

다중운집 인파안전관리를 위한 DEVS 기반시물레이션모델개발

대한산업공학회/한국경영과학회/한국시물레이션학회 2025년 춘계공동학술대회

김규리, 이상화, 길준혁, 송나영, 배장원
한국기술교육대학교
arthur1859@koreatech.ac.kr

— 목차

1. 서론
2. 군중 시뮬레이션 모델링
3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토
4. 결론

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

1. 다중운집 인파사고의 개념 및 특성

- 정의: 한정된 공간에 인파가 몰리면서 생명·신체 및 재산의 피해가 발생하는 사회재난¹⁾
- 실외 공간 밀집 기준(수용능력 기준)²⁾
 - 여유: 2인/m²미만, 주의: 3~4인/m², 위험: 5인/m²이상
- 사고 유형 분류²⁾
 - 축제·행사 기반 사고: 주최자가 존재, 참가 인원·시간·장소가 사전 계획됨 → 안전계획 수립 가능
 - 주기적 밀집 사고: 평상시의 출퇴근 시간, 연례적 집결 현상 등 예측 가능
 - 예측 곤란 밀집 사고: 클럽·카페 등 상권, 고장(에스컬레이터) 등으로 갑작스러운 인파 발생

2. 이태원 참사의 사례³⁾

- 일시: 2022년 10월 29일 22시 15분 경
- 장소: 서울 용산구 이태원로 일대
- 배경: 핼러윈 행사로 밀집된 인파가 쓰러지면서 사고 발생
- 문제점: 사전 관리 통제 시스템 부재 및 인파 흐름 관리 실패
- 의의: 이 사건을 계기로 인파관리 및 인파통제의 중요성이 사회적 이슈로 급부상

1) 『재난안전법』 제3조제1호나목, 사회재난 유형에 다중운집인파사고 반영(24.07.17.시행)

2) 행정안전부, 『다중운집인파사고 안전관리 가이드라인』 다중운집 3대 유형(2024.09.)

3) 행정안전부, 『서울 이태원 사고 대처상황 보고서』(10.31일 06:00), 2022.10.31.

1. 서론

1.2 국내·외 다중운집행사 밀집사고 발생현황

- 이태원 참사 이전에도 전 세계에서 다중운집 인파사고가 빈번하게 발생하였음
- 예상과 다른 변수로 인해 계획된 인파 통제조차 무력화되며, 대규모 인명 피해로 이어진 사례가 반복

연번	날짜/국가	사고경위	피해
1	'20.01.07.(이란)	거شم 솔레이만 장군의 장례식장에서 인파가 뒤엉켜 발생한 사고	사망 56 부상 200+
2	'20.02.01.(탄자니아)	교회의 기도모임에서 영적인 행위를 위하여 출구로 안내될 때 발생한 압사사고	사망 20 부상 20
3	'20.02.17.(니제르)	나이지리아로부터 지원받은 구호물품 배급 도중 발생한 사고	사망 20
6	'20.10.21.(아프가니스탄)	COVID-19로 7개월간 중단되었던 비자 발급 업무의 재개로 수천명의 인파가 파키스탄 비자 신청을 위해 경기장에 모여 발생한 압사사고	사망 15 부상 다수
7	'21.03.21.(탄자니아)	경기장에서 인파가 뒤엉켜 발생한 압사사고	사망 45
8	'21.04.30.(이스라엘)	초정통파 유대인과 경찰 10만여명이 집결한 종교 순례 행사 중 발생한 군중 압사사고	사망 45
9	'21.11.05.(미국)	아스트로월드 축제에서 갑자기 증가한 군중으로 발생한 압사사고	사망 10 부상 300
10	'22.01.01.(인도)	힌두사원에서의 새해 신년 행사에 몰려든 인파로 인해 발생한 압사사고	사망 12 부상 16
12	'22.05.28.(나이지리아)	교회의 자선행사에서 음식과 의복을 무료로 지급받기 위한 수백명의 인파가 울타리를 넘으며 패닉 상황에 발생한 압사사고	사망 31
14	'22.10.01.(인도네시아)	축구경기 후 폭동을 일으킨 후 경기장 내부에서 최루가스를 피하기 위해 발생한 압사사고	사망 135

1) 『다중운집행사에서의 군중관리와 군중통제 및 군중행동에 관한 연구-문헌연구를 중심으로』, 문준섭, 한국경찰연구제21권제4호, 국내·외 다중밀집사고 발생현황

1. 서론

1.3 군중행동에 관한선행 연구

1. **기존 예측 모델의 일반화 한계(Iovreglio, et al., 2015)**
 - 실제 사고 데이터 기반 모델은 사건 당시 특수한 환경 및 인구 특성에 과도하게 의존
2. **실험 환경의 현실적 제약(Ma, Song, Tian, Lo, & Liao, 2012)**
 - 군중 행동 실험은 동시 다중 참여의 어려움, 비용 및 안전 문제로 제한
 - 시뮬레이션 모델이나 제한 조건 하의 실제 실험으로 대체
3. **물리적 모델에 치우친 기존 연구(Pan, X, et al., 2007)**
 - 기존 모델은 공간적 이동 중심, 인지적, 사회적 행동은 반영 부족 또는 단순화
4. **보행자 행동의 비통합적 접근(Papadimitriou, 2009)**
 - 보행자의 의사결정(경로 선택, 횡단 결정, 정지, 속도 조절 등)을 별개로 처리
 - 실제 보행자의 통합된 의사결정 재현이 어려움
5. **고밀도 상황에서의 실용적 모델 부족(Duives, 2013)**
 - 군중의 핵심 움직임 및 집단 행동 특성을 반영하면서도 계산 효율성을 갖춘 모델 부족
6. **현실 적용성 제고 필요(Vermuyten, 2016)**
 - 이론적 모델을 실제 시나리오에 적용하여 테스트
 - 기술적 정교함과 최적화 해법을 통합하는 방향으로 발전 필요

