

다중운집 인파 안전 관리를 위한 DEVS 기반 모델링 및 시물레이션

김규리 · 이상화 · 배장원[†]

DEVS-Based Simulation Model for Safety Management of Pedestrian Streams in High-Density Situations

Gyu-Ri Kim · Sang-Hwa Lee · Jang-Won Bae[†]

ABSTRACT

Crowd accidents in high-density situations occur frequently worldwide, and the actual development of crowd dynamics often deviates from prior expectations, making it difficult for pre-established control measures to function effectively. As a result, such incidents have emerged as critical social disasters that can lead to large-scale casualties within a short time. Previous studies have mainly focused on evacuation models confined to specific facilities or situations, or on the analysis of individual pedestrian behaviors, thereby limiting their applicability under diverse environmental conditions. To address these limitations, this study proposes CrowdSim, a DEVS (Discrete Event System Specification)-based simulation model for safety management of pedestrian streams in high-density situations. The proposed model is designed to enhance generalizability across various environments and scenarios by treating pedestrians as independent agents and dynamically simulating their movement, stay, and density variations within walkway networks. Applying the model to spatial and transportation data from the 2022 Itaewon disaster, the results revealed periodic density fluctuation patterns across the entire walkway network according to the subway passenger drop-off cycle (every 4 minutes), with a specific edge ($n1_n2$) showing a rapid density increase that reached hazardous levels. The proposed model goes beyond simple crowd size prediction by incorporating time-dependent spatial constraints and crowd flows, and it is expected to serve as a practical tool for supporting effective crowd safety management and preventive countermeasure planning.

Key words : mass-crowd; safety management; DEVS; simulation; pedestrian; crowd

요 약

다중운집 인파 사고는 전 세계적으로 빈번히 발생하며, 실제 상황에서의 군중 전개 양상이 예측과 다르게 나타나 사전에 마련된 통제 조치가 효과적으로 작동하기 어렵다. 그 결과, 단시간 내에 대규모 인명 피해로 이어지는 사회적 재난으로 부각되고 있다. 기존 연구는 특정 시설이나 상황에 국한된 대피 모델 혹은 개별 보행자 행동 분석에 집중하여 다양한 환경적 조건에 대응하여 적용하는 데 한계가 있었다. 본 연구는 이러한 한계를 보완하기 위해 DEVS(Discrete Event System Specification) 형식론을 기반한 다중운집 인파 안전관리 시물레이션 모델(CrowdSim)을 제안한다. 제안된 모델은 다양한 환경과 시나리오에 적용할 수 있도록 보행자를 독립적 행위 주체로 유지하면서, 보행로 네트워크 상의 이동·체류 과정과 밀집도 변화를 동적으로 모사하도록 설계하였다. 시물레이션에 2022년 이태원 참사 당시의 공간 및 교통 데이터를 적용한 결과, 전체 보행로에서 지하철 하차 주기(4분)에 따른 밀집도 변동 패턴이 관찰되었으며, 특히 특정 구간($n1_n2$)에서는 밀집도가 급격히 상승하여 위험 단계에 도달하는 과정이 확인되었다. 본 모델은 단순 인파 규모 예측을 넘어 시간대별 공간적 제약을 반영한 군중 흐름을 반영할 수 있어, 향후 효과적인 인파 안전 관리 및 사고 예방 대책 수립을 지원하는 실무적 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 다중운집, 안전관리, DEVS, 시물레이션, 보행자, 군중

* 이 논문은 2024년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 글로벌 인문·사회융합연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2024S1A5C3A01042885)

Received: 14 October 2025, Revised: 27 November 2025,
Accepted: 27 November 2025

[†] **Corresponding Author**: Jang Won Bae
E-mail: jangwon_bae@koreatech.ac.kr
Korea University of Technology and Education School of Industrial Management

1. 서론

다중운집 인파 사고는 한정된 공간에 인파가 급격히 집중됨으로써 인명, 신체 및 재산 피해가 발생하는 사회 재난을 의미한다. 이러한 사고는 주로 축제나 행사와 같은 특정 이벤트, 주기적으로 발생하는 밀집 상황, 혹은 예

측이 어려운 돌발적 밀집 상황에서 발생한다. 이때 ‘인파 밀집’은 특정 장소의 수용 능력을 초과하는 인원이 모인 상태로 정의된다. 실외 공간을 기준으로 인원 밀도는 1m^2 당 2인 이하일 경우 ‘여유 상태’, 2~4인인 경우 ‘주의 상태’, 5인 이상일 경우 ‘위험 상태’로 분류된다(행정안전부, 2024).

축제나 행사와 같이 주최자가 존재하는 경우에는 사전에 안전관리계획이 수립되며, 참가인원, 개최 시기 및 장소 등이 등록·공고됨에 따라 인파 밀집을 일정 수준 예측할 수 있다. 또한, 주최자가 존재하지 않더라도 특정 시기의 연례적 집결이나 평시 출·퇴근 시간과 같은 주기적 밀집 현상은 비교적 예측이 가능하다. 반면, 클럽, 카페, 술집 등 대도시 상권 발달 밀집 지역이나 시설 고장·공사 등의 돌발상황이 발생한 지역에서는 인파가 급격하게 집중되므로 밀집 현상을 사전에 예측하기 어렵다(행정안전부, 2024).

실제 사례로, 2022년 10월 29일 22시 15분경 서울특별시 용산구 이태원로 일대에서는 헬러원 행사로 인해 다수의 인파가 밀집한 가운데, 군중 일부가 넘어지면서 대규모 인파 사고가 발생하였다. 이 사고는 현장에서의 인파 관리 및 통제가 적절히 이루어지지 않은 점이 주요 원인 중 하나로 지적되었으며, 이를 계기로 다양한 상황에서 인파 관리와 통제의 중요성이 사회적으로 크게 부각되었다(배재현, 이송림, 2022).

이태원 참사 이전에도 이란, 탄자니아, 인도 등 세계 각국에서 다중운집 인파 사고는 빈번하게 발생해 왔다(문준섭, 2022). 이러한 사고들은 예측과는 다른 돌발적 변수로 인해 사전에 마련된 인파 통제 조치가 무력화되면서 대규모 인명 피해로 이어지는 사례가 반복되고 있음을 보여준다. 이는 단순히 ‘얼마나 많은 사람이 모일 것인가’에 대한 정량적 예측만으로는 인파 안전을 확보하기 어렵다는 점을 시사하며, 시시각각 변화하는 군중의 흐름, 공간의 물리적 제약, 그리고 돌발 변수에 대한 실시간 대응을 통합적으로 고려하는 인파 안전 관리 체계의 필요성을 강조한다.

