

3차원 건물 기반 119 구조·구급 서비스 접근성 분석

김다정* · 최진무**

An Analysis of 119 Emergency Rescue Service Accessibility Based on 3D Buildings

Dajeong Kim* · Jinmu Choi**

요약 : 119 구조·구급 서비스는 골든타임 내 대응 여부에 따라 생존율이 크게 달라지며, 이에 따른 공간적 접근성 분석은 필수적이다. 하지만 고층 건물 밀집 지역에서의 119 구조·구급 서비스 접근성은 기존의 2차원 도로망 기반 분석만으로는 실제 구조 지연 요인을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하고자 도로망과 실내 이동 경로를 통합한 3차원 구조 시간 분석을 수행하고자 하였다. 실외 접근성 분석에서는 도로망, 시간대별 교통 정보를 결합하고, 도로에서 건물까지의 연결성을 반영한 방식을 통해 구조 도달 시간을 산출하였다. 실내 분석 단계에서는 Unity 기반 A* 알고리즘을 활용하여 건물 내부의 수직 이동 수단별 구조 시간을 계산하고, 계단과 엘리베이터 이용 시나리오에 따른 구조 시간을 계산하였다. 이렇게 산출된 총 구조 시간은 복셀 단위로 3차원 시각화하여 구조 취약 영역과 수직 이동 지연의 공간적 분포를 확인하였다. 그 결과, 기존 도로망 기반 구조 시간만을 활용한 분석과 달리, 건물 내 이동을 포함한 3차원 분석에서는 구조 지연 요인을 보다 정밀하게 반영할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이는 실제 구조 활동에서의 지연 가능성을 반영하는 동시에, 지역별 맞춤형 구조 대응 전략 수립의 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다.

주요어 : 119 구조·구급 서비스, 네트워크 분석, Unity 시뮬레이션, 3차원 접근성 분석, 골든타임

Abstract : Survival rates depend heavily on the ability of 119 emergency services to respond in a timely manner, and analyzing spatial accessibility is essential. However, the accessibility of emergency services in high-rise areas is limited by the existing two-dimensional road network-based analysis, which does not fully reflect the actual rescue delay factors. This study aims to overcome these limitations by performing a three-dimensional rescue time analysis that integrates the road network and indoor travel routes. In the outdoor accessibility analysis, the rescue arrival time was calculated by combining the road network, traffic information by time of day, and reflecting the connectivity from the road to the building. In the indoor analysis phase, we used the Unity-based A* algorithm to calculate rescue times for each vertical mode of transportation inside the building, and calculated rescue times for staircase and elevator scenarios. The total rescue time was then visualized in three dimensions on a voxel-by-voxel basis to determine the spatial distribution of structural vulnerability areas and vertical movement delays. The results showed that, unlike traditional road network-based rescue time analysis, the three-dimensional analysis including movement within the building can more precisely reflect rescue delay factors. This reflects the potential for delays in actual rescue activities and can be used as a basis for establishing customized rescue response strategies by region.

Key Words : 119 Emergency Rescue Service, Network Analysis, Unity-based Simulation, Three-dimensional Accessibility Analysis, Golden Time

본 연구는 김다정의 석사학위 논문의 요약 및 정리 내용을 담고 있습니다.

* 경희대학교 경희대학교 지리학과 석사과정(Master's Student, Department of Geography, Kyung Hee University, kcdj001106@khu.ac.kr)

** 경희대학교 지리학과 교수(Professor, Department of Geography, Kyung Hee University), cjm89@khu.ac.kr

1. 서론

「119 구조·구급에 관한 법률」에 따르면, 119 구조·구급이란 위급 상황 발생 시 119 구조대와 구급대가 신속하게 현장에 도착하여 응급처치와 환자 이송 등의 활동을 수행하는 일련의 응급 대응 과정을 의미한다. 119 구조·구급 서비스는 위급 상황 발생 직후 현장에서 즉각적으로 응급 처치를 제공할 수 있는 대표적인 공공 서비스로, 그 접근성 확보는 환자의 생존율과 직결되는 핵심 요소이다. 특히 응급 환자의 생존 가능성을 좌우하는 골든타임 개념은, 119 구조·구급 서비스가 적시에 도착하여 적절한 응급 처치를 시행할 수 있을 때에만 실질적으로 의미를 갖는다. 이에 따라 구조·구급 서비스의 공간적·시간적 접근성 확보는 단순한 행정 서비스 제공 범위를 넘어, 국민의 생명 보호라는 사회적 가치 실현의 필수 조건으로 작용하게 된다(옥택근 등, 2022; 하재서·신동빈, 2022).

의료 서비스 접근성 분석이란, 환자가 필요한 시점에 적절한 의료 서비스를 얼마나 용이하게 이용할 수 있는지를 정량적으로 평가하는 과정으로, 이는 의료 자원의 효율적 분배와 부족 지역에 대한 정책적 보완에 필수적인 자료를 제공한다(예레미·최요한, 2023; Haggerty *et al.*, 2011). 특히 119 구조·구급 서비스와 같은 응급 의료 서비스는 신속성이 강조되기 때문에, 공간적 접근성의 중요성이 더욱 부각된다. 우리나라의 응급 의료 서비스 체계는 국가 주도의 119 구조·구급 출동 시스템에 기반을 두고 있으며, 119안전센터의 위치와 도로망, 교통 상황 등 다양한 공간적 요인이 실제 구조 시간에 영향을 미친다(장경호 등, 2016; 최준호 등, 2015).

