

행위자 기반 모델을 활용한 인구과밀 및 병목현상의 위험성 분석

최문기*·박진우**·지상훈***

Risk Assessments of Crowds at Bottlenecks through Agent Based Modelling

Moongi Choi* · Jinwoo Park** · Sanghoon Ji***

요약 : 급격한 인구밀도의 증가로 인한 군중 충돌 현상은 다수의 사상자를 초래할 수 있는 도시재난으로써 도시의 발달과 함께 그 수가 증가해왔다. 인구과밀에 따라 야기될 수 있는 위험상황을 예방하기 위해서는 보행자 유동 현상에 관한 과학적 이해 및 도시적 차원의 관리가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 행위자 기반 모델을 통하여 보행자 유동 현상 및 상황 통제(우측 통행 등)의 변수에 따라 인구과밀현상의 위험도 변화 양상을 면밀히 분석하였다. 첫째, 가상공간을 통로를 설정하여 다양한 요인(유동 인구 수, 그룹 빈도, 도로의 폭, 길이 및 우측 통행 등)이 시간당 인구밀도 변화에 미치는 영향을 측정 하였다. 둘째, 2022년 10월 발생한 대규모 이태원 압사 사고의 공간 및 인구밀도 상황을 추정 재현하고 상황 통제(차벽 제거, 우측 통행 등) 시나리오를 적용하여 인구과밀에 대한 개선 효과를 추정하였다. 연구 결과로써 보행자 유동 현상 측면에서는 해당 통로를 지나려는 인구수가 주변 유동 인구, 그룹 빈도 변화에 비해 연구지역의 인구밀도 증가에 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 공간 환경적 요소에서는 통로 폭이 통로 길이보다 더 큰 요인으로 작용하였다. 이태원 참사 추정 분석에서는 통로 상의 가벽 철거 및 우측 통행이 시행되었을 때, 인구밀도가 위험 수준인 6명/㎡를 넘지 않는 것으로 나타났다. 다만, 인구밀도는 지속적으로 증가하는 패턴을 보이므로 추후 효과적인 인구통제 및 공간개선을 위하여 보다 넓은 차원의 인구밀도 감시체계 및 보행 정책 개선의 필요성을 시사한다.

주요어 : 행위자 기반 모델, 군중과밀, 군중밀도, 병목현상

Abstract : Crowd crush accidents, one of the catastrophic urban disasters, have become frequent due to urban growth. To alleviate those potential risks, it is critical to not only understand the characteristics of pedestrian flow, but also provide appropriate crowd management, simultaneously. In this sense, our study examines how the population density increases according to the multiple variables associated with pedestrian movements (e.g., population, path width) and crowd control methods (e.g., right-hand traffic) through agent based modeling (ABM). In detail, we first built a passage in a virtual space and measured the population density changes over time with respect to the various pedestrian attributes (e.g., incoming counts and group ratio) and the passage characteristics (e.g., width and length). We then revisited the Itaewon stampede, which occurred in October 2022, and simulated how the population density would be curbed if a side barrier had been removed or the pedestrian rule had been implemented. As results, the pedestrian counts in the passage and the width of the passage were the two most significant variables causing the crowdedness. In addition, two advancements (i.e., right-hand traffic and no barrier in the passage) to the Itaewon stampede would result in meaningful improvement in the population density (i.e., less than six people /m²), which is less than the risky crowd crush threshold. Our study suggests that the population density monitoring system and pedestrian policy should be implemented in the future to effectively prevent the crowd crush accidents.

Key Words : Agent based modelling, Crowd crush, Crowd density, Bottlenecks

* 유타대학교 지리학과 박사과정(Ph.D. Student, Department of Geography, University of Utah), u1316663@utah.edu

** 일리노이대학교 CyberGIS 연구소 박사후연구원(Postdoctoral Research Associate, CyberGIS Center, University of Illinois Urbana-Champaign), jipark.geo@gmail.com

*** 경희대학교 지리학과 석사수료 (M.S. student, Department of Geography, Kyung Hee University), jish@khu.ac.kr

1. 서론

2022년 10월 29일 서울시 용산구 이태원역 1번 출구 인근에서는 길이 약 40m, 폭 약 3.2m~4m의 좁은 내리막길 골목에 다수의 인구가 몰리며 사망자 총 158명, 부상자 196명의 대규모 압사 사건이 발생했다(행정안전부). 2022년 10월 30일 용산 소방서의 최종 재난 브리핑에 따르면 압사로 인한 약 300여 명의 사상자는 약 5.7m 길이에 불과한 구간에서 집중적으로 발생하였다. 압사 사고 당시 단위 면적당 인구밀도는 폭 3.2m로 계산하였을 때 16.44명/m², 4m로 계산했을 때 13.16명/m² 수준으로 추산되며 이는 상당한 수준의 인구과밀이 발생하였음을 의미한다.

이러한 인구과밀, 병목현상으로 인한 군중 충돌 문제의 위험성은 지난 수년간 꾸준히 제기되어 왔으며, 발생 빈도가 증가함과 동시에(Shi *et al.*, 2019) 학문적인 관심 역시 증가하고 있다(Liao *et al.*, 2014). 인구과밀 및 병목현상의 예방을 위해서는 인구 유동 현상에 대한 과학적 이해와 도시 차원의 관리가 수반되어야 한다(Shi *et al.*, 2019). 이 때문에 도시공간에서 대규모의 인구 유동 및 병목, 충돌 등의 현상을 이해하려는 노력이 행해지고 있다(Cao *et al.*, 2019a; Solmaz *et al.*, 2019). 하지만 여전히 안전 및 비용 등의 문제로 대규모로 실험하는 데 한계가 있다. 이에 기존 관련 연구에서는 주로 통제된 소규모의 실험실에서 참가자의 움직임을 분석하는 방식으로 진행되었다.

일례로 모의 실험장에서 병목현상 발생 시 시간별 인구 밀도 변화 연구(Nagai *et al.*, 2006; Rupprecht *et al.*, 2007; Rupprecht *et al.*, 2011), 입·출구 부근 인구 유동의 공간적 패턴 변화 연구(Liao *et al.*, 2014; Hoogendoorn and Daamen, 2005), 공간구조 및 장애물이 인구 유동에 미치는 영향(Seyfried *et al.*, 2009; Liddle *et al.*, 2009; Shi *et al.*, 2019) 등의 실험 연구가 진행되었다.

하지만 이러한 실험 연구는 첫째, 시간 및 비용적 측면에서 다양한 공간구조 및 인구 유동 시나리오(그룹, 한방향 걷기 등)를 통한 반복 시행이 어려우며, 둘째, 도심 상황을 가정한 큰 규모의 인구 충돌 현상을 모의 수행할 수 없다는 단점을 지닌다. 따라서 다양한 상황에서 대규모 인구과밀 및 인구 충돌 현상의 위험성을 실험 및 분석하고 정량화하여 실제 정책, 가이드라인 등에 적용하기엔 쉽지 않았다.

한편, 군중 시뮬레이션(pedestrian/ crowd simulation)은 군사(Hawe *et al.*, 2012; Henscheid *et al.*, 2018), 안전

(Choi *et al.*, 2021; Ünal *et al.*, 2022), 질병(Kang and Aldstadt, 2019a; Choi and Hohl, 2021), 도시(Simonov *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2022) 등의 분야에서 모델의 유효성을 검증하고 실제에 적용하기 위해 널리 사용되어왔다. 군중 시뮬레이션에서 대표적으로 사용되는 기법은 행위자 기반 모델(ABMs: Agent Based modelling simulation)로써 자율적인 의사결정 개체집합들을 이용한 시뮬레이션 모형을 의미한다(Bonabeau, 2002). 행위자 기반 모델은 개별 행위자에게 확률모형에 입각한 자율성을 부여하며(Train, 2009), 큰 틀의 규칙 내에서 행위자들은 다양한 의사결정을 진행한다. 또한 행위자는 주변 환경과 상호작용하는 특징을 가지는데(Zhang *et al.*, 2009) 이를 통해 공간구조 혹은 타 행위자 등인 개개인의 유동 패턴에 미치는 영향을 시뮬레이션에 반영할 수 있다.