본 연구에서는 다양한 환경적 조건과 상황 변화에 유연하게 대응할 수 있는 다중운집 인파 안전관리 모델을 개발하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 각 보행자를 보행로 네트워크 상에서 독립적으로 유지·관리할 수 있도록 DEVS(Discrete Event System Specification) 형식론을 기반으로 한 시뮬레이션 모델을 제안한다. 제안하는 모델은 DEVS의 모듈·계층 구조로 미시적 보행 행태와 거시적 혼잡 지표를 일관되게 결합하고, 실험데이터 기반

파라미터화로 재현성과 해석 가능성을 확보하여, 위험 구간의 조기 식별 및 정책 의사결정(사전 대비·현장 배치·통제 전략)에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 선행 연구

Chalmet 등(1982)은 건물 내 여러 출구를 가진 환경에서 평균 대피 시간, 최종 대피 시간, 특정 시간 내 대피 인원 수를 동시에 최적화하는 네트워크 모델을 개발하였다. 건물을 노드와 엣지의 네트워크로 모델링하고, 동적 네트워크 플로우 알고리즘을 사용하여 경로 배정을 최적화하였다. 본 연구는 다중운집 인파 사고의 초기 연구 중 하나로, 대피 계획을 수학적 최적화 문제로 정식화했으며, 이후 많은 네트워크 기반 연구의 기초가 되었다.

Cepolina(2005)는 건물 내부 대피 경로를 결정하여 전체 대피 시간을 최소화하기 위해 특정 건물 기하 구조를 단순화해 탐색 공간을 제한하고, 시뮬레이티드 어닐링(heuristic)을 적용하였다. 휴리스틱 최적화 접근법을 통해 계산 효율성을 높였으며, 실제 건물 대피 문제에 적용 가능한 유연성을 보여주었다. 이후 Cepolina(2009)는 기존 모델을 확장하여 위층별 순차적 대피(phased evacuation)와 병목구간의 capacity drop 현상을 반영하기 위해 시뮬레이티드 어닐링 기반 모델에 병목 효과와 층별 대피 개시 시점을 최적화 변수로 추가하였다. 단순한 경로 배정에서 한 걸음 더 나아가, 실제 군중 흐름의 비선형성과 병목 현상을 고려한 진일보한 모델을 제시한 것이다. 그러나 시뮬레이티드 어닐링은 효율적이지만, 모델 보정(calibration)과 실제 데이터 검증이 부족하다.

Ma, Song 등(2012)은 초고층 빌딩에서 대규모 인원의 대피 특성을 규명하고, 설계 및 안전 관리에 필요한 기초 데이터를 제공한다. 중국 상하이의 101층, 470m 규모 초고층 건물을 대상으로 개인 자유 대피, 177명 집단 대피, 계단·엘리베이터 혼합 대피 전략으로 나누어 실험을 진행하였다. 이를 통해 층수별 병합·대기 현상, 피로 누적에 따른 속도 저하, 피난층 전환 소요 시간, 엘리베이터 병행 효과 등을 분석하였다. 본 연구는 실제 건물에서의 대피 실험을 통해 정량적 지표를 제시한 점에서 의미가 있다. 그러나 참여 인원이 177명으로 제한되고, 변수 통제가 어려운 한계가 있어 일반화에 제약이 있다.

Lovreglio(2015)는 건물 화재 상황에서 개별 보행자가 언제, 왜 대피를 시작하는지를 정밀하게 예측하려고 한다. Random Utility Theory에 기반한 통계적·행동적 의사결정 모델을 설계학과 실제 대피 실험 데이터를 활용

하여 모델을 검증하였다. 이를 통해 개별 보행자의 상태 전이와 의사결정을 모사할 수 있는 행동 기반 예측 모델을 제안하였다. 해당 연구는 개인 단위 의사결정 요인 규명에 초점을 맞추어 보다 현실적인 대피 시뮬레이션을 가능하게 했으나, 분석 범위가 건물 내부 실험 데이터에 한정되어 있고 네트워크 수준의 밀집도나 위험 구간 탐지는 다루지 못한다는 한계가 있다.

기존 연구들은 개인 의사결정 또는 특정 시설 상황에 국한되어 있으며, 실험 데이터나 이론적 검토에 치중함으로써 다양한 다중운집 인파 사고 상황에 일반화하여 적용하기 어렵다는 한계가 있다. 이에 본 연구는 실험 데이터를 활용하여 개별 보행자 행동과 네트워크 수준의 상황을 동시에 고려할 수 있도록 DEVS 형식론 기반 시뮬레이션을 제안한다. 이를 통해 정확성과 계산 효율을 동시에 확보하고, 나아가 정책적 의사결정에 직접 활용 가능한 효율적인 안전관리 체계 수립을 목표로 한다.

3. 군중 시뮬레이션 모델링

3.1 DEVS 형식론

DEVS(Discrete Event System Specification) 형식론은 이산사건 시스템(Discrete Event System)의 모델링 및 시뮬레이션을 위한 수학적 프레임워크로, 복잡한 시스템의 구조적 표현과 시간 기반 동작을 정밀하게 모사할 수 있는 도구를 제공한다. 본 형식론은 시스템을 구성하는 요소들을 계층적(Hierarchical)이며 모듈화(Modular)된 방식으로 정의함으로써, 대규모 복잡계의 유연한 모델링을 가능하게 한다(Zeigler, 2000).

DEVS 모델은 크게 원자 모델(Atomic Model)과 결합 모델(Coupled Model)의 두 가지 구성 요소로 정의된다. 원자 모델은 더 이상 분해될 수 없는 최소 단위의 행동 단위로, 상태(state), 내/외부 이벤트 함수(int/ext transition function), 출력 함수(output function), 시간 전진 함수(time advance function) 등을 포함한다. 반면, 결합 모델은 여러 개의 원자 모델 혹은 결합 모델을 조합하여 하나의 상위 모델을 구성하는 방식으로, 시스템의 계층적 구조를 표현하는 데 사용된다.

Fig. 1은 DEVS 모델의 구조적 특성을 시각적으로 나타낸 것으로, 모델의 계층성과 모듈성을 동시에 표현하고 있다. 가장 하위 계층에는 원자 모델 A, B, C가 존재하며, 이들이 결합 되어 중간 수준의 결합 모델 AB와 C를 형성한다. 상위 수준에서는 이들 결합 모델이 다시 하나의 최상위 결합 모델 ABC로 통합된다. 이러한 구조는 시

스템 구성 요소 간의 명확한 경계를 유지하면서도, 각 모듈의 재사용성과 독립성을 확보할 수 있는 장점을 제공한다.

