

DEVS 기반 군중 시뮬레이션 모델을 활용한 이태원 참사 시나리오 재현 및 통제 전략 효과 분석

대한산업공학회/한국경영과학회/한국시뮬레이션학회 2025년 춘계공동학술대회

이상화, 김규리, 길준혁, 송나영, 배장원
한국기술교육대학교

tkdghk4110@koreatech.ac.kr

— 목차

1. 연구 배경 및 목적
2. 입력 데이터 구성 및 설명
3. DEVS 기반 시뮬레이션 모델 설계
4. 실험 설계 및 결과 분석
5. 결론 및 시사점

1. 연구 배경 및 목적

1.1 연구 배경

- 도시화와 대규모 행사 증가로 인해 도시 공간에서의 군중 밀집 현상이 일상화되고 있음
- 특히 좁은 골목, 복잡한 교차로, 시야 확보가 어려운 공간은 보행 흐름을 방해하며 국지적 혼잡을 유발
→ 대규모 인파 유입 시 병목 현상 발생 가능성
- 2022년 이태원 참사는 이러한 구조적 취약성과 통제의 부재가 결합되어 발생한 대표적 사례



“ 단순히 인원 수를 통제하는 것만으로는 부족하며,
공간 구조와 보행 흐름까지 함께 고려한 사전적 대응이 필요 ”

1. 연구 배경 및 목적

1.2 기존 연구의 한계

- 기존 군중 시뮬레이션 연구는 군중 전체를 연속적인 흐름으로 보고 밀도와 유량을 분석하는
1) 거시적 흐름 모델을 활용 (Hughes, 2003)
- 보행자 간 상호작용과 개별 행태를 재현하기 위해 **2) 행위자 기반 모델**과 **3) 사회적 힘 모델**을 사용하는 방식이 주를 이룸 (Pan et al., 2007; Helbing et al., 2000)
- 최근에는 **군중 밀집 위험을 예측하거나 이태원 참사를 가상으로 재현한 연구도 일부 진행되었으나, 군중 통제 전략의 효과를 비교·분석하는 연구는 거의 없는 상황** (박찬호, 2024; 황주이 외, 2023)

1) 거시적 흐름 모델 (Macroscopic Flow Model):

보행자 개개인이 아닌 군중 전체를 하나의 유체처럼 보고, 밀도·속도·유량의 변화를 연속체 방정식으로 분석하는 방식

2) 행위자 기반 모델 (Agent-Based Model):

각 보행자를 독립적인 '에이전트'로 모델링하여, 주변 상황에 따라 자율적으로 이동·반응하도록 시뮬레이션하는 방식

3) 사회적 힘 (Social Force Model):

'보행자가 목적지로 이동하려는 힘'과 '다른 보행자나 장애물에 의해 받는 힘' 간의 상호작용을 수식으로 표현한 모델

1. 연구 배경 및 목적

1.3 연구 목적

- 본 연구는 이태원 참사 사례를 기반으로 실제 골목망을 반영한 시뮬레이션 환경을 구축하고,
*DEVS 형식론을 활용하여 보행 흐름을 이산 이벤트 단위로 정밀하게 모델링하였음
- 이러한 모델을 활용하여 다음 2가지 군중 통제 전략에 대한 실험을 수행함으로써,
통제 전략 간 효과를 정량적으로 비교·분석하였음
 - Baseline (통제 없음)
 - 전략 1 (위험 구간 통제): 식별된 고밀집 위험 구간에 일방통행 적용
 - 전략 2 (인접 구간 통제): 위험 구간과 인접한 주요 유입 구간에 일방통행 적용

*DEVS(Discrete Event System Specification) 형식론:

시스템을 구성요소(component) 단위로 모듈화하고, 특정 사건(event)이 발생하는 시점에만 상태 변화와 계산을 수행하는 방식

→ 복잡한 전략 시나리오를 효율적으로 구조화하고, 보행 흐름의 시간적 변화를 정밀하게 분석하기에 적합

2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.1 시물레이션 대상 공간

- 이태원역 1·2번 출구 상단 반원 집계구 (데이터 집계 최소 단위 구역)



2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.2 이태원역 시간대별 하차 인원

- 출처: 서울 열린데이터 광장
- 내용: 2022년 10월 29일, 이태원역 시간대별(18:00-22:00) 하차 인원 수
- 활용 방식:
 - 열차 배차 간격(약 4분)으로 보행자 분할 유입 → 총 21,786명
 - 최적 경로(Dijkstra Algorithm) or 두번째로 빠른 경로를 따라 목적지 이동 및 복귀

표 1. 이태원역 시간대별 지하철 하차 인원 데이터

기준일	호선	고유역 번호	역명	승하차 구분	시간대	인원
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	18-19시	10,747
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	19-20시	11,873
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	20-21시	11,666
2022-10-29	6	2631	이태원역	하차	21-22시	9,285
					합계 / 2	21,786

※ 시뮬레이션에서는 이태원역 실제 4개 출구 중 2개 출구만 포함하므로, 전체 하차 인원 또한 2로 나누어 적용

2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.3 이태원역 인근 시간대별 총 생활인구

- 출처: 서울 열린데이터 광장
- 내용: 2022년 10월 29일, 이태원역 인근 시간대별(18:00-22:00) 총 생활인구 수
- 활용 방식:
 - 지하철 하차 인원 외 고정 체류 인구 수 부여 → 총 11,361명
 - 특정 구간(주요 상권)에 고정적으로 배치되어, 별도 이동 없이 밀집도 계산에만 포함

표 2. 이태원역 인근 시간대별 총 생활인구 데이터

기준일	행정동 코드	집계구 코드	시간대	인구
2022-10-29	11170650	11000000000000	18시	13210
2022-10-29	11170650	11000000000000	19시	16505
2022-10-29	11170650	11000000000000	20시	18138
2022-10-29	11170650	11000000000000	21시	19380
			평균	16,808