하지만 이러한 장점에도 불구하고 대규모의 군중 시뮬레이션을 통해 공간구조, 인구수 등 다양한 요인들이 인구과밀 및 군중 충돌 위험에 미치는 영향을 정량화한 연구는 찾아보기 힘들다. 이러한 맥락에서 이 연구는 다음의 두 연구 질문을 갖는다. 첫째, 유동 인구수, 그룹 빈도, 도로의 폭 등 다양한 요인들의 변화가 인구과밀의 위험성에 어떤 영향을 주는가, 둘째, 인구과밀의 위험개선을 위한 효과적인 방안은 무엇인가. 해당 연구 질문의 답을 위해 첫째, 가상 공간의 통로를 설정하여 행위자 기반 군중 시뮬레이션을 진행하였다. 1번 시나리오는 좁은 통로를 지나는 인구수, 주변 도로를 지나는 인구수 및 그룹 빈도, 2번 시나리오에는 도로 폭, 길이 및 한 방향 걷기 시행의 파라미터들을 설정하였으며 각 파라미터의 변화에 따른 인구밀도의 변화를 분석하였다. 둘째, 이태원 참사 당시의 상황을 시뮬레이션으로 재현하였으며 효과적인 인구통제방안을 제시 및 논의하였다.

2. 관련 연구 동향

보행자 유동에 관한 실험 연구는 주로 좁은 공간을 탈출할 때 발생하는 병목현상을 실험하고 이를 효과적으로 해결하기 위한 방향으로 이루어졌다. 많은 실험 연구는 모의 실험장을 만들어 적게는 10명, 많게는 약 600여 명의 피실험자를 특정 조건에 따라 이동하게 하는 방식으로 이루어졌다(Haghani, 2020). Hoogendoorn and Daamen(2005)

은 60명에서 90명의 실험자를 대상으로 이미지 프로세싱 방식을 이용하여 병목현상 시 보행자들이 서로 겹쳐 층을 형성하게 되는 지퍼 효과(Zipper effect)를 관찰하였다. Isobe *et al.* (2004) 및 Guo *et al.* (2013)은 10명에서 30명의 보행자를 학교 교실에서 탈출하게 하였으며 인구, 좌석의 배치, 입·출구의 수에 따라 탈출 시간 및 인구밀도 등을 측정하였다. 이 외에도 가상의 좁은 통로(Yanagisawa *et al.*, 2009; Jiang *et al.*, 2014), 계단(Burghardt *et al.*, 2013; Sharifi *et al.*, 2015), 사각 혹은 원 형태의 가상공간(Wolinski *et al.*, 2014; Crociani *et al.*, 2016; Ezaki *et al.*, 2016); 다층 빌딩(Choi *et al.*, 2014; Huo *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2017) 등에서 다양한 인구조건 및 공간 패턴에 따라 인구의 속도, 밀도, 경로 선택, 유동 패턴 등을 측정하는 형태로 이루어졌다.

대규모 혹은 좁은 공간에서 인구 유동 실험이 가지는 위험성 때문에 동물을 이용한 실험이 이루어지기도 하였다. 대표적으로 Shiwakoti *et al.* (2014)은 사각형 및 원 모양의 모의 실험장에서 개미를 이용하여 출구 주변 장애물이 유동 패턴에 미치는 영향을 실험한 바 있다. Oh and Park (2017)의 경우 쥐를 이용해 좁은 공간에서 출구의 각도에 따른 탈출 시간, 속도 등을 측정하였다. 이 외에도 각 공간의 온도 조건을 다르게 한다거나, 통로의 각도 및 모양, 출구 너비 등을 조절하여 탈출속도, 밀도, 유동 패턴 등을 실험하였다(Lin *et al.*, 2017; Shahhoseini and Sarvi, 2017; Ji *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018; Xiao *et al.*, 2019).

한편, 시뮬레이션을 통해 인구 유동 및 병목현상을 재현한 연구는 주로 행위자 기반 모델을 통해 건물 안 가상의 공간에서 장애물, 벽 등의 조건에 따른 유동 패턴, 인구밀도 변화를 분석하는 방식으로 이루어졌다. Severiukhina *et al.* (2017)은 기동이나 장애물 등의 요인 유무에 따른 유동 변화와 정체 발생의 특성을 분석하기 위해 직선의 복도, T자형 교차로, 십자형 교차로 형태의 가상공간을 배경으로 실험하였다. Bina and Moghadas (2021)는 실존하는 실내 회의장을 배경으로 구체적인 환경 개선 방안을 도출하기 위해 177명 수준의 군중이 탈출하는 상황에 대한 가상 환경을 구축하였고, 탈출구의 크기와 위치, 공연장 내 좌석 배치, 집단 분류에 따른 이동 특성 차이 등의 다양한 변수를 적용한 시뮬레이션 연구를 진행하였다. Pelechano *et al.* (2007)은 군중이 밀집하는 상황에서 개별 이동자 간의 사회 및 물리적 상호작용과 개별 이동자의 상황 인지 및 심리적 차이에 따른 행동 특성을 반영한 시뮬레이션 연구의 필요성을 제안하였고, 이를 통해 공황, 초조함, 타인을 미는

행위, 넘어진 이동자가 장애물로 작용하는 상황 등이 반영된 상황에서의 인구 유동을 연구하였다. Liu *et al.* (2014)은 군중이 밀집된 가상공간에서 개별 이동자의 시야와 장애물 및 타인과의 회피 경향성, 그리고 장애물의 유무에 따라 변화하는 유동 패턴을 시뮬레이션으로 분석한 바 있다.

실험 연구의 한계를 극복하기 위한 대규모의 시뮬레이션 연구도 찾아볼 수 있는데, 예로 Narain *et al.* (2009)은 행위자의 이동 방향 및 상호작용을 수식으로 정의하고 약 25,000~100,000명의 대규모 유동 시뮬레이션을 작성하여 이를 검증하였다. Djehiche *et al.* (2017)은 두바이의 다층 빌딩을 사례로 비상 상황을 가정하여 35,000명의 탈출 유동 패턴을 시뮬레이션으로 분석한 바 있다.

한편 시뮬레이션 연구 형태는 가상 및 증강현실의 발달로 개개인의 행태를 분석하는 연구로써 진행되기도 하였다. 이는 주로 개개인이 실험용 기기를 착용한 상태로 건물 실내, 지하철, 터널 등 가상의 공간에서 길을 찾거나 탈출하는 형태로 진행되었다(Aoki *et al.*, 2007; Cosma *et al.*, 2016; Arias *et al.*, 2019; Cao *et al.*, 2019b).

이처럼 보행자의 유동에 관한 실험 연구는 실내 소규모의 모의 공간에서 공간구조, 혹은 이동 시나리오 등의 변화에 따라 보행자, 동물 등의 객체를 이동시킴으로써 이루어졌다. 따라서 도시공간에서 대규모의 인구 유동을 실험하고 이해하기에는 명확한 한계가 있었다. 예로 대규모 인구 이동 조건에서 그룹이나 우측 통행과 같은 복잡한 유동 방식에 따른 이동패턴의 변화를 실험하기 어려웠다.

이에 대한 대안으로 시뮬레이션을 통해 가상공간에서 인구의 정체, 패턴 및 밀도 변화를 살펴보는 연구가 활발히 이루어졌다. 하지만 대부분 건물 실내, 좁은 공간 등에서 시뮬레이션을 실험하였으며 인구 개개인의 이동방식을 실험 및 검증하는 형태로써 진행되어 도시공간 속 대규모의 인구과밀 위험성에 미치는 요인을 발굴한 연구는 찾아보기 힘들었다. 이러한 요인들은 인구과밀 및 충돌의 위험성을 줄이는 도시 정책, 가이드라인 등에 실제적으로 적용 가능한 기초자료로 활용되기 때문에 필수적으로 연구되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 행위자 기반 시뮬레이션을 통해 좁은 통로에서 대규모의 인구과밀 현상에 영향을 주는 인구수, 그룹, 도로 폭, 우측 통행 등의 요인들을 발굴하고 해당 요인들의 변화에 따른 시간당 인구밀도 패턴 및 위험성의 변화를 측정하였다.

3. 연구방법 및 설계

1) 모델 설계

본 연구에서는 Anylogic 8.8.0 소프트웨어를 사용하여 행위자 기반 시뮬레이션을 작성 및 시행하였다. Anylogic 소프트웨어는 자바(JAVA) 프로그래밍 언어를 통해 시뮬레이션을 작성하며 재난 관리, 교통, 공급망, 보건 등의 다양한 분야에서 사용된다(Borshchev, 2013).