1. 서론

1.4 연구 목표

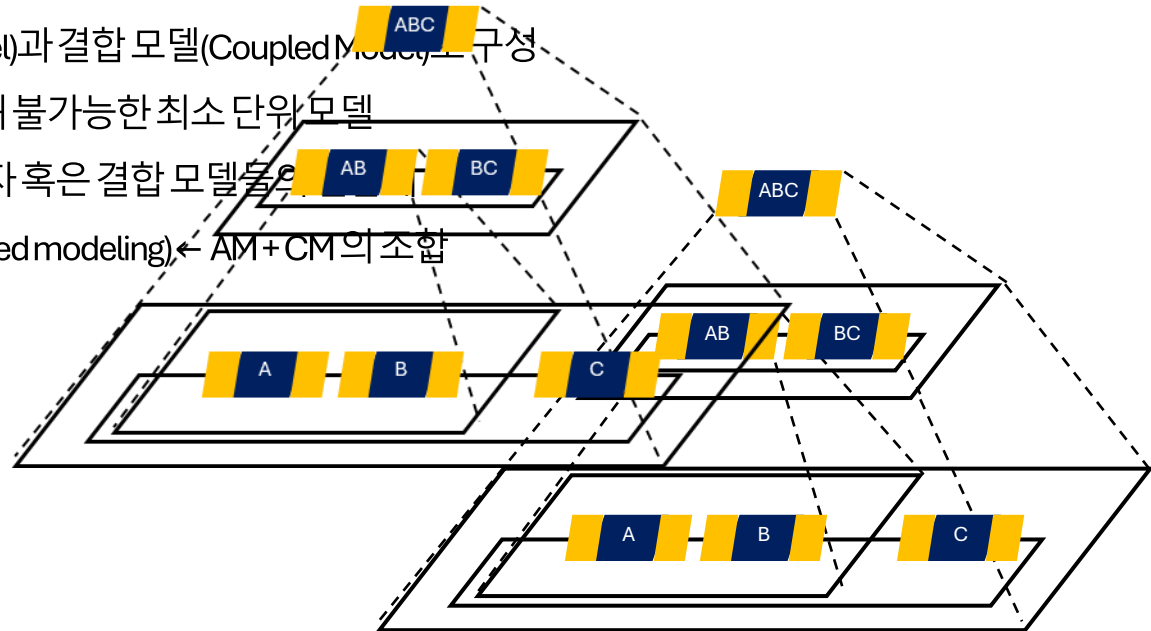
- 다양한 환경적 배경에 따른 광범위한 상황에 적용이 가능한 다중운집 인파안전관리¹⁾ 모델을 개발
- 각 보행자를 보행 네트워크에서 독립적으로 유지하고 관리할 수 있도록 하기 위해 DEVS 형식론 (Discrete Event Systems Specifications) 기반 시뮬레이션 모델 개발
- 다중운집 인파안전관리 모델을 통해 효과적인 인파안전관리 예방대책 마련

2. 군중 시뮬레이션 모델링

2.1 시뮬레이션 방법론

- DEVS (Discrete Event Systems Specifications) 형식론

- 이산사건시스템 기반 모델링 및 시뮬레이션 도구
- 원자 모델 (Atomic Model)과 결합 모델 (Coupled Model) 구성
 - 원자 모델 (AM): 분해 불가능한 최소 단위 모델
 - 결합 모델 (CM): 원자 혹은 결합 모델들로 구성
- 구조적 모델링 (structured modeling) ← AM+CM의 조합



출처: [1] Bernard Zeigler; Tag Gon Kim; Herbert Praehofer (2000). Theory of Modeling and Simulation (second ed.). Academic Press, New York | KAIST

2. 군중 시뮬레이션 모델링

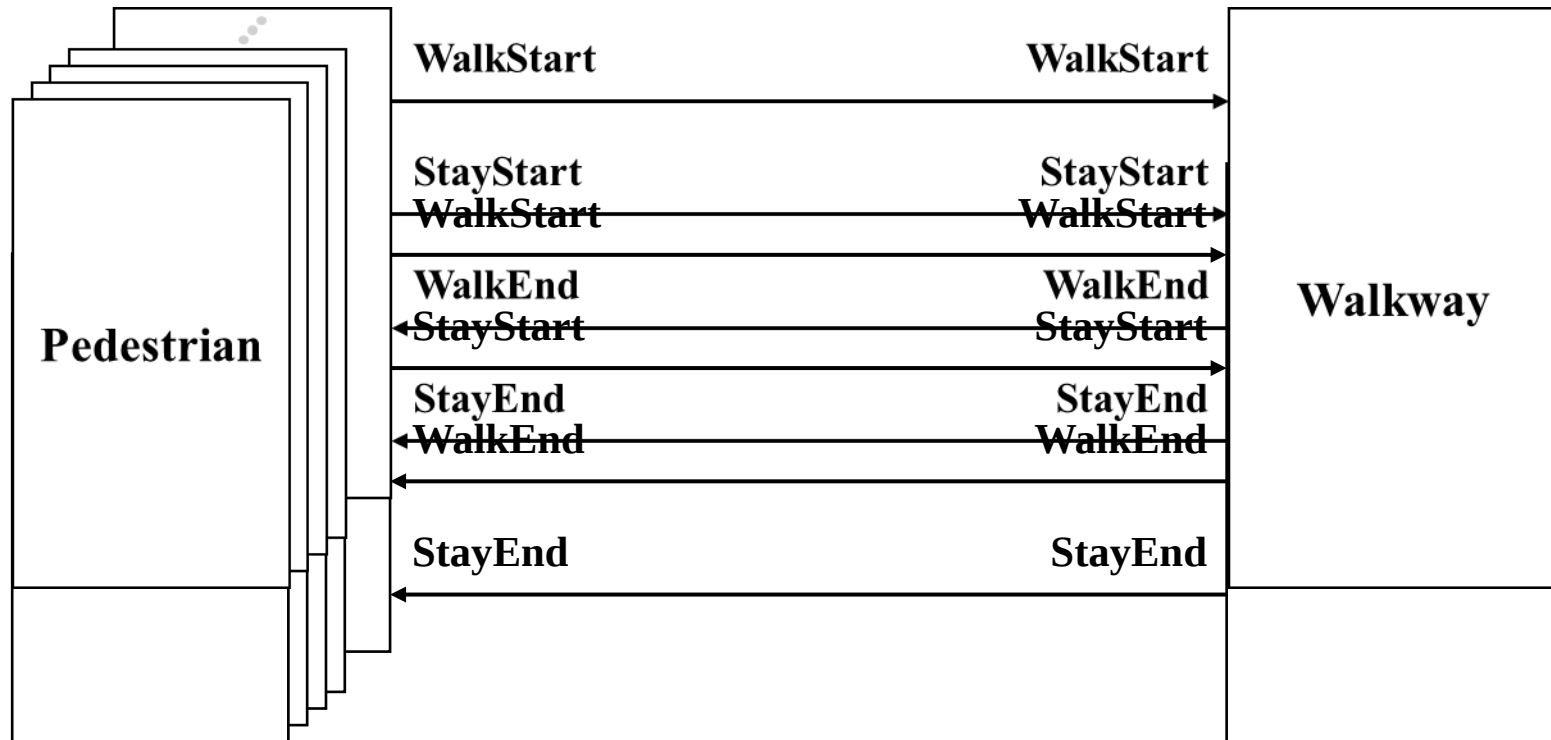
2.2 DEVS 형식론 기반 군중 시뮬레이션 모델링

- **CrowdSim**: 본 연구에서 개발한 DEVS 형식론 기반의 다중운집 사고 관리 시뮬레이션 모델
 - **CrowdSim 구성 주요 컴포넌트**
 - **Pedestrian Atomic Model(보행자 원자 모델)**
 - 출발지부터 도착지까지 움직인 후, 다시 출발지로 돌아오는 각 보행자에 대한 모델
 - 각 보행자의 이동, 상태 변화(대기, 보행, 체류)를 독립적으로 처리
 - 각 보행자는 각기 다른 출발지, 목적지, 이동 경로, 체류 시간을 가짐
 - **Walkway Atomic Model(보행 도로 원자 모델)**
 - 모든 보행도로를 나타내는 모델
 - 시간에 따라 밀집도, 보행 속도, 통과 시간을 자체적으로 관리하고 업데이트
 - 보행자의 경로를 다익스트라 알고리즘으로 계산하여 제공