※ 평균 생활인구에서 평균 지하철 하차 인원을 제외한 나머지를 고정 체류 인구로 추정하여 시뮬레이션에 반영

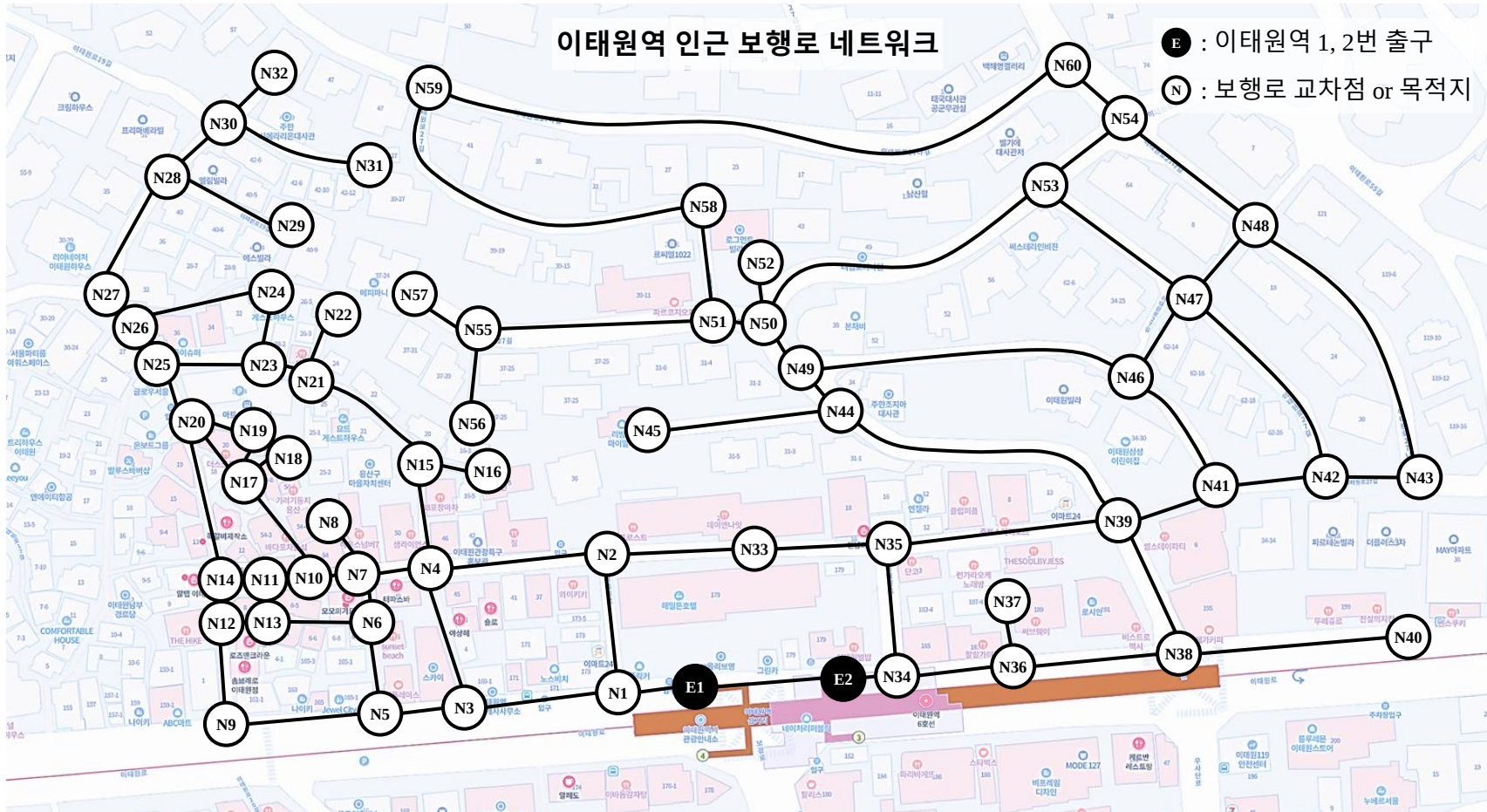
2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.4 이태원역 인근 보행로 네트워크

- **출처:** 네이버 지도(거리 측정 기능) 기반 수작업 측정
- **내용:** 실제 골목 구조를 바탕으로 62개 노드, 158개 엣지 구성
- **활용 방식:**
 - **노드:** 지하철역 출구, 교차점, 목적지
 - **엣지:** 보행로 (길이/폭)
 - 각 구간별 보행자 수, 밀집도, 통과 시간 등을 계산에 핵심적으로 활용

2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.4 이태원역 인근 보행로 네트워크



2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.5 이태원역 인근 상점별 업종 구분

- 출처: 네이버 지도(업종 구분) 기반 수작업 분류
- 내용: 주점, 클럽, 음식점, 카페 등 13개 업종
- 활용 방식:
 - 각 보행자가 목적지를 선택하는 기준으로 사용

표 3. 이태원역 인근 노드별 대표 업종 목록

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

2. 입력 데이터 구성 및 설명

2.6 업종별 선택 가중치 및 체류시간

- 출처: 내부 설정값 (업종 기반 임의 조정)
- 내용: 업종별 목적지 선택 가중치 및 체류 시간
- 활용 방식:
 - 각 보행자의 목적지 선택 시 업종별 가중치에 따라 확률적으로 분배
 - 체류 시간은 보행자가 해당 노드(목적지)에 머무는 시간으로 설정