기존의 119 구조·구급 서비스 접근성 연구들은 대체로 119안전센터로부터 현장까지의 도달 시간, 병원 이송 시간 등 시간 요소 중심의 분석을 통해 서비스의 공간적 불균형과 취약성을 규명해 왔다(이달별, 2020). 예를 들어, GIS 기반 도로 네트워크 분석 기법을 활용하여 구조·구급 서비스의 공간적 도달 가능 범위를 평가하거나, 실제 119 출동 데이터를 통해 시간 지연 및 지역 간 불균형 문제를 분석한 연구들이 있다(유순규·엄태환, 2010; 이경열 등, 2016; 장경호 등, 2016; 최준호 등, 2015). 그러나 이러한 연구들은 대부분 119안전센터에서 건물 외부까지의 접근성에 초점을 두고 있어, 실제로 구급대원이 환자에게 도달하기까지의 건물 내부 이동 시간, 즉 실내 접근성은 충분히 반영하지 못

하는 한계가 있다. 실제로 응급 환자의 생존율에 직접적인 영향을 미치는 것은 단순한 현장 도착 시간이 아니라, 현장에 도착한 이후 얼마나 신속하게 환자에게 응급 처치를 시행할 수 있는가 하는 점이다. 특히 고층 건물 밀집 지역에서는 구조대원이 건물 내부로 진입하여 환자에게 도달하는데 상당한 시간이 소요될 수 있으며, 이러한 실내 이동 시간은 기존 2차원 도로망 기반 방식으로는 정밀하게 분석하기 어렵다. 이에 따라 최근에는 3차원 네트워크 모델링을 활용한 연구들도 등장하고 있으나, 이들 대부분은 이동 경로 분석에 초점을 맞추고 있어, 실제 건물 내부까지의 접근성을 평가하는 분석과는 차이를 보인다(Isikdag and Zlatanova, 2009; Lin and Lin, 2018; Teo and Cho, 2016). 따라서 119 구조·구급 서비스의 접근성 분석은 여전히 도로망 네트워크 수준에 머무르는 경우가 많아, 실제 건물 내부까지의 접근성을 정밀하게 반영하지 못하는 한계가 존재한다.

이에 본 연구는 기존의 2차원 도로망 기반 접근성 평가의 한계를 극복하고, 119 구조·구급 서비스의 정밀한 접근성 분석을 위해 도로망과 실내 이동을 통합한 3차원 구조 시간 분석을 수행하고자 하였다. 이를 위해 시간대별 교통정보가 반영된 도로망과, Unity3D 엔진 기반의 건물 내부 3차원 모델을 결합하여, 구급대원이 119안전센터에서 출발해 도로망과 건물 내부 경로를 거쳐 환자에게 도달하기까지의 총 구조 시간을 산출할 수 있는 분석 체계를 마련하였다. 또한, 산출된 구조 시간을 복셀 단위의 3차원 구조로 시각화함으로써, 층별·위치별 구조 시간의 차이와 골든타임 초과 영역, 구조 취약 지역을 직관적으로 확인할 수 있도록 하였다.

2. 분석 방법

1) 도로망 네트워크 기반 접근성 분석 환경 제작

응급 환자 발생 시 119안전센터에서 현장까지의 구조 시간은 도로 이동 시간과 건물 내부 이동 시간으로 구분된다. 본 연구에서는 도로 이동 시간 산정을 위해 도로 속도와 건물까지의 실제 이동 경로를 반영한 최단 경로 탐색 체계를 구축하였다. 이를 위해 ITS 국가교통정보센터의 표준노드 링크 자료와 시간대별 교통소통정보, 국토교통부의 GIS 건물 통합정보를 활용하였다. 도로 속도 정보의 시간적 범위는 2025년 3월 14일 하루의 평균값을 사용하였다. 도로망

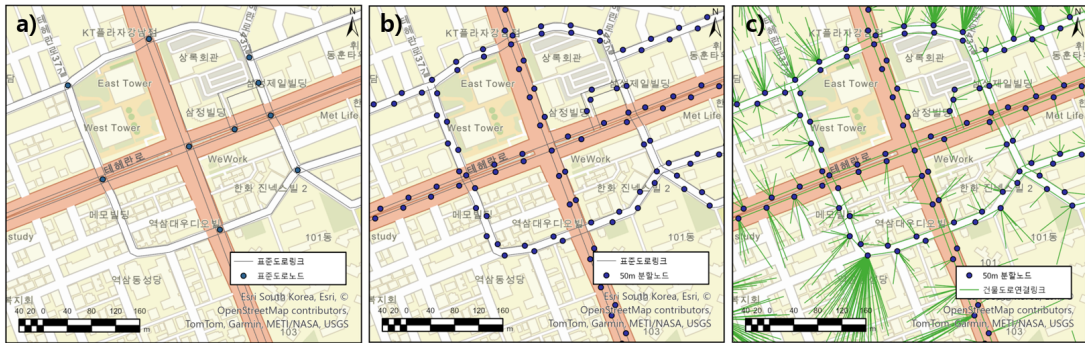


그림 1. 도로망 네트워크 세분화 및 건물 연결 과정

a) 표준도로노드 표시, b) 50m 분할노드 표시, c) 50m 분할노드에서 건물 연결 링크 표시

은 119안전센터와 건물 중심점을 각각 도로 네트워크에 직접 연결하는 방식으로 구축하였으며, 기존 도로 링크를 50m 간격으로 세분화하여 보다 정밀한 경로 분석이 가능하도록 하였다(그림 1).

시간대별 교통 현황을 구조 시간 분석에 반영하기 위해 도로 링크에 교통 소통정보 기반의 속도 데이터를 통합하였다. 이를 위해 교통소통정보와 도로링크 속성 정보를 활용하였으며, 두 데이터셋은 공통의 도로링크 ID를 기준으로 병합되었다. 이 과정을 통해 교통 소통정보의 시간대별 평균 속도 속성을 도로링크에 부여할 수 있었다. 도로망 네트워크가 완성된 이후에는, 119안전센터에서 각 건물까지의 경로를 도출하기 위해 A* 알고리즘을 활용하여 탐색하였다. A* 알고리즘은 다른 알고리즘과 비교하여 경로 연산 시간과 저장공간 측면에서 우수한 장점이 있다(Liu and Gong, 2011). 따라서, 본 연구에서는 강남구 전체의 건물로부터 구조 경로를 도출해야하므로 빠른 경로 탐색이 가능한 A* 알고리즘을 사용하였다. 119안전센터를 출발점으로 설정하여 도로망을 따라 구조대원이 도착하는 데 걸리는 시간을 계산하였고, 이는 도로길이(km)를 도로속도(km/h)로 나누고 60을 곱하여 분 단위로 산정하였다.