DEVS 형식론은 이러한 계층적·모듈화된 구조를 기반으로 하여, 동적 시스템의 다양한 상태 전이와 이벤트 기반 상호작용을 정형화할 수 있으며, 특히 군중 시뮬레이션, 물류 시스템, 교통 흐름 분석 등 복잡계 모델링에 적합한 방법론으로 활용된다.

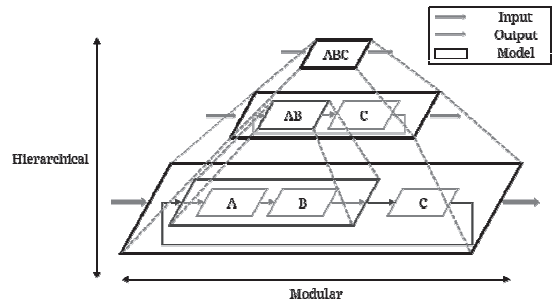


Fig. 1. Discrete Event System Specification (DEVS) formalism

3.2 DEVS 형식론 기반 군중 시뮬레이션 모델링

본 절에서는 DEVS 형식론을 기반으로 구축된 군중 시뮬레이션 모델인 CrowdSim의 구성과 동작 원리를 설명한다. CrowdSim은 군중의 이동 및 체류 과정을 정밀하게 모사하기 위해 군중 행동 프로세스와 보행자, 보행로 네트워크까지 전체 구조를 계층적으로 모델링하였다.

3.2.1 다중운집 사고 관리 시뮬레이션 모델

본 연구에서는 DEVS 형식론을 기반으로 한 다중운집 인파 안전관리 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 이를 CrowdSim이라 명명한다. CrowdSim은 특정 공간으로 유입된 군중이 밀집되는 상황을 동적으로 모사하며, 각 보행자의 이동 경로, 체류 시간, 복귀 경로 등을 시간 기반 이산사건으로 표현될 수 있도록 설계되었다.

구체적으로, 보행자(Pedestrian)는 지하철역 등 유입 지점에서 보행로 네트워크(Walkway)를 통해 각자의 목적지로 이동하고, 도착지에서 일정 시간 체류한 후 다시 유입 지점으로 복귀하는 과정을 거친다. 군중은 개별 보행자 단위로 행동하며, Fig. 2는 보행자 행동 과정을 도식화한 것이다.

보행자는 초기 위치에서 특정 조건(예: 지하철 하차 시간)이 충족될 때까지 대기 상태를 유지(Pedestrian Waiting)하며, 조건이 만족되면 목적지까지의 경로를 탐색한다. 이때 경로 탐색(Path Finding)은 다익스트라 알고리즘을 기반

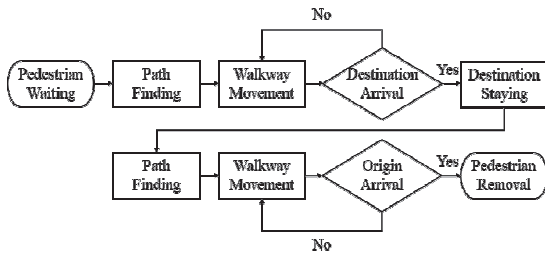


Fig. 2. Pedestrian behavior process

으로 수행되며, 최단 경로(Shortest Path)와 두 번째로 짧은 대체경로(Second Shortest Path) 중 하나를 확률적으로 선택하여 이동(Walkway Movement)을 개시한다. 이동 과정에서 보행자는 네트워크 내 노드 간을 순차적으로 이동하며, 각 노드 도착 시 목적지 도달 여부를 판정한다(Destination Arrival). 목적지에 도착하면 일정 시간 동안 체류 활동을 수행(Destination Stay)하며, 체류 시간이 종료되면 출발지로의 복귀를 시작한다. 복귀 시 출발지까지의 경로를 재탐색(Path Finding)하고 동일한 보행 과정을 반복(Walkway Movement)하며, 출발지에 도착-Origin Arrival)하면 보행자의 프로세스를 종료(Pedestrian Removal)한다.

한편, 보행자의 경로 선택은 사전에 정의된 확률 규칙에 따라 이루어지도록 설계하였다. 각 보행자는 주어진 출발지 - 목적지(OD) 쌍 내에서 경로 선택 확률이 부여되며, 전체 보행자 중 20%는 최단 경로(Shortest Path)를, 나머지 80%는 두 번째로 짧은 대체 경로(Second Shortest Path)를 선택한다. 이러한 설정은 이태원역 인근의 공간 구조와 상권 분포를 반영하여, 실제로 다수의 보행자가 해밀턴 호텔 뒤편의 세계음식문화거리를 중심으로 이동 동선을 형성하는 현상을 모사하기 위함이다. 이를 통해

동일한 유입 조건에서도 보행자의 분산 이동과 특정 구간으로의 집중 현상을 보다 현실적으로 재현할 수 있었다.

Fig. 3은 CrowdSim을 구성하는 주요 컴포넌트와 입력과 출력을 보여준다. CrowdSim은 두 개의 주요 원자 모델(Atomic Model)로 구성된다. 첫째, Pedestrian Atomic Model은 개별 보행자의 출발지로부터 도착지까지의 이동, 도착지에서의 체류, 도착지로부터 출발지까지 복귀하는 독립적인 보행자를 의미한다. 각 보행자는 독립적인 인스턴스로 구성되며, DEVS 원자 모델의 개념에 따라 개별 상태, 입력/출력 이벤트, 상태 전이 함수 등을 갖는다. 둘째, Walkway Atomic Model은 보행자가 실제로 이동하는 보행로 네트워크를 의미하며, 각 보행자의 이동과 체류 상태를 추적하는 역할을 수행한다.