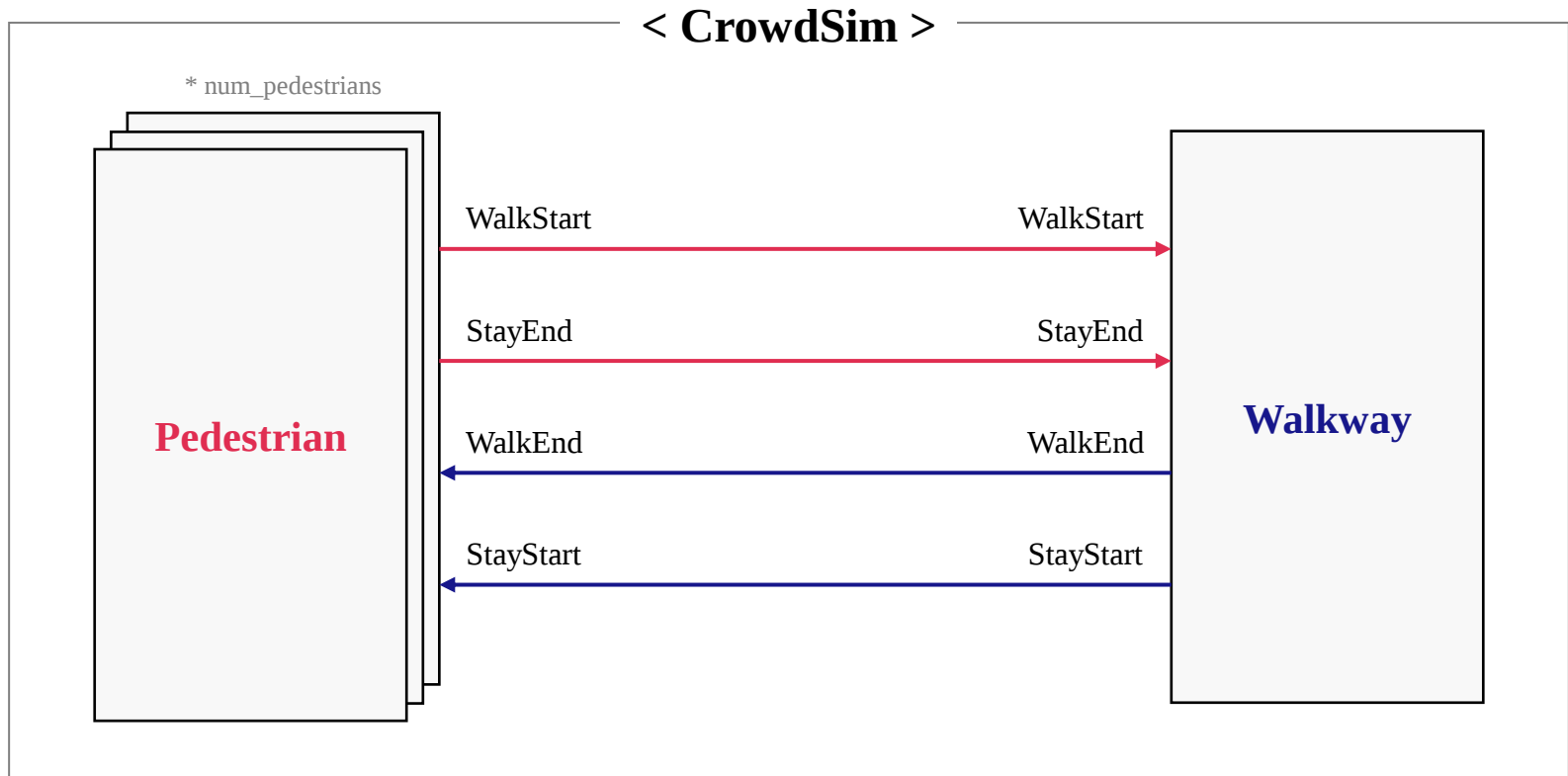
표 4. 이태원역 인근 상점 업종별 선택 가중치 및 체류시간

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

3. DEVS 기반 시뮬레이션 모델 설계

3.1 CrowdSim Coupled Model

- Pedestrian 원자 모델과 Walkway 원자 모델을 결합한 전체 시스템 구조

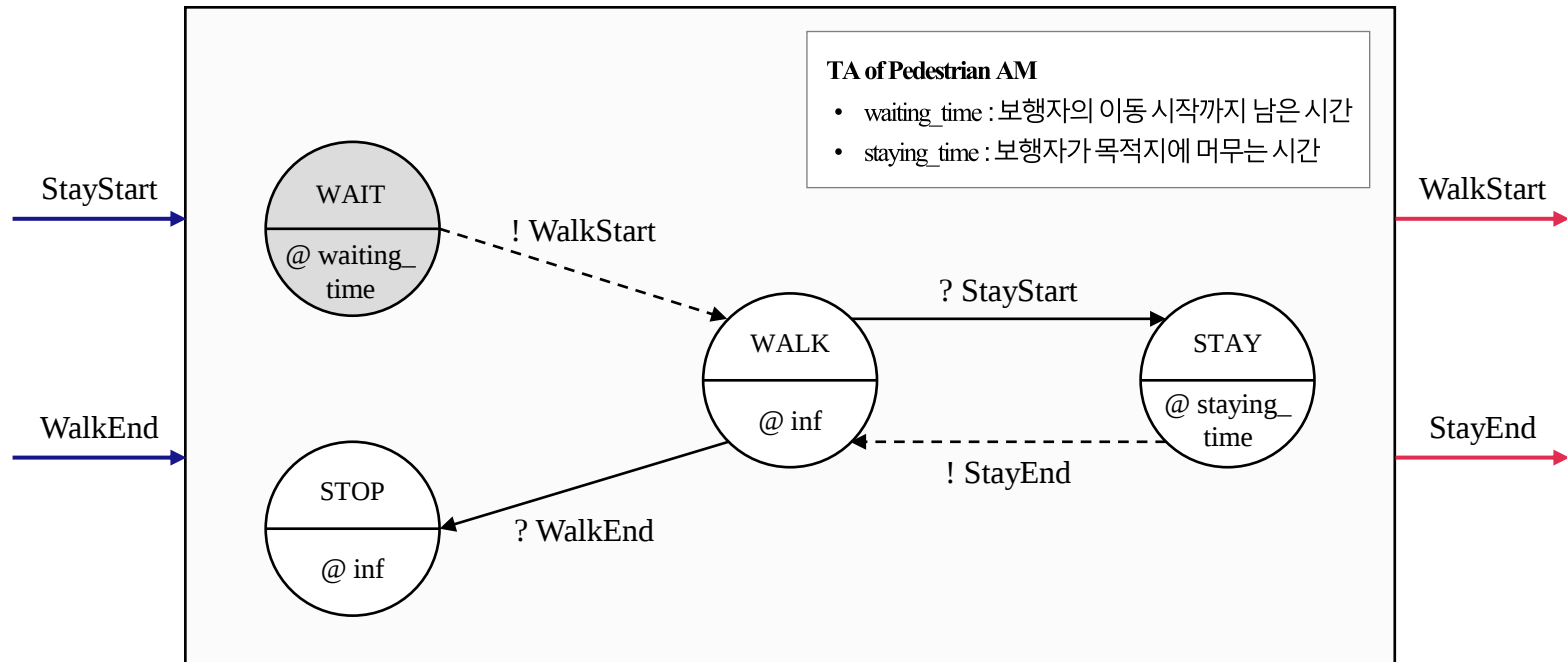


3. DEVS 기반 시뮬레이션 모델 설계

3.2 Pedestrian Atomic Model

- 각 보행자 객체를 의미
 - 보행자의 대기, 보행, 체류, 소멸 상태를 이산 이벤트 단위로 정의

Pedestrian Atomic Model

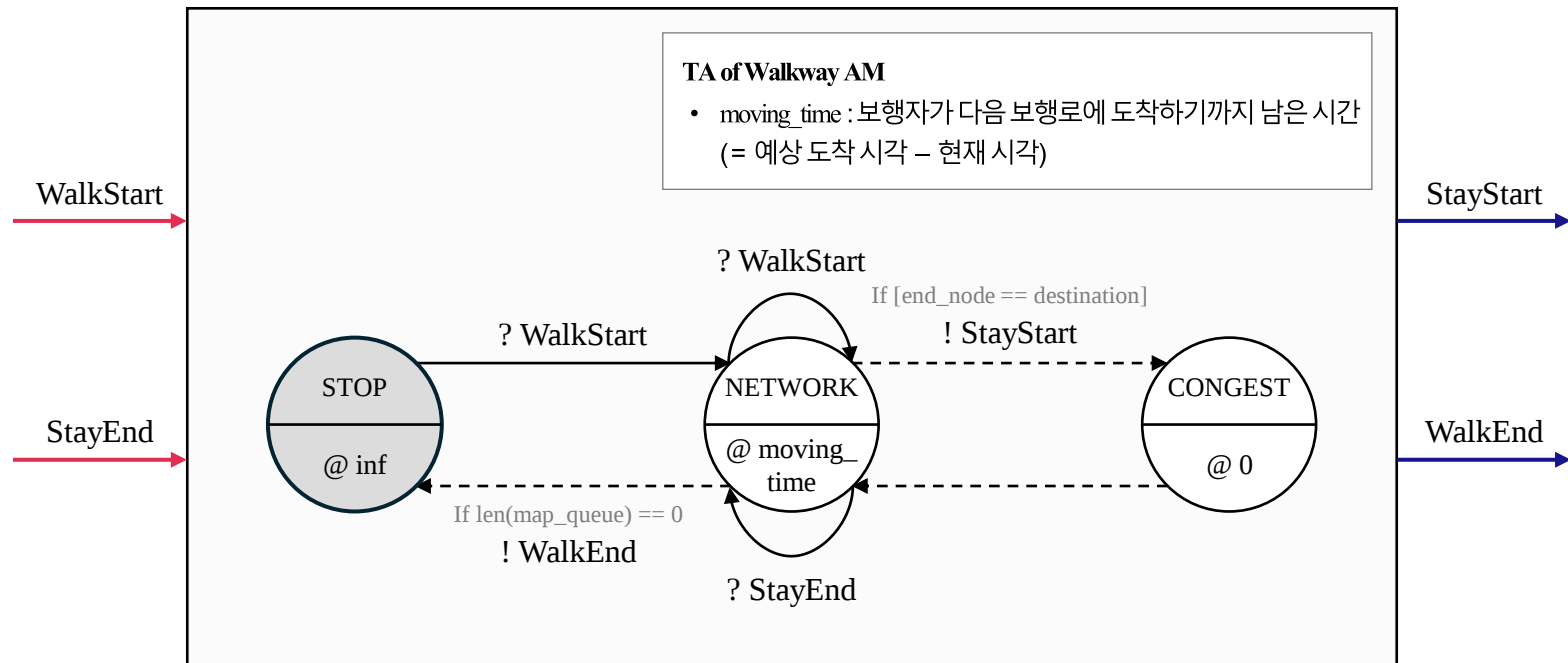


3. DEVS 기반 시뮬레이션 모델 설계

3.3 Walkway Atomic Model

- 전체 보행로 네트워크를 의미
 - 각 보행자의 구간 진입/이탈을 처리하며, 구간별 보행자 수, 밀집도, 통과 시간 계산

Walkway Atomic Model



