

Simulating Pedestrian Risk in Dense Urban Networks: Bottlenecks, Flow Interactions, and Intersections

Han Byeol Yoo*, Hyunchul Ahn**

*PhD Candidate, Graduate School of Business IT, Kookmin University, Seoul, Korea /
Assistant Professor, Department of Public Administration and Public Enterprises, Sunmoon University, Asan, Korea
**Professor, Graduate School of Business IT, Kookmin University, Seoul, Korea

[Abstract]

This study presents a Python-based simulation design to assess pedestrian crowd-density risks in Seoul's high-density roads and alleyways using the Social Force Model (SFM). Twenty-four scenarios were constructed across three spatial typologies: bidirectional corridors, T-intersections, and X-intersections. The scenarios varied by flow volume, obstacle placement, and stopping probability. Risk was evaluated using five indicators: collisions, near-miss events, mean walking speed, blocked ratio, and queue pressure, integrated into a Composite Risk Index (RI). Each scenario was repeated with five independent random seeds for robustness. Results show that T-intersections produced the highest risk, with T08 recording $RI = 0.834 \pm 0.122$, followed by T04. X-intersections showed the greatest variability, while obstacles in corridors increased collisions more sharply than blockage.

▶ **Key words:** Pedestrian crowd simulation, Crowd density risk, Social Force Model (SFM), Urban alleyway safety, Intersection congestion, Composite Risk Index, Queue pressure

[요 약]

본 연구는 서울의 고밀도 도로·골목 공간에서 발생하는 군중 밀집 위험을 정량적으로 분석하기 위해 Python 기반 보행자 시뮬레이션과 사회력 모형(Social Force Model)을 적용하였다. 분석 대상은 양방향 직선 골목(C군), T자 교차점(T군), X자 교차점(X군)의 세 공간 유형이며, 유량 수준, 장애물 유무, 무작위 정지 확률을 조합한 총 24개 시나리오를 실행하였다. 각 시나리오에서는 충돌 횟수, 근거리 위험, 평균 보행속도, 차단 비율, 대기 압력을 산출하고, 이를 복합위험지수(RI)로 통합하여 위험 수준을 평가하였다. 결과의 견고성을 검증하기 위해 모든 시나리오를 5개의 독립 난수 시드로 반복 실험하였다. 분석 결과, T자 교차점의 T08이 $RI = 0.834 \pm 0.122$ 로 가장 높은 위험을 보였으며, X군은 변동계수($CV \approx 16.2\%$)가 가장 커 4방향 합류 구조의 예측 불확실성이 확인되었다.

▶ **주제어:** 보행자 군중 시뮬레이션, 군중 밀집 위험, 사회력 모형(SFM), 도시 골목길 안전, 교차로 혼잡, 복합위험지수(RI), 대기 압력

- First Author: Han Byeol Yoo, Corresponding Author: Hyunchul Ahn
- *Han Byeol Yoo (hanbyeolyoo@sunmoon.ac.kr), Graduate School of Business IT, Kookmin University, Department of Public Administration and Public Enterprises, Sunmoon University
- **Hyunchul Ahn (hcahn@kookmin.ac.kr), Graduate School of Business IT, Kookmin University
- Received: 2026. 04. 14, Revised: 2026. 04. 24, Accepted: 2026. 05. 12.

I. Introduction

2022년 10월 29일 서울 이태원에서 발생한 군중 압사 사고는 159명의 사망자를 낳으며 한국 도시 안전 정책의 근본적 한계를 드러냈다. 이 사고는 단지 과도한 인원 집중의 결과가 아니었다. 폭 3.2미터의 좁은 경사 골목, 양방향에서 동시에 유입되는 군중, 교차 지점에서의 측면 유입, 그리고 이동 중 발생하는 임의적 정지가 복합적으로 결합된 구조적 사고였다. 이 사건은 정적인 면적 기준에 기초한 인파관리 기준의 적용 가능성에 근본적 의문을 제기하였다[1][2].

도시의 고밀도 상업지와 축제 공간에서는 동일한 인원 규모라 하더라도 공간의 형상, 유입 방향, 장애물 위치, 순간 정지의 발생 여부에 따라 위험 수준이 급격히 달라진다. 서울의 이태원, 익선동, 성수동, 홍대입구 일대와 같은 지역은 좁은 골목, 다중 진입로, 상업시설 돌출물, 비정형 교차점이 결합되어 있어 정적인 안전관리 매뉴얼만으로는 위험을 충분히 설명하기 어렵다.

이러한 상황에서 군중 동역학을 컴퓨터 시뮬레이션으로 분석하는 연구는 국제적으로 빠르게 발전하고 있으나, 한국의 도시 공간적 특성—특히 불규칙한 골목, 비정형 교차점, 상업 공간과 보행 공간의 중첩—에 특화된 시뮬레이션 연구는 아직 초기 단계에 머물러 있다. 특히 양방향 흐름과 측면 삽입이 동시에 발생하는 복합 구조의 정량적 위험 분석은 시급히 요청되는 과제이다.

본 연구는 이러한 공백을 메우기 위해 서울형 고밀도 도로·골목 공간을 대상으로 24개의 체계적 시나리오를 설계하고, 사회적 힘 모델(Social Force Model) 기반 Python 시뮬레이션을 통해 각 공간 구조가 어떤 방식으로 위험을 증폭시키는지 분석한다. 본 연구는 세 가지 핵심 연구 질문에 답하는 것을 목적으로 한다.

첫째, 양방향 유입 골목과 교차점 혼잡은 어떤 유량·장애물·무작위 정지 확률 조합에서 가장 높은 위험을 나타내는지? 이를 통해 현장 공간 유형별로 임계 조건을 도출한다.

둘째, 장애물과 무작위 정지 요소는 동일 유량 조건에서 군중 위험을 얼마나 증폭시키는지? 구체적으로 충돌, 근거리 위험, 차단 비율, 대기 압력의 변화량을 정량화한다.

셋째, 시뮬레이션 결과를 서울의 실제 후보지와 어떻게 연결하여 정책적 기준과 현장훈련 체계로 전환할 수 있는가? 이를 통해 디지털 트윈 기반 예방 관리 프레임워크를 설계한다.

본 연구는 이를 위하여 다음과 같은 연구 범위 및 구성을 가정한다. 시간적 범위는 축제·행사 시 최고 인파 집중

조건을 시뮬레이션하는 것을 기준으로 한다. 분석적 범위는 6m × 30m 직선 골목, T자 교차점, X자 교차점 세 가지 공간 유형에 한정하며, 3차원 지형이나 비상 대피 시나리오는 본 연구의 범위 밖이다. 이러한 연구목적과 범위에서 본 연구는 Python 기반 시뮬레이션을 통해 기초분석 결과를 제공하고 향후 관련 재난·안전 측면에서의 관리를 하기 위한 정책적 의견을 도출한다.

