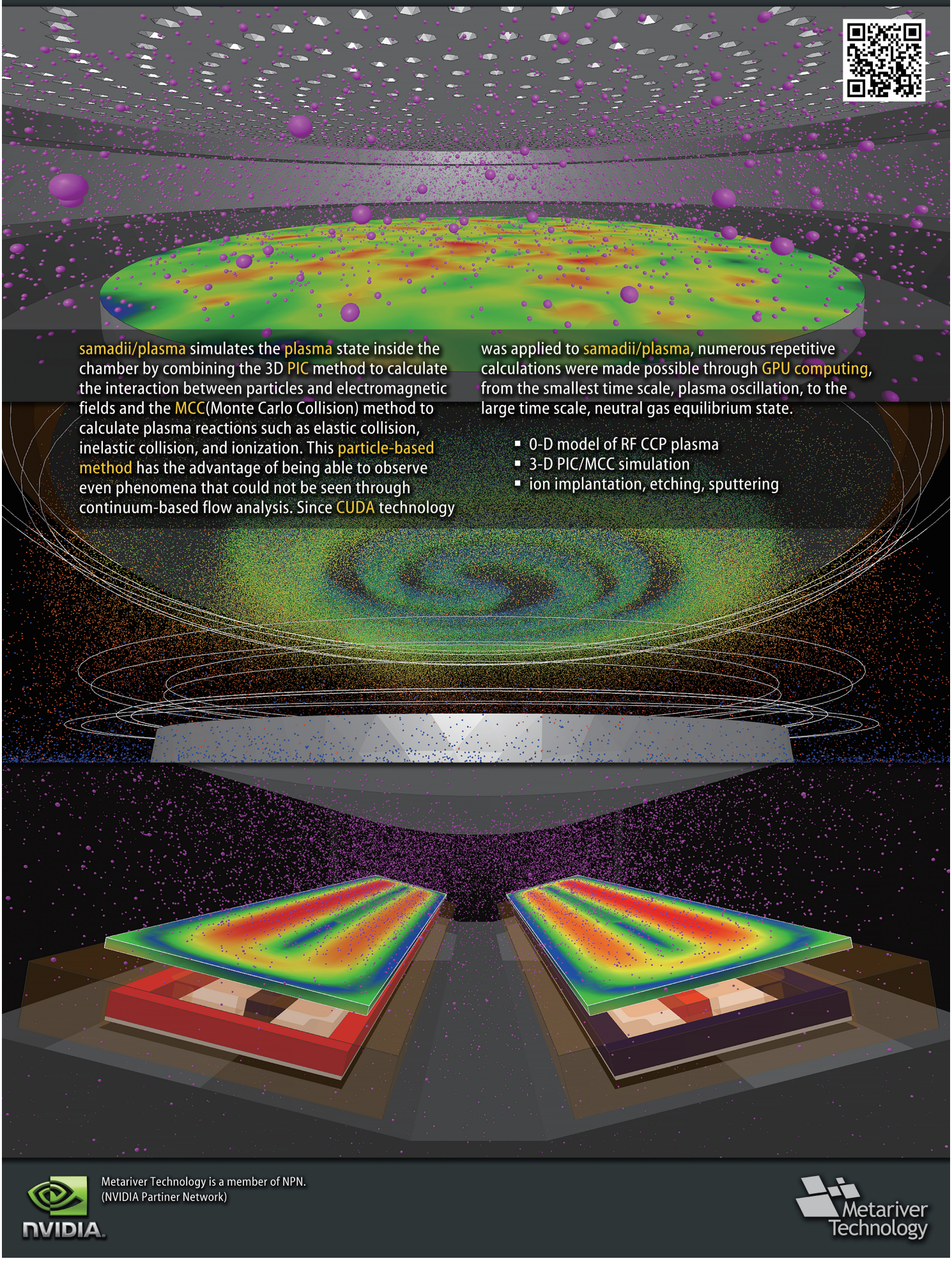


www.pkolab.com
E-mail : infor@pkolab.com
Tel : 042-931-1012

TECHNOORG LINDA
ThermoFisher SCIENTIFIC

samadii™/plasma

www.metariver.kr



samadii/plasma simulates the plasma state inside the chamber by combining the 3D PIC method to calculate the interaction between particles and electromagnetic fields and the MCC(Monte Carlo Collision) method to calculate plasma reactions such as elastic collision, inelastic collision, and ionization. This particle-based method has the advantage of being able to observe even phenomena that could not be seen through continuum-based flow analysis. Since CUDA technology was applied to samadii/plasma, numerous repetitive calculations were made possible through GPU computing, from the smallest time scale, plasma oscillation, to the large time scale, neutral gas equilibrium state.