3. DEVS 기반 시뮬레이션 모델 설계

3.4 선형 보행 속도-밀도 모델 (양방향 간섭 보정 포함)

▪ 수식:

$$v(p) = \begin{cases} v_{max} \cdot \left(1 - \frac{\alpha \cdot p}{p_{max}}\right), & \text{if } v \geq v_{min} \\ v_{min} & \text{otherwise} \end{cases}$$

표 5. 선형 보행 속도-밀도 모델의 주요 변수 정의

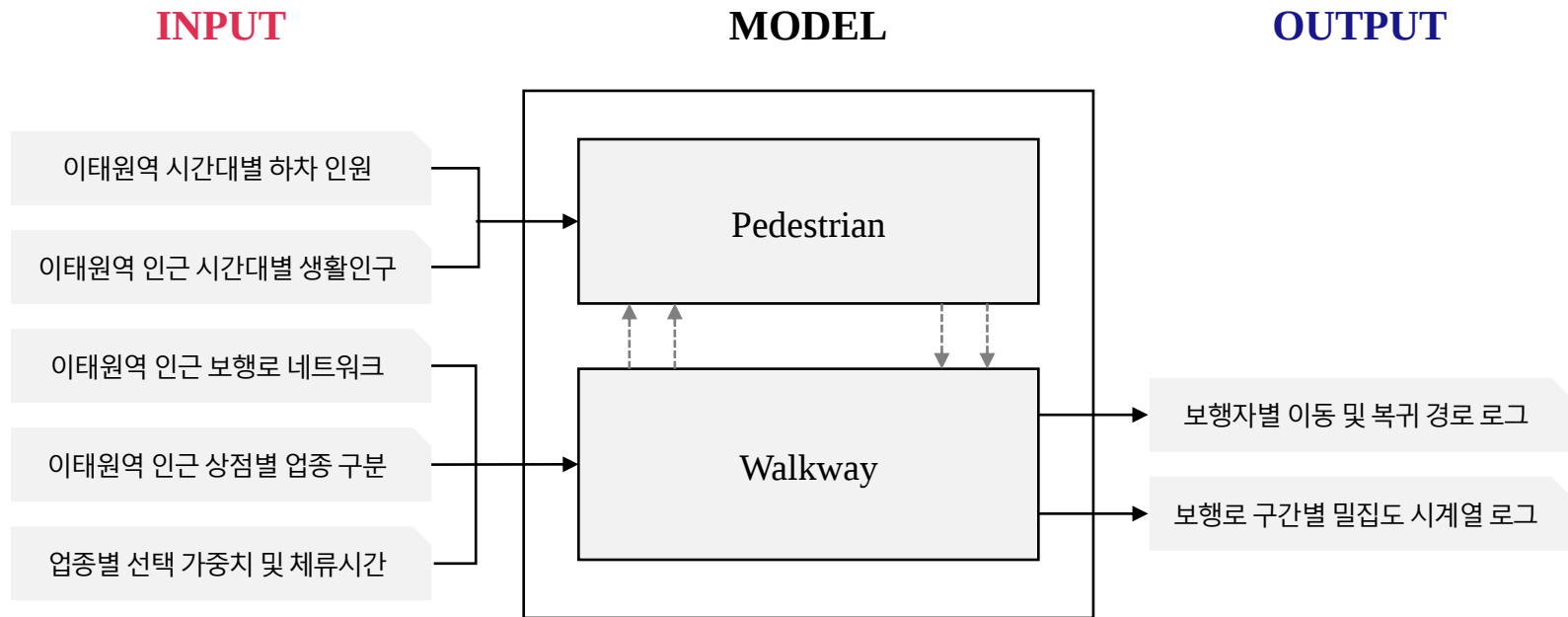
기호	설명	단위	비고
p	현재 밀집도	명/ m^2	독립 변수 (입력)
p_{max}	임계 밀집도 (최대 허용 밀도)	6명/ m^2	보행 불가능 상태의 밀집도
α	양방향 간섭 보정 계수	1.3	양방향 흐름의 간섭을 반영하는 계수
v_{max}	최대 보행 속도	1.3m/s	군중이 거의 없는 자유 보행 속도
v_{min}	최소 보행 속도	0.1m/s	극심한 혼잡 상황에서의 보행 속도
$v(p)$	밀집도 p 에서의 보행 속도	m/s	종속 변수 (출력)

※ 참고: Greenshields (1935), Blue & Adler (2001), Helbing et al. (2005)