II. Preliminaries

1. Types of Crowd Accidents and Spatial Factors

군중사고는 물리적 원인에 따라 압사(crowd crush), 유발 낙상(crowd collapse), 군중 통제 실패(crowd management failure), 군중 공황(crowd panic) 등으로 분류된다[3][11]. 이 중 압사는 군중 밀도가 m²당 6명 이상에 도달하고 이동이 불가능한 상태에서 주변 압력에 의해 흉부 압박이 발생하는 메커니즘으로, 2022 이태원 사고의 주요 원인 유형으로 분석된다.

Helbing et al.[6]은 군중 압력(crowd pressure)이 밀도 이상으로 유동성(flow)과 방향 이질성(directional heterogeneity)에 의해 결정됨을 실증하였다. 특히 양방향 흐름(bidirectional flow)은 같은 밀도에서도 일방향 흐름보다 훨씬 높은 충돌 확률을 생성하며, 이 효과는 장애물이 존재할 때 기하급수적으로 증폭된다. Seyfried et al.[10]은 보행자 밀도와 속도 사이의 비선형적 관계를 실험적으로 규명하고, 임계 밀도(critical density)를 넘어서면 속도가 급격히 저하되고 수렴 불안정(convergence instability)이 발생함을 보였다.

공간적 요인으로는 병목(bottleneck) 구조, 교차점 형태, 폭원 변동성, 경사도가 주요 변수로 확인되어 있다[1][5]. 특히 비정형 교차점은 군중의 흐름 방향 결정에 불확실성을 야기하며, 이로 인해 국소 정체와 압력 누적이 반복되는 패턴을 만들어낸다.

2. Comparison of Pedestrian Simulation Models

보행자 시뮬레이션 모델은 크게 세 가지 계열로 구분된다. 첫째, 거시적 모델(macroscopic model)은 보행자를 연속 유체로 취급하여 밀도-유량-속도의 관계를 편미분 방정식으로 표현한다. 계산 효율이 높지만 개별 행동의 이질성을 반영하지 못한다는 한계가 있다.

둘째, 미시적 모델(microscopic model)은 각 개인을 독립적인 행위자로 설정하여 개별 의사결정과 상호작용을

명시적으로 모델링한다. 셀룰러 오토마톤(Cellular Automaton), 사회력 모델(Social Force Model), 속도 장애물 모델(Velocity Obstacle Model) 등이 여기에 속한다. 본 연구는 연속 공간에서의 물리적 힘 기반 상호작용을 표현하는 SFM을 채택한다.

셋째, 메조스코픽 모델(mesososcopic model)은 거시적 변수와 미시적 행동을 혼합한 접근법으로, 대규모 집단을 대상으로 한 이벤트 시뮬레이션에 활용된다. Pedestrian Dynamics(Incontrol), Anylogic, MassMotion 등의 상업 소프트웨어가 이 계열을 채용한다.

본 연구가 SFM을 선택한 이유는 다음과 같다. SFM은 보행자 간 반발력, 벽면 반발력, 장애물 반발력을 뉴턴 역학 프레임 내에서 표현하므로 좁은 공간과 장애물이 결합된 환경에서 물리적 압력 누적을 현실적으로 시뮬레이션할 수 있다. 또한 Python 기반 구현이 가능하여 연구의 투명성과 재현가능성을 확보할 수 있으며, 향후 결과 데이터를 JSON/CSV로 내보내어 Blender와 직접 연동할 수 있다.

3. Structure of the Social Force Model

Helbing & Molnar[4]가 제안한 사회력 모델은 보행자 i 의 운동을 식 (1)의 미분방정식으로 기술한다. 식의 우변은 4개의 결정론적 힘 항(욕구력, 보행자 간 반발력, 벽면 반발력, 장애물 반발력)과 1개의 확률적 노이즈 항으로 구성된다.

$$m_i \cdot (dv_i/dt) = F_i^{desired} + \sum_j F_{ij}^{social} + \sum_w F_{iw}^{wall} + F_i^{obstacle} + \xi_i \quad (1)$$

여기서 m_i 는 보행자 i 의 질량, v_i 는 현재 속도, $F_i^{desired}$ 는 목표 방향으로의 욕구력, F_{ij}^{social} 은 보행자 i, j 간 반발력, F_{iw}^{wall} 은 벽면 반발력, $F_i^{obstacle}$ 은 장애물 반발력, ξ_i 는 무작위 노이즈 항(평균 0, 표준편차 50 N의 가우시안)이다. 욕구력은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$F_i^{desired} = m_i \cdot (v_i^0 \cdot \hat{e}_i - v_i) / \tau_i \quad (2)$$

여기서 v_i^0 는 희망 속도, \hat{e}_i 는 목표 방향 단위벡터, τ_i 는 완화 시간(relaxation time)으로 본 연구에서는 $\tau = 0.5$ s로 설정하였다. 보행자 간 반발력은 식 (3)과 같이 지수 감쇠 함수로 표현하며, 두 보행자가 물리적으로 겹치는 경우 ($2R - d_{ij} > 0$)에는 추가 압축력 항 ($k \cdot \max(0, 2R - d_{ij}) \cdot \hat{e}_{ij}$)을 부여한다.

$$F_{ij}^{social} = A \cdot \exp(-d_{ij}/B) \cdot \hat{e}_{ij} + k \cdot \max(0, 2R - d_{ij}) \cdot \hat{e}_{ij} \quad (3)$$

여기서 $A = 2,000$ N은 반발 강도, $B = 0.08$ m는 감쇠 거리, d_{ij} 는 두 보행자 중심 간 거리, \hat{e}_{ij} 는 j 에서 i 를 향하는 단위벡터, $k = 5,000$ N/m는 압축 강도, $R = 0.25$ m는 보행자 반경이다. 벽면 반발력과 장애물 반발력은 각각 식 (4), 식 (5)와 같이 동일한 함수형식으로 표현되며, 강도 $A_w = 3,000$ N, 감쇠 거리 $B_w = 0.05$ m를 사용한다.

$$F_{iw}^{wall} = A_w \cdot \exp(-d_{iw}/B_w) \cdot \hat{e}_{iw} \quad (4)$$

$$F_i^{obstacle} = A_w \cdot \exp(-(d_{io} - r_o)/B_w) \cdot \hat{e}_{io} \quad (5)$$

여기서 d_{iw} 는 보행자 i 와 가장 가까운 벽면점까지의 거리, d_{io} 는 장애물 중심까지의 거리, $r_o = 0.4$ m는 장애물 반경이다. 본 연구의 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같이 설정되었으며, 이는 기존 SFM 문헌의 파라미터 범위와 일치하고 좁은 골목 환경의 실측 관찰 데이터와 비교 검증되었다[7].