- 0-D model of RF CCP plasma
- 3-D PIC/MCC simulation
- ion implantation, etching, sputtering

Metariver Technology is a member of NPN.
(NVIDIA Partiner Network)

NVIDIA

Metariver Technology

(주)페트로마인코리아 : 폐배터리 재활용을 넘어, 희소금속 추출의 통합 솔루션을 완성하다

(주)페트로마인코리아는 지속 가능한 배터리 리사이클링 및 자원 순환 시스템 구축을 선도합니다.

핵심 역량 및 기술 (Core Competencies)



폐배터리 전과정 수거 및 전처리 시스템

폐배터리의 수거, 선별 및 안전한 전처리 전과정을 체계적으로 수행합니다.



고효율·친환경 리튬 회수 공정

최적화된 공정을 통해 경제적이고 환경친화적인 방식으로 리튬을 회수합니다.



고부가가치 재자원화 제품

블랙매스(Black Mass), 블랙파우더, 젤리롤 등 핵심 원료 생산

기업 성과 및 신뢰도(Growth & Trust)

기업 정보 (Company Info.)

설립일	2022년 3월 2일
주력제품	블랙매스, 블랙파우더, 젤리롤 등
주요 협력사	SK 온, L&F, 에커포르씨엔지, 삼성 SDI, VinFast 등

글로벌 리딩 기업과의 파트너십

국내외 주요 기업 및 베트남 VinFast와 협력

SK 온 · EcoPro CnG · SAMSUNG SDI · VINFAST · LF (주)엘앤에프

검증된 기술력과 공인인증



(일반)폐기물 종합 재활용업
(지정)폐기물 종합 재활용업
ISO 45001, 14001, 9001 등

회사 연락처 (Contact Information)

회사 홈페이지: https://petrominekorea.com/
연락처: 대표번호 : +82 54 973-1888 / 팩스번호 : +82 54 973-1889
이메일: pmk@petrominekorea.com

취급 소재

Handled Material

- Be — Beryllium & Beryllium Alloys
- Co — Cobalt & Cobalt Alloys
- Hf — Hafnium & Hafnium Alloys
- Hastelloy Scrap
- Haynes Scrap
- Zr — Zirconium & Zirconium Alloys
- Inconel Scrap
- Mo — Molybdenum & Molybdenum Alloys
- Monel Scrap
- Ni — Nickel & Nickel Alloys
- Nb — Niobium & Niobium Alloys
- Rene Scrap
- Ta — Tantalum & Tantalum Alloys
- Ti — Titanium & Titanium Alloys
- Ti — Titanium CP
- Ti — Titanium Solids
- W — Tungsten & Tungsten Alloys
- Waspaloy Scrap