CrowdSim은 Pedestrian 모델과 Walkway 모델 간의 상호작용을 위해 네 가지 포트인 WalkStart, WalkEnd, StayStart, StayEnd를 정의하고 있으며, 이들 포트를 통해 입·출력 이벤트를 처리한다. WalkStart는 보행자가 특정 지점(예: 지하철역 출구 등)에서 보행로 네트워크로 진입한 이벤트를 나타낸다. Pedestrian 모델에서 WalkStart 이벤트를 출력하면, 해당 메시지는 Walkway 모델로 전달되어 보행자가 이동을 시작했음을 기록하고 처리한다. WalkEnd는 보행자가 보행로를 따라 이동한 후 도착지에 도달한 이벤트를 의미한다. 이는 이동 과정의 종료 시점이며, Pedestrian 모델에서 WalkEnd 출력이 발생하면 Walkway는 이를 수신하여 해당 보행자의 이동 종료를 처리한다. 일반적으로 이 이벤트는 체류 시작 이벤트인 StayStart로 이어진다. StayStart는 보행자가 목적지에 도달한 후 일정 시간 동안 체류를 시작하는 시점을 나타낸다. Pedestrian 모델이 StayStart 메시지를 출력하면, Walkway는 해당 보행자의 목적지 도착 및 체류 시작을 감지하여

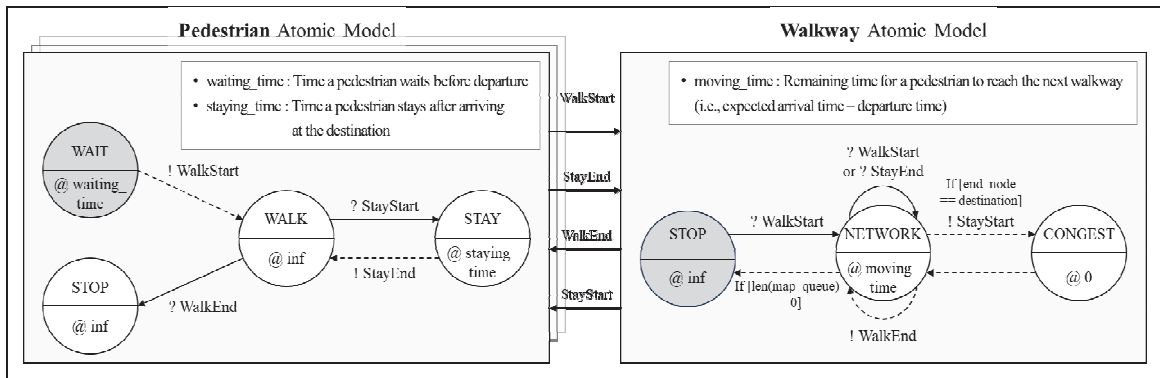


Fig. 3. Pedestrian & Walkway Atomic model

공간 밀집 상태를 반영한다. StayEnd는 보행자의 체류 시간이 종료되어 다시 보행을 시작할 준비가 되었음을 나타낸다. Pedestrian 모델이 StayEnd 메시지를 출력하면, Walkway는 이를 수신하여 보행자의 체류 종료와 이동 재개를 위한 상태 전이를 유도한다. 이 시점 이후 다시 WalkStart 메시지가 발생하며, 복귀 경로로의 이동이 개시된다.

3.2.2 Pedestrian Atomic Model

Fig. 3의 왼쪽 그림은 Pedestrian 원자 모델을 나타낸다. Pedestrian 모델은 보행자의 이동 행태를 시뮬레이션하는 모델이다. Pedestrian 모델은 WAIT, WALK, STAY, STOP으로 총 4가지의 상태로 구성된다. WAIT은 이동 전 대기 상태를 의미하고, WALK는 보행 중 상태, STAY는 목적지 체류 중인 상태, STOP은 시뮬레이션을 종료한 상태를 의미한다. Pedestrian 모델의 waiting_time은 보행자의 이동 시작까지 남은 시간을 말하고, staying_time은 보행자가 목적지에 머무는 시간을 말한다.

Pedestrian은 이동을 시작하기 전 waiting_time 동안 WAIT 상태를 유지하다가 해당 시간이 종료되면 WalkStart 이벤트를 출력하고 WALK 상태로 진입한다. Pedestrian이 목적지에 도착하게 되면 StayStart 입력이 발생하여 STAY 상태로 전환되며, staying_time 동안 머문 후 시간이 종료되면 StayEnd 이벤트를 출력하고 다시 WALK 상태로 복귀한다. 이후 Pedestrian이 출발지로 복귀하게 되면 WalkEnd 입력이 발생하여 STOP 상태로 전환되고, 시뮬레이션은 종료된다.

3.2.3 Walkway Atomic Model

Fig. 3의 오른쪽 그림은 Walkway 원자 모델을 나타낸다. Walkway 모델은 보행 경로 상에서의 동적 상태를 시뮬레이션하기 위한 모델이다. Walkway 모델은 STOP, NETWORK, CONGEST로 총 3가지의 상태로 구성된다. STOP은 보행자가 대기 중인 상태를 의미하고, NETWORK는 보행자가 통행 중인 상태, CONGEST는 보행로 상의 혼잡 상태를 의미한다. Walkway 모델의 moving_time은 보행자가 다음 보행로에 도착하기까지 남은 시간을 의미하며, 이는 예상 도착 시각에서 현재 시각을 뺀 값으로 정의된다. STOP 상태에 있던 보행자가 이동을 시작하면 WalkStart 입력이 발생하고, 이에 따라 NETWORK 상태로 진입한다. Pedestrian은 moving_time 동안 NETWORK 상태에서 이동을 지속하며, 해당 시간이 종료되면 다음 보행 노드가 최종 목적지인지 여부에 따라 상태 전이가

달라진다. 최종 목적지인 경우 StayStart 이벤트를 출력한 뒤 CONGEST 상태로 전이하며, 최종 목적지가 아닌 경우에는 StayStart 이벤트 없이 CONGEST 상태로 전이한다. CONGEST 상태에서는 보행자가 해당 구간에 진입하거나 이탈할 때마다 구간 내 보행자 수를 집계하고, 이를 바탕으로 밀집도(density)를 즉시 갱신한다. 보행자가 진입하는 경우, 갱신된 밀집도는 해당 보행자 자신을 포함하여 계산되며, 이 값을 기반으로 보행자의 이동 속도(v)와 통과 시간(moving_time)이 결정된다. 이후 구간을 이동하는 동안에는 밀집도 변동이 발생하더라도 속도는 재계산되지 않으며, 다음 보행자가 진입할 때 다시 밀집도가 갱신되어 새로 적용된다. 이러한 구조는 DEVS의 이벤트 단위 처리 특성을 반영하여, 각 구간 진입 시점에 서만 밀집도 변화를 고려하는 방식이다. 보행자가 구간을 이탈하면 Walkway Atomic model은 해당 인원을 제거하고 밀집도를 재산출하여, 이후 진입자에게 갱신된 값을 반영한다. 이후 모델은 NETWORK 상태로 전이하며, Pedestrian이 최종 목적지에 도달할 때까지 이 과정을 반복한다. 이후 Pedestrian이 목적지에서의 체류를 마치고 StayEnd 입력을 받으면, 다시 NETWORK 상태로 진입하여 출발지로 복귀하게 된다. 마지막으로, 보행 중인 Pedestrian이 모두 사라지면 WalkEnd 이벤트가 발생하고, 모델은 STOP 상태로 전이하여 종료된다.