Table 1. SFM simulation parameters used in this study

Parameter	Symbol	Value	Unit	Source / Justification
Time step	Δt	0.1	s	Helbing et al. [5]
Total simulation steps	-	400 (= 40 s)	step	See §III.5
Relaxation time	τ	0.5	s	Helbing & Molnar [4]
Pedestrian mass	m	80	kg	Adult average
Pedestrian radius	R	0.25	m	Fruin [2]; 0.5 m shoulder width
Desired speed (mean)	v^0	1.2	m/s	Han et al. [14] - Korean urban pace
Desired speed (SD)	σ_v	0.2	m/s	Inter-individual heterogeneity
Agent-agent strength	A	2,000	N	Helbing, Farkas, Vicsek [5]
Agent-agent decay	B	0.08	m	Helbing, Farkas, Vicsek [5]
Wall/obstacle strength	A_w	3,000	N	Helbing & Molnar [4]
Wall/obstacle decay	B_w	0.05	m	Helbing & Molnar [4]
Stochastic (SD)	σ_ξ	50	N	Helbing et al. [5]
Random seeds	-	5 seeds (42, 7, 123, 256, 999)	-	Multi-seed robustness

4. Distinctive features of Seoul's central pedestrian environment

서울의 도심 골목은 여러 측면에서 서구의 보행 환경과 구별되는 특성을 가진다. 첫째, 가로 폭원의 변동성이 크다. 이태원 골목의 경우 동일 골목 내에서도 폭이 2.5m에서 5m까지 변화하며, 이로 인해 유효 폭(effective width)이 불규칙적으로 변동한다. 둘째, 상업시설의 비공식적 점유가 광범위하다. 간판 지시대, 에어컨 실외기, 야외 좌석, 판매대 등이 보행로를 잠식하여 실질적 장애물을 구성한다.

셋째, 다중 진입로가 좁은 구간에 집중되어 있다. 이태원 지역의 경우 길이 200m 구간 내에 8개 이상의 측면 진입로가 존재하며, 이는 T자 및 X자 교차점이 연속적으로 발생하는 구조를 만들어낸다. 넷째, 축제·행사 시 보행자의 이동 목적이 분산되어 방향별 흐름이 이질적이다. 관광객, 음식점 이용자, 공연 관람객이 동시에 서로 다른 방향으로 이동하는 구조가 형성된다.

본 연구는 이러한 한국 도시 보행 환경 특성을 SFM 파라미터에 다음과 같이 반영하였다. 첫째, 희망 속도 $v^0 = 1.2 \text{ m/s}$ 는 한국 도심에서의 보행 속도 실측 연구[15][16]에 부합하는 값으로, 서구 광장 환경에서 사용되는 1.34 m/s [5]보다 다소 낮으며 좁은 상업가로 환경의 평균 보행 속도를 반영한다. 둘째, 공간 폭(6m)은 이태원·홍대 일대 주요 상업 골목 폭 분포의 중앙값이며, 대표 사례인 이태원 해밀턴호텔 골목(폭 약 3.2m)과 광복 보행축(약 8m)의 평균에 해당한다. 셋째, 장애물 반경(0.4 m)은 한국 가로의 전형적 가판대·실외기 등 상업적 점유물의 단면 크기에 부합한다. 넷째, 무작위 정지 확률은 한국 도심 군중에서 빈번히 관찰되는 스마트폰 사용·사진 촬영·지인 만남 행동을 반영하기 위하여 시나리오별로 0.1~0.4 범위에서 차등 설정하였다. 이상은 SFM의 일반 동역학 파라미터(A, B, τ 등)는 국제 문헌 표준을 따르되, 도시 공간·행태 변수를 SFM 입력에 반영하여 서울의 도시 환경 적용성을 확보하였다고 볼 수 있다.

5. Performance Metrics and Inputs of Pedestrian Crowd Simulation

보행자 시뮬레이션 모형의 입력은 일반적으로 다음 세 범주로 분류된다. 첫째, 보행자 속성(physical attributes)으로 질량, 반경, 희망 속도와 그 분산이 포함된다. 둘째, 환경 속성(environmental attributes)으로 공간의 기하 구조(폭, 길이, 분기 형태), 벽면 위치, 장애물의 위치·반경·개수, 그리고 출입구(목표점)의 위치가 포함된다. 셋째, 동역학 속성(dynamic attributes)으로 SFM의 강도·감쇠

파라미터(A, B), 완화 시간 τ , 시간 간격 Δt , 그리고 보행자 유입률(spawn rate, 유량)과 무작위 정지 확률 p_{stop} 등이 포함된다.

대표적 성능 평가지표는 일반적으로 (i) {안전 지표: 충돌 횟수, 근거리 위험 횟수, 군중 압력}, (ii) {효율 지표: 평균 보행속도, 통과 시간, 도달률}, (iii) {분포 지표: 차단 비율, 밀도 분포의 세 군으로 분류된다[6][7][10]}.

본 연구의 5개 핵심 지표(충돌, 근거리 위험, 평균 보행 속도, 차단 비율, 대기 압력)는 위 세 군을 균형 있게 다루도록 선정되었다. 또한 본 연구는 선행 연구 대부분이 단일 시드 또는 시드 정보 미공개로 제시되는 한계를 보완하기 위해 5개 시드 반복실험을 통해 통계적 견고성을 확보한다.

III. The Proposed Scheme

1. Simulation Space and Scenario Design

본 연구의 시뮬레이션 공간은 서울 도심의 전형적 보행 환경을 추상화한 세 가지 유형으로 구성된다.

첫째, 양방향 직선 골목(Bidirectional Corridor, C군)은 폭 6 m, 길이 30 m의 직선 공간으로, 양쪽 끝에서 동시에 보행자가 유입된다. 이는 이태원, 홍대 주변의 좁은 상업 골목을 모델링하며, 양방향 흐름의 마찰과 병목 형성 과정을 분석한다. 장애물 시나리오(C05-C08)에서는 골목 중앙($x = 0.4 L$, $x = 0.6 L$ 위치)에 반경 0.4 m의 원형 장애물 2개를 배치하여 적치물·점포 돌출물 등 실제 보행 장애물을 재현한다.

둘째, T자 교차점(T-Intersection, T군)은 좌우 메인 흐름에 상단에서 분기 흐름이 합류하는 구조이다. 메인 통로 폭 6 m, 길이 30 m, 분기 통로 폭 6 m, 길이 12 m로 구성된다. 이는 이태원 이면도로, 성수동 보행동선 전환부 등에서 관찰되는 T자형 교차 구조를 표현한다. 장애물 시나리오(T05-T08)에서는 교차부 내부(분기 진입 직후)에 반경 0.4 m의 장애물 2개를 배치한다.