또한, 구조 경로 탐색 방식의 비교를 통해 분석의 정확도와 현실성을 향상시키고자, 총 세 가지 유형의 네트워크 분석 방식을 구축하였다. 첫째, 링크 수만을 고려하여 최단 경로를 산출하는 Baseline 방식, 둘째, 시간대별 도로 속도를 반영하여 경로에 시간적 가중치를 적용한 Cost 방식, 셋째, 도로망과 건물 출입구를 직접 연결하여 공간적 연결성을 강화한 Cost2 방식이다. 이러한 세 방식은 구조 경로 분석의 현실성과 정밀도를 점진적으로 개선하는 방향으로 설

계되었으며, 각 방식에 따른 분석 결과를 비교함으로써 실제 구조 활동에 가장 적합한 네트워크 분석 방식을 도출하고자 하였다.

2) 건물 내부 접근성 분석 환경 제자

구급대원이 현장에 도착한 후 환자에게 접근하여 응급처치를 하기까지는 추가 시간이 필요하며, 이러한 추가 시간 중 환자에게 접근하기 위한 시간을 환자 접촉 시간 혹은 수직 반응 시간이라고 한다(박정근 등, 2008; Campbell *et al.*, 1993; Lateef and Anantharaman, 2000; Silverman *et al.*, 2007). 환자 접촉 시간은 건물의 층수와 면적에 크게 영향을 받으며, 실내 공간의 수직 및 수평적 특성에 따라 구조 시간이 지연될 수 있다. 예를 들어, 저층 건물에서는 실내 이송 시간이 전체 구조 시간에 미치는 영향이 제한적인 반면, 초고층 건물에서는 수직 이동 시간이 구조 시간 증가의 주요 요인으로 작용한다(박정근 등, 2008; Campbell *et al.*, 1993; Morrison *et al.*, 2005). 따라서 계단과 엘리베이터 같은 수직 이동 요소뿐만 아니라, 동일 층 내에서의 수평 이동까지 함께 고려한 종합적인 실내 공간 분석이 필요하다.

이러한 분석을 위해, 본 연구는 사례 지역인 강남구의 각 건물을 3차원 복셀 구조로 분할하였다. 복셀(voxel)은 3차원 공간을 X, Y, Z축으로 일정 간격으로 분할한 최소 공간 단위로, 본 연구에서는 (3m)³간격의 격자를 설정하여 건물 내부 공간을 입체적으로 재구성하였다. 복셀은 구조 시나리오상 환자가 위치할 수 있는 잠재적 공간 단위로 정의되며, 구급대원이 해당 위치에 도달하는 데 소요되는 구조 시간을 계산하는 기준 단위로 활용하였다. 이를 통해 층 간은

물론 동일 층 내 위치 간의 구조 시간 차이까지 반영할 수 있으며, 각 복셀에는 건물 내부의 수직 및 수평 이동 시간과 도로망 기반 구조 시간을 합산한 총 구조 시간이 할당되었다.

(1) 수직 접근성 분석 환경 제작

먼저, 수직 접근성 분석을 위해 본 연구에서는 Unity3D Engine(이하 Unity)을 활용하여 시뮬레이션 기반 분석 환경을 구축하였다. Unity는 3차원 공간 내에서 에이전트(agent)의 경로 탐색과 이동이 가능한 AI 경로 탐색 시스템을 내장하고 있으며(Unity Technologies, 2022), 사용자가 설정한 보행 가능 영역을 기반으로 경로를 구성한다. 또한, 엘리베이터와 같이 일반적인 보행 경로를 벗어난 이동을 구현하기 위한 오프메시 링크 기능도 제공되어, 실내 공간 내 수직 연결을 현실적으로 구현하는 데 유용하다. 실내 공간 모델링은 Unity Asset Store에서 제공하는 3차원 건물 데이터를 활용하여 이루어졌다. 해당 건물은 실제 건축 구조와 유사한 내부 공간을 갖춘 5층 구조물로(그림 2), 계단과 엘리베이터가 포함되어 있어 수직적 연결이 가능한 3차원 네트워크 분석에 적합하다.

실내 구조 시간 분석을 위해, 본 연구에서는 Unity 기반의 접근성 분석 환경을 구축하고, 건물 내부 이동 경로 탐색을 수행하였다. 현실적인 경로 선택이 가능하도록 Unity의 Navigation 영역 기능을 활용하여 내부 공간을 평지, 계단, 엘리베이터 영역으로 구분하고, 각 영역에 차등적인 이동

속도를 적용하였다. 이를 통해 단순한 거리 기반 경로가 아닌, 실제 이동 환경에서의 시간 소요와 효율성을 함께 고려한 경로 탐색이 가능하도록 구현하였다.

특히 계단 구간에서는 층수가 높아질수록 누적되는 피로로 인해 이동 속도가 점차 감소하는 경향이 있으며(Tashakori *et al.*, 2015), 이러한 특성은 다양한 선행 연구를 통해서도 확인된 바 있다. 실제로 고층(20층 이상)에서는 초기 속도(0.7m/s)에 비해 이동 속도가 약 30~40%까지 저하되는 것으로 보고되었다(김윤성 등, 2021). 이를 바탕으로 본 연구에서는 5층 이하 구간에 대해 초기 속도인 0.70m/s에서 시작하여, 층이 올라갈수록 0.02m/s씩 점진적으로 감소하도록 설정하였다. 즉, 2층은 0.70m/s, 3층은 0.68m/s, 4층은 0.66m/s, 5층은 0.64m/s로 적용되며, 이는 실제 피난 실험에서 관찰된 피로 누적에 따른 이동 속도 저하를 반영한 결과이다.

반면, 엘리베이터 구간은 층수와 관계없이 일정한 수직 이동 속도를 유지하는 것으로 설정하였으며, 승강기 종류에 따라 속도에 차이가 있지만, 일반적인 승객용 엘리베이터는 약 250~500 FPM(Feet Per Minute), 즉 1.3~2.5m/s 범위에서 운행되는 것으로 알려져 있다(Tonna *et al.*, 2024). 이를 바탕으로 본 연구에서는 현실적인 평균값에 해당하는 2.0m/s를 적용하여, 계단 구간보다 빠른 이동이 가능하도록 설정하였다.