3. DEVS 기반 시뮬레이션 모델 설계

3.5 전체 시뮬레이션 입/출력 구조

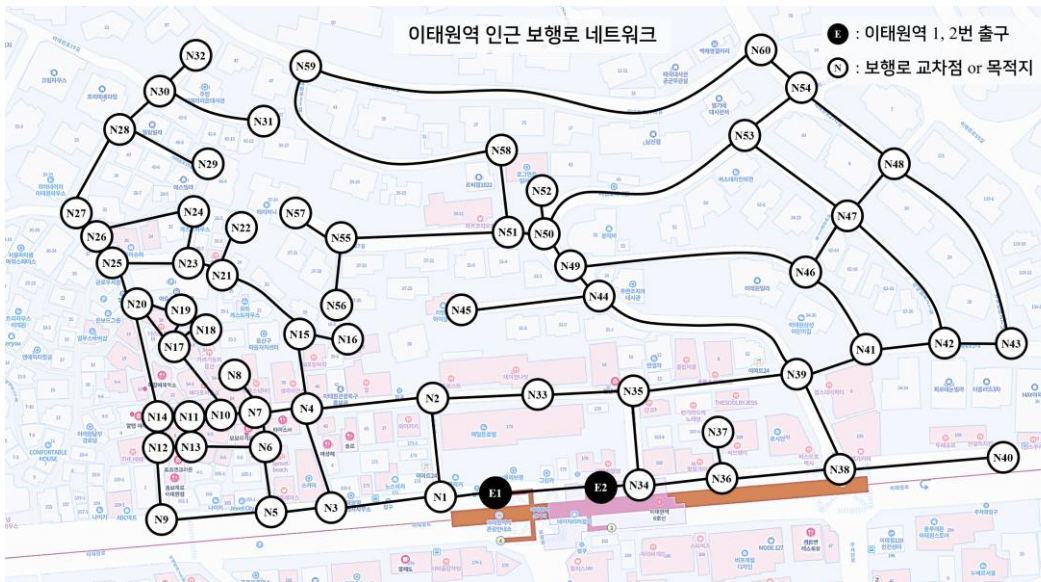
- 시뮬레이션은 이태원역 인근 인구·공간 데이터를 입력받아, 보행자 경로와 밀집도 로그를 출력



4. 실험 설계 및 결과 분석

4.1 시뮬레이션 기본 설정

- 대상 시나리오: 2022년 10월 29일, 이태원역 1·2번 출구 상단 집계구
- 시뮬레이션 시간: 총 240분 (18-22시)
- 유동 인구(보행자) 수: 21,786명
- 고정 체류 인구 수: 11,361명

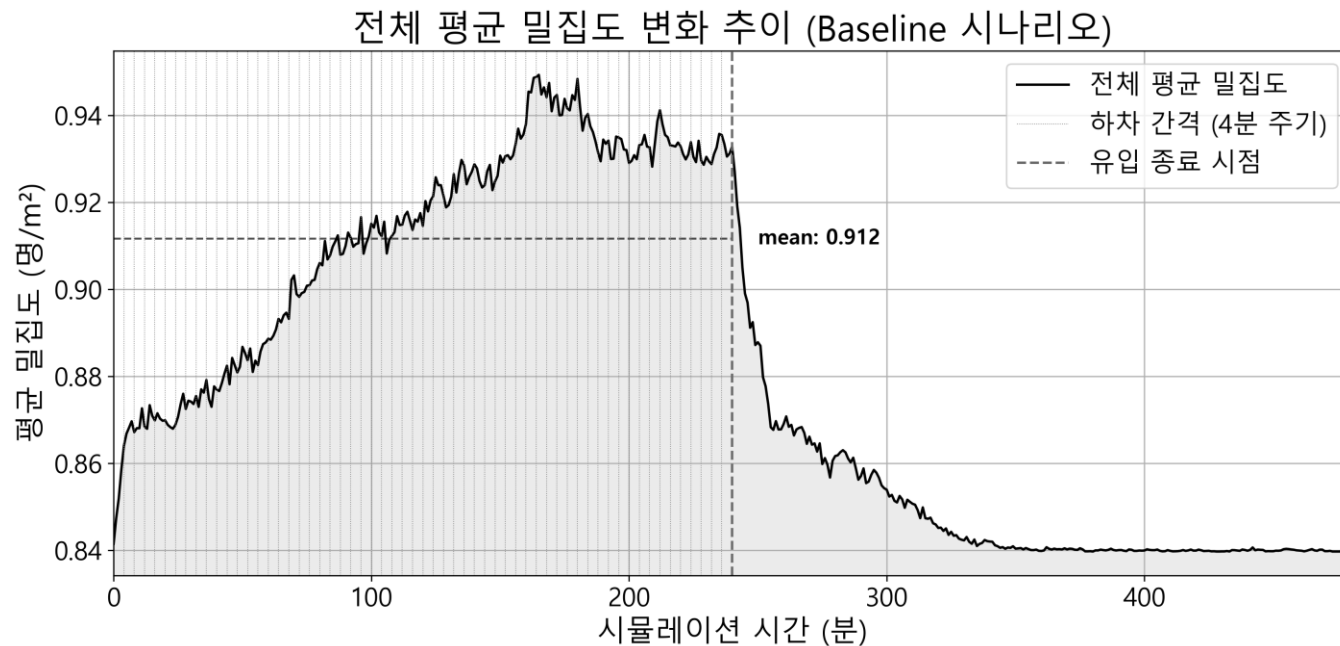


id	origin	destination	waiting_tir	staying_tin	time_slot	train_idx
1	e1	n20	0.048586	63	18-19시	0
2	e2	n9	2.851975	48	18-19시	0
3	e1	n1	2.867003	20	18-19시	0
4	e2	n1	2.58418	20	18-19시	0
5	e1	n33	2.445355	20	18-19시	0
6	e2	n37	0.294866	94	18-19시	0
7	e2	n20	0.985624	52	18-19시	0
8	e1	n33	2.297512	20	18-19시	0
9	e2	n17	1.576747	59	18-19시	0
10	e1	n38	3.968093	30	18-19시	0
11	e1	n33	3.694981	20	18-19시	0
12	e1	n1	0.608032	20	18-19시	0
13	e2	n35	2.359842	66	18-19시	0
14	e2	n1	2.78486	20	18-19시	0
15	e2	n33	0.546174	25	18-19시	0
16	e2	n6	1.250383	98	18-19시	0
17	e2	n35	2.863671	103	18-19시	0
18	e1	n17	3.604432	81	18-19시	0
19	e1	n10	1.366971	42	18-19시	0