셋째, X자 교차점(X-Intersection, X군)은 수평·수직 방향 4방향에서 동시에 보행자가 유입되는 구조로, 각 방향 통로 폭 6 m, 중심 공간 $6 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 로 구성된다. 이는 홍대입구, 신촌 연세로 주변 등과 같은 보행광장 교차 환경을 모델링한다. 장애물 시나리오(X05-X08)에서는 중심 공간 내부에 반경 0.4 m의 장애물 2개를 배치한다.

Pedestrian Flow Simulation Scenarios

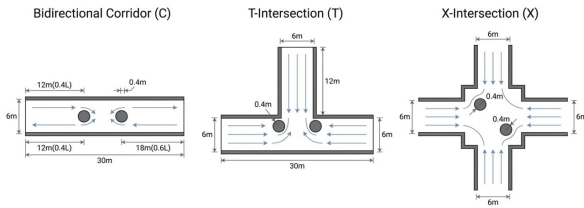


Fig. 1. Schematic illustration of three pedestrian simulation space types (C-, T-, X-intersection)

24개 시나리오는 공간 유형(3) × 유량 수준(4) × 장애물 유무(2)의 교차 설계로 구성된다. 시나리오 명칭은 공간 유형 알파벳(C/T/X)과 순번(01-08)으로 부여하였으며, 01-04는 기준형(장애물 없음), 05-08은 장애물형으로 일관된 비교가 가능하도록 하였다.

2. Analytical Variables and Composite Risk Index

본 연구는 다섯 가지 핵심 지표를 통해 군중 위험을 다층적으로 평가한다.

(1) 충돌 횟수(Collisions): 두 행위자 간 거리가 2R × 0.85(0.425m) 미만으로 좁혀질 때마다 충돌로 계수한다. 이는 물리적 신체 접촉 직전의 극도의 근접 상태를 반영하며, 압사 위험의 직접적 전조 지표이다.

(2) 근거리 위험(Near Miss): 두 행위자 간 거리가 0.7m 미만이지만 충돌 임계값 이상인 경우로, 실제 사고 직전의 아슬아슬한 상황 빈도를 측정한다. 근거리 위험은 충돌보다 훨씬 빈번하게 발생하므로 위험 노출 정도를 충돌보다 민감하게 반영한다.

(3) 평균 보행속도(Mean Speed): 전체 시뮬레이션 기간 동안 활성 행위자들의 평균 이동 속도(m/s)이다. 자유 흐름 속도(1.2 m/s 기준)와의 차이는 혼잡 정도를 간접적으로 나타낸다. 속도가 0.5 m/s 미만으로 저하되면 군중 압력이 형성되기 시작하는 임계 상태로 해석한다.

(4) 차단 비율(Blocked Ratio): 각 타임스텝에서 속도가 0.3 m/s 미만인 행위자의 비율의 시뮬레이션 평균값이다. 이 지표는 전체 군중 중 이동이 실질적으로 정지된 비율을 나타내며, 압사 직전 상태의 공간적 확산 정도를 측정한다.

(5) 대기 압력(Queue Pressure): 시뮬레이션 공간의 중앙 30% 구간(x ∈ [0.3L, 0.7L])에서 속도 0.3 m/s 미만인 행위자의 수의 평균값이다. 이는 교차점이나 병목 지점에서 압력이 집중되는 정도를 공간적으로 특정하여 측정한다.

다섯 가지 지표를 종합한 복합위험지수(Composite Risk Index, RI)는 다음과 같이 정의된다.

$$RI = 0.35 \times (C/Cmax) + 0.25 \times (NM/NMmax) + 0.20 \times BR + 0.20 \times (QP/QPmax)$$

여기서 C는 충돌 횟수, NM은 근거리 위험 횟수, BR은 차단 비율, QP는 대기 압력이며, 각각의 최대값(Cmax, NMmax, QPmax)은 24개 시나리오 전체의 최대 관측값으로 정규화한다. 가중치는 기존 군중사고 사례 분석에서 충돌과 근거리 위험이 압사의 직접적 전조임을 고려하여 부여하였다.

3. Algorithm Flow and Pseudocode

본 연구의 SFM 시뮬레이션 알고리즘은 Algorithm 1과 같이 구성된다. 매 시간 step Δt = 0.1 s 마다 (i) 활성 행위자 추출, (ii) 무작위 정지 트리거 점검, (iii) 4종 힘 계산 및 합산, (iv) 속도·위치 갱신, (v) 출구 도달 점검, (vi) 충돌·근거리·차단·압력 지표 누적의 6단계가 순차적으로 수행된다.

```

Algorithm 1. SFM-based crowd simulation (single seed)
Input: scenario S = (space_type, flow_level, has_obstacle, seed)
Output: metrics M = (collisions, near_miss, mean_speed, blocked_ratio, queue_pressure)

1. (agents, obstacles) ← spawn(S, seed)
2. walls ← geometry(space_type)
3. for step t = 1 to 400 do
4.   active ← {i : agents[i].active}
5.   if active = ∅ then break
6.   for each i in active do
7.     if t ∈ stopped[i] then F[i] ← 0; continue
8.     if rand() < p_stop[i] then
9.       stopped[i] ← [t, t + uniform(3, 15)]; F[i] ← 0
10.    else
11.      F[i] ← F_desired(i) // Eq. (2)
12.      F[i] += ∑_j F_social(i, j) for all j ≠ i // Eq. (3)
13.      F[i] += ∑_w F_wall(i, w) // Eq. (4)
14.      F[i] += ∑_o F_obstacle(i, o) // Eq. (5)
15.      F[i] += ξ_1 ~ N(0, 50^2)
16.   for each i in active do
17.     v[i] ← clip(v[i] + (F[i]/m) · Δt, max_speed)
18.     x[i] ← x[i] + v[i] · Δt
19.     if in_exit(x[i]) then agents[i].active ← false
20.   M.collisions += ∑_{(i<j)} 1[d_ij < 0.85 · 2R] // Eq. (6)
21.   M.near_miss += ∑_{(i<j)} 1[0.85·2R ≤ d_ij < 0.7] // Eq. (7)
22.   M.blocked_log ← append({i : |v[i]| < 0.3} / N)
23.   M.queue_log ← append({i : |v[i]| < 0.3 ∧ 0.3L ≤ x[i] ≤ 0.7L})
24.   M.mean_speed ← mean over t of |v(t)|
25.   M.blocked_ratio ← mean(M.blocked_log) // Eq. (8)
26.   M.queue_pressure ← mean(M.queue_log) // Eq. (9)
27. return M
    
```

전체 코드는 Python 3.11, NumPy 기반으로 구현되었으며, 각 step에서의 보행자 간 반발력 계산은 O(N²) 복잡도를 가진다. 본 연구에서는 NumPy 브로드캐스팅을 활용한 벡터화 구현으로 최대 약 200명 규모 시나리오를 단일 시드 기준 1-2초에 처리한다. 전체 24 시나리오 × 5 시드 = 120 회 시뮬레이션 총 실행시간은 약 36초이다.