행위자 기반 시뮬레이션은 다양한 노력에도 불구하고 모델의 설계 및 구축에 대한 보편적인 지침은 존재하지 않으며, 모델의 재생산을 위한 대안적인 방법으로 ODD (Overview, Design concepts and Details) 작성을 통해 모델을 문서화하려는 노력이 이루어져 왔다(Müller *et al.*, 2013; Crooks *et al.*, 2015; Kang and Aldstadt, 2019b; Grimm *et al.*, 2020).

ODD는 1) 목적, 2) 객체(Entities), 상태 변수 및 스케일, 3) 프로세스 개요 및 스케줄링, 4) 디자인 개념 및 기본원리, 5) 초기화, 6) 인풋 데이터, 7) 부속모델의 7가지로 구성된다(Grimm *et al.*, 2010). 본 연구에서도 ODD를 단계적으로 작성하여 모델 프로세스의 이해를 돕고, 추후 연구에서의 결과 재생산 및 모델발전의 용이성을 도모하고자 하였다. 초기화 항목의 경우 프로세스 개요 및 스케줄링 항목에 포함하여 서술하였으며 인풋 데이터 및 부속모델은 본 시뮬레이션 모델에서 고려하지 않아 생략하였다.

(1) 목적

본 시뮬레이션의 목적은 다양한 상황에서 인구과밀 및

균중 병목현상의 위험성을 정량화하고 이를 감소하는 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 가상의 공간을 설정한 후 공간의 길이, 너비, 유동 인구수 및 속도 등 인구과밀 현상에 영향을 미치는 파라미터들을 기반으로 다양한 시나리오를 작성하여 각각의 위험성을 평가한다. 다음으로 이태원 참사의 상황을 재현하였으며 차벽 및 우측통행 시나리오를 통해 개선 효과를 측정하였다.

(2) 객체, 상태 변수 및 스케일

본 연구는 2가지의 객체를 가진다. 첫째는 통로 유동 인구로써 밀도를 수집하는 주 통로로 들어오는 인구에 해당한다. 둘째는 주변 유동 인구로 주 통로는 들어오지 않으며 주변 도로를 따라 움직이는 유동 인구에 해당한다. 각 객체가 가지는 상태 변수와 시뮬레이션 상 조절 변수는 다양한 범위로 설정하여 각각의 시나리오로 작성되며, 균중 과밀 현상의 위험성을 파악하기 위해 활용된다. 각 객체가 가지는 상태 변수는 다음 표 1과 같다.

통로 유동 인구는 통로를 따라 움직이며 개개인은 고유의 상태 변수를 가진다. 속도는 범위를 가지는 균일분포(uniform distribution)를 따르며 최소 간격 변수와 함께 실증데이터를 활용한 검증을 통해 선정된 범위를 사용하였다. 그룹의 크기는 2~5명으로 설정하였으며, 전체 인구 당 그룹의 비율을 조정하여 시뮬레이션하는 방식으로 진행된다. 우측통행의 경우 '시행'과 '미시행'으로 설정되며 시행 시 통로를 절반으로 나누어 통로 유동 인구를 우측으로 통행하도록 설정하였다. 주변 유동 인구는 통로 유동 인구와 마찬가지로 검증된 속도 및 최소 간격을 사용하도록 하였다.

표 1. 행위자 및 변수

객체	상태 및 조절 변수	부가 설명
통로 유동 인구	행위자 속도	검증 후 범위 조정
	행위자 간 최소 간격	
	그룹의 크기(2~5명)	전체 인구 당 그룹의 비율
	우측 통행	통로 상 우측으로 일괄 이동
	총 인구수	-
주변 유동 인구	행위자 속도	검증 후 범위 조정
	행위자 간 최소 간격	
	총 인구수	-

(3) 프로세스 개요 및 스케줄링

시뮬레이션은 시행 시 다음의 프로세스를 가진다. 첫째, 통로 유동 인구 및 주변 유동 인구가 그림 1의 A 및 B 통로에서 생성된다. 둘째, A에서 생성된 통로 유동 인구는 C를 지나 B로, B에서 생성된 통로 유동 인구는 C를 지나 A로 이동한다. 주변 유동 인구는 D의 경로를 따라 이동한다. 셋째, 통로 유동 인구가 E를 지나는 동시에 1㎡당 인구밀도를 실시간 계산한다. 시뮬레이션 공간은 그림 1과 같이 가상 공간을 작성하여 진행하였다.

통로의 인구밀도는 인구수, 공간의 설정 등 다양한 환경에 의해 영향을 받기 때문에 표 2와 같이 파라미터를 조정하여 다양한 시나리오에서 인구과밀의 위험성을 정량화하고자 하였다. 이를 위해 표 1에서의 상태 및 조절 변수를 포함하였으며, 추가로 공간변수(도로 폭, 길이)를 반영하였다.

시나리오 1은 인구 유동이 인구밀도 증가에 미치는 영향을 알아보기 위해 설정되었으며 이에 통로 유동 인구, 주변 유동 인구 및 그룹의 수를 3가지씩 설정하여 총 27가지의 경우의 수($3 \times 3 \times 3$)에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 시나

리오 2에서는 도로의 폭, 길이 및 우측 통행의 영향을 파악하기 위해 통로 및 주변 인구수를 12,000으로 고정한 후 총 18가지의 경우의 수($2 \times 3 \times 3$)에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 시나리오 1 및 2를 통해 다양한 변수들이 병목 및 인구과밀 현상의 위험에 주는 일반적인 영향을 분석한 뒤, 시나리오 3에서 이태원 참사 당시의 특수한 공간 상황을 배경으로 시뮬레이션을 재현하고 효과적인 공간 활용 및 인구통제 방안을 제시 및 논의하였다.

시나리오 3의 시뮬레이션 환경 및 파라미터 설정 세부 과정은 다음과 같다. 첫째, 이태원 참사가 일어났던 골목길의 폭은 약 3.2~5m, 길이는 약 40m로 협소한 통로이며(그림 2) 이때 골목 오른쪽의 가벽을 제거한다면 추가적인 이동 공간의 확보로 인구과밀 현상을 예방할 가능성이 있다. 또한 우측 통행 역시 사고 방지 효과를 높일 수 있을 것으로 예상된다. 이에 따라 가벽 유지/제거 및 우측 통행 시행/미시행 4가지의 파라미터 범위를 설정하여 분석을 진행하였다.

둘째, 이태원 참사 당시 해당 통로의 유동 인구수는 미시적 스케일의 공간 데이터의 부재로 알 수 없으나 당시 골목 주변 300m에 시간당 약 3만 6천 명이 몰렸으며(KBS NEWS), 중앙의 이태원역 삼거리를 기준으로 3등분하여 시간당 유동 인구를 유추한다면 약 12,000명으로 예상된다. 이에 따라 시간별 최대 인구 유입을 12,000명으로 설정하여 분석을 진행하였다.

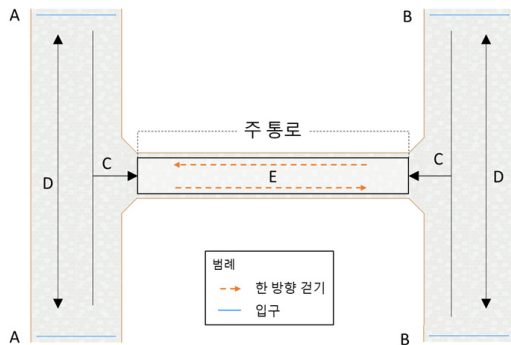


그림 1. 시뮬레이션 환경

표 2. 시뮬레이션 시나리오 설정

시나리오		조절 파라미터	범위	단위
1	가상 공간 (15분)	통로 유동 인구	4,000, 8,000, 12,000	명/ 시간
		주변 유동 인구	4,000, 8,000, 12,000	
그룹 수		50, 70, 100	%	
2		우측 통행	시행 / 미시행	-
		도로 폭	3, 4, 5	m
	도로 길이	20, 30, 40		
3	이태원 (1시간)	도로 폭	가벽 유지 / 가벽 제거	-
		우측 통행	시행 / 미시행	-

(4) 디자인 개념 및 기본원리

본 시뮬레이션은 인구 및 공간 환경이 인구과밀 현상에



그림 2. 사례연구의 통로공간

(사진 출처 : 네이버지도 거리뷰, 서울시 용산구 이태원동 199-3, 2022년 10월 촬영)

미치는 영향을 분석하기 위해 설계되었다. 이를 위해 그림 3과 같이 각 시나리오에서 시간별 통로의 초당 인구밀도를 수집하였다.