4. 실험 설계 및 결과 분석

4.2 Baseline 결과

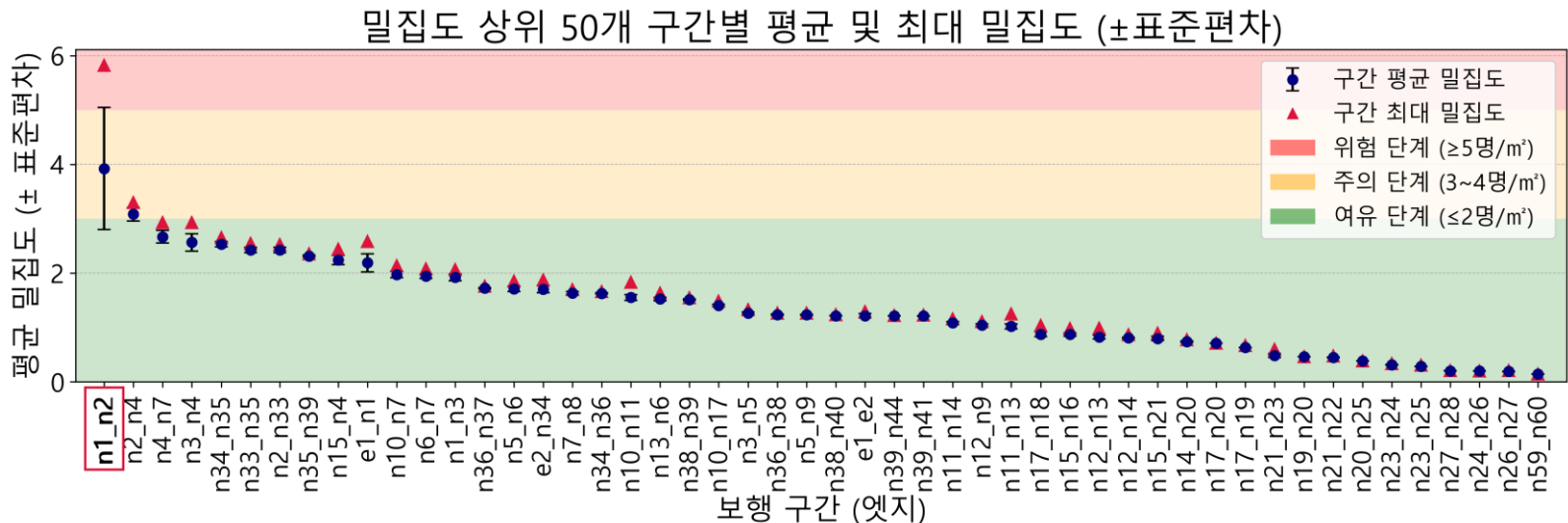
- 전체 평균 밀집도 변화 추이
 - 평균 밀집도는 초기 $0.84\text{명}/m^2$ 에서 점진적으로 증가하며 최대 $0.95\text{명}/m^2$ 까지 기록



4. 실험 설계 및 결과 분석

4.2 Baseline 결과

- 밀집도 상위 50개 구간 분포
 - 최대 밀집도를 기준으로 각 구간을 위험/주의/여유 단계로 구분 (행전안전부, 2024)



4. 실험 설계 및 결과 분석

4.2 Baseline 결과

- 밀집도 상위 3개 구간
 - 최대 밀집도가 5.82명/ m^2 로 가장 높은 n1_n2 구간 → 위험 구간으로 식별

표 6. 평균 및 최대 밀집도 기준 상위 3개 구간

구분	엣지 ID	평균 밀집도 (명/ m^2)	최대 밀집도 (명/ m^2)	밀집도 단계별 기준
위험 구간	n1_n2	3.92	5.82	위험 단계 (≥ 5 명/ m^2)
주의 구간	n2_n4	3.08	3.30	주의 단계 (3~4명/ m^2)
여유 구간	n4_n7	2.67	2.93	여유 단계 (≤ 2 명/ m^2)

4. 실험 설계 및 결과 분석

4.2 Baseline 결과

- 위험 구간 유입 상위 3개 구간
 - 위험 구간(n1_n2)에 총 **5,834명**의 보행자를 유입시킨 **n4_n2 구간** → **인접 구간**(최대 유입)으로 식별

표 7. 위험 구간(n1_n2) 유입 상위 3개 구간 및 보행자 수

구분	엣지 ID	유입 보행자 수	통제 가능 여부
인접 구간	e1_n1	8,823	통제 불가 (지하철역 출구 포함)
인접 구간	n4_n2	5,834	통제 가능
인접 구간	n33_n2	3,812	통제 가능

4. 실험 설계 및 결과 분석

4.3 통제 전략 수립

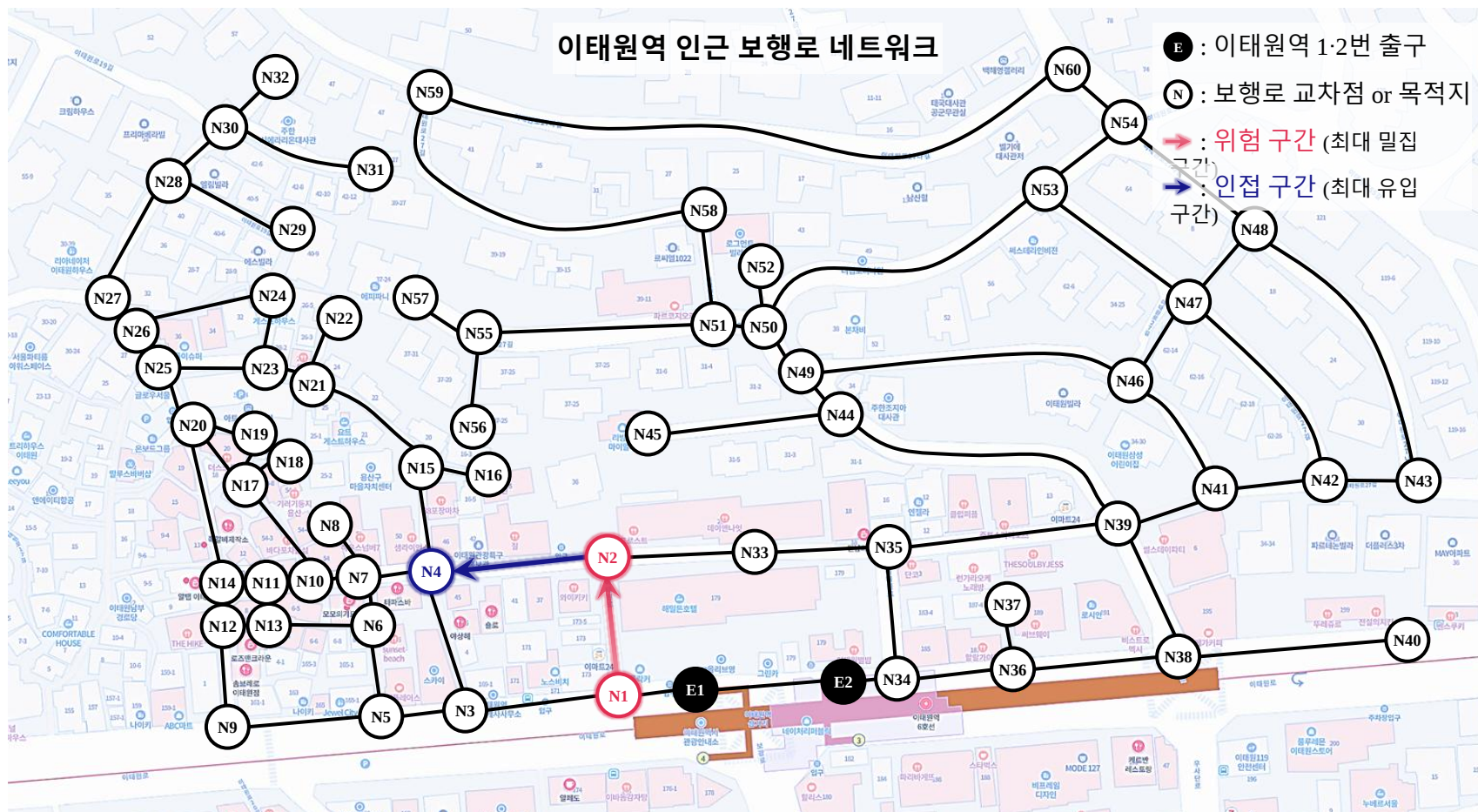
- 식별된 **위험 구간** 및 **인접 구간**에 대해 각각 **일방통행을 실시**하여 통제 전략간 효과를 비교
 - **위험 구간** (n1_n2) — 평균 밀집도 3.92명/ m^2 , 최대 밀집도 5.82명/ m^2
 - **인접 구간** (n2_n4) — 평균 밀집도 3.08명/ m^2 , 최대 밀집도 3.30명/ m^2 , 유입 수 5,834명