2. 군중 시뮬레이션 모델링

2.3 CrowdSim Coupled Model

- **CrowdSim**: 본 연구에서 개발한 DEVS 형식론 기반의 다중운집 사고 관리 시뮬레이션 모델

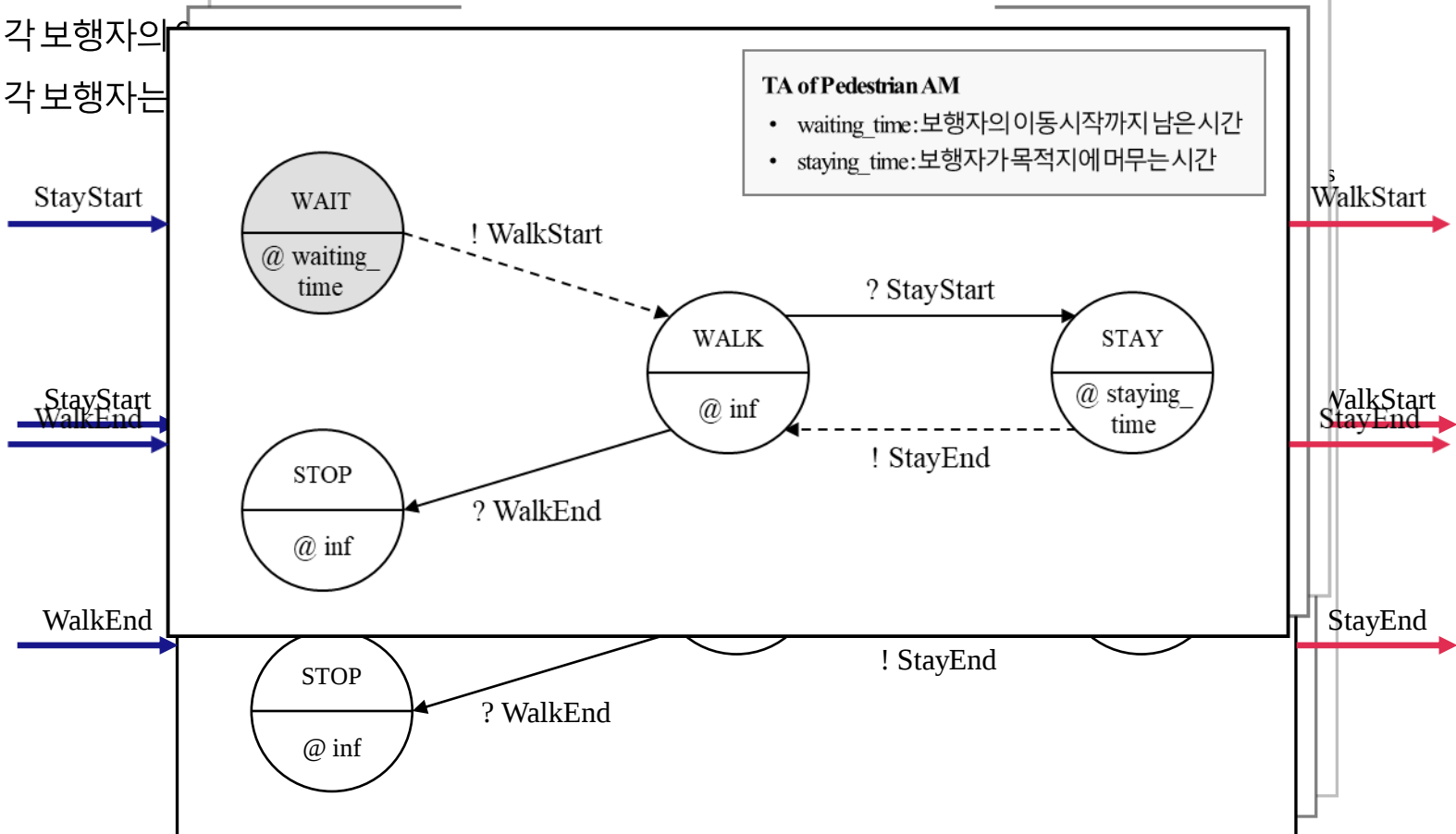


2. 군중 시뮬레이션 모델링

2.4 Pedestrian Atomic Model

- 출발지부터 도착지까지 움직인 후 **Pedestrian Atomic Model** 대한 모델 * num_pedestrians

- 각 보행자의
- 각 보행자는

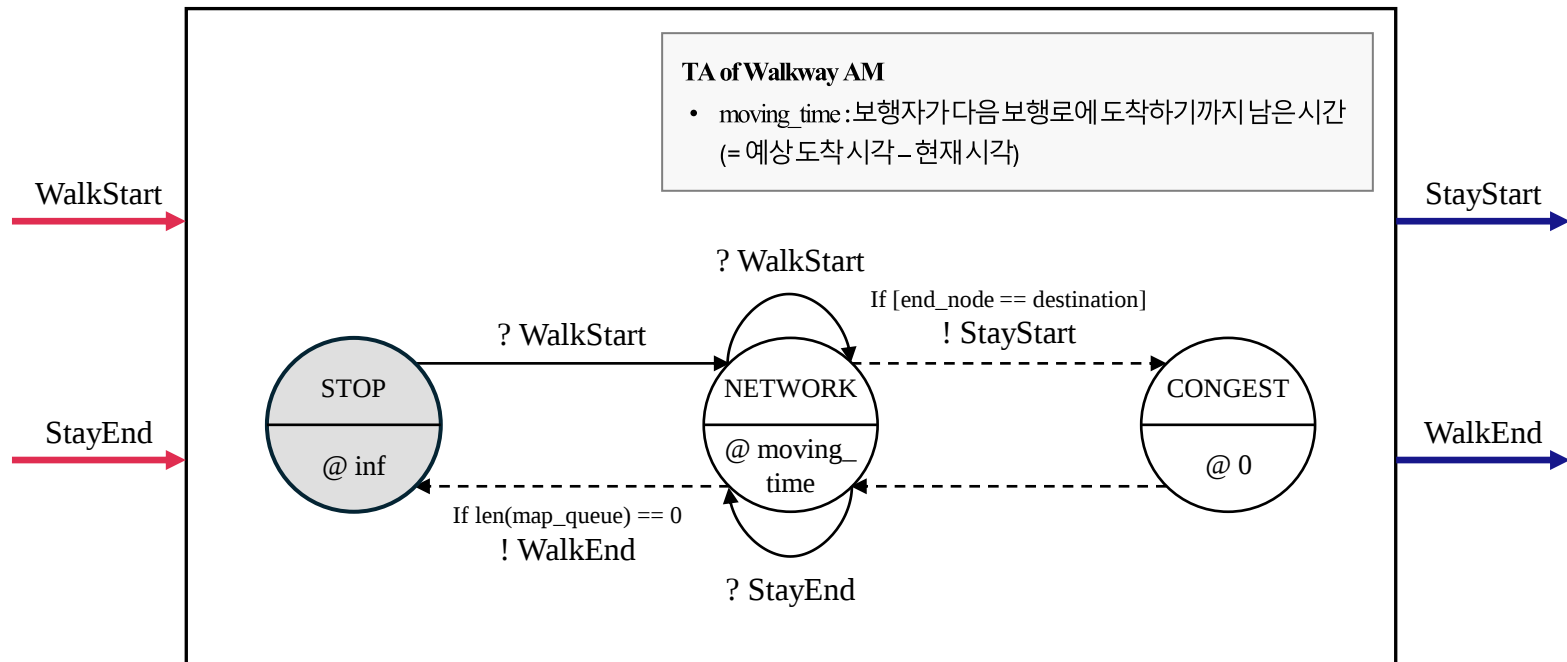


2. 군중 시뮬레이션 모델링

2.5 Walkway Atomic Model

- 모든 보행도로를 나타내는 모델
- 시간에 따라 밀집도, 보행 속도, 통과 시간을 자체적으로 관리하고 업데이트
- 보행자의 최적 경로를 다익스트라 알고리즘으로 계산하여 제공

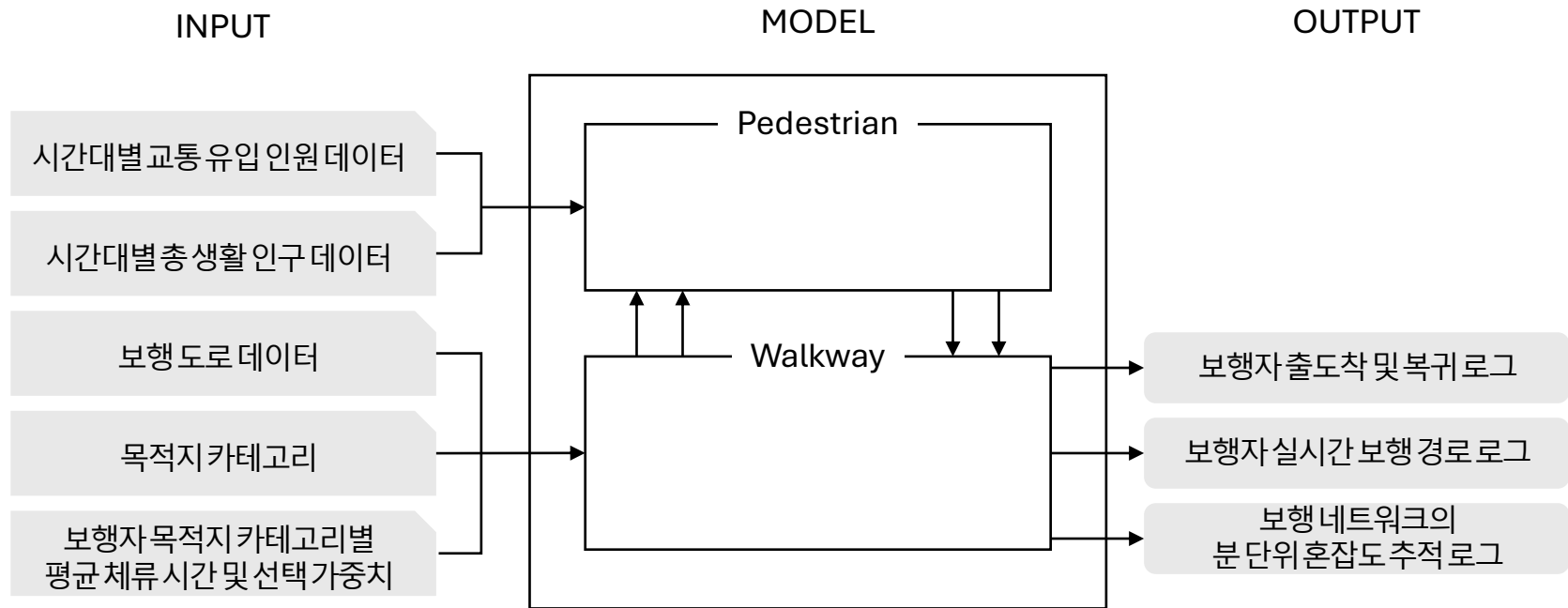
Walkway Atomic Model



2. 군중 시뮬레이션 모델링

2.6. CrowdSim 입출력 데이터

- **보행자출도착및체류로그**:보행자의출발,도착(체류)및복귀하는지확인하기위한로그
- **보행자실시간보행경로로그**:보행자의구간별이동행태와밀집도및통과속도를확인하기위한로그
- **보행네트워크의분단위혼잡도추적로그**:시간흐름에따른혼잡구간탐지를위한로그



3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.1 현실 적용성 검토 데이터

- 시나리오

- 이태원 참사 당일 2022년 10월 29일 오후 18~22시(4시간) 이태원역 인근 보행로

INPUT	데이터명	출처	시점