3.2.4 보행 속도 계산식

보행 속도는 CONGEST에서 밀집도에 따라 선형적으로 감소하며, 다음과 같은 수식으로 표현된다(1)(Greenshields 등 1935; Weidmann 등 1993; Blue 등 2001; Zhang 등 2012).

$$v(N, L, W) = \begin{cases} v_0(1 - \alpha_{eff} \frac{1}{p_{max}} \frac{N}{LW}), & \text{if } v \geq v_{min} \\ v_{min} & \text{otherwise} \end{cases}$$

N : 구간내 보행자수(명)

L : 보행로 길이(m)

W : 보행로 폭(m)

p_{max} : 최대(정체) 밀집도(명/ m^2)

α_{eff} : 민감도 계수(단방향 = 1, 양방향 = 1.3)

v_0 : 정상보행 속도(m/s)

v_{min} : 최소속도하한(m/s)

v : 보행 속도(최종)(m/s)

(1)

보행자는 인원이 증가할수록 공간 내 상호작용이 누적되어 흐름 저항이 커지게 되며, 이는 곧 보행 속도의 점진적 저하로 이어진다. 본 연구에서는 이러한 누적 효과

를 반영하기 위하여 밀집도 증가에 따른 보행 속도 변화를 수식으로 모델링하였다. 아울러, 실제 보행 경로에서는 통행 방식에 따라 속도 차이가 발생하면, 선행 연구에서는 우측 통행과 같은 일관된 통행 규율이 보행 효율을 향상시켜 평균 보행 속도를 증가시킨다고 보고하였다 (Zhang 등, 2012). 이를 고려하여 본 모델에서는 양방향 간섭 효과와 통행 규율을 함께 반영할 수 있도록 민감도 계수(a_{eff})를 도입하였다. 따라서 본 수식은 단순히 보행자 수 증가에 따른 밀집도 효과뿐 아니라, 통행 통제 여부에 따른 속도 변화를 동시에 설명할 수 있다.

본 모델의 민감도 계수(a_{eff})는 1.3으로 반영하였다. 밀집도가 증가할수록 보행 속도는 점진적으로 감소하며, 일정 임계 밀집도(P_{max}) 6명 이하에서는 최소 보행 속도($v_{min} = 0.1$)로 제한된다. 정상 보행 속도(V_0)는 $1.3m/s$ 로 설정하였다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 활용 데이터

본 연구에서는 대중운집 인과 안전 관리를 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였으며, 이를 CrowdSim이라고 명명하였다. Table 1에는 CrowdSim의 입·출력 과정에서 사용되는 주요 칼럼을 제시한다.

Table 1. Description of CrowdSim Input-Output Structure and Data

Dataset Name	Data Type	Data Collection Period	Data Size	Data Usage Purpose
Number of Boarding and Alighting Passengers by Time Period	Actual Data (14)	October 29, 2022, from 6:00 p.m. to 10:00 p.m.	6×7	Modeling of Incoming Population
Total Living Population by Time Period	Actual Data (15)	October, 2022, from 6:00 p.m. to 10:00 p.m.	3×5	Modeling of Resident Population
Walkway Network	Actual Data (16)	2025	62×62	Modeling of Walkway Network
Destination Category	Actual Data (16)	2025	60×2	Category Information of Node in the Walkway Network
Average Dwell Time and Selection Weight	Synthetic Data	-	13×3	Pedestrian Dwell Time Estimation

이제 CrowdSim의 현실 적용 가능성을 검토하기 위하여 시나리오를 설계하고, 이에 적합한 데이터를 활용하고자 한다. 구체적으로, 시나리오는 2022년 이태원 참사 당일인 10월 29일 오후 18시부터 22시까지의 시간대를 대상으로 설정하였다. 이에 따라 이태원역 일대를 이동하는 보행자 집단(Pedestrian)과 이태원 주요 보행로(Walkway) 모델을 구축하기 위해 필요한 데이터를 수집하였다.

4.1.1 시간대별 교통 유입 인원 데이터

본 연구에서 보행자 이동을 시뮬레이션하기 위한 입력 데이터로 이태원역 시간대별 승하차 인원 데이터를 활용하였다. 컬럼은 날짜, 호선, 고유역 번호, 역명, 승하차 구분, 시간대, 인원으로 구성되어 있다. 시간대별로 기록된 하차 인원 수는 열차 도착 시간 4분 간격에 맞춰 분배되며, 해당 시점마다 역 입구 노드 위치에서 보행자가 생성된다. 시나리오 상 이태원역 4곳 중 2곳만을 사용하기 때문에 전체 인원 43,571명 중 절반인 21,785명만을 사용하였다.

4.1.2 시간대별 지역 상주 인원 데이터

본 연구에서는 보행 네트워크 내 기본 보행자 밀도를 설정하기 위한 입력 데이터로 이태원1동 특정 집계구의 총생활인구 데이터이다. 컬럼은 기준일(날짜), 집계구 코드, 행정동 코드, 시간대, 인구로 구성되어 있다. 이 데이터는 단순한 교통 유입 인원만으로는 네트워크 내 보행자가 전혀 없는 비현실적인 상황이 발생할 수 있기 때문에, 시간대별 체류 기반 상주 인원을 반영하여 네트워크의 배경 인구를 보정하는 데 사용하였다. 구체적으로, 시간대별 총생활인구에서 시간대별 교통 유입 인원을 제외하여 산출한 값을 시간대별 체류 기반 상주 인구로 정의하고, 이를 시뮬레이션의 초기 보행자 분포로 적용하였다.

4.1.3 보행로 네트워크 데이터

보행로 네트워크 데이터는 Walkway 모델을 설계하기 위한 데이터로 62개의 노드와 158개의 엣지를 포함한다 (Fig. 4 참조). 여기서 노드(node)는 보행로 상의 교차 지점 또는 분기점(교차로)을 의미하며, 엣지(edge)는 두 노드를 연결하는 실제 보행로 구간을 나타낸다.

각 엣지에는 길이(m)와 폭(m)이 속성 값으로 포함되어 보행 속도 및 밀집도 계산에 활용된다. 또한, 시간대별 보행자 유입은 네트워크 내 특정 노드에서 발생한다고 가정하며, 본 사례에서는 이태원역 인근의 주요 출입구 노드(e1, e2)에서 보행자가 발생하는 것으로 설정하였다.