Still *et al.*(2020)은 실험 연구를 통해 1m²당 6명의 인구밀도에 도달할 시 유동의 속도가 현저히 줄어들며, 7명 이상 시 거의 움직이지 못하는 현상이 발생하는 것을 밝혔다. 또한 통상 인구밀도 6명 이상 시 위험 수준으로 인식되며, 이때부터 본인의 의지대로 움직이지 못하고 하나의 유체와

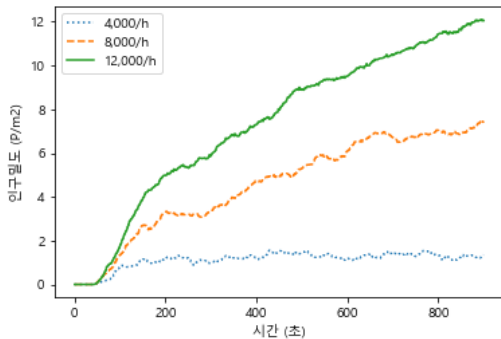


그림 3. 초당 통로 유동 인구밀도 수집 예시

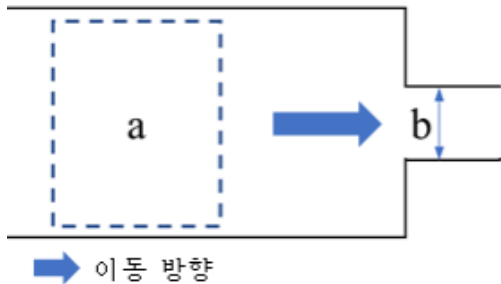


그림 4. 밀도 수집 방법(Liddle *et al.*, 2009)

같이 움직이게 된다(Keefe and Uzquiano, 2021; Still, 2019). 본 시뮬레이션에서는 이를 바탕으로 1m²당 6명의 인구밀도를 위험으로 설정하여 수집하였다.

2) 모델 파라미터 검증

군중 밀도가 높아질 시 인구의 속도는 현저히 떨어지게 되며 사람들 간의 간격은 점차 좁아지게 된다(Still, 2000). 이와 같은 현상은 인구 유동 시뮬레이션이 실제 인구과밀 현상을 현실적으로 반영하기 위해 반드시 검증되어야 할 부분이다. 따라서 실험자들을 대상으로 실제 인구유동을 실험한 관찰데이터를 통해 속도 및 최소 간격이 실제상황에서 어느 정도 범위를 가지는지 알아보고 선정된 범위를 본 시뮬레이션에 적용할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 속도 및 행위자 간의 최소 간격을 Liddle *et al.*(2009)의 실험 데이터와 비교하여 검증하였다. 해당 연구에서는 병목현상의 실험을 위해 250명의 지원자를 그림 4의 a 공간에서부터 좁은 입구로 탈출하도록 하였으며, 입구의 크기 b에 따른 시간당 탈출 인원수를 파악하였다.

실험 연구와 동일한 조건의 가상 환경을 만든 후 시뮬레이션을 반복하였으며 실험 데이터와 가장 유사한 파라미터 쌍을 추출하였다. 속도의 경우 0.3~0.9, 0.6~1.2, 0.9~1.5, 1.2~1.8(m/s)로 설정하였으며 행위자 간 간격이 좁아지거나 인구과밀 시 자동으로 감소하도록 설정하였다. 사람들 간의 최소 간격은 0, 1, 10cm로 설정하였으며 이는 인구과밀 시에 최소로 유지되는 저장 간격에 해당한다.

표 3은 각 파라미터 쌍을 적용한 시뮬레이션과 실험 데이터 간의 RMSE (Root Mean Square Error)를 나타낸 것으로 입구의 길이가 각 90cm일 때 속도 0.9~1.5 m/s 및 최소 간

표 3. 실험 데이터와의 RMSE 분석 결과

입구 크기 (cm)	속도(m/s)		0.3~0.9	0.6~1.2	0.9~1.5	1.2~1.8
	최소 간격(cm)					
90	0		9,429	9,456	9,38 ^{***}	9,904
	1		13,213	13,261	13,647	13,416
	10		48,026	48,051	47,89	47,97
250	0		14,773 ^{***}	14,999	14,783 ^{***}	14,859
	1		17,811	17,849	17,707	17,807
	10		41,828	41,912	41,812	41,762

^{***}각 입구 크기에 따른 최소 RMSE 값

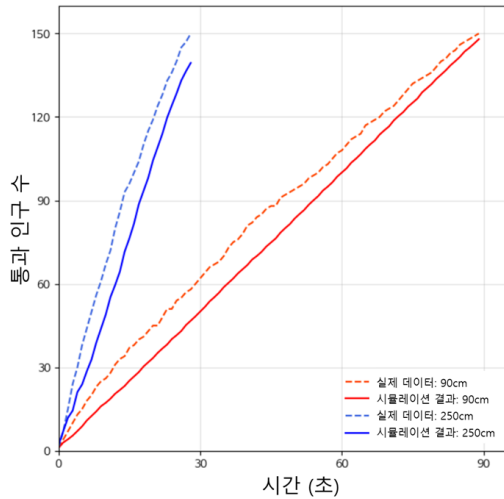


그림 5. 선정된 파라미터 쌍 및 실험 데이터와의 시간당 통과 인구수 비교 결과

격 0cm, 250cm일 때 속도 0.3~0.9 m/s 및 최소 간격 0cm 쌍이 각각 최소 RMSE를 보였다. 하지만 군중 밀도가 높고 병목현상이 발생할 시 속도가 줄고 인구 유동이 제한되기 때문에 속도에 따른 RMSE 값은 거의 변화가 없음을 확인할 수 있으며, 행위자 간 최소 간격이 큰 영향을 미침을 볼 수 있다. 예로 속도 0.3~0.9m/s 및 최소 간격 0cm 조합의 경우 입구 크기 250cm에서 가장 적은 RMSE 값을 보였으나, 속도 0.9~1.5m/s와 0.01 정도의 매우 작은 차이를 보인다. 따라서 종합적으로 판단하였을 때 속도 0.9~1.5m/s, 최소 간격 0cm의 조합이 실험 데이터를 가장 잘 반영한 것으로 판단하였다. 그림 5는 선정된 두 파라미터를 적용한 시뮬레이션과 실제 데이터와의 시간별 통과 인구수를 비교한 것으로 상호 유사한 패턴을 보여준다.

4. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 공간구조 및 인구수 등의 다양한 시나리오를 기반으로 인구과밀 및 군중 병목현상을 시뮬레이션하고, 군중 밀도를 수집하여 위험성을 분석하였다. 그림 6은 시나리오 1 및 2의 가상공간을 바탕으로 통로 유동 인구 12,000명, 주변 유동 인구 4,000명, 그룹 빈도 50%, 통로 폭 3m, 길이 20m 및 우측 통행 미시행의 조건에서 작성한 시

뮬레이션 시행 예시화면으로 시간별 군중 밀도 및 병목의 공간적 패턴을 보여준다.

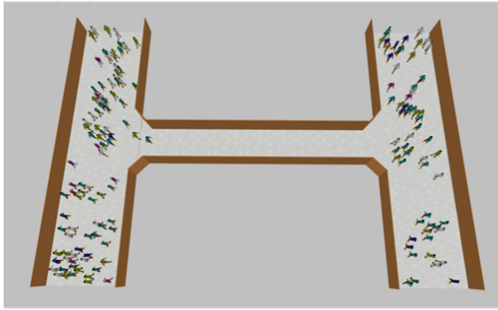
시간별로 150초 부근 주 통로의 중심에서부터 점차 과밀이 생기며, 인구밀도가 6의 위험 수준에 도달하는 300초 부근에서는 점차 통로의 양쪽 입구에서 병목현상이 발생하여 중심부의 인구가 갇히는 현상을 보인다. 이후 통로 중심 부분의 인구밀도가 점차 높아지며 마침내 통로 모든 부분에서 병목이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 시간별 인구밀도의 변화패턴은 밀도 6 이상의 결과가 나온 모든 시뮬레이션에서 유사하게 나타났으며, 이는 단기간 좁은 통로에 지나친 인구가 집중될 시 초기 양쪽 통로 입구에서 인구를 통제하여 분산시킬 필요가 있음을 보여준다.