표 8. 통제 전략 유형 구분 및 적용 내용

구분	전략 유형	적용 내용
-	Baseline	모든 구간 통제 없음
전략 1	위험 구간 통제	구간 밀집도가 가장 높은 위험 구간(n1_n2) 에 일방통행 적용
전략 2	유입 구간 통제	위험 구간으로 가장 많은 보행자를 유입시키는 인접 구간(n2_n4) 에 일방통행 적용

4. 실험 설계 및 결과 분석

4.4 위험 구간 및 인접 구간 시각화



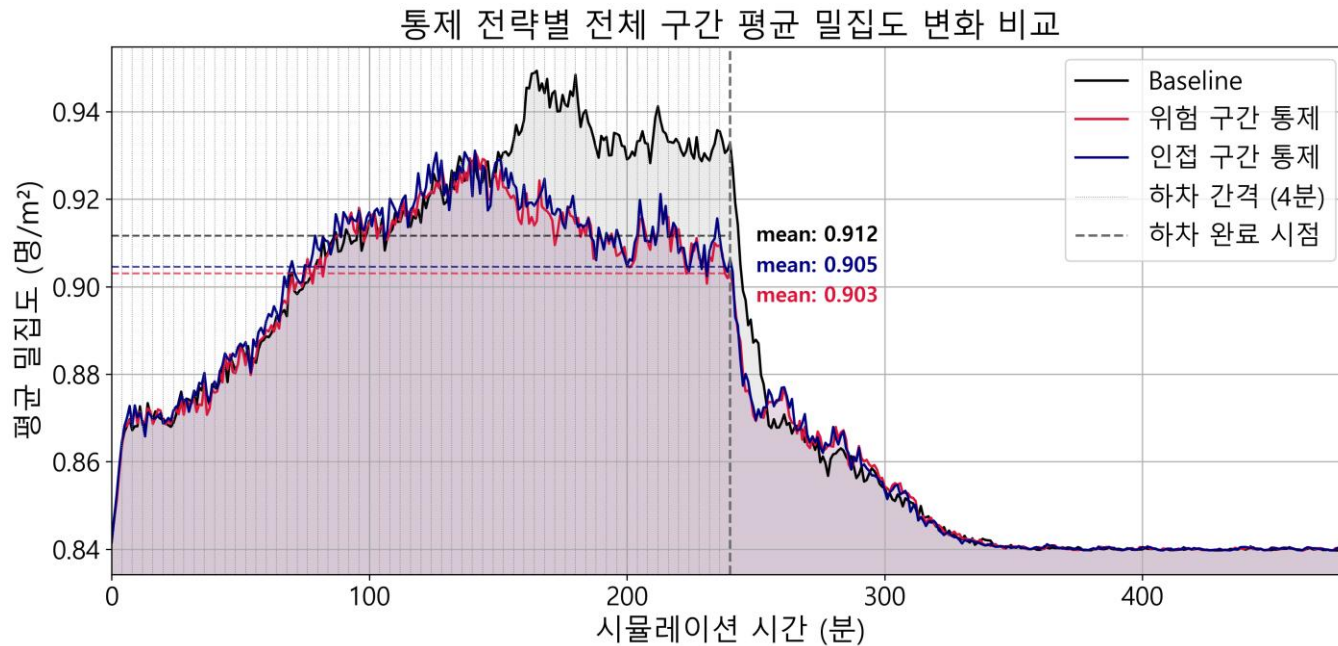
4. 실험 설계 및 결과 분석

4.5 통제 전략별 결과 비교

- 통제 전략별 전체 평균 밀집도 비교

- 위험 구간 (n1_n2) — 일방통행 시 평균 밀집도: **0.903명/ m^2**

- 인접 구간 (n2_n4) — 일방통행 시 평균 밀집도: **0.905명/ m^2**



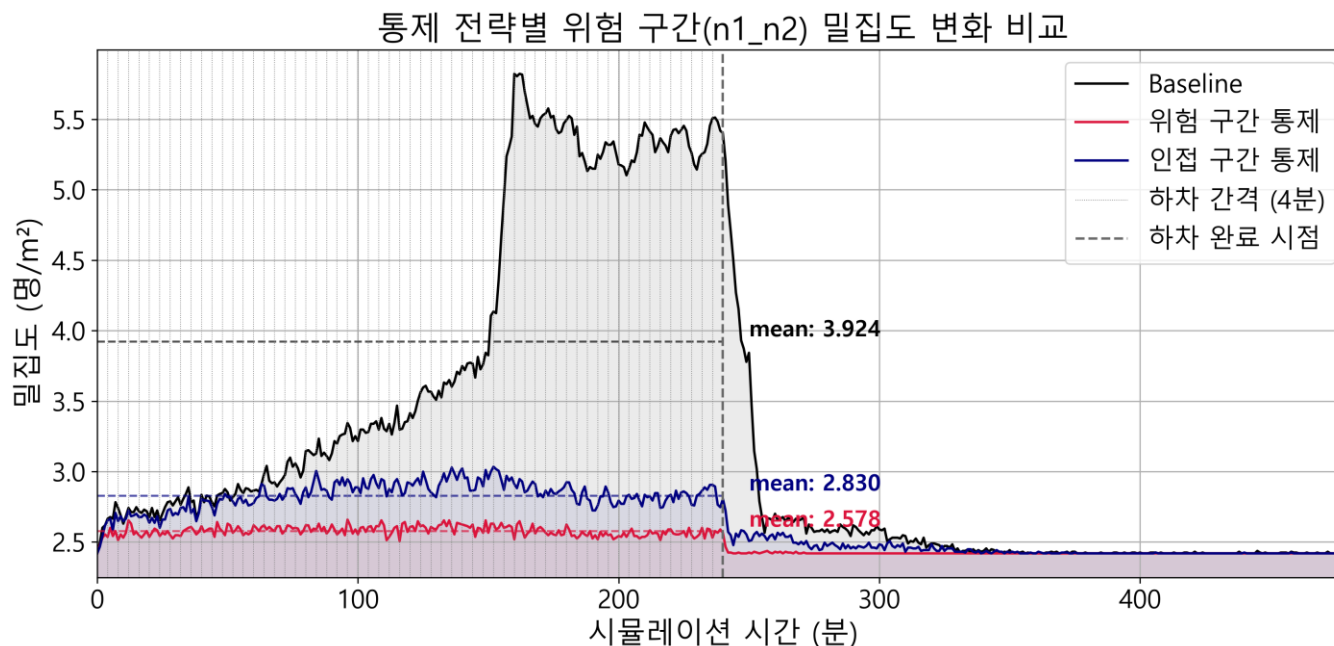
4. 실험 설계 및 결과 분석

4.5 통제 전략별 결과 비교

- 통제 전략별 위험 구간 밀집도 비교

- **위험 구간** (n1_n2) — 일방통행 시 평균 밀집도: $2.578 \text{명}/m^2$

- **인접 구간** (n2_n4) — 일방통행 시 평균 밀집도: $2.830 \text{명}/m^2$



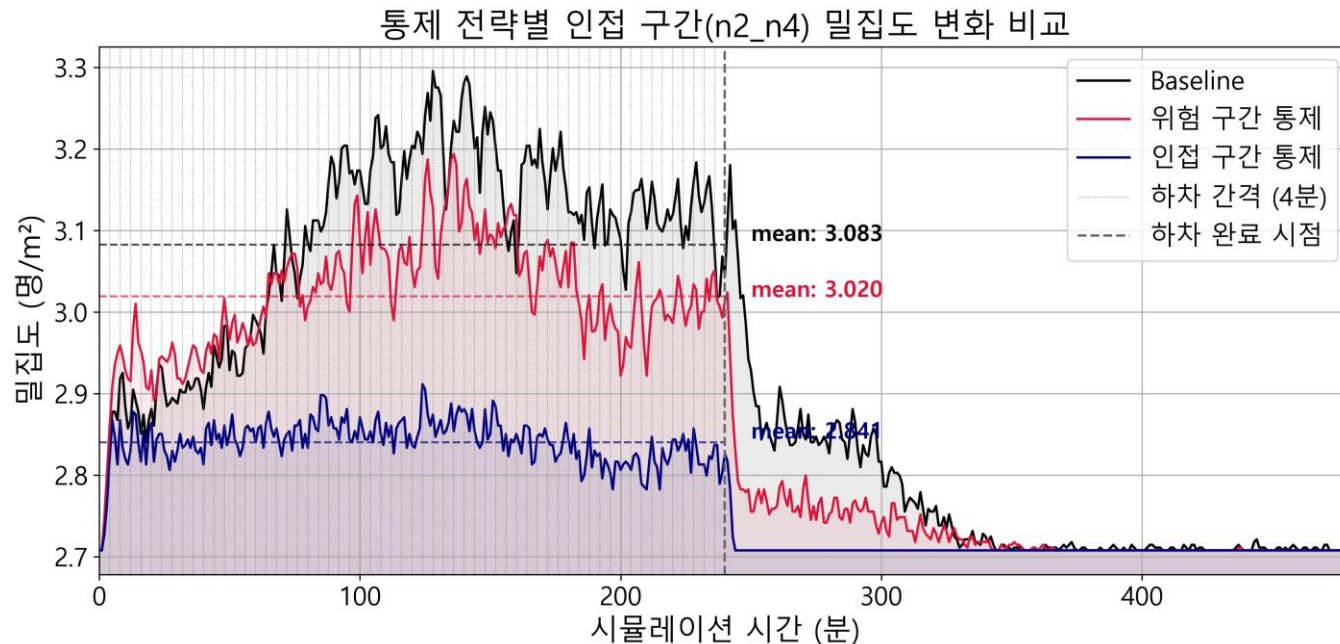
4. 실험 설계 및 결과 분석

4.5 통제 전략별 결과 비교

통제 전략별 인접 구간 밀집도 비교

➤ **위험 구간** (n1_n2) — 일방통행 시 평균 밀집도: $3.020 \text{명}/m^2$

➤ **인접 구간** (n2_n4) — 일방통행 시 평균 밀집도: $2.841 \text{명}/m^2$



4. 실험 설계 및 결과 분석

4.6 통제 전략별 종합 평가

- **위험 구간**(n1_n2) 통제:
 - 해당 구간의 밀집도는 뚜렷하게 완화되었으나, 인접 구간에서의 효과는 상대적으로 미비
 - 전체 평균 밀집도에서 가장 낮은 수치를 보였으나, 이는 위험 구간에 집중된 국지적 효과로 확인
- **인접 구간**(n4_n2) 통제:
 - 위험 구간 및 인접 구간 모두에서 밀집도 완화 효과 확인