시간대별 교통 유입 인원 데이터	이태원역 시간대별 승하차 인원	서울 열린데이터광장	2022년 10월 29일 18~22시
시간대별 총 생활 인구 데이터	이태원1동 시간대별 총생활인구	서울 열린데이터광장	2022년 10월 29일 18~22시
보행 네트워크 데이터	이태원 보행 네트워크	네이버 지도	2025년
목적지 카테고리 데이터	이태원 목적지 카테고리	직접 수집	2025년
보행자 목적지 카테고리별 평균 체류 시간 및 선택 가중치	이태원 카테고리별 평균 체류 시간 및 선택 가중치	시뮬레이션 반복 실험과 파라미터 조정을 통해 도출	2025년

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.1 현실 적용성 검토 데이터

- 시간대별 교통 유입 인원 데이터
 - 2022년 10월 29일 18~22시 이태원역 시간대별 승하차 인원 (4 rows x 7 columns)(서울열린데이터광장)
 - 시간대별로 기록된 하차 인원 수는 열차 도착 시간 간격에 맞춰 분배되며, 해당 시점마다 역 입구 노드 위치에서 보행자가 생성됨
 - 이태원 역 입구 4개 중 2개만 사용해서 총 43,571명 중 절반인 21,785명만 생성됨

날짜	호선	고유역 번호	역명	승하차 구분	시간대	인원
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	18-19시	10747
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	19-20시	11873
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	20-21시	11666
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	21-22시	9285