표 4는 각 시나리오의 인구밀도의 통계량 산출 결과를 나타낸다. 인구밀도의 평균, 중간값, 최댓값 및 특정 인구밀도 초과 비율은 시뮬레이션 시간 15분(900초)을 기준으로 계산되었다. 인구밀도는 동일 시나리오상의 세부 시나리오들을 조합하고 각 조합당 30회의 반복 시뮬레이션을 진행하여 계산하였다. 예로 통로 유동 인구 4,000명 조건의 인구밀도 평균값 1.078은 주변 유동 인구 4,000, 8,000, 12,000 및 그룹 빈도 0.5, 0.75, 1의 모든 경우의 수 시뮬레이션 결과값의 평균 인구밀도에 해당한다.

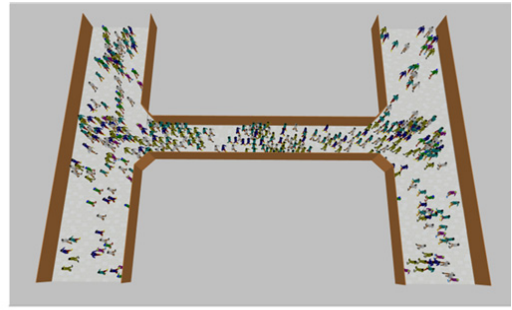
1) 시나리오 1 결과

결과로 시나리오 1에서 통로 유동 인구수는 다른 주변 유동 인구수 및 그룹 수보다 인구과밀 위험성에 큰 관련성을 보이는 것으로 나타났다. 통로 유동 인구수가 증가할수록 인구밀도의 평균이 크게 증가하였으며 6, 12의 밀도 초과 시뮬레이션 비율이 각각 100%, 96%로 다른 파라미터들과 비교해 가장 높았다. 특히 시간당 8,000명일 경우 최대 7.8, 12,000명일 때 17.3의 인구밀도로 높은 군중 충돌 위험성을 보여주었다.

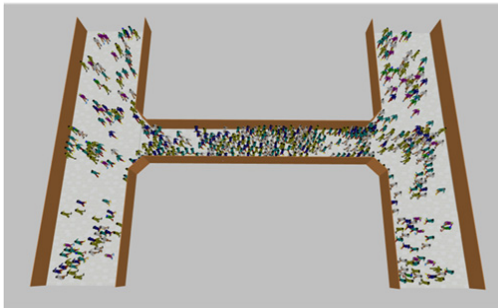
주변 유동 인구의 경우 통로 유동 인구보다 큰 영향을 보여주진 않았으며, 증가 시에 최대 인구밀도는 오히려 감소하는 경향을 보였다. 이러한 현상은 주변 유동 인구가 많은 경우 오히려 통로에의 빠른 진입이 제한되는 것에 기인한 것으로 보인다. 그룹 빈도는 증가할수록 인구밀도 6을 초과하는 경우가 늘어났으나, 밀도가 6보다 높아질 시 오히려 인구밀도를 감소시키는 긍정적 효과를 보였다. 그룹의 비율이 높은 경우 좁은 통로를 단기간에 막아 인구과밀의 가능성을 높이지만, 위험 인구밀도 이상부터는 그룹 이동



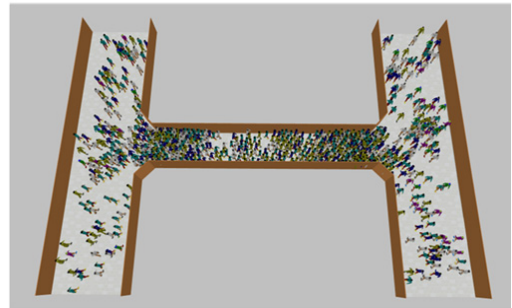
(a) 30초



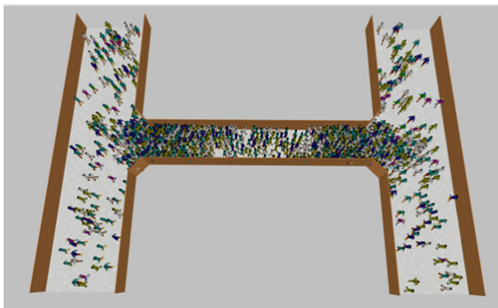
(b) 90초 (2.42명/m²)



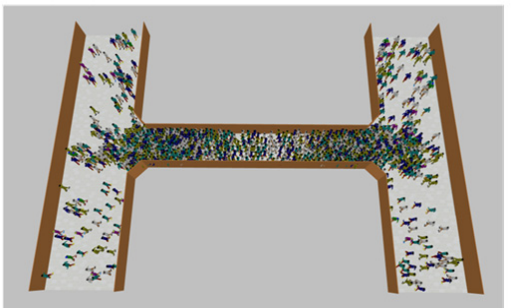
(c) 150초 (4.5명/m²)



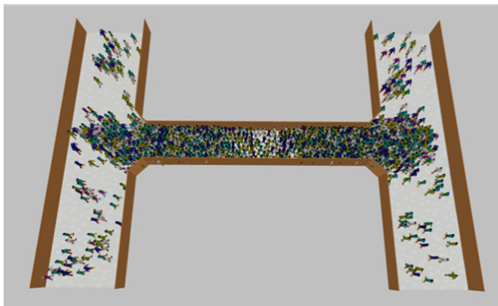
(d) 300초 (7.7명/m²)



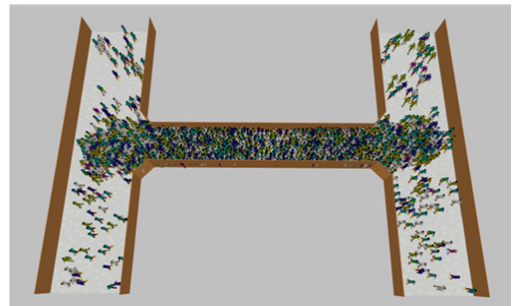
(e) 420초 (9.75명/m²)



(f) 510초 (10.87명/m²)



(g) 690초 (13.58명/m²)



(h) 900초 (15.9명/m²)

그림 6. 시간별 시뮬레이션 예시 화면
(시나리오: 통로 유동 인구 12,000, 주변 유동 인구 4,000, 그룹 빈도 50%, 통로 폭 3m, 길이 20m, 우측 통행 미시행)

표 4. 시나리오별 인구밀도 패턴 결과

시나리오	인구밀도(p/m ²) 세부 시나리오		평균	중간값	최댓값	인구밀도 초과 시뮬레이션 비율	
						6	12
1	통로 유동 인구	4,000	1,078	1,150	2,067	0	0
		8,000	3,794	4,050	7,783	0.396	0
		12,000	8,672	9,300	17,267	1,000 ⁺	0.956 ⁺
	주변 유동 인구	4,000	4,726	3,500	17,267	0.422	0.333
		8,000	4,617	3,550	16,467	0.467	0.333
		12,000	4,202	3,417	14,783	0.507 ⁺	0.289
	그룹 빈도 (2-5명)	0.5	4,497	3,367	17,267	0.396	0.333 ⁺
		0.75	4,505	3,517	16,833	0.437	0.326
		1	4,542	3,633	16,533	0.563 ⁺	0.296
2	통로 폭	3	5,361	5,575	13,333	0.956 ⁺	0.111 ⁺
		4	3,750	3,913	9,688	0.339	0
		5	2,752	2,875	7,190	0.039	0
	통로 길이	20	4,721	4,488	13,333	0.572 ⁺	0.111 ⁺
		30	3,801	3,622	10,033	0.450	0
		40	3,341	3,192	8,158	0.311	0
	우측 통행	미시행	4,342	4,058	13,333	0.563 ⁺	0.074 ⁺
		시행	3,566	3,538	10,617	0.326	0

*세부 시나리오 분류 중 밀도 6, 12 초과 비율이 가장 높은 항목

이 개별 이동보다 1인당 할당 면적이 좁으면서도 이동 방향 또한 같아 개선된 인구밀도 결과를 보이는 것으로 해석할 수 있다.

2) 시나리오 2 결과

다음으로 시나리오2에서는 통로의 폭이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 통로의 폭이 3m일 경우 약 96%의 시뮬레이션이 밀도 6을 초과함을 보여주었으며 5m일 경우 약 4%로 크게 떨어짐을 보인다. 통로 길이는 두 번째로 큰 영향을 주는 것으로 보이며 이는 15분의 시간 동안 통로 폭 3m 및 20m의 경우가 유일하게 밀도 12를 초과한 것에서 유추할 수 있다. 우측 통행의 경우 시행 시 인구밀도를 낮추는 효과를 보이며 밀도 6을 초과하는 경우가 약 24% 감소함을 보였다.