 - 전체 최대 밀집도 기준, Baseline 대비 약 47.9%의 높은 저감 효과

표 7. 통제 전략별 평균 및 최대 밀집도 결과 비교

구분	전략 유형	전체 구간 평균 밀집도	위험 구간 평균 밀집도	인접 구간 평균 밀집도	전체 구간 최대 밀집도
-	Baseline	0.912 (명/m ²)	3.924 (명/m ²)	3.093 (명/m ²)	5.823 (명/m ²)
전략 1	위험 구간 통제	0.903 (명/m ²)	2.578 (명/m ²)	3.020 (명/m ²)	3.296 (명/m ²)
전략 2	인접 구간 통제	0.905 (명/m ²)	2.830 (명/m ²)	2.841 (명/m ²)	3.034 (명/m ²)

5. 결론 및 시사점

5.1 연구 요약

- 이태원 참사 사례를 기반으로, 실제 공간 구조와 인구 흐름 데이터를 반영한 DEVS 기반 군중 시뮬레이션 모델을 설계하여 통제 전략간 효과를 비교·분석하였음
- 실험 결과, 'Baseline (통제 없음)' 대비,
전략 1: **위험 구간** 통제 → 해당 구간의 밀집도 완화, 인접 구간 효과는 미비
전략 2: **인접 구간** 통제 → 위험 및 인접 구간 모두 완화, **최대 밀집도 47.9% 감소**
- 통제 위치와 범위에 따라 **밀집도 분산 효과가 구조적으로 달라짐**을 실증적으로 확인

5. 결론 및 시사점

5.2 정책적 시사점

- 위험 구간이 아닌 인접 구간을 간접적으로 통제하는 방식이 더 효과적일 수 있음을 실험적으로 입증
- 행정안전부의 3단계 밀집도 분류 기준을 적용하여 실제 현장에서 즉시 활용 가능한 판단 기준을 제시함
- DEVS 기반 시뮬레이션은 다양한 전략을 유연하게 실험할 수 있는 정책 실험 도구로서 활용 가능함

5.3 연구 한계 및 향후 과제

- 군중 행태 재현의 한계
→ 회피, 상호작용, 심리 반응 등 복잡한 실제 보행자의 특성을 반영한 모델 고도화 필요
- 통제 전략 유형의 제한
→ 다양한 통행 규칙이나 반응형 통제 등 복합 전략을 반영한 시나리오 확장 필요
- 단일 유입 경로만 고려
→ 도로·버스·건물 등 다중 유입 경로와 비상 상황을 반영한 입력 설계 필요