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.1 현실 적용성 검토 데이터

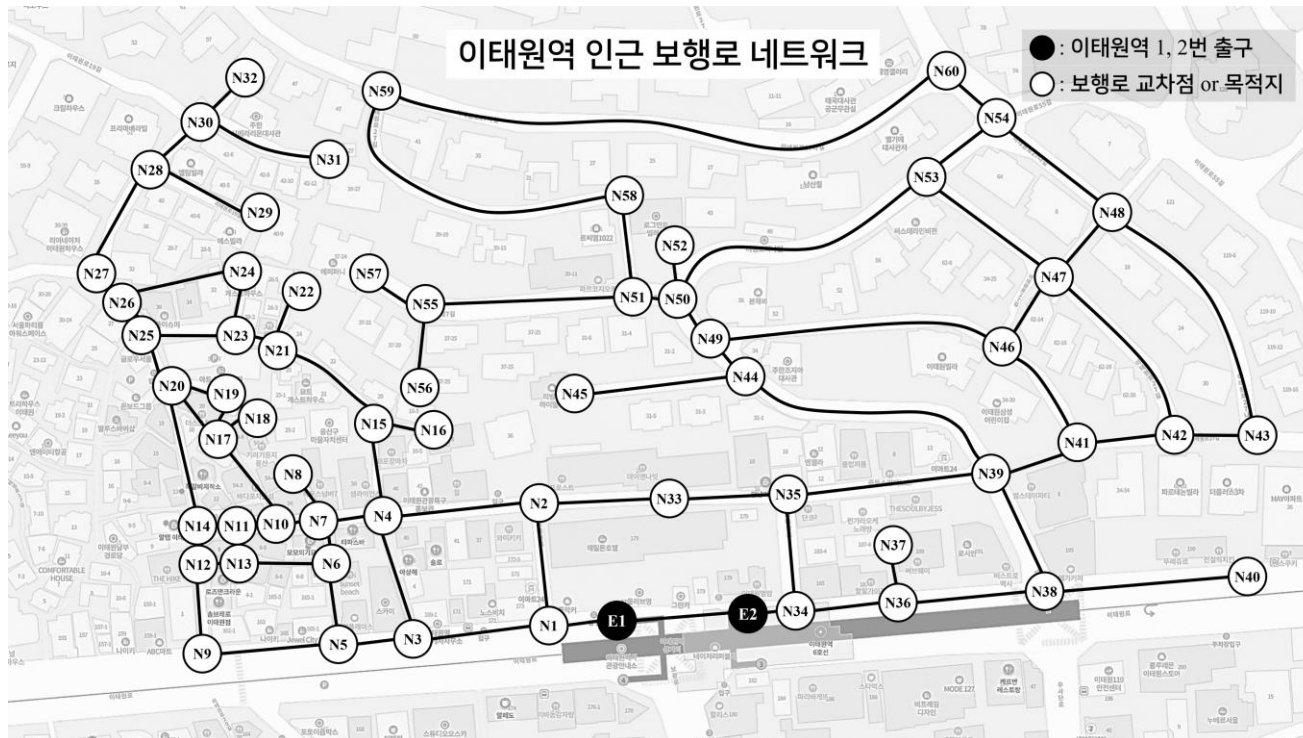
- 시간대별 총 생활 인구 데이터
 - 2022년 10월 29일 18~22시 이태원1동 집계구(1100000000000) 시간대별 총생활인구 (5 rows x 5 columns)
(서울열린데이터광장)
 - 시간대별 체류 기반 상주 인구 데이터를 만들기 위해 사용
 - 시간대별 체류 기반 상주 인구 = 시간대별 총 생활 인구 - 시간대별 교통 유입 인원

기준일	집계구 코드	행정동 코드	시간대	인구
2022-10-29	11000000000000	11170650	18시	13210
2022-10-29	11000000000000	11170650	19시	16505
2022-10-29	11000000000000	11170650	20시	18138
2022-10-29	11000000000000	11170650	21시	19380
2022-10-29	11000000000000	11170650	22시	18233

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.1 현실 적용성 검토 데이터

- 보행 도로 데이터(네이버지도 직접수집)
 - 네트워크:이태원역 반경 300m 상단반원 구역(노드 60개, 엣지 156개)
 - 데이터는 엣지의 길이, 폭으로 구성됨

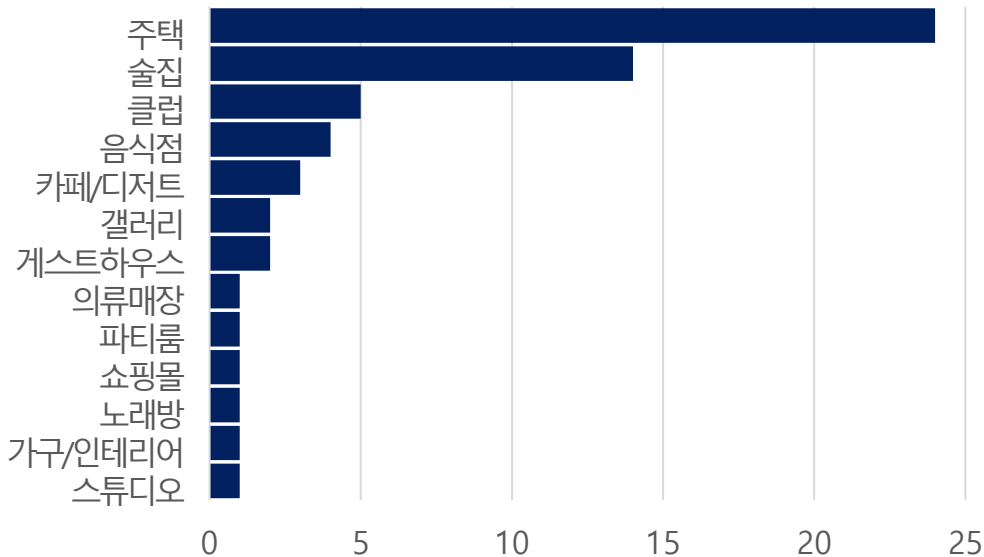


3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.1 현실 적용성 검토 데이터

- 목적지 카테고리 데이터
 - 이태원 목적지 카테고리 (60 rows x 2 columns)
 - 각 노드에서 제일 가까운 카테고리로 분류

카테고리별 목적지 개수



node	category	node	category
n1	의류매장	n31	주택
n2	클럽	n32	주택
n3	음식점	n33	쇼핑몰
n4	술집	n34	술집
n5	카페/디저트	n35	클럽
n6	클럽	n36	음식점
n7	술집	n37	클럽
n8	술집	n38	음식점
n9	카페/디저트	n39	클럽
n10	술집	n40	노래방
n11	음식점	n41	주택
n12	카페/디저트	n42	주택
n13	술집	n43	주택
n14	술집	n44	주택
n15	술집	n45	가구/인테리어
n16	술집	n46	주택
n17	술집	n47	주택
n18	술집	n48	주택
n19	갤러리	n49	주택
n20	술집	n50	주택
n21	술집	n51	주택
n22	게스트하우스	n52	스튜디오
n23	술집	n53	주택
n24	게스트하우스	n54	주택
n25	주택	n55	주택
n26	주택	n56	주택
n27	파티룸	n57	주택
n28	주택	n58	주택
n29	주택	n59	주택
n30	주택	n60	갤러리