이러한 실내 공간 모델을 기반으로, A* 알고리즘을 사용하여 경로를 탐색하였다. 시뮬레이션에서 구급대원은 목적지까지 이동하며, 건물에서의 출발 지점부터 도착 지점까지의 구조 소요 시간을 기록하도록 구성하였다. 마지막으로, Unity 기반 시뮬레이션을 통해 계단과 엘리베이터 각각에 대한 시나리오를 구성하고, 층별 수직 이동 시간을 산출하였다. 이 결과는 구조대원이 건물 외부에서 각 층에도달하는 데 소요되는 시간을 나타낸다.

(2) 수평 접근성 분석 환경 제작

건물 내부에서 구조대원이 환자에게 도달하기까지의 구조 시간은 단순히 계단이나 엘리베이터를 이용한 수직 이동에만 국한되지 않으며, 동일 층 내에서 발생하는 수평 이동 시간 또한 중요한 영향을 미친다. 이를 반영하기 위해, 수평 접근성은 각 건물의 중심점을 기준으로 동일 층 내 각 복셀까지의 유클리드 거리를 계산하고, 여기에 구조대원이 장비를 착용한 채 실내 공간에서 신속하게 이동할 수 있는 속도인 7km/h(약 1.94m/s)를 적용하여 산정하였다. 이



그림 2. 5층 건물 데이터

와 같은 속도는 'brisk walk(빠른 걸음)'로 정의되는 수준이며, 실제 응급 상황에서 일반인이 빠르게 걷는 속도와 유사하여 AED 접근성 시뮬레이션에서 자주 사용된다. 또한, 도시 지역에서 심정지 현장에 출동한 일반인 응답자의 평균 이동 속도는 약 1.8m/s로 보고되었으며(Jonsson *et al.*, 2020), 본 연구에서 설정한 속도는 이와 유사하면서도 훈련된 구조대원의 이동 특성을 반영하여 미세하게 높게 설정한 값이다. 이에 따라 건물 내 수평 이동시간(분)은 수평거리(km)를 구조대원 이동속도(km/h)로 나누고, 60을 곱하여 분 단위로 산정하였다.

3. 분석 결과

1) 도로망 네트워크 분석 결과

119 구조·구급 접근성 분석을 위해 앞서 제작한 Baseline 방식, Cost 방식, Cost2 방식의 세 가지 도로망 네트워크 분석 방식을 비교하였다. Baseline 방식은 출발지부터 목적지

까지의 도로링크 개수를 최소화하는 경로를 탐색하는 가장 기본적인 접근으로, 계산 효율성과 분석 단순성 측면에서 장점이 있으나 실제 이동 시간이나 교통 상황, 건물 진입 경로와 같은 현실적 요소를 반영하지 못하는 한계가 있다. 이러한 한계를 보완하기 위해 도로 속도를 반영하여 이동 시간 기반의 최적 경로를 도출하는 Cost 방식을 적용한 결과, 교통 정체 구간을 회피하는 등 보다 신뢰도 높은 구조 경로 도출이 가능하였으며, 동일한 건물에 대해 출동 119안전센터가 달라지는 등 경로 최적화의 효과가 확인되었다. 그림 3의 a)는 그 사례를 시각화한 지도로, 동일한 건물과 동일한 119안전센터를 대상으로 분석했음에도 불구하고, 각 방식에서 도출된 최단 경로가 다르게 나타나는 것을 보여준다. 또한, 같은 건물에 대해 출동하는 119안전센터 자체가 달라지는 경우도 확인되었다(그림 3의 b)). 이러한 차이는 Baseline 방식이 단순히 링크 개수를 최소화하는 경로를 선택하는 반면, Cost 방식은 교통 흐름이 정체된 구간을 회피할 수 있도록 속도 정보를 반영한 경로 최적화를 수행하기 때문이다.

나아가 Cost2 방식은 도로망 내에서의 이동뿐만 아니라 도로에서 건물로의 실제 진입 경로까지 분석에 반영한 통



그림 3. baseline, cost 네트워크 분석 결과; a) 구조 경로 비교, b) 출동 119안전센터 비교

표 1. cost, cost2 네트워크 분석 결과 구조 시간 비교

building	cost	t_cost(분)	cost2	t_cost2(분)
하이빌	역삼119안전센터	5.12	역삼119안전센터	5.27
한양팰리스아파트	삼성119안전센터	7.97	삼성119안전센터	8.41
스페이스라운	영동119안전센터	5.14	영동119안전센터	5.49
우성스포츠센터	영동119안전센터	4.37	영동119안전센터	4.59
아지트901	영동119안전센터	6.29	영동119안전센터	6.63

합 방식으로, 본 연구에서 제안하는 최종 네트워크 분석 방식이다. 분석 결과, 표 1과 같이 Cost2 방식은 기존 Cost 방식과 비교했을 때 구조 경로 자체에는 차이가 없었으나, 총 구조 소요 시간에서는 유의미한 차이가 발생하였다. 이는 도로에서 건물까지의 연결 경로 및 추가적인 이동 시간이 반영됨으로써 구조 시간이 다른 분석 방법들보다 정확하게 산정되었기 때문으로 해석된다. 119 구조·구급 서비스는 시간이 응급 환자의 생명과 직결되기 때문에, 단순한 거리 기반의 분석이 아닌 실제 이동 시간에 기반한 정밀한 접근성 분석이 필수적이다. 이에 따라 본 연구에서는 Cost2 방식을 최종 분석 방식으로 채택하였으며, 도로망 기반의 경로, 교통 상황의 동적 변화, 건물 진입 경로 등을 통합적으로 고려함으로써 보다 현실적이고 정확한 구조 경로 산정을 수행하였다.