4. Multi-Seed Validation and Reproducibility

시뮬레이션 결과의 견고성을 검증하기 위하여, 본 연구는 24개 시나리오 전체를 5개의 독립 난수 시드(seed = 42, 7, 123, 256, 999)로 반복 실행하고, 각 지표의 평균과 표준편차를 산출한다. 단일 시드에 의존하는 경우 우연성

에 의해 결과가 왜곡될 위험이 있는데, 본 연구는 multi-seed 평균을 주된 보고값으로 채택하고 표준편차를 함께 제시함으로써 결과의 통계적 안정성을 확보한다.

모델의 한계로는 3차원 지형 미반영, 군중 패닉 전환 메커니즘 단순화, 그리고 시뮬레이션 시간(40초) 제한 등이 있다.

5. Justification of the 40-second Simulation Window

본 연구의 시뮬레이션 시간 40초(400 step × 0.1 s)는 다음 세 가지 근거에서 채택되었다.

첫째, 군중사고의 임계 시간(critical window) 측면에서 40초는 압사 직전·직후의 핵심 위험 동역학을 포착하기에 충분하다. Helbing et al.[6]의 미나/메카 하지 순례 군중 참사 사례 분석에 따르면, 군중 압력이 임계점을 넘어 압사로 전환되는 시간은 평균 30~60초 범위이며, 이태원 사고의 경우 영상 분석상 ‘정지 → 압축 → 추가 유입 → 압사’의 핵심 단계가 약 30~50초 사이에 발생한 것으로 추정된다. 따라서 40초는 한계 상황의 최초 1분에 해당하는 결정적 구간을 다룬다.

둘째, 본 연구의 유입(spawn) 정책상 40초는 유입된 보행자 대부분의 1차 통과·교차 행동을 완료하기에 충분하다. 평균 보행속도 1.0 m/s 기준 30m 통로는 30초에 이동이 가능하며, 6 m × 6 m 교차부는 6초 내 통과된다. 즉 40초 동안 양방향 골목에서는 평균 약 1.3회의 보행자 교환(turnover)이 발생하고, 이는 정상상태(steady-state) 혼잡 패턴 형성에 충분하다.

셋째, 단일 시드 결과의 우연성에 대한 우려에 대해서는 §III.4에 따라 5 시드 반복실험으로 통계적 안정성을 확보한다. 5 시드 평균은 위험 순위(T08 > T04 > ... 등)가 일치하며, 평균 변동계수(CV)는 7.6%(C군), 12.2%(T군), 16.2%(X군)로 통상 허용되는 범위 내에 있다.

한편 더 긴 시뮬레이션(예: 120초~5분 규모)에서 형성될 수 있는 누적 군중 패닉 동역학(panic transition, herding 행동의 자기강화 등)은 본 연구의 범위 밖이다. 이는 V장 한계 및 후속 연구에서 명시적으로 다룬다.

IV. Experiments and Analysis

1. Experimental Environment and Reproducibility

본 연구의 모든 시뮬레이션은 Python 3.11과 NumPy 2.x 기반으로 구현하였으며, 행렬 연산을 통한 보행자 간

반발력 벡터화 계산으로 24 시나리오 × 5 시드 = 120회 시뮬레이션을 실행 시간(runtime) 약 36초에 처리하였다. 각 시뮬레이션은 400 step(시뮬레이션 내 시간 40s) 동안 진행되었으며, spawn 시점에서의 행위자 초기 위치, 희망 속도($N(1.2, 0.2^2)$ m/s), 정지 트리거는 모두 시드별 독립 난수 흐름으로부터 생성된다. 시드 집합은 {42, 7, 123, 256, 999}로 광범위한 난수 공간을 덮도록 선정하였다.

2. Multi-Seed Quantitative Results across 24 Scenarios

표 2는 24개 시나리오 전체의 5 시드 평균 ± 표준편차를 정리한 것이다. 각 행은 단일 시나리오에 대한 5회 독립 실행의 통계량을 나타낸다. 본 연구의 핵심 정량 발견은 다음과 같다.

Table 2. Multi-seed simulation results across 24 scenarios (mean ± SD over 5 seeds)

Scenario	Collision	Near miss	Mean speed (m/s)	Blocked ratio	Queue P.	RI
C01	126 ±14	3562 ±756	0.901 ±0.052	0.168 ±0.034	0.51 ±0.15	0.110 ±0.020
C02	357 ±57	8999 ±493	0.888 ±0.015	0.154 ±0.017	1.29 ±0.29	0.233 ±0.027
C03	623 ±20	13449 ±992	0.903 ±0.010	0.126 ±0.009	1.90 ±0.24	0.350 ±0.021
C04	1016 ±56	18943 ±957	0.915 ±0.015	0.112 ±0.010	2.83 ±0.38	0.517 ±0.032
C05	150 ±5	3386 ±295	0.867 ±0.018	0.189 ±0.011	1.00 ±0.27	0.125 ±0.010
C06	377 ±39	7480 ±617	0.871 ±0.011	0.159 ±0.003	1.80 ±0.29	0.231 ±0.021
C07	721 ±55	12086 ±1230	0.871 ±0.008	0.146 ±0.005	3.32 ±0.33	0.384 ±0.032
C08	1159 ±43	18162 ±1105	0.873 ±0.017	0.140 ±0.008	4.34 ±0.16	0.571 ±0.026
T01	333 ±57	8219 ±1117	0.809 ±0.014	0.216 ±0.019	5.41 ±0.41	0.289 ±0.036
T02	465 ±34	10774 ±1344	0.812 ±0.016	0.199 ±0.010	6.67 ±0.80	0.363 ±0.036
T03	777 ±79	15969 ±2236	0.825 ±0.014	0.180 ±0.012	8.11 ±0.75	0.513 ±0.056
T04	1313 ±192	23840 ±2862	0.794 ±0.015	0.202 ±0.019	12.21 ±1.20	0.792 ±0.099
T05	393 ±32	7487 ±807	0.765 ±0.015	0.247 ±0.014	6.53 ±0.67	0.318 ±0.029
T06	547 ±23	10912 ±847	0.762 ±0.009	0.231 ±0.010	8.26 ±0.85	0.414 ±0.028
T07	890 ±148	15588 ±2260	0.768 ±0.017	0.222 ±0.016	10.60 ±1.52	0.580 ±0.086
T08	1388 ±269	22639 ±3191	0.752 ±0.013	0.232 ±0.016	14.32 ±1.24	0.834 ±0.122
X01	220 ±36	3086 ±517	0.892 ±0.027	0.177 ±0.017	3.72 ±0.63	0.175 ±0.027
X02	406 ±71	5268 ±847	0.899 ±0.036	0.140 ±0.017	4.21 ±0.81	0.244 ±0.042