다음으로 인구과밀에 높은 상관성을 보인 파라미터들과 시간별 인구밀도의 관계를 살펴보았다. 그림 7(a)는 인구과밀 위험이 가장 높았던 통로 폭 3m, 길이 20m의 공간에

서의 통로 인구수 및 그룹 비율에 따른 시간별 인구밀도를 보여준다. 통로 인구수가 시간당 4,000명 이하일 경우 밀도는 더 이상 증가하지 않는 것을 보였으며 8,000에 도달하면 꾸준히 증가하였다. 그룹 비율의 경우 시간별 통로 인구수 12,000에서 밀도 6을 초과할 시 인구밀도를 낮추는 역할을 하는 것을 확인할 수 있으며 인구밀도가 올라갈수록 편차가 커짐을 보인다. 하지만 제곱미터 당 인구밀도 6을 인구과밀의 기준으로 볼 때, 과밀에 도달하기 전까지는 그룹의 형성이 좁은 통로의 인구과밀에 악영향을 끼치는 것으로 나타났다. 그림 7(b)는 통로 폭 및 길이에 따른 시간별 인구밀도 추이를 보여준다. 표 4의 결과와 마찬가지로 폭과 길이가 짧을수록 인구과밀이 높았으며 특히 시간별 증가 폭은 도로 폭이 좁고 길이가 짧을수록 빠르게 높아졌다.

그림 8은 우측 통행 시행 시와 미시행 시 통로의 폭 및 길이 당 최대 인구밀도 추이를 보여주며, 시행 시 인구밀도를 낮추는 효과를 보였다. 특히 폭과 길이가 짧아 위험한 상황일수록 효과가 극대화되었다. 시나리오 1 및 2의 결과를 종합하여 볼 때, 통로 유동 인구, 통로 폭, 길이, 우측 통행의

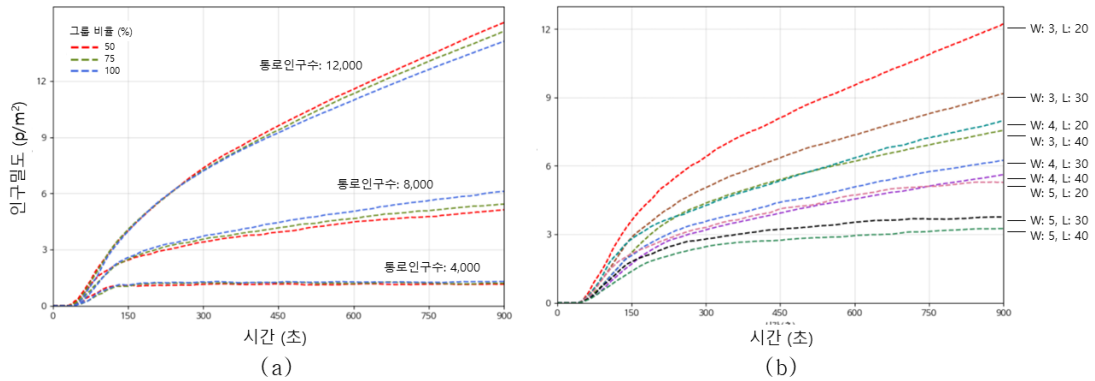


그림 7. 세부 시나리오 별 시간별 인구밀도 결과

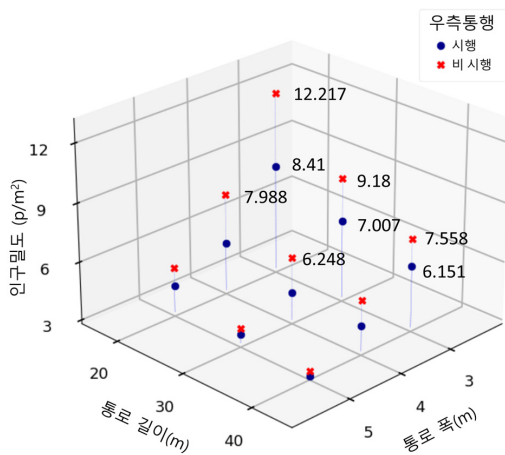


그림 8. 우측 통행 시 인구밀도 최댓값 변화

4가지 요인이 인구과밀의 위험성을 낮추는데 크게 기여하는 것으로 나타났다.

3) 시나리오 3 결과

시나리오 3에서는 이태원 참사 당시의 상황을 시뮬레이션으로 재현하였으며, 4가지 요인 중 통로 폭 개선 및 우측 통행 시행 두 가지 사항을 적용하여 시간별 인구밀도를 살펴보았다. 통로의 유동 인구는 당시 상황을 재현하기 위해 시간당 최대 12,000명으로 고정하였다.

그림 9은 시뮬레이션 결과이며 파라미터당 50회의 결과를 평균하여 나타내었다. 가벽 유지, 우측 통행 미시행의 참사 당시 상황을 살펴보면, 그래프와 같이 인구밀도가 가

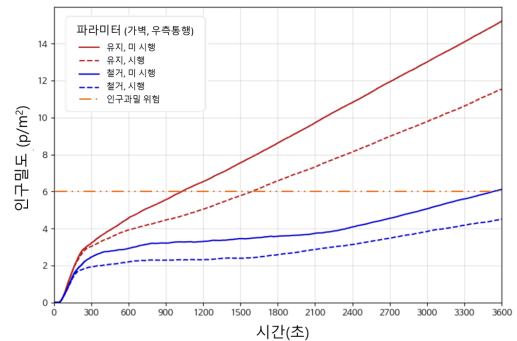
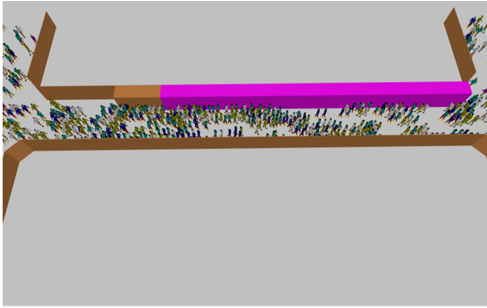


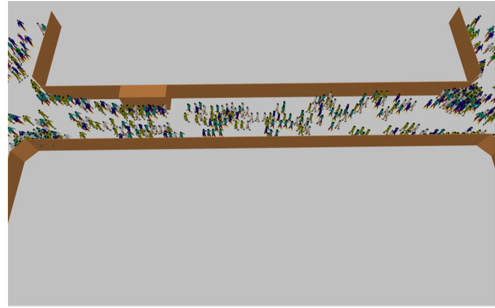
그림 9. 사례연구 시뮬레이션 결과

파르게 증가하며 한 시간 이내 인구밀도 약 15에 도달하는 것을 확인하였다. 특히 인구밀도가 0에서 위험 수준인 6까지 도달하는데 20분이 채 걸리지 않았으며 이는 추후 비슷한 사고의 예방을 위해 실시간 유동 인구수 감시와 신속한 인구통제가 필요함을 시사한다.