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.2 현실 적용성 검토 가중치

- 보행자 목적지 카테고리별 평균 체류 시간 및 선택 가중치
 - 이태원 카테고리별 평균 체류 시간 및 선택 가중치 (13 rows x 3 columns)

category	weight	avg_stay_min
술집	0.5	60
음식점	0.12	90
클럽	0.1	30
쇼핑몰	0.1	20
카페/디저트	0.1	45
의류매장	0.05	35
노래방	0.015	35
게스트하우스	0.005	360
주택	0.003	360
가구/인테리어	0.003	30
파티룸	0.002	120
갤러리	0.002	25
스튜디오	0.001	45

- Category: 노드의 장소를 분류하여 보행자가 어떤 유형의 장소에 머무르는지를 분류하는 데 사용됨
- Weight: category가 갖는 가중치로, 시뮬레이션 시 각 장소 유형이 보행자 체류 확률에 미치는 영향을 조정할 때 사용
- Avg_stay_min: category에서의 평균 체류 시간(분)으로, 시뮬레이션에서 특정 장소 유형에서 보행자가 얼마 동안 머무는지를 모델링하는 데 사용

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.3 밀집도 계산식

- $v = v_{max} \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot p}{p_{max}}\right), v \geq v_{min}$
 - v_{max} : 최대 보행 속도 ($1.3m/s$)
 - v_{min} : 최소 보행 속도 ($0.1m/s$)
 - p : 밀집도 ($명/m^2$)
 - p_{max} : 임계 밀집도 ($6명/m^2$)
 - α : 양방향 가중 계수 ($1.3/m^2$)

1) 『A study of traffic capacity』, Greenshields, 1935

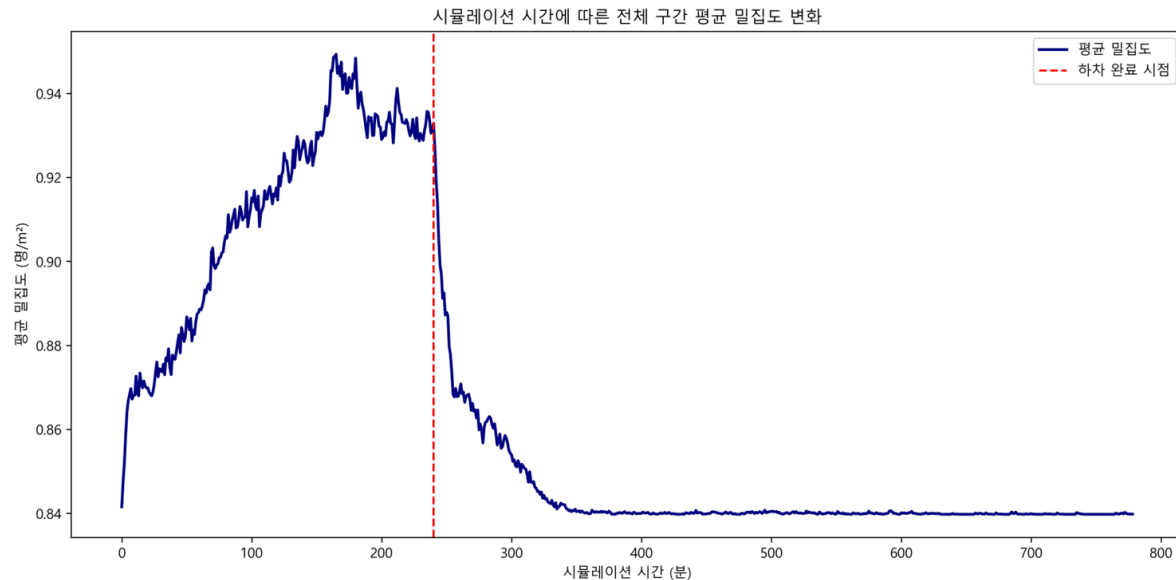
2) 『Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways』, Blue & Adler, 2001

3) 『Social force model for pedestrian dynamics』, Helbing, 1995

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.3 시뮬레이션 결과

- 전체 보행도로 시간별 평균 밀집도 변화
 - 전체 밀집도 변동 추세
 - 일정 시간마다 상승 및 하강 패턴 반복
 - 전체적으로 우상향 그래프
 - 시간이 지날수록 밀집도가 누적되다가 보행자가 하차하지 않는 시점부터 해소



3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.3 시뮬레이션 결과

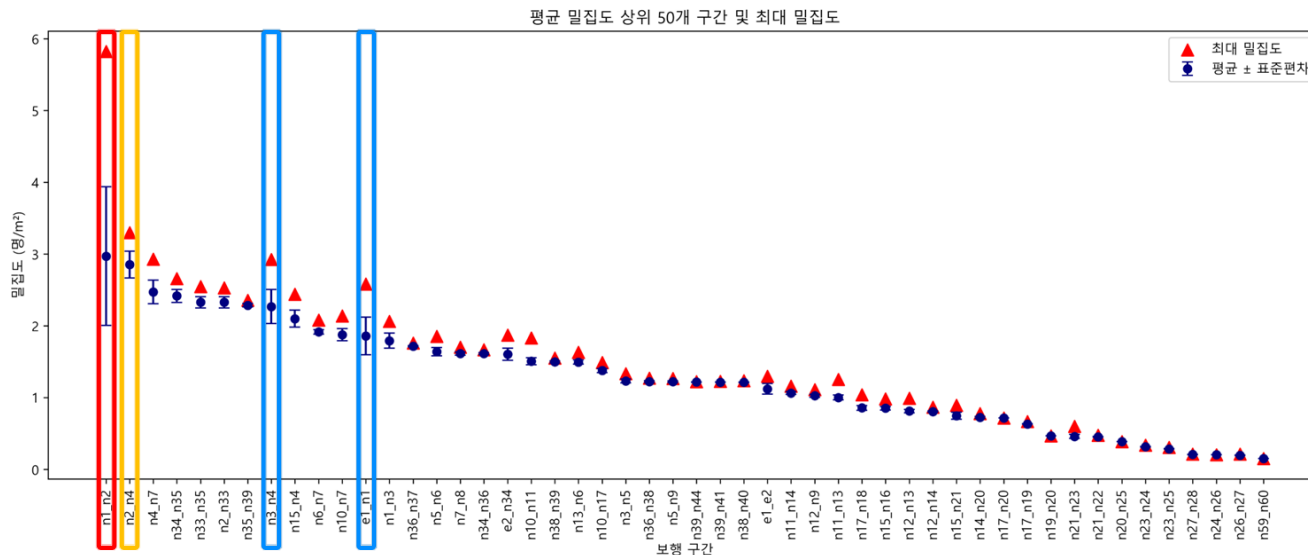
• 밀집도 상위 50개 보행 도로(평균±표준편차)