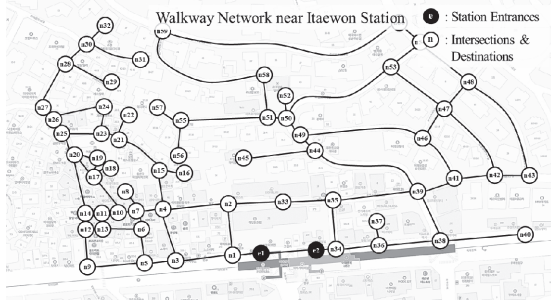


Fig. 4. Walkway network

4.1.4 목적지 업종 분류 데이터

목적지(노드) 업종 분류 데이터는 전체 60개 노드 가운데 지하철역 출입구에 해당하는 e1과 e2 노드를 제외한 58개 노드를 대상으로 구축하였다. 각 노드의 업종 유형은 해당 노드와 가장 가까운 상점의 업종을 기준으로 분류하였으며, 이를 통해 구축된 업종 분류 결과는 보행자의 목적지 선택 모델링의 입력값으로 활용되었다(Fig. 5 참조).

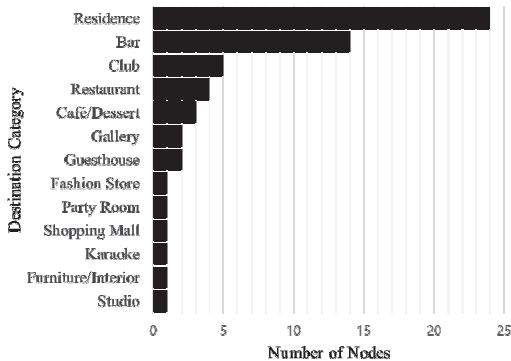


Fig. 5. Number of destination nodes by category

4.1.5 보행자 체류 시간 보정

보행자의 목적지 선택 및 체류 행태를 모델링하기 위해, 업종 분류 결과를 기반으로 목적지 선택 가중치(weight)와 평균 체류 시간(mean_stay_min)을 파라미터로 정의하여 활용하였다(Table 2 참조).

업종별 선택 가중치(weight)은 각 업종이 목적지로 선택될 상대적 가능성을 의미한다. 목적지별 선택 확률은 해당 업종의 가중치를 그 업종에 속한 목적지 수로 균등 분할한 뒤, 모든 목적지 확률의 합이 1이 되도록 재정규화하여 산출하였다. 시뮬레이션에서는 보행자가 이러한 확률로 목적지를 무작위 선택한다.

평균 체류 시간(mean_stay_min)은 목적지 도착 이후의 체류를 의미한다. 체류 시간은 업종별 평균을 중심으로 정규분포에서 표본화하되, 표준편차는 평균이 약 25%로 두고 20~720분 범위로 제한하여 실험적 의미가 낮거나 결과를 과도하게 왜곡할 수 있는 극단값을 억제하였다.

Table 2. Destination selection weights and mean stay time by category

category	weight	mean_stay_min
Bar	0.5	60
Club	0.12	90
Restaurant	0.1	30
Shopping Mall	0.1	20
Café/Dessert	0.1	45
Fashion Store	0.05	20
Karaoke	0.015	35
Guesthouse	0.005	360
Residence	0.003	360
Furniture/Interior	0.002	30
Party Room	0.002	120
Gallery	0.002	25
Studio	0.001	45

두 파라미터의 초기값은 업종 특성과 시나리오 맥락을 고려한 합리적 범위로 설정하였다. 이후 파일럿 시뮬레이션을 통해 이태원 참사 당일과 유사한 혼잡 상황(사고 발생 골목으로의 집중)이 무리 없이 재현되는지를 점검하고, 과도한 조정을 피한 최소한의 보정으로 값을 확정하였다. 재현 가능성 확보를 위해 난수 시드를 고정하였다.

4.2 시뮬레이션 결과 분석

4.2.1 전체 보행로 시간별 평균 밀집도 변화

Fig. 6은 시뮬레이션 시간에 따른 전체 보행로의 평균 밀집도 변화를 나타낸다. 평균 밀집도는 약 4분 주기의 주기적 상승 및 하강 패턴을 보인다. 이는 열차 도착 주기에 따라 새로운 보행자가 지속적으로 유입되기 때문이며, 해당 주기성은 하차 간격인 4분과 일치한다.

시뮬레이션 초기에는 보행자의 유입으로 인해 평균 밀집도가 점진적으로 증가하며, 이후 시간이 지남에 따라 누적 효과로 전체 밀집도가 우상향 추세를 보인다. 특히, 약 200분 시점 이전까지는 보행자의 지속적인 유입으로 밀집도가 꾸준히 상승하다가, 열차 운행이 종료되어 신규

보행자가 유입되지 않는 시점(점선 표시) 이후부터는 밀집도가 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이때 신규 보행자가 유입되지 않는 시점까지 시뮬레이션 전 구간에 걸친 평균 밀집도는 약 $0.912m^2$ 로 확인되었다. 시뮬레이션 종료 시점에는 체류 보행자의 이동 완료로 인해 밀집도가 안정적으로 낮아진 상태에 도달함을 확인할 수 있다.

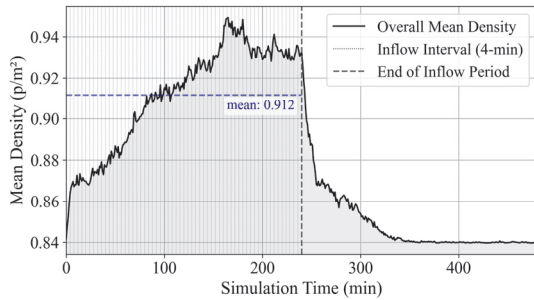


Fig. 6. Overall mean crowd density over time

4.2.2 밀집도 상위 50개 보행 구간

Fig. 7은 시뮬레이션 결과를 바탕으로 도출한 보행 구간별 평균 밀집도와 최대 밀집도를 나타낸 것이다. 각 점은 구간별 평균 밀집도($\pm$ 표준편차)를, 삼각형은 구간별 최대 밀집도를 의미하며, 배경색은 밀집도 수준을 구분하는 기준으로 사용되었다. 본 연구에서는 행정안전부의 「다중운집 인파사고 안전관리 가이드라인」에서 제시하는 위험 단계별 ‘ $1m^2$ 당 적정인원 수’ 기준(여유: 2명/ $1m^2$ 이하, 주의: , 위험:)을 참고하였다(행정안전부, 2024). 시뮬레이션에서는 동일한 기준을 면적 기반 밀집도 값으로 적용하기 위해 단위면적 당 보행자 수(0)로 환산하였으

며, 이를 바탕으로 밀집도를 여유, 을 주의, 을 위험 단계로 구분하여 분석을 수행하였다.(행정안전부, 2024).