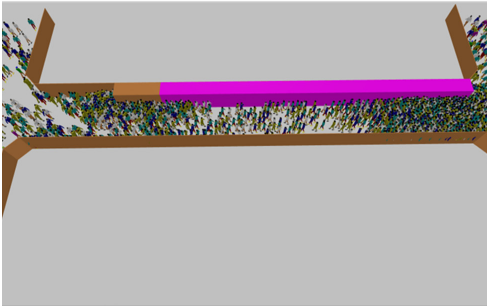
가벽 철거와 우측 통행은 모두 인구과밀 현상을 줄이는데 큰 역할을 하는 것으로 나타났으며 특히 가벽을 철거하여 폭을 확보하는 것이 인구밀도를 크게 줄이는데 큰 효과를 보였다. 두 가지 모두 시행되었을 경우 한 시간의 경과에도 불구하고 인구밀도가 $6p/m^2$ 를 넘지 않는 것으로 확인되었다. 그림 10은 이태원 참사 당시의 공간 상황을 재현한 시뮬레이션과 가벽 철거 및 우측 통행 시행 후 개선된 상황을 대조적으로 보여준다. 재현 시뮬레이션 상에서는 급격한 인구 유입 15분 경과 후 인구밀도 6에 빠르게 도달하는 것을 확인할 수 있으며, 50분에서 60분경과 구간에 도달하였을 때 이태원 참사 당시의 인구밀도로 추정되는 13.16-



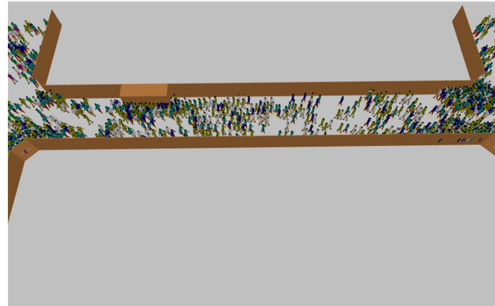
(a) 3분 (좌: 2.2, 우: 1.8 p/m²)



(b) 15분 (좌: 6.4, 우: 3 p/m²)



(c) 30분 (좌: 10.5, 우: 3.8 p/m²)



(d) 50분 (좌: 14.1, 우: 4.1 p/m²)

그림 10. 사례연구 시뮬레이션 예시 화면
(좌: 가벽 유지 및 우측 통행 미시행, 우: 가벽 철거 및 우측 통행 시행)

16.44p/m² 구간에 도달하였다. 개선 상황 시뮬레이션의 결과에서는 50분의 경과 후에도 인구밀도가 4.1p/m² 정도로 충분히 통제가 가능한 수준임을 보여주었다. 하지만 여전히 인구밀도가 꾸준히 증가하는 경향을 보였으며 지속적인 유동 인구 감시의 필요성을 암시하였다.

5. 결론 및 시사점

본 연구에서는 최근 이태원에서 발생한 압사 사고와 관련하여, 대규모의 인구과밀 및 인구 충돌 현상 위험성에 영향을 미치는 요인들을 발굴하고 각 요인의 변화에 따른 인구밀도 변화를 분석함으로써 인구과밀 현상의 과학적 이해를 도모하고자 하였다.

이를 위해 첫 번째로 가상의 공간에서 통로 유동 인구, 주변 유동 인구, 그룹 빈도, 통로 폭, 통로 길이 및 우측 통행의 6가지 파라미터를 행위자 기반 모델에 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그 결과, 인구 유동 측면에서는 통로를 지나는 유동 인구수가 통로 주변의 유동 인구, 그룹 빈도 변수에 비해 인구밀도 증가에 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며 공간적인 측면에서는 통로 폭이 통로 길이보다 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

두 번째로 이태원 참사 당시의 상황을 시뮬레이션 환경으로 재현하였으며 통로 폭 개선, 우측 통행 시행을 가정하여 인구밀도 감소 효과를 분석하였다. 결과로 동일한 상황에서 우측 통행을 시행했을 때보다 가벽을 철거하여 통로 폭을 넓혔을 때 더 큰 효과를 나타냈다. 특히 두 가지의 개선사항을 모두 적용하였을 경우 시간당 인구밀도는 현저히 감소함을 보였으며 약 한 시간의 경과 후에도 인구밀도가 위험 수준인 6p/m²를 초과하지 않았다. 하지만 여전히 인구밀도가 꾸준히 증가하는 패턴을 보였으며 지속적인 유동 인구 감시 및 통제의 필요성을 나타냈다.

본 연구에서는 다양한 조건에서 인구과밀의 위험성을 파악하고 개선사항을 제시하였으나, 유동 인구수나 통로의 공간 형태 등 다양한 조건에 따라 결과가 달라질 가능성이 있다. 따라서 급격한 인구밀도의 상승이 예견되는 지역을 미리 선정하고 후 군중 시뮬레이션 등을 이용해 위험 상황을 예측하는 맞춤형 감시체계가 수반되어야 할 것으로 생각된다. 특히 불가피하게 인구과밀이 예상되는 지역에는 시간별 인구밀도를 시뮬레이션하고 인구과밀위험도를 예

측하여 경찰의 투입시간 및 효과적인 군중 통제방안을 제시하는 시스템이 마련되어야 할 것이다. 또한 본 연구에서의 결과를 적용하여 좁은 골목길에서 우측 통행을 생활화하고 통로 폭을 개선하는 방안 역시 예방에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구의 한계점은 다음과 같다. 첫째, 지나친 컴퓨터 연산을 피하고자 6가지의 파라미터를 3개씩 시나리오 2가지로 나누어 분석을 진행하였다. 하지만 이는 고성능 연산 처리가 가능한 컴퓨팅 리소스와 함께 GSA (Global Sensitivity Analysis), ABC (Approximate Bayesian Computation) 등 다양한 민감도 분석기법을 활용하여 극복이 가능할 것으로 생각된다. 둘째, 대규모의 인구 유동을 수집한 실험 혹은 관찰데이터의 부재로 인해 시뮬레이션 상 인구가동의 검증은 기존연구의 소규모 인구가동 데이터로 대체하여 진행하였다. 또한 속도 및 최소 간격 파라미터에 따른 인구 유동 패턴의 검증이 다소 과소 추정된 경향을 보였다. 추후 연구에서는 이보다 대규모의 인구 유동 실험 데이터를 확보하고 정밀한 검증 방법을 제시할 필요가 있다.

그럼에도 불구하고 본 연구의 방법론 및 결과는 효과적인 인구통제 및 공간개선을 위한 도시 차원의 정책, 가이드라인 수립을 위한 근거자료로 활용될 수 있다. 특히 도시 공간 내 인구과밀 위험 예상 지역을 미리 선정하고 군중 시뮬레이션을 적용하여 잠재적인 위험 및 개선사항을 분석한다면 보다 구체적이고 실증적인 의사결정 자료로써 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 행정안전부, 행정안전부 재난안전관리본부 이태원 사고 중대본 브리핑(2022년11월18일), https://www.mois.go.kr/firt/bbs/type010/commonSelectBoardArticle.do?bbsId=BBSMSTR_000000000008&ntId=96678.
- KBS NEWS, 이태원 1동 역대 최다 인파... 데이터로 본 이태원 참사(2022년11월4일), <https://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=5593479>
- Aoki, H., Oman, C. M. and Natapoff, A., 2007, Virtual-reality-based 3D navigation training for emergency egress from spacecraft, *Aviation, space, and environmental medicine*, 78(8), 774-783.
- Arias, S., La Mendola, S., Wahlqvist, J., Rios, O., Nilsson, D. and Ronchi, E., 2019, Virtual reality evacuation ex-