- (여유) 밀집도 2.0 미만: 48개
- (주의) 밀집도 3.0 이상: 1개
- (위험) 밀집도 5.0 이상: 1개

• 인파밀집 수용 능력¹⁾

- 실내 공간: 2인/m²
- 실외 공간: (여유) 2인/m², (주의) 3인~4인/m², (위험) 5인/m²

⇒ 다중운집 인파 사고 발생 예측 구간을 여유, 주의, 위험으로 식별하며 밀집도 정도를 파악

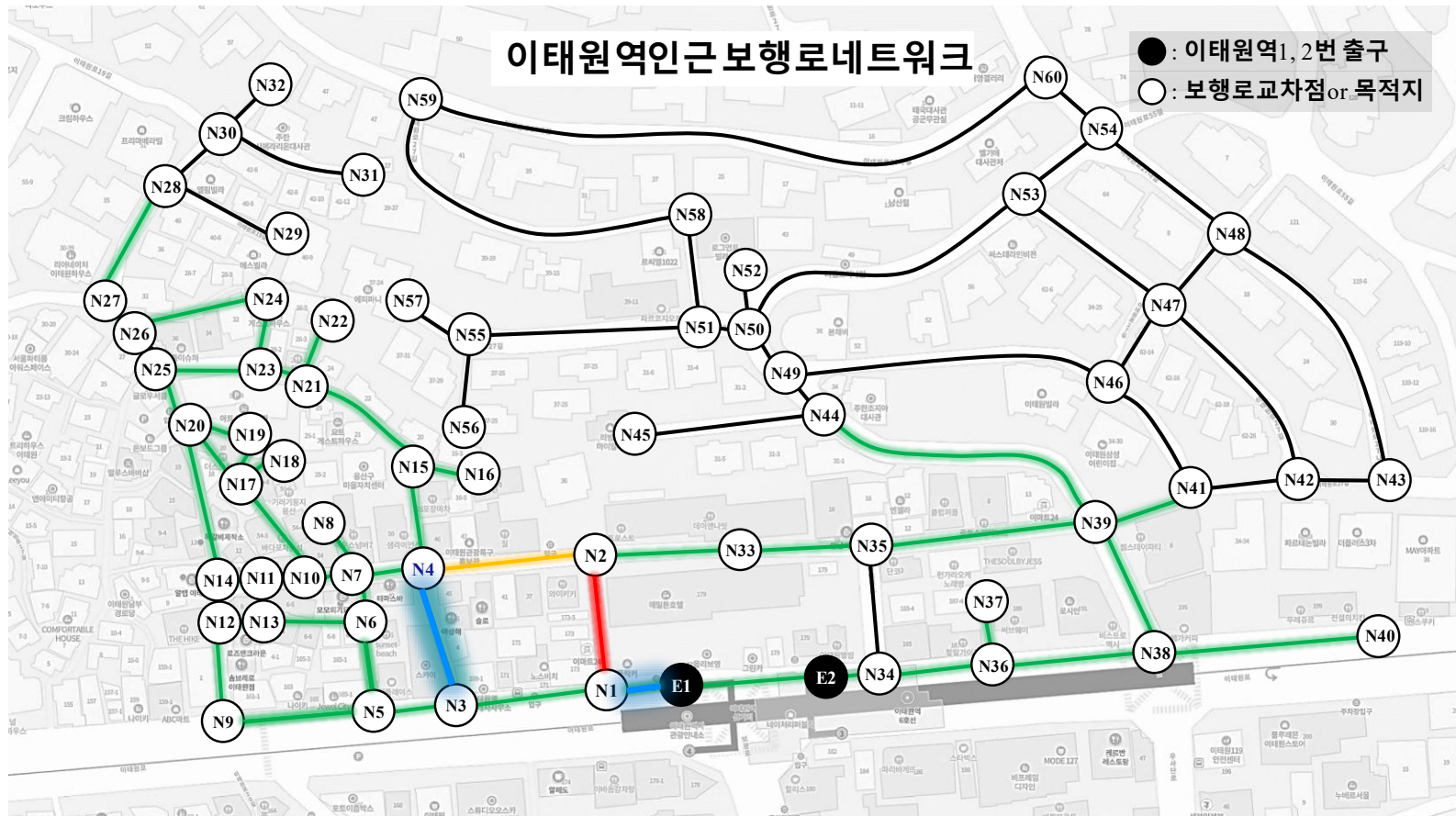


1) 행정안전부, 『다중운집인파사고안전관리가이드라인』 다중운집3대유형(2024.09.)