분석 결과, 상위 50개 보행 구간 중 밀집도가 2.0 미만인 여유 단계 보행 구간은 48개, 3.0 이상인 주의 단계 보행 구간은 2개, 5.0 이상인 위험 단계 보행 구간은 1개로 나타났다. 특히 n1_n2 구간은 최대 밀집도가 5명을 초과하여 위험 단계로 분류되었으며, 이는 다중운집 인파 사고 가능성이 높은 구간으로 해석된다. 이러한 결과는 단순 평균 밀집도 뿐만 아니라 표준편차와 최댓값을 고려하여 위험 구간을 조기 식별할 수 있는 가능성을 시사한다.

4.2.3 다중운집 인파 사고 발생 예측 구간

Fig. 8은 이태원역 인근 보행로 네트워크를 기반으로 다중운집 인파 사고 발생이 예측되는 구간을 시각적으로 나타낸 것이다. 본 그림에서 각 노드(node)는 보행로의 교차점이나 주요 지점을 나타내며, 연결된 선(edge)은 보행자 이동 경로를 나타낸다.

선의 색상은 해당 구간의 인파 밀집도를 기준으로 사고 발생 위험 수준을 구분한 것이다. 빨간색 선은 인파 밀집도가 매우 높아 사고 위험성이 가장 큰 ‘위험 단계 구간’을 나타내며, 주황색 선은 사고 발생 가능성이 상대적으로 낮지만 주의가 요구되는 ‘주의 단계 구간’을 나타낸다. 초록색 선은 밀집도가 낮고 보행자 이동에 충분한 여유가 있는 ‘여유 단계 구간’으로 분류된다. 추가로, 밀집도의 표준편차가 크다는 특징을 가지는 구간은 특정 시간대에 따라 인파 밀집도가 급격하게 변동하여 예측하기 어렵기 때문에, 비록 평상시 위험이나 주의 단계에 해당하지 않더라도 시간대별 변화에 따라 사고 위험이 증가할 수 있으므로 지속적인 관찰과 유의가 필요하다.

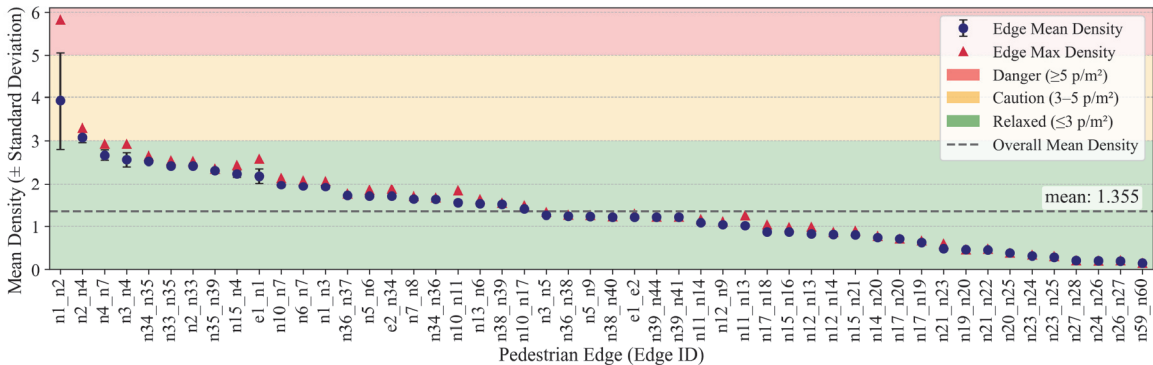


Fig. 7. Mean crowd density of the top 50 walkway edges

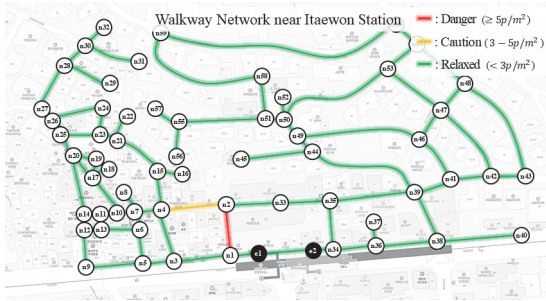


Fig. 8. Walkway network categorized by density-based risk levels

4.2.4 위험 단계 보행 구간들의 밀집도 분석

Fig. 9는 위험 및 주의 단계로 분류된 보행 구간인 n1_n2와 n2_n4는 시간대별 밀집도 변화를 나타낸다. 주의 단계로 분류된 보행 구간인 n2_n4는 시뮬레이션 진행 시간에 따라 점진적으로 밀집도가 증가하였으나, 전체적으로 $4\text{명}/\text{m}^2$ 이하 수준에서 안정화되는 경향을 보였다.

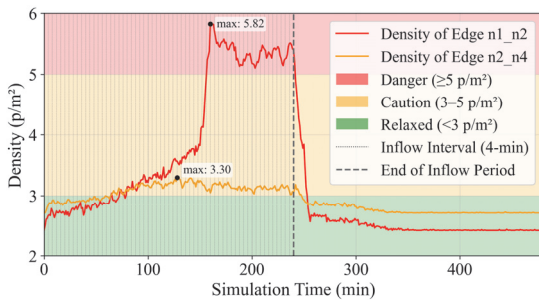


Fig. 9. Walkway-edge crowd density over time

반면, 위험 단계로 분류된 보행 구간인 n1_n2은 초기에는 완만한 증가세를 보였으나 약 100분 이후부터 급격한 상승세로 전환되었고, 밀집도가 $4\text{명}/\text{m}^2$ 를 초과한 직후 단기간 내에 $6\text{명}/\text{m}^2$ 수준까지 급등하는 모습을 나타냈다. 이는 동일한 보행 네트워크 내에서도 구간별로 여유와 주의, 위험 단계로 뚜렷하게 나뉠 수 있음을 보여주며, 단순한 평균 밀집도 수준이 아니라 급격한 전환점의 발생 시점과 증가 속도를 조기 식별하는 것이 안전 관리에서 핵심임을 시사한다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 환경적 배경에 따른 광범위한 상황에 적용이 가능한 다중운집 인파 안전 관리 모델을

개발하였다. 제안된 모델은 시간에 따른 군중 흐름의 동태적 변화와 보행 네트워크의 공간적 제약을 통합적으로 반영할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 보행자 단위의 이동·체류 시간과 구간별 밀집도 변화를 정량적으로 분석할 수 있다. 특히, 인파가 급격히 집중되는 상황에서도 잠재적 위험을 사전에 예측할 수 있음을 이태원 참사 시나리오 적용을 통해 확인하였다. 이러한 결과는 단순 평균 밀집도 수준에 의존하는 기존 정적 지표를 넘어, 시간대별 변동성과 구간별 위험도를 종합적으로 반영하는 새로운 인파 안전 관리 체계로의 확장을 가능하게 한다. 향후 효과적인 인파 안전 관리 및 사고 대책 수립을 지원할 수 있는 의사결정 지원 도구로도 활용될 수 있다.