회사정보 및 거래업체 소개

Company Information and Partner / Client Profile

055-582-1105

055-582-1106

경남 함안군 칠원읍 원서로 205-29

www.shinsungmetal.net

국내: KPC, KPCM, SeAH 세아창원특수강

해외: DAIDO STEEL, KOBELCO

(주) 신성금속

HIGH TEMPERATURE ALLOY SCRAP SPECIALIST

초내열 합금 스크랩, 더 정확하게 더 신뢰있게

회사소개

ISO 14001:2015
ISO 9001:2015

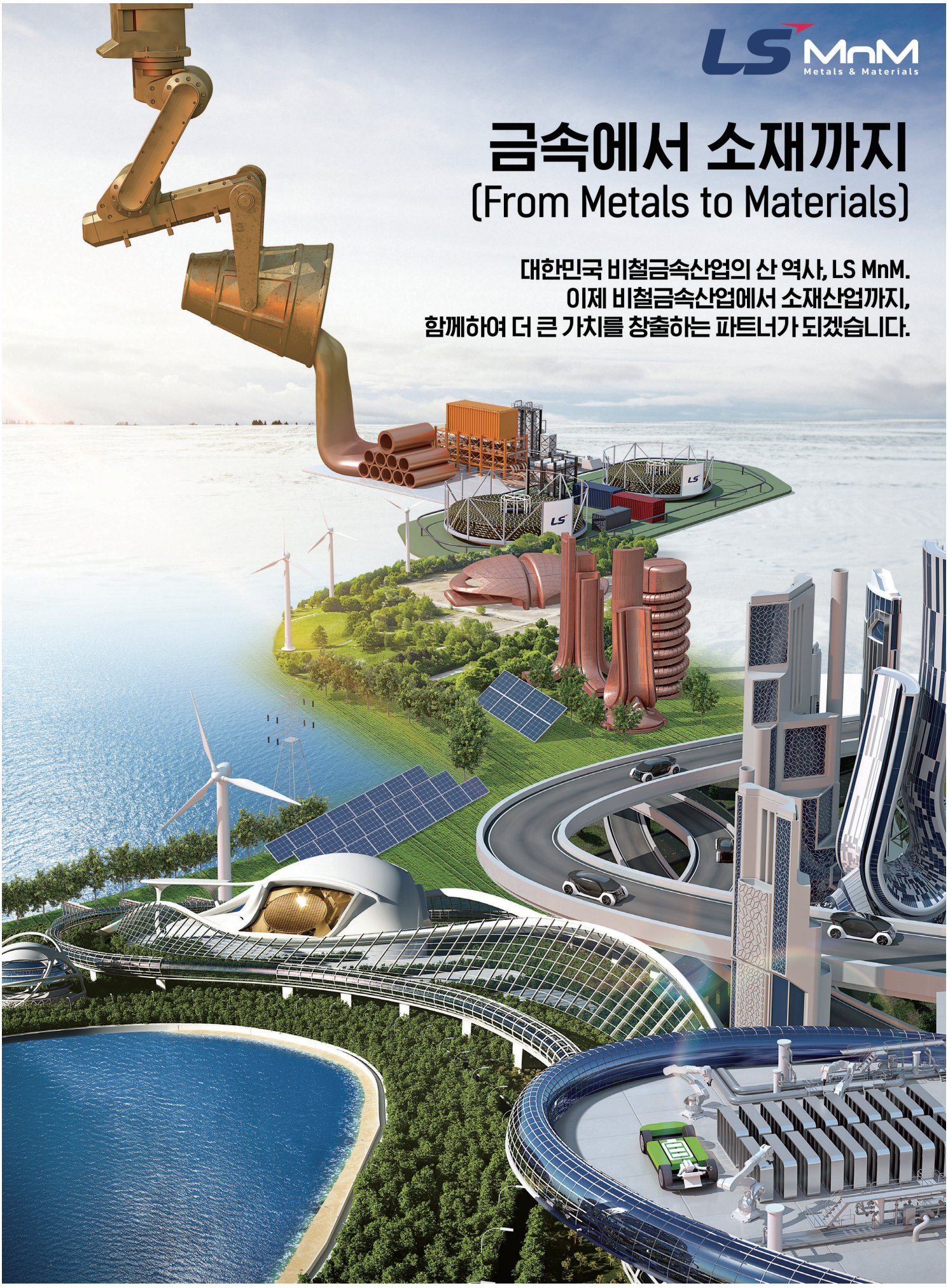
L. Ver.1.1

Company Profile



(주) 신성금속은 산업 전반에서 발생하는 초내열 합금 및 특수금속 스크랩을 전문적으로 취급하는 기업입니다. 당사는 다양한 특수금속 스크랩의 매입·분류·가공·유통을 통해 자원 의 재활용 가치를 높이고, 고객사에 안정적이고 신뢰할 수 있는 서비스를 제공합니다.

축적된 현장 경험과 책임감 있는 대응을 바탕으로, 고객이 필요로 하는 소재를 정확하게 이해하고 신속하게 대응하는 초내열 합금 소재 스크랩 전문기업으로 성장하고 있습니다.


LS MnM
Metals & Materials
금속에서 소재까지
(From Metals to Materials)
대한민국 비철금속산업의 산 역사, LS MnM.
이제 비철금속산업에서 소재산업까지,
함께하여 더 큰 가치를 창출하는 파트너가 되겠습니다.

Troika Drive



신재생에너지

신재생에너지 및 그린수소 기반
그린메탈 생산

자원순환

전자폐기물, 태양광 폐패널,
희토류 등의 자원 순환
밸류체인 구축

이차전지 소재

전구체부터 리사이클링까지
배터리 벨류체인 구축

우리는 다양한 원료 및 에너지원을 가장 안전하고, 친환경적이며, 효율적인 방법으로 소재 및 에너지로 전환하는 것입니다.

KOREA ZINC