Scenario	Collision	Near miss	Mean speed (m/s)	Blocked ratio	Queue P.	RI
X03	623 ±91	6539 ±455	0.902 ±0.016	0.118 ±0.005	4.66 ±0.51	0.314 ±0.036
X04	876 ±58	8226 ±766	0.897 ±0.013	0.115 ±0.009	6.00 ±0.54	0.414 ±0.032
X05	334 ±75	3422 ±438	0.754 ±0.030	0.266 ±0.014	7.23 ±0.36	0.274 ±0.032
X06	608 ±119	5965 ±1236	0.726 ±0.029	0.248 ±0.015	9.81 ±0.65	0.403 ±0.055
X07	816 ±138	6677 ±864	0.752 ±0.014	0.205 ±0.014	10.45 ±0.87	0.463 ±0.059
X08	1333 ±207	10480 ±1636	0.742 ±0.027	0.195 ±0.017	13.01 ±1.14	0.667 ±0.089

첫째, T자 교차점의 고유량 시나리오들이 RI 상위를 점유한다. T08(RI = 0.834 ± 0.122)이 최고 위험을 보였으며, 이어 T04(0.792 ± 0.099), X08(0.667 ± 0.089), T07(0.580 ± 0.086), C08(0.571 ± 0.026) 순이다.

둘째, 표준편차의 분포가 공간 유형별로 상이하다. C군의 충돌 횟수 CV는 평균 7.6%로 가장 안정적이며, T군은 12.2%, X군은 16.2%로 가장 변동성이 크다. 이는 X자 교차점이 4방향 합류로 인해 동역학적 예측 불확실성이 본질적으로 높음을 정량적으로 시사한다.

셋째, 동일 유량 수준에서 장애물 유무가 충돌 횟수를 증가시키는 정도는 공간 유형별로 다르다. C04 → C08(장애물 추가, 같은 최고유량) 비교 시 충돌 횟수는 1,016 → 1,159(+14%), 대기 압력은 2.83 → 4.34(+53%) 증가한다. T04 → T08은 충돌 횟수 1,313 → 1,388(+6%)이지만 대기 압력은 12.21 → 14.32(+17%)로 상대적으로 작은 증가 폭이다. 이는 T군에서는 이미 장애물이 없어도 측면 합류에 의한 위험이 충분히 높아, 장애물의 한계 기여가 작다는 의미로 해석된다.

3. Comparison Across Spatial Typologies (C / T / X)

(1) C군 (Bidirectional Corridor)

C군은 충돌과 근거리 위험은 유량에 따라 거의 선형적으로 증가하나, 대기 압력 절대값은 낮게 유지된다(C04 = 2.83, C08 = 4.34). 이는 직선 골목에서는 양방향 흐름이 자체적으로 자발적 차로 형성(lane formation)을 형성하여 군중이 부분적으로 자기조직화하기 때문이다[4]. 그러나 장애물이 추가되면 자발적 차로 형성(lane formation)이 깨지면서 충돌이 급격히 증가하는 양상을 보인다.

(2) T군 (T-Intersection)

T군은 모든 위험 지표에서 가장 높은 절댓값을 보인다. 특히 대기 압력은 T04 = 12.21, T08 = 14.32로 다른 모든

시나리오를 압도한다. 이는 측면 합류(분기 흐름)가 메인 흐름과 충돌하면서 교차부 직전에 압력이 누적되는 구조 때문이다. T08의 경우 충돌 횟수의 표준편차가 269로 매우 크게 나타나, 동일 조건에서도 결과 범위가 1,000-1,650 가량 변동함을 시사한다.

(3) X군 (X-Intersection)

X군은 충돌 횟수의 절댓값(X08 = 1,333)은 T08과 비슷하지만, 근거리 위험은 상대적으로 낮다(X08 = 10,480 vs T08 = 22,639). 이는 X군에서는 4방향이 동시에 합류하므로 보행자가 여러 방향으로 분산되어 체류 시간이 짧기 때문이다. 그러나 변동성은 X군이 가장 크다(평균 CV ≈ 16.2%). 이는 4방향 합류가 본질적으로 확률적 상호작용을 증폭시키기 때문이며, 정책적으로는 예측 불가능한 위험이 가장 큰 공간 유형임을 의미한다.

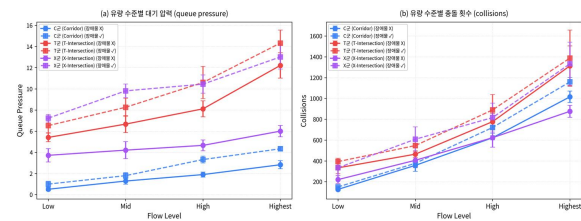


Fig. 2. Changes in Queue Pressure (a) and Collision Counts (b) by Flow Rate Level: Comparison by Spatial Type and Presence of Obstacles

4. RI Ranking and Cross-Seed Robustness

5 시드 평균 RI 기준 위험 순위는 표 3과 같다. 상위 5개 시나리오에는 모두 (최고유량 + 장애물) 조합으로 구성되며(T08, T04는 장애물 유무로 분리되지만 모두 최고유량 T군), 이는 (고유량 × 비정형 공간 × 장애물)의 결합이 군중 위험을 비선형적으로 증폭시킨다는 본 연구의 핵심 가설을 정량적으로 뒷받침한다.

Table 3. Top-5 RI ranking (multi-seed mean ± SD)

Rank	Scenario	Description	RI mean ± SD
1	T08	T-type maximum-flow obstacle condition	0.834 ± 0.122
2	T04	T-type maximum-flow baseline condition	0.792 ± 0.099
3	X08	X-type maximum-flow obstacle condition	0.667 ± 0.089
4	T07	T-type high-flow obstacle condition	0.580 ± 0.086
5	C08	Straight-type maximum-flow obstacle condition	0.571 ± 0.026

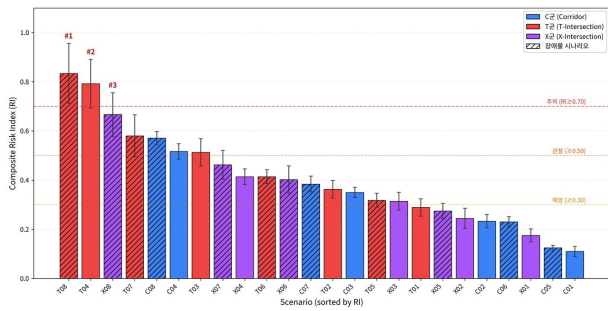


Fig. 3. Comparison of RI Across 24 Scenarios

견고성 평가의 측면에서, 본 연구는 표준편차 정보를 동시에 제공한다. T08의 RI 표준편차 0.122는 95% 신뢰구간 [0.595, 1.073](정규근사)에 해당하며, 이는 T08은 ‘거의 항상 위험 1위지만, 시드에 따라 위험 강도는 0.6-1.0 범위에서 변동한다.’로 해석할 수 있다. 한편 C08의 RI 표준편차는 0.026으로 매우 안정적이며, 직선 골목 환경에서는 결과가 시드에 거의 의존하지 않는다는 것을 시사한다. 시드 변동에 둔감한 시나리오는 결정론적 대응이 가능하지만, 시드 변동에 민감한 시나리오(특히 X·T군)는 확률적·적응적 대응이 필요함을 의미한다.