2) 건물 내부 접근성 분석 결과

Unity를 활용하여 제작한 실내 접근성 분석에서는 A* 알고리즘을 적용하여 구조대원이 가장 빠르게 도달할 수 있는 최적 경로를 탐색하였으며, 각 층 및 수직 이동 수단별 구조 소요 시간이 기록되었다. 그 결과, 표 2와 같이 수직 이동 수단의 유형에 따라 구조 시간에 뚜렷한 차이가 나타났다. 계단은 층이 높아질수록 구조 시간이 급격히 증가한 반면, 엘리베이터는 층간 이동 시간이 일정하게 증가하는 경향을 보였다. 또한, 층수가 증가할수록 구조 시간이 거의 선형

표 2. 수직 이동 수단에 따른 층별 구조 시간(초)

	1층	2층	3층	4층	5층
계단	8	16	27	44	70
엘리베이터	8	10	12	14	16

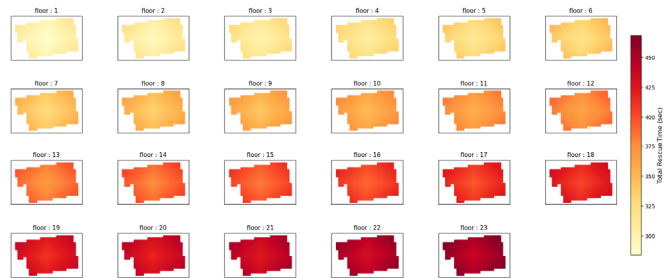
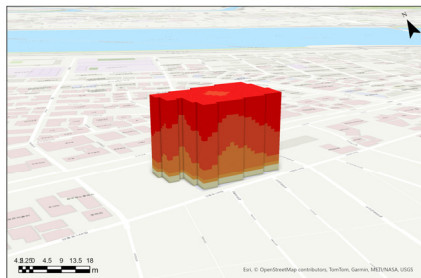


그림 4. 고층 건물의 층별 구조 시간 분포

적으로 증가하는 경향을 확인하였으며, 이를 바탕으로 5층 이후 층수에 대해서는 등차수열 공식을 적용하여 이동 수단별 구조 시간을 일반화하였다. 5층까지 도달하는 데 계단은 70초, 엘리베이터는 16초가 소요되어 수단에 따라 큰 시간 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 수직 이동 수단의 선택이 전체 구조 시간의 효율성에 중요한 영향을 미친다는 점을 보여준다. 이에 본 연구에서는 서울 강남구 내 모든 건축물의 엘리베이터 설치 여부를 식별하여 건물의 속성으로 입력하고, 해당 정보를 층수와 함께 고려하여 수직 이동 시간을 복셀별로 차등 적용하였다.

3) 3차원 접근성 분석 결과

앞서 계산한 구조 시간을 실제 분석 환경에 적용하기 위해, 3차원 복셀 데이터에 총 구조 시간을 입력하였다. 최종적으로, 복셀별 구조 시간은 도로망 기반의 구조 시간에 실내 구조 시간을 더하여 계산되었으며, 이를 통해 건물 내부 구조 시간의 공간적 분포를 3차원적으로 분석하고 시각화할 수 있는 기반을 마련하였다. <식 1>은 이러한 구조 시간 산정 방식의 수식적 표현으로, 복셀 v 에 대한 총 구조 시간 $T_{total}^{(v)}$ 는 실외 도로망을 따라 구조대원이 해당 건물까지 도달하는 데 걸리는 시간 $T_{outdoor}^{(v)}$ 와, 건물 내부에서 복셀 v 까지 이동하는 데 소요되는 실내 이동 시간 $T_{indoor}^{(v)}$ 의 합으로 정의된다. 실내 이동 시간은 건물 내 수평 이동 시간과 수직 이동 시간의 합이다.

$$T_{total}^{(v)} = T_{outdoor}^{(v)} + T_{indoor}^{(v)} \quad (\text{식 1})$$

$$= T_{outdoor}^{(v)} + (T_{vertical}^{(v)} + T_{horizontal}^{(v)})$$

이러한 결과를 직관적으로 확인하기 위해 구조 시간이 저장된 복셀을 3차원 공간에 시각화하였다. 구조 시간을

복셀 단위로 시각화한 결과, 건물의 층수 및 구조적 특성에 따라 구조 시간의 공간적 분포가 뚜렷하게 달라짐을 확인할 수 있었다(그림 4).

그림 4는 고층 건물의 구조 시간을 복셀 단위로 시각화한 결과로, 구조 지연의 공간적 분포를 입체적으로 확인할 수 있도록 구성되었다. 좌측의 3차원 시각화는 건물을 복셀 단위로 세분화하여, 각 복셀에 해당 위치까지 도달하는 구조 시간을 색상으로 표현한 것이다. 시각화 결과에서 확인할 수 있듯이, 층수가 올라갈수록 구조 시간이 점진적으로 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타나며, 색상 농도가 진해지는 상층부는 구조 지연이 집중되는 고위험 영역으로 해석할 수 있다. 우측의 그림은 동일 건물의 각 층을 수평 단면으로 나누어 복셀 구조 시간을 2차원적으로 시각화한 것으로, 층별 구조 시간의 분포를 보다 정밀하게 비교할 수 있도록 한다. 1층부터 23층까지의 단면에서 색상이 점차 어두워지는 패턴이 연속적으로 나타나며, 이는 구조 시간이 상층으로 이동할수록 일관되게 증가하는 경향을 시각적으로 확인할 수 있게 한다. 특히 복셀 단위로 구조 시간을 분석함으로써, 단순한 층수 차이뿐만 아니라 구조 지연이 발생하는 공간적 위치를 구체적으로 식별할 수 있는 분석 기반을 제공한다. 그림 4에서 건물의 층수가 증가함에 따라 구조 시간이 누적되어 점진적으로 증가하는 경향이 매우 뚜렷하게 관찰되었다. 이러한 시간 증가는 단순한 공간적 거리 차이에 따른 결과가 아니라, 구조대원이 상층부에 도달하기까지 소요되는 수직 이동 시간의 누적 효과에 기인하는 것으로 해석된다. 구체적으로, 본 연구에서 분석한 하나의 고층 건물 사례에서는 건물 내 복셀별 구조 시간을 비교한 결과, 최솟값은 약

284초, 최댓값은 약 468초로 나타났으며, 동일한 건물 내부에서 무려 184초, 즉 3분 이상에 달하는 시간 차이가 발생하였다. 이러한 시간 차이는 단순한 위치 차이에서 비롯된 것이 아니라, 구조 경로 내 수직 이동 거리의 차이가 구조 시간에 중첩되어 누적된 결과로 볼 수 있다. 이처럼 고층 건물에서는 같은 건물 내부라 하더라도, 층 위치에 따라 구조 시간이 크게 달라질 수 있으며, 이는 상층부로 갈수록 구조 지연 가능성이 커진다는 현실적인 위험을 시사한다.