References

1. Blue, Victor J, and Jeffrey L. Adler, "Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways". *Transportation Research Part B Methodological*, Vol. 35, No. 3, pp. 293~312, 2001.
2. Chalmet, Luc G, Richard L. Francis, and Patsy B. Saunders, "Network models for building evacuation", *Management science*, Vol. 28, No. 1, pp. 86~105, 1982.
3. Cepolina, Elvezia M, "A methodology for defining building evacuation routes", *Civil engineering and environmental systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 29~47, 2005.
4. Cepolina, Elvezia M, "Phased evacuation: An optimisation model which takes into account the capacity drop phenomenon in pedestrian flows", *Fire Safety Journal*, Vol. 44, No. 4, pp. 532~544, 2009.
5. Greenshields, Bruce D., et al, "A study of traffic capacity." *Highway research board proceedings*. Vol. 14. No. 1. 1935.
6. Lovreglio, Ruggiero, Enrico Ronchi, and Daniel Nilsson, "A model of the decision-making process during pre-evacuation", *Fire Safety Journal*, Vol. 78, pp. 168~179, 2015.
7. Ma, Jian, et al, "Experimental study on an ultra high-rise building evacuation in China", *Safety science*, Vol. 50, No. 8, pp. 1665~1674, 2012.
8. Weidmann, Ulrich, "Transporttechnik der Fussgänger,"

- Schriftenreihe des IVT, Vol. 90, ETH Zürich, pp. 1~87, 1993.
9. Zeigler, Bernard P, Herbert Praehofer, and Tag Gon Kim, "Theory of modeling and simulation", Academic press, 2000.
10. Zhang, Jun, et al, "Ordering in bidirectional pedestrian flows and its influence on the fundamental diagram," Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, Article ID P02002, 2012.
11. Naver Corporation, "Itaewon Station," Naver Map, 2025. <https://map.naver.com/p/search> (네이버 지도. 2025. "이태원역". <https://map.naver.com/p/search>)
12. Moon, J.-S., "A study on crowd management, crowd control, and crowd behavior in mass gathering events: A literature review," Korean Journal of Police Studies, Vol. 21, No. 4, pp. 53~74, 2022. (문준섭, 다중운집행사에서의 군중관리와 군중통제 및 군중행동에 관한 연구 - 문헌연구를 중심으로, 한 국경찰연구, 제21권, 제4호, pp. 53~74, 2022.)
13. Bae, J.-H., and Lee, S.-R., "Issues and future tasks in safety management of mass gathering events," NARS Current Analysis, No. 268, National Assembly Research Service, 2022. (배재현, 이송림, 다중운집 행사 안전관리의 문제점 및 향후 과제, 국회입법조사처, NARS 현안분석 제 268호, pp. 1, 2022.)
14. Seoul Transportation Corporation, "Station-by-station daily and time-of-day ridership data," Seoul Open Data Plaza, 2022. <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-12921/F/1/datasetView.do>
- (서울교통공사, 역별 일별 시간대별 승하차인원 정보, 서울 열린데이터 광장, 2022.10.29., <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-12921/F/1/datasetView.do>)
15. Seoul Metropolitan Government, "Seoul living population by census block (Korean nationals)," Seoul Open Data Plaza, 2022. <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-14979/S/1/datasetView.do> (서울시, 집계구 단위 서울 생활인구(내국인), 서울 열린데이터 광장, 2022.10.29., <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-14979/S/1/datasetView.do#>)
16. Seoul Metropolitan Government, "Seoul living population by census block (long-term foreign residents)," Seoul Open Data Plaza, 2022. <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-14978/S/1/datasetView.do> (서울시, 집계구 단위 서울 생활인구(장기체류 외국인), 서울 열린데이터 광장, 2022.10.29., <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-14978/S/1/datasetView.do>)
17. Seoul Metropolitan Government, "Seoul living population by census block (short-term foreign residents)," Seoul Open Data Plaza, 2022. <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-14980/S/1/datasetView.do> (서울시, 집계구 단위 서울 생활인구(단기체류 외국인), 서울 열린데이터 광장, 서울 열린데이터 광장, 2022.10.29., <https://data.seoul.go.kr/dataList/OA-14980/S/1/datasetView.do>)
18. Ministry of the Interior and Safety, "Safety management guidelines for mass gathering crowd accidents," Ministry of the Interior and Safety, 2024. (행정안전부, 다중운집인파사고 안전관리 가이드라인, pp. 1~2, 2024.)



김 규 리 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0005-7708-0138> / arthur1859@koreatech.ac.kr)

2025 한국기술교육대학교 산업경영학부 학사
2025~ 현재 한국기술교육대학교 산업경영학과 석사과정

관심 분야 : 인공지능, 모델링 및 시뮬레이션, 생산관리



이 상 화 (ORCID : <https://orcid.org/0009-0006-0001-8771> / tkdghk4110@koreatech.ac.kr)

2020~ 현재 한국기술교육대학교 산업경영학부 학사과정, 혁신경영전공
2024~ 현재 DSC 공유대학 모빌리티 ICT 융합학부 모빌리티 SW/AI 융합전공

관심 분야 : 운영 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 인공지능



배 장 원 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0002-4681-5059> / jangwon_bae@koreatech.ac.kr)

2007 고려대학교 전기전자전파공학부 학사
2009 한국과학기술원 전자공학과 석사
2015 한국과학기술원 산업및시스템공학과 박사
2015~ 2020 한국전자통신연구원 인공지능연구소 선임연구원
2020~ 2023 한국기술교육대학교 산업경영학부 조교수
2023~ 한국기술교육대학교 산업경영학부 부교수

관심 분야 : 시스템 분석 및 최적화, 모델링 및 시뮬레이션, 인공지능