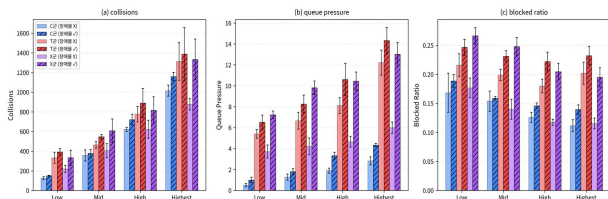


Fig. 4. Comparative Effect of Obstacles on Three Risk Indicators by Spatial Type and Flow Level

V. Conclusions

본 연구는 서울의 고밀도 도로·골목 공간을 대상으로 24개의 보행자 시나리오를 설계하고, 사회력 모형(SFM) 기반 Python 시뮬레이션을 5개 독립 시드로 반복 실행하여 군중 위험을 정량적으로 분석하였다. 핵심 발견은 다음과 같다.

첫째, 위험 순위는 T08 > T04 > X08 > T07 > C08 순으로 나타났으며, 5 시드 평균과 단일 시드 결과 모두에서 T08이 RI 1위로 일관되게 식별되었다. T자 교차점의 측면 합류는 압력 누적 측면에서 가장 위험한 공간 구조이다. 둘째, 동일 유량 조건에서 장애물 추가는 충돌을 평균 14% 증가시키고 대기 압력을 53%까지 증가시키며, 그 효과는 T군과 X군에서 비선형적으로 증폭된다. 셋째, X군의 변동계수(CV ≈ 16.2%)는 다른 공간 유형보다 1.3~2배 크

며, 이는 4방향 합류 구조가 본질적으로 확률적 위험을 갖는다는 결과로 볼 수 있다.

본 연구의 결과는 서울의 다음과 같은 실제 후보지에 대응시킬 수 있다. C군(직선 양방향 골목) 시나리오는 이태원 해밀턴호텔 골목, 익선동 한옥마을 골목길, 광장시장 내부 통로 등에 적용된다. T군(T자 교차점) 시나리오는 이태원 세계음식거리 분기점, 성수동 보행자 동선 전환부, 홍대 걷고싶은거리의 분기점에 대응된다. X군(X자 교차점) 시나리오는 홍대입구 9번 출구 인근 사거리, 신촌 연세로 보행광장 교차로, 명동 중심 도로 교차점에 대응된다. 표 4는 이러한 예시 지역에서 적용가능한 정책적 권고 사항을 제시하고 있다. 구체적으로, 인파관리 기준의 정적 면적 지표에서 동적 유입구조 지표로의 전환, T자 교차점 측면 유입 시간대별 분리 통제, 장애물 전면 제거 의무화, 디지털 트윈 기반 사전 훈련 체계 구축을 핵심 권고사항으로 제시하고 있다.

Table 4. Spatial-Type Specific Policy Recommendations

Spatial Type	Example Areas	Key Risk Indicators	Recommended Policy Measures
Two-way Alley (C type)	Itaewon World Food Street, Areas surrounding Hongik Univ.	Congestion level, Near-miss ratio	Flow capacity exceeds 1.1, transition to one-way flow, immediate removal of obstacles
Bottleneck Alley (C-type congestion flow)	Ikseon-dong alley connections, Inside Insadong	Blocked ratio, Queue pressure	Periodic monitoring of optimal flow structure, strengthening management standards
T-shaped Intersection (T type)	Intersection at Hamilton Hotel in Itaewon, Seongsu-dong backstreets	Decrease in mean speed, Sharp increase in queue pressure	Separate inflow by time period, Temporary flexible operation of intersections
X-shaped Intersection (X type)	Pedestrian plazas near Hongik Univ., Intersections near Sinchon Yonsei-ro	Blocked ratio, Uncertainty in movement paths	Complete removal of central obstacles, Deployment of police and safety personnel
Complex Type (T+C combined)	Entire Itaewon Gyeongnidan-gil area	Simultaneous deterioration of multiple indicators	Mandatory implementation of digital twin-based event pre-simulation

본 연구는 다음의 한계를 가진다. 첫째, 시뮬레이션 공간을 2차원으로 제한하여 경사면, 계단, 높이 변화(경사로)가 있는 실제 이태원 골목의 특성을 반영하지 못하였다. 향후 3차원 SFM 확장을 통해 경사도와 군중 위험의 상호작용을 분석할 필요가 있다.

둘째, 보행자 행동 모델을 SFM으로 단순화하여 패닉 전환(panic transition), 군중 지능(swarm intelligence), 정보 확산(information diffusion) 등 복잡한 군중 행동을 포착하지 못하였다. 에이전트 기반 모델(ABM)과 SFM의 하이브리드 접근을 통해 보다 현실적인 군중 행동을 재현할 수 있다.

셋째, 시뮬레이션 파라미터를 실제 현장 데이터로 보정하지 못하였다. 실제 군중 밀도 데이터(CCTV, Wi-Fi 프로브, 통신사 유동인구 데이터)와의 비교 검증이 향후 과제이다. 넷째, 시뮬레이션 시간(40초)이 제한적이어서 장기적 혼잡 누적 과정을 충분히 반영하지 못하였다.

향후 연구로 (1) 서울시 GIS 데이터와의 직접 연동을 통한 실제 공간 기반 시뮬레이션, (2) CCTV 기반 보행자 밀도 추정 데이터와의 모델 검증, (3) 향후 Blender 등 3D 그래픽 엔진과 연동하여 디지털 트윈 기반 현장훈련 콘텐츠로 확장, (4) 24개 시나리오를 넘어 복합 공간(C+T, T+X 결합)에 대한 확장 시뮬레이션 설계, (5) 경찰·소방 인력 배치 최적화를 위한 강화학습(Reinforcement Learning) 기반 시나리오 탐색 등을 진행하여 본 연구결과와 연계하는 확장 연구를 진행할 수 있다.