또한, 층별 구조 시간이 누적되어 증가하는 양상을 확인함에 따라, 동일한 층수를 가진 건물이라 하더라도 구조 시간이 수직 이동 수단의 종류에 따라 달라질 수 있다는 점에 주목할 필요가 있었다. 다시 말해, 단순히 건물의 층수만을 기준으로 구조 시간을 판단하기보다는, 그 층에 도달하기 위한 이동 수단에 따라 구조 시간의 양상이 달라질 수 있다는 것이다. 그림 5는 수직 이동 수단의 유형에 따른 구조 시간의 차이를 시각화한 결과이다. 상단의 그림은 엘리베이터가 설치되지 않은 건물의 경우로, 상층부로 갈수록 구조 시간이 눈에 띄게 급증하며, 색상 역시 상층으로 갈수록 점점 진해지는 양상을 보였다. 반면, 하단의 그림은 엘리베이터가 설치된 동일한 구조를 가진 건물의 구조 시간을 시각화한 예시이다. 이는 층수가 증가함에 따라 구조 시간도 함께 증가하긴 하지만, 그 변화 폭이 일정하게 유지되며 전체적으로 균등한 색상 분포를 보였다. 이러한 결과를 통해, 구조·구급 접근성 분석에서 단순히 건물의 높이만을 구조 지연의 기준으로 삼는 것은 불충분하며, 구조 동선 내에서 실제로 어떤 수직 이동 수단이 배치되어 있는지를 함께 고려해야 한다는 것이다. 특히 고층 건물의 구조 시간을 평가할

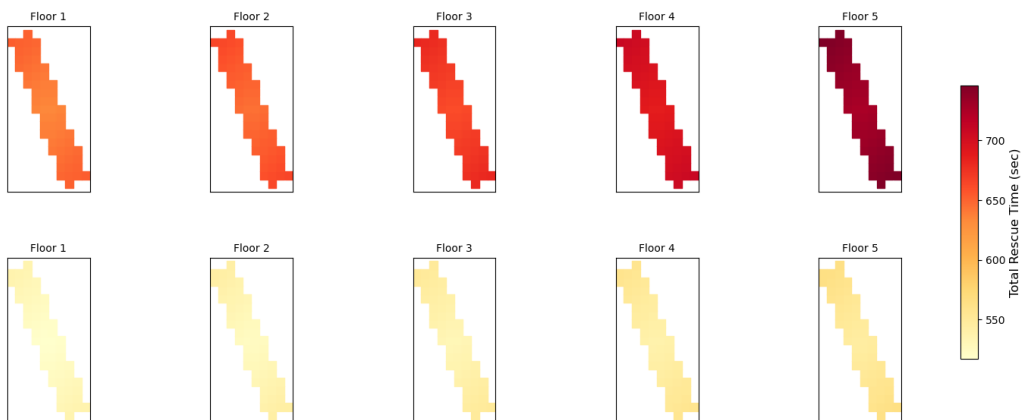


그림 5. 수직 이동 수단별 구조 시간 분포(위: 계단, 아래: 엘리베이터)

때에는 엘리베이터의 존재 여부와 위치, 성능 등 실질적인 이동 조건을 반영해야만 구조 접근성을 보다 현실적으로 평가할 수 있다.

4) 119 구조·구급 서비스 강남구 적용

본 연구의 사례 지역인 서울시 강남구 전체를 대상으로 지역 단위의 구조 취약 현황을 종합적으로 파악하기 위해 공간 단위 기반 분석을 수행하였다. 구조 접근성 평가는 구조 시간이 골든타임인 5분을 초과하는지 여부를 기준으로 이루어졌다. 분석을 위해 강남구 전역을 100×100m 크기의 정사각형 격자로 구분하고, 각 격자 내 포함된 건물들의 구조 시간을 집계하였다. 이를 바탕으로 격자별로 골든타임 내 구조가 가능한 건물의 비율을 산출하였으며, 그 결과를 그림 6과 같이 공간적으로 시각화하였다.

그림 6의 a)는 도로망 기반 접근성만을 고려한 결과로, 강남구 대부분 지역에서 골든타임(5분)을 준수하는 건물 비율이 높게 나타났으며, 특히 119안전센터 주변 격자에서는 85% 이상을 기록하는 구간이 넓게 분포하였다. 반면 그림 6의 b)는 동일한 격자 단위에 대해 건물 내부의 수직 및 수평 이동 시간을 포함하여 총 구조 시간을 재산정한 결과로, 골든타임 충족 비율이 전반적으로 큰 폭으로 감소하여 구조 가능성이 낮은 지역으로 재평가되었다. 이는 도로망 접근성만으로 구조 시간을 판단할 경우, 실제 구조 가능성을 과대평가할 수 있음을 시사한다. 이러한 분석 결과는 건물의 높이, 실내 구조, 수직 이동 수단의 유무가 구조 시간에

직접적인 영향을 미친다는 점을 보여준다.

이처럼 복셀 단위 분석을 활용하면 건물 평균 구조 시간 만으로는 파악하기 어려운 층별·위치별 구조 지연 취약성을 정밀하게 진단할 수 있다. 골든타임을 초과하는 복셀의 비율이 높은 건물은 구조 접근성이 낮은 것으로 간주할 수 있으며, 이러한 정보는 응급 구조 전략 수립이나 자원 배치 계획에 있어 우선순위를 판단하는 기초 자료로 활용될 수 있다. 동일한 건물이라 하더라도 내부 이동 조건에 따라 골든타임 준수 여부가 달라질 수 있으며, 실제 환자가 존재할 수 있는 위치 단위에서 구조 가능성을 평가하기 위해서는 복셀 수준의 시간 분석이 필요하다.

따라서 고층 건물에서의 구조 시간을 보다 현실적으로 산정하고, 응급 구조 활동의 적시성을 정량적으로 평가하기 위해서는 복셀 기반의 3차원 분석이 효과적인 접근 방식이다. 이는 구조 지연의 주요 원인을 공간적으로 진단할 수 있는 기반을 제공하며, 기존의 건물 단위 또는 평면적 분석 방식이 가지는 한계를 보완하는 실질적 대안이 될 수 있다.