3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.3 시뮬레이션 결과

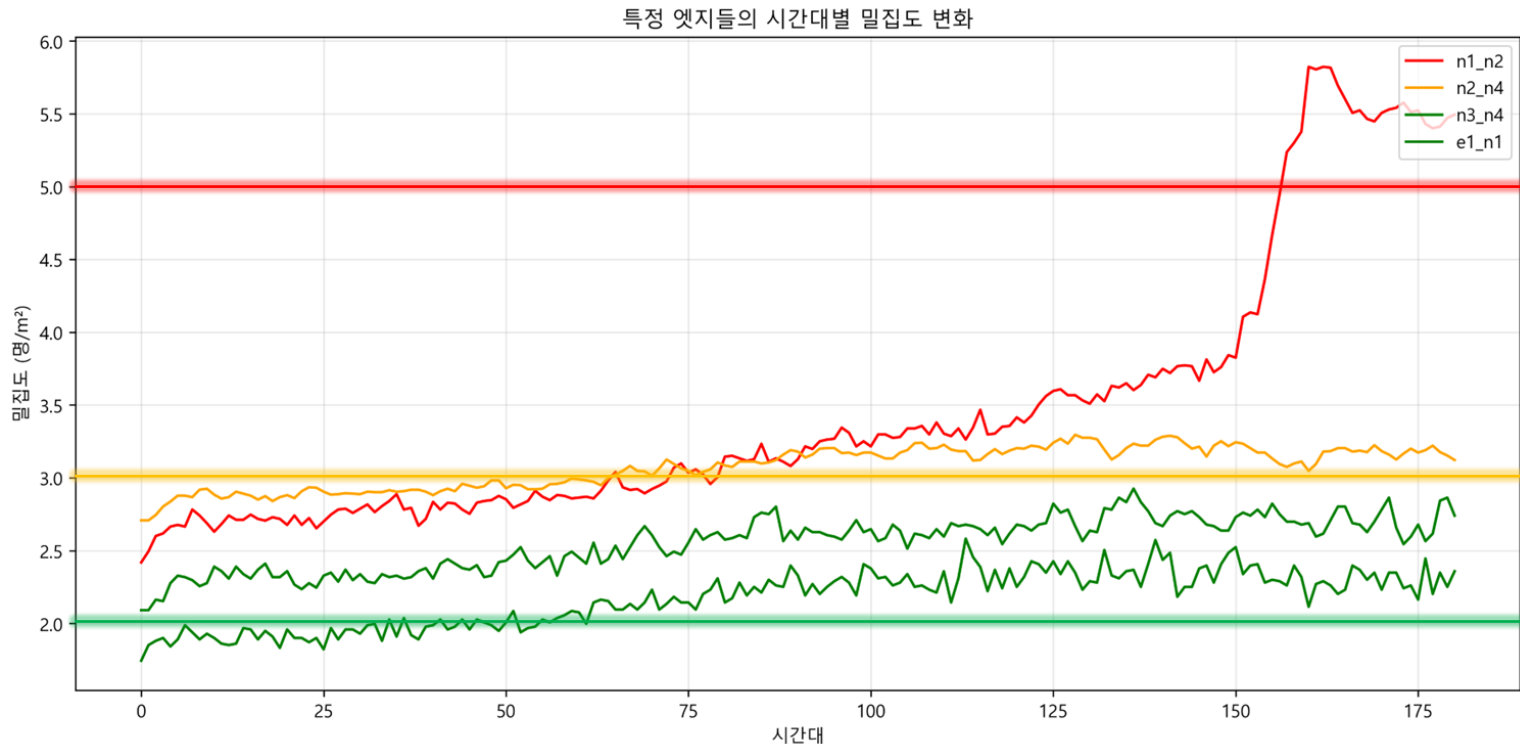
- 다중운집인파사고 발생 예측 구간



3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.3 시뮬레이션 결과

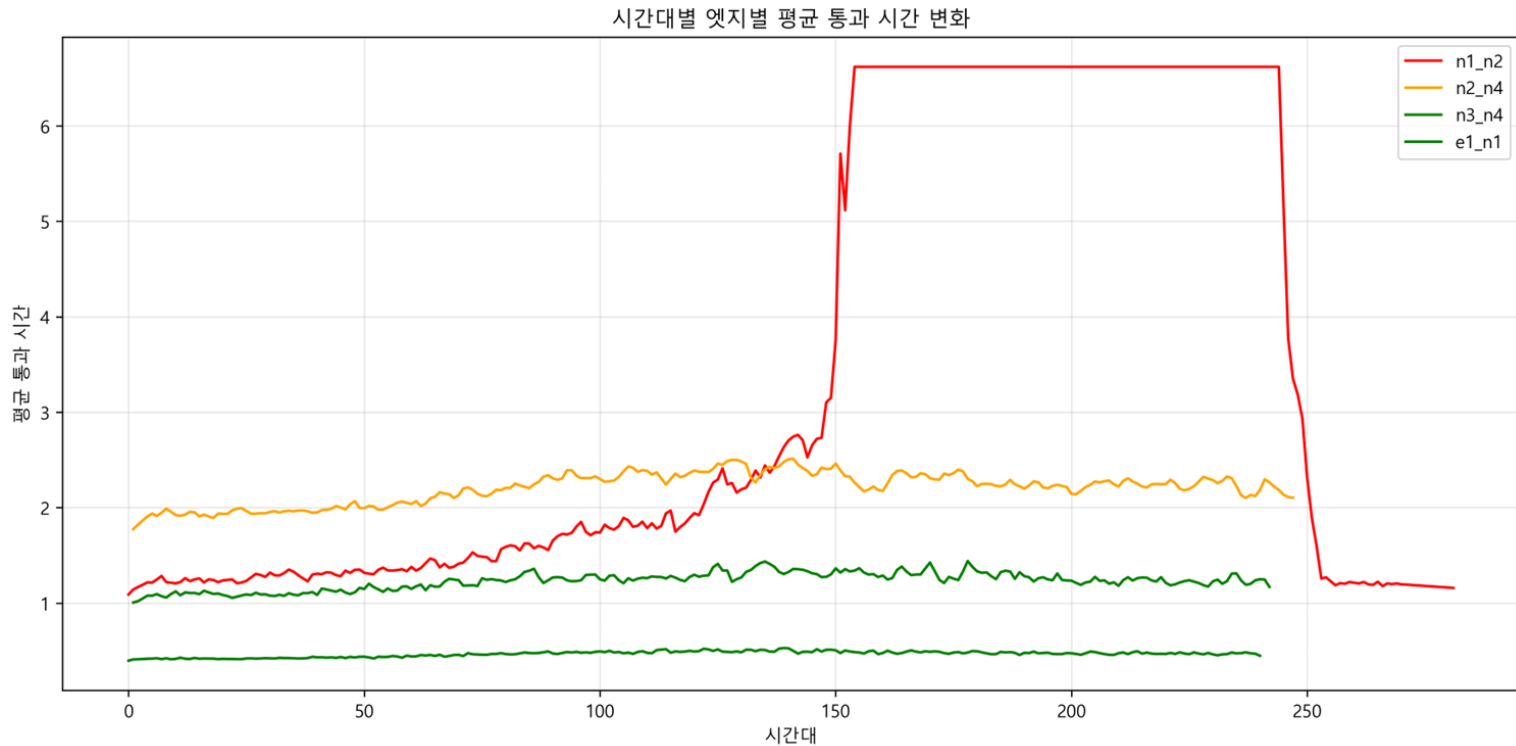
- 특정 옛지들의 시간대별 밀집도 변화
 - 주의 및 여유 그래프는 점차 우상향
 - 위험 그래프는 점차 우상향하면서 밀집도 4.0을 넘는 순간, 순식간에 밀집도 6.0에 도달하는 모습을 보임



3. 시뮬레이션 현실 적용성 검토

3.3 시뮬레이션 결과

- 보행자의 시간대별 엣지별 평균 통과 시간 변화
 - 밀집도 4.0을 넘는 이후부터 보행자의 통과 시간이 높아지면서, 정체되는 것을 확인



4. 결론

4.1 결론

- 다양한 환경적 배경에 따른 광범위한 상황에 적용이 가능한 다중운집 인파안전관리 모델을 개발하였고, 이를 이태원 참사 시나리오에 적용하여 실제 활용 가능성을 검토하였음
- 모델은 보행 네트워크 상의 밀집도 변화와 보행자 단위의 통과 및 이동시간 패턴을 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석할 수 있는 구조를 갖추고 있음
- 이를 통해, 거시적으로는 공간 단위의 위험 밀집 구간을 식별하고, 미시적으로는 개별 보행자의 체류 및 이동 시간 변화 추이를 확인함으로써, 향후 효과적인 인파 안전관리 및 사고 예방 대책 수립을 지원할 수 있는 도구로 활용될 수 있음

4. 결론

4.2 추후 연구

1. 개별 보행자 행동 모델링

- 특성 반영: 나이, 성별, 신체적 조건 등 특성에 따른 특성에 따른 보행 속도 및 보행자 간의 간격 변화를 분석
- 행동 다양성: 최단 경로 외 혼잡 회피, 성향 기반 경로 선택 로직 추가

2. 보행 목적의 세분화

- 노드 목적 유형 확장: 단순 이동(지나감, 산책 등) 포함하여 다양한 목적 정의
- 행동 패턴 차별화: 목적지에 따라 보행자 이동 특성 개별 분석 가능하도록 설정

3. 보행 네트워크 환경 현실성 강화

- 지형 정보 적용: QGIS 기반 경사도 데이터를 활용해 경로 선택과 보행 속도에 영향 반영
- 공간 파라미터 정밀화: 보행로 길이 폭, 보행자 수 등 기초 구조 정교화