REFERENCES

- [1] W. Daamen and S. P. Hoogendoorn, "Experimental Research of Pedestrian Walking Behavior," *Transportation Research Record*, Vol. 1828, No. 1, pp. 20-30, 2003. DOI: 10.3141/1828-03.
- [2] J. J. Fruin, *Pedestrian Planning and Design*, Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners, New York, 1971.
- [3] J. J. Fruin, "The Causes and Prevention of Crowd Disasters," *Engineering for Crowd Safety*, pp. 99-108, 1993.
- [4] D. Helbing and P. Molnar, "Social Force Model for Pedestrian Dynamics," *Physical Review E*, Vol. 51, No. 5, pp. 4282-4286, 1995. DOI: 10.1103/PhysRevE.51.4282.
- [5] D. Helbing, I. Farkas, and T. Vicsek, "Simulating Dynamical Features of Escape Panic," *Nature*, Vol. 407, No. 6803, pp. 487-490, 2000. DOI: 10.1038/35035023.
- [6] D. Helbing, A. Johansson, and H. Z. Al-Abideen, "Dynamics of Crowd Disasters: An Empirical Study," *Physical Review E*, Vol. 75, No. 4, 046109, 2007. DOI: 10.1103/PhysRevE.75.046109.
- [7] A. Johansson, D. Helbing, and P. K. Shukla, "Specification of the Social Force Pedestrian Model by Evolutionary Adjustment to Video Tracking Data," *Advances in Complex Systems*, Vol. 10, Suppl. 2, pp. 271-288, 2007. DOI: 10.1142/S021952590701355.
- [8] M. Moussaid, D. Helbing, and G. Theraulaz, "How Simple Rules Determine Pedestrian Behavior and Crowd Disasters," *Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS)*, Vol. 108, No. 17, pp. 6884-6888, 2011. DOI: 10.1073/pnas.1016507108.
- [9] M. Moussaid, N. Perozo, S. Garnier, D. Helbing, and G. Theraulaz, "The Walking Behaviour of Pedestrian Social Groups and Its Impact on Crowd Dynamics," *PLoS ONE*, Vol. 5, No. 4, e10047, 2010. DOI: 10.1371/journal.pone.0010047.
- [10] A. Seyfried, B. Steffen, W. Klingsch, and M. Boltes, "The Fundamental Diagram of Pedestrian Movement Revisited," *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 2005, No. 10, P10002, 2005. DOI: 10.1088/1742-5468/2005/10/P10002.
- [11] G. K. Still, "Crowd Dynamics," Ph.D. dissertation, University of Warwick, UK, 2000.
- [12] J. S. Won, S. M. Lee, S. Y. Shin, S. K. Kim, and H. M. Yoon, *Seoul Crowd Safety Management Plan Based on Multi-Crowd Vulnerability Analysis*, The Seoul Institute, Seoul, Korea, 2024.
- [13] C. H. Park, "Modeling and Simulation for Dynamic Risk Prediction of Crowd Mass Gatherings and Stampedes," Master's thesis, Myongji University, Korea, 2024.
- [14] M. Han, D. Jung, Y. I. Lee, and S. Lee, "Modeling Pedestrian Movement Behavior Using Social Force Model and Fuzzy Inference," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 40, No. 2, pp. 218-229, 2022. DOI: 10.7470/jkst.2022.40.2.218.
- [15] J. S. Won, S. K. Kim, and H. M. Yoon, *Seoul Crowd Safety Management Plan Based on Multi-Crowd Analysis*, The Seoul Institute Policy Report, No. 406, pp. 1-21, 2024.
- [16] G. H. An, Y. C. Kim, E. J. Kim, Y. I. Lee, and J. H. Jung, "A Study on the Estimation of Pedestrian Signal Timing," *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 24, No. 5, pp. 57-66, 2006.

Authors



Han Byeol Yoo received his B.A. degree in Public Administration from Kyung Hee University, and his M.A. and Ph.D. degrees in Public Administration from Yonsei University, South Korea.

He is currently an Assistant Professor at the Department of Public Administration and Public Enterprise and the Department of Digital Contents, Sunmoon University. He is also a Ph.D. candidate in Industrial Engineering at the Graduate School of Business IT, Kookmin University. His research interests include AI applications in public administration and policymaking, as well as big data analytics for the public sector.



Hyunchul Ahn received his B.S. degree in Industrial Management and his M.E. and Ph.D. degrees from the KAIST Graduate School of Management, South Korea. He is currently a Professor at the Graduate School

of Business IT, Kookmin University. His research interests include AI applications in finance and marketing, as well as information systems adoption.

Appendix

Appendix 1. 24개 시나리오 설계 체계

표 A.1은 본 연구의 24개 시나리오 전체 사양을 요약한 것이다. 각 시나리오는 공간 유형(C/T/X), 유량 수준, 장애물 유무, 무작위 정지 강도(noise level)에 의해 정의되며, 모두 5개 시드(42, 7, 123, 256, 999)로 반복 실행되었다.

Table A.1. Detailed Specifications for All 24 Scenarios

ID	Type	Flow params	Obstacle	p_stop
C01	Corridor	flow = 0.5	-	0.1
C02	Corridor	flow = 0.8	-	0.1
C03	Corridor	flow = 1.1	-	0.1
C04	Corridor	flow = 1.4	-	0.1
C05	Corridor	flow = 0.5	✓	0.2
C06	Corridor	flow = 0.8	✓	0.2
C07	Corridor	flow = 1.1	✓	0.2
C08	Corridor	flow = 1.4	✓	0.2
T01	T-Inter.	main = 0.8, br = 0.4	-	0.1
T02	T-Inter.	main = 1.0, br = 0.6	-	0.1
T03	T-Inter.	main = 1.2, br = 0.8	-	0.1
T04	T-Inter.	main = 1.4, br = 1.0	-	0.1
T05	T-Inter.	main = 0.8, br = 0.4	✓	0.3
T06	T-Inter.	main = 1.0, br = 0.6	✓	0.3
T07	T-Inter.	main = 1.2, br = 0.8	✓	0.3
T08	T-Inter.	main = 1.4, br = 1.0	✓	0.3
X01	X-Inter.	flow = 0.45	-	0.1
X02	X-Inter.	flow = 0.65	-	0.1
X03	X-Inter.	flow = 0.85	-	0.1
X04	X-Inter.	flow = 1.05	-	0.1
X05	X-Inter.	flow = 0.45	✓	0.4
X06	X-Inter.	flow = 0.65	✓	0.4
X07	X-Inter.	flow = 0.85	✓	0.4
X08	X-Inter.	flow = 1.05	✓	0.4