4. 결론

본 연구는 초고층 건물의 증가와 건축 구조의 복잡화로 인해 기존의 도로망 기반 접근성 분석이 지닌 한계를 극복하고, 119 구조·구급 서비스의 실질적인 구조 시간 지연 요인을 보다 정밀하게 반영하기 위해 3차원 기반의 접근성 분

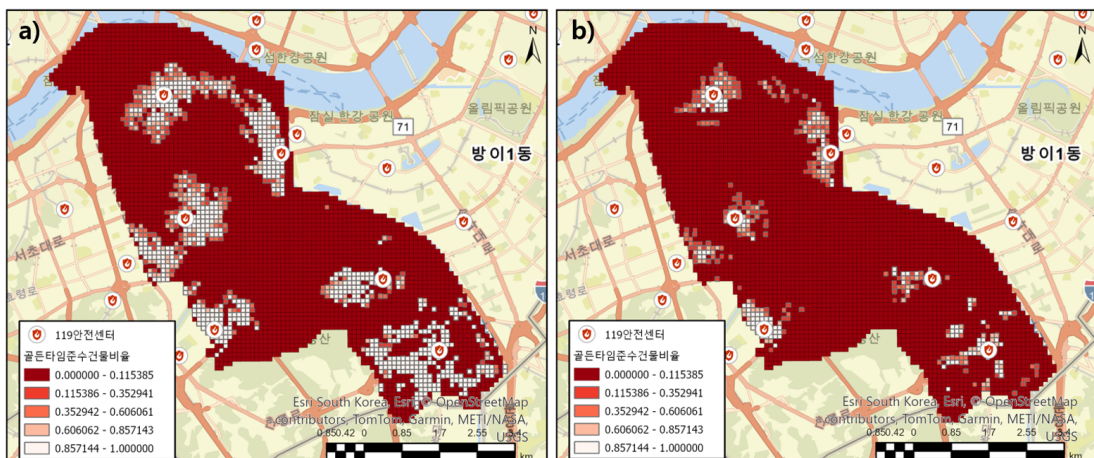


그림 6. 골든타임(5분) 기준 구조 가능성의 공간적 분포; a) 도로망 기반 접근성 고려, b) 건물 내 접근성 추가 고려

석을 수행하였다. 최근 고층 건물과 복합 용도의 대형 건축물이 증가함에 따라, 구조 대상자가 위치한 지점까지 도달하기 위해 구조대원이 건물 내부에서 겪는 수직 및 수평 이동 과정은 전체 구조 시간에서 상당한 비중을 차지하게 되었다. 그럼에도 불구하고 기존의 접근성 분석은 이러한 실내 이동 과정을 고려하지 못한 채, 외부에서 건물 중심점까지의 도달 시간만을 계산하는 방식에 머무르고 있었다. 이로 인해 구조 지연이 발생할 수 있는 핵심 구간인 '건물 내부 동선'이 과소평가되는 문제가 발생하며, 결과적으로 구조 가능성이나 구조 취약성에 대한 판단이 왜곡될 위험이 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 구조 시간의 전 과정을 통합적으로 고려하는 분석이 필요하며, 특히 수직 이동은 고층 건물에서 구조 지연의 핵심 요인으로 작용하므로 보다 정밀하게 반영되어야 한다. 이에 따라 본 연구는 기존의 2차원 도로망 기반 분석을 확장하여 건물 내부의 수직 및 수평 이동 요소를 통합한 3차원 구조를 기반으로 총 소요 시간을 분석하였다.

접근성 분석은 도로 접근성과 실내 접근성으로 구분하여 분석하였다. 도로 접근성은 도로망 기반의 세 가지 방식(Baseline, Cost, Cost2)을 적용하여 비교 분석하였으며, 실내 접근성은 수직·수평 이동 요소를 포함하는 3차원 경로 탐색 결과를 기반으로 구조 시간을 산정하였다. 도출된 구조 시간은 3m 해상도의 복셀(voxel) 단위로 저장되었으며, 구조 대상자가 위치할 수 있는 모든 위치에 대해 총 구조 시간을 포함하도록 하였다. 실외에서 건물까지의 도달 시간과 실내에서 환자에게 도달하기까지의 시간을 통합하여, 구조 시뮬레이션 기반의 종합 구조 시간을 추정하였으며, Unity 기반 시뮬레이션을 통해 구조 동선의 현실성을 보완하였다. 복셀 단위 3차원 시각화를 통해 응급 구조 접근성의 공간적 사각지대를 식별하고, 구조 취약 구간이 어느 지점에 집중되는지를 시공간적으로 파악할 수 있었다.

분석 결과, 구조 시간은 건물의 높이, 수직 이동 수단의 유무, 그리고 수평 거리 등에 따라 유의미하게 달라지는 것으로 나타났다. 엘리베이터가 설치되지 않은 고층 건물에서는 구조 시간이 급격히 증가하였으며, 동일 층 내에서도 구조 수단으로부터 멀리 떨어진 위치일수록 구조 시간이 길어지는 경향이 뚜렷했다. 특히, 복셀 단위로 골든타임(5분) 초과 여부를 분석한 결과, 기존 도로망 기반 분석에서는 구조 가능 구간으로 판단되던 건물 다수가, 실제 내부 이동을 포함한 분석에서는 골든타임을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 단순한 도로 기반 분석만으로는 구조 지연을

과소평가할 수 있음을 의미하며, 실내 이동 동선과 구조 수단 접근성을 함께 고려한 정밀한 분석이 필수적임을 시사한다. 따라서, 본 연구는 구조 시간의 민감성을 '건물 단위'가 아닌 '복셀 단위', 즉 응급 환자가 실제 존재할 수 있는 공간 해상도에서 판단할 수 있는 분석을 수행함으로써, 응급 환자 발생에 대한 지역별 대응 방안 마련을 위한 기초정보를 제공할 수 있을 것이다.

사사

이 논문은 행정안전부 지능형 상황관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-MOIS37-003)(RS-2021-ND 631021).

참고문헌

- 김윤성·이유림·김혜원·권영진, 2021, “고층건축물 계단실 내 재실자의 합류를 고려한 수직보행속도 분석에 관한 연구,” 한국화재소방학회 논문지, 35(5), 105-113.
- 박정근·김재우·조민우·임현술, 2008, “초고층 건물 안에서 구급대 출동요청을 한 환자의 층별 수직이송시간 비교,” 대한응급의학회지, 19(2), 147-152.
- 예레미·최요한, 2023, 소아응급 의료이용 및 자원변화와 의료 접근성 분석, 건강보험심사평가원 심사평가정책연구소, 원주.
- 옥택근·조준휘·천인국·김민수·이태현·김창환·배선학, 2022, “춘천시 응급의료서비스 취약지역 분석 및 권역 평가,” 한국지역지리학회지, 28(2), 170-182.
- 유순규·엄태환, 2010, “신고 시간대에 따른 출동거리와 현장 도착 시간 간의 상관관계,” 한국응급구조학회지, 14(3), 5-12.
- 이경열·문준동·최은숙, 2016, “119 구급서비스 지역별 출동 특성 및 출동거리와 현장도착시간과의 관계,” 한국콘텐츠학회논문지, 16(1), 482-492.
- 이달별, 2020, “구급서비스의 지역 불균형: 부산시 119 구급 활동일지 분석,” 한국지리정보학회지, 23(3), 161-173.
- 장경호·강경희·장윤희·한경동, 2016, “119 구급서비스의 시간 분석,” 한국화재소방학회 논문지, 30(4), 128-134.
- 최준호·이지수·홍원화, 2015, “부산지역 119 구조대 증설을 통한 건축물 접근취약성 개선효과 분석,” 한국화재

- 소방학회 논문지, 29(5), 79-87.
- 하재서·신동빈, 2022, “지도서비스의 오픈 API 를 활용한 응급의료 취약지역 분석,” *대한공간정보학회지*, 30(3), 15-23.
- Campbell, J. P., Gratton, M. C., Salomone III, J. A. and Watson, W. A., 1993, Ambulance arrival to patient contact: the hidden component of prehospital response time intervals, *Annals of Emergency Medicine*, 22(8), 1254-1257.
- Haggerty J. L., Lévesque, J. F., Santor, D. A., Burge, F., Beaulieu, C., Bouharaoui, F., Beaulieu, M. D., Pineault, R. and Gass, D., 2011, Accessibility from the patient perspective: comparison of primary healthcare evaluation instruments, *Healthcare Policy*, 7, 94-107.
- Isikdag, U. and Zlatanova, S., 2009, Towards defining a framework for automatic generation of buildings in CityGML using building information models, in Lee, J. and Zlatanova, S. (eds.), *3D Geo-Information Sciences. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87395-2_6
- Jonsson, M., Berglund, E., Djärv, T., Nordberg, P., Claesson, A., Forsberg, S., Nord, A., Tan, H. L. and Ringh, M., 2020, A brisk walk-Real-life travelling speed of lay responders in out-of-hospital cardiac arrest, *Resuscitation*, 151, 197-204.
- Lateef, F. and Anantharaman, V., 2000, Delays in the EMS response to and the evacuation of patients in high-rise buildings in Singapore, *Prehospital Emergency Care*, 4(4), 327-332.
- Lin, W. Y. and Lin, P. H., 2018, Intelligent generation of indoor topology (i-GIT) for human indoor pathfinding based on IFC models and 3D GIS technology, *Automation in Construction*, 94, 340-359.
- Liu, X. and Gong, D., 2011, A comparative study of A-star algorithms for search and rescue in perfect maze, *In 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering*, 24-27.
- Morrison, L. J., Angelini, M. P., Vermeulen, M. J. and Schwartz, B., 2005, Measuring the EMS patient access time interval and the impact of responding to high-rise buildings, *Prehospital Emergency Care*, 9(1), 14-18.
- Silverman, R. A., Galea, S., Blaney, S., Freese, J., Prezant, D. J., Park, R., Pahl, R., Caron, D., Yoon, S., Epstein, J. and Richmond, N. J., 2007, The “vertical response time”: barriers to ambulance response in an urban area, *Academic Emergency Medicine*, 14(9), 772-778.
- Tashakkori, H., Rajabifard, A. and Kalantari, M., 2015, A new 3D indoor/outdoor spatial model for indoor emergency response facilitation, *Building and Environment*, 89, 170-182.
- Teo, T. A. and Cho, K. H., 2016, BIM-oriented indoor network model for indoor and outdoor combined route planning, *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 268-282.
- Tonna, J. E., Boonstra, P. S., MacLaren, G., Paden, M., Brodie, D., Anders, M., Hoskote, A., Ramanathan, K., Hyslop, R., Fanning, J. J., Rycus, P., Stead, C., Barrett, N. A., Mueller, T., Gómez, R. D., Kapoor, P. M., Fraser, J. F., Bartlett, R. H., Alexander, P. M. A. and Barbaro, R. P., 2024, Extracorporeal life support organization registry international report 2022: 100,000 survivors, *ASAIO Journal*, 70(2), 131-143
- 브이월드, GIS건물통합정보, https://www.vworld.kr/dtmk/dtmk_ntads_s002.do?svcCde=NA&dsId=18, 2025년 6월 17일 접속.
- 유니티, 에셋스토어, <https://assetstore.unity.com/ko-KR/3d>, 2025년 6월 17일 접속.
- ITS국가교통정보센터, 표준노드링크, <https://www.its.go.kr/nodelink/nodelinkRef>, 2025년 6월 17일 접속.
- 교신: 최진무, 02447, 서울특별시 동대문구 경희대로 26, 경희대학교 지리학과(이메일: cjm89@khu.ac.kr, 전화: 02-961-0188, 팩스: 02-961-0848)
- Correspondence: Jinmu Choi, Department of Geography, Kyung Hee University, 26 Kyungheedaero, Dongdaemun-gu, Seoul 02447, Korea(e-mail: cjm89@khu.ac.kr, phone: +82-2-961-0188, fax: +82-2-961-0848)
- 최초투고일 2025. 6. 17
수정일 2025. 6. 26
최종접수일 2025. 6. 26