- periments on way-finding systems for the future circular collider, *Fire Technology*, 55(6), 2319-2340.
- Bina, K. and Moghadas, N., 2021, BIM-ABM simulation for emergency evacuation from conference hall, considering gender segregation and architectural design, *Architectural Engineering and Design Management*, 17(5-6), 361-375.
- Bonabeau, E., 2002, Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(3), 7280-7287.
- Borshchev, A., 2013, *The Big Book of Simulation Modeling: Multimethod Modeling with AnyLogic 6*, AnyLogic, North America.
- Burghardt, S., Seyfried, A. and Klingsch, W., 2013, Performance of stairs-fundamental diagram and topographical measurements, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 37, 268-278.
- Cao, H., Sankaranarayanan, J., Feng, J., Li, Y. and Samet, H., 2019a, Understanding metropolitan crowd mobility via mobile cellular accessing data, *ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems*, 5(2), 1-18.
- Cao, L., Lin, J., and Li, N., 2019b, A virtual reality based study of indoor fire evacuation after active or passive spatial exploration, *Computers in Human Behavior*, 90, 37-45.
- Chen, J., Liu, R., Wang, J. and Chen, Y., 2017, Experimental influence of pedestrian load on individual and group evacuation speed in staircases, *Fire Technology*, 53(5), 1745-1763.
- Choi, J. H., Galea, E. R. and Hong, W. H., 2014, Individual stair ascent and descent walk speeds measured in a Korean high-rise building, *Fire Technology*, 50(2), 267-295.
- Choi, M. and Hohl, A., 2021, Investigating spatiotemporal indoor contact patterns using ABM and STKDE, *In Proceedings of the 4th ACM SIGSPATIAL International Workshop on GeoSpatial Simulation*, 1-8.
- Choi, M., Cho, S. J. and Hwang, C. S., 2021, Relieving bottlenecks during evacuations using IoT devices and agent-based simulation, *Sustainability*, 13(16), 9465.
- Cosma, G., Ronchi, E. and Nilsson, D., 2016, Way-finding lighting systems for rail tunnel evacuation: A virtual reality experiment with Oculus Rift®, *Journal of Transportation Safety & Security*, 8, 101-117.
- Grociani, L., Vizzari, G., Yanagisawa, D., Nishinari, K. and Bandini, S., 2016, Route choice in pedestrian simulation: design and evaluation of a model based on empirical observations, *Intelligenza Artificiale*, 10(2), 163-182.
- Crooks, A., Malleon, N., Manley, E. and Heppenstall, A., 2015, *Agent-based Modeling and Geographical Information Systems, Geocomputation: A Practical Primer*, SAGE Publications Ltd, Thousand Oaks, CA.
- Djehiche, B., Tcheukam, A. and Tembine, H., 2017, A mean-field game of evacuation in multilevel building, *Transactions on Automatic Control*, 62(10), 5154-5169.
- Ezaki, T., Ohtsuka, K., Chraïbi, M., Boltes, M., Yanagisawa, D., Seyfried, A. and Nishinari, K., 2016, Inflow process of pedestrians to a confined space, *Collective Dynamics*, 1, 1-18.
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J. and Railsback, S. F., 2010, The ODD protocol: a review and first update, *Ecological Modelling*, 221 (23), 2760-2768.
- Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., DeAngelis, D. L. and Ayllón, D., 2020, The ODD protocol for describing agent-based and other simulation models: A second update to improve clarity, replication, and structural realism, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(2), 7.
- Guo, R. Y., Huang, H. J. and Wong, S. C., 2013, A potential field approach to the modeling of route choice in pedestrian evacuation, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2013(02), P02010.
- Haghani, M., 2020, Empirical methods in pedestrian, crowd and evacuation dynamics: Part II. Field methods and controversial topics, *Safety Science*, 129, 104760.
- Hawe, G. I., Coates, G., Wilson, D. T. and Crouch, R. S., 2012, Agent-based simulation for large-scale emergency response: a survey of usage and implementation, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 45(1), 1-51.
- Henscheid, Z., Middleton, D. and Bitinas, E., 2018, *Pythogoras: An Agent-based Simulation Environment*,

- Northrop Grumman Corporation, USA.
- Hoogendoorn, S. P. and Daamen, W., 2005, Pedestrian behavior at bottlenecks, *Transportation Science*, 39(2), 147-159.
- Huo, F., Song, W., Chen, L., Liu, C. and Liew, K. M., 2016, Experimental study on characteristics of pedestrian evacuation on stairs in a high-rise building, *Safety Science*, 86, 165-173.
- Isobe, M., Helbing, D. and Nagatani, T., 2004, Experiment, theory, and simulation of the evacuation of a room without visibility, *Physical Review E*, 69(6), 066132.
- Ji, Q., Xin, C., Tang, S. X. and Huang, J. P., 2018, Symmetry associated with symmetry break: revisiting ants and humans escaping from multiple-exit rooms, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 492, 941-947.
- Jiang, L., Li, J., Shen, C., Yang, S. and Han, Z., 2014, Obstacle optimization for panic flow-reducing the tangential momentum increases the escape speed, *PloS One*, 9(12), e115463.
- Kang, J. Y. and Aldstadt, J., 2019a, Using multiple scale space-time patterns in variance-based global sensitivity analysis for spatially explicit agent-based models, *Computers, Environment and Urban Systems*, 75, 170-183.
- Kang, J. Y. and Aldstadt, J., 2019b, Using multiple scale spatio-temporal patterns for validating spatially explicit agent-based models, *International Journal of Geographical Information Science*, 33(1), 193-213.
- Keefe, J. and Uzquiano, K., 2021, These are the warning signs that a crowd is dangerously dense, <https://www.cnn.com/interactive/2021/11/us/crowd-density-dangerous-warning-signs/>
- Liao, W., Seyfried, A., Zhang, J., Boltes, M., Zheng, X. and Zhao, Y., 2014, Experimental study on pedestrian flow through wide bottleneck, *Transportation Research Procedia*, 2, 26-33.
- Liddle, J., Seyfried, A., Klingsch, W., Rupprecht, T., Schadschneider, A. and Winkens, A., 2009, An experimental study of pedestrian congestions: influence of bottleneck width and length, *Physics and Society*, arXiv: 0911.4350. doi: 10.48550/arXiv.0911.4350.
- Lin, P., Ma, J., Liu, T. Y., Ran, T., Si, Y. L., Wu, F. Y. and Wang, G. Y., 2017, An experimental study of the impact of an obstacle on the escape efficiency by using mice under high competition, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 482, 228-242.
- Liu, S., Lo, S., Ma, J. and Wang, W., 2014, Agent-based microscopic pedestrian flow simulation model for pedestrian traffic problems, *Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(3), 992-1001.
- Müller, B., Bohn, F., Dreßler, G., Groeneveld, J., Klassert, C., Martin, R. and Schwarz, N., 2013, Describing human decisions in agent-based models-ODD+ D, an extension of the ODD protocol, *Environmental Modelling & Software*, 48, 37-48.
- Nagai, R., Fukamachi, M. and Nagatani, T., 2006, Evacuation of crawlers and walkers from corridor through an exit, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 367, 449-460.
- Narain, R., Golas, A., Curtis, S. and Lin, M. C., 2009, Aggregate dynamics for dense crowd simulation, *Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2009*, 1-8.
- Oh, H. and Park, J., 2017, Main factor causing 'faster-is-slower' phenomenon during evacuation: rodent experiment and simulation, *Scientific Reports*, 7(1), 1-14.
- Pelechano, N., Allbeck, J. M. and Badler, N. I., 2007, Controlling individual agents in high-density crowd simulation, *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, San Diego, CA.
- Rupprecht, T., Klingsch, W. and Seyfried, A., 2011, *Influence of Geometry Parameters on Pedestrian Flow through Bottleneck, Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Springer, Boston, MA, 71-80.
- Rupprecht, T., Seyfried, A., Klingsch, W. and Boltes, M., 2007, Bottleneck capacity estimation for pedestrian traffic, *In Proceedings of the Interflam*, 1423-1430.
- Severiukhina, O., Voloshin, D., Lees, M. H. and Karbovskii, V., 2017, The study of the influence of obstacles on crowd dynamics, *Procedia Computer Science*, 108, 215-224.
- Seyfried, A., Passon, O., Steffen, B., Boltes, M., Rupprecht, T.

- and Klingsch, W., 2009, New insights into pedestrian flow through bottlenecks, *Transportation Science*, 43(3), 395-406.
 - Shahhoseini, Z., and Sarvi, M., 2017, Collective movements of pedestrians: how we can learn from simple experiments with non-human (ant) crowds, *Plos One*, 12(8), e0182913.
 - Sharifi, M. S., Stuart, D., Christensen, K. and Chen, A., 2015, Traffic flow characteristics of heterogeneous pedestrian stream involving individuals with disabilities, *Transportation Research Record*, 2537(1), 111-125.
 - Shi, X., Ye, Z., Shiwakoti, N., Tang, D. and Lin, J., 2019, Examining effect of architectural adjustment on pedestrian crowd flow at bottleneck, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 522, 350-364.
 - Shiwakoti, N., Sarvi, M. and Burd, M., 2014, Using non-human biological entities to understand pedestrian crowd behaviour under emergency conditions, *Safety Science*, 66, 1-8.
 - Simonov, A., Lebin, A., Shcherbak, B., Zagarskikh, A. and Karsakov, A., 2018, Multi-agent crowd simulation on large areas with utility-based behavior models: Sochi Olympic Park Station use case, *Procedia Computer Science*, 136, 453-462.
 - Solmaz, G., Wu, F. J., Cirillo, F., Kovacs, E., Santana, J. R., Sánchez, L. and Munoz, L., 2019, Toward understanding crowd mobility in smart cities through the internet of things, *Communications Magazine*, 57(4), 40-46.
 - Still, K., 2000, Crowd Dynamics, Doctoral Dissertation, University of Warwick, Coventry.
 - Still, K., Papalexi, M., Fan, Y. and Bamford, D., 2020, Place crowd safety, crowd science? case studies and application, *Journal of Place Management and Development*, 13(4), 385-407.
 - Still, K., 2019, Crowd safety and crowd risk analysis, static crowd density visuals, <https://www.gkstill.com/Support/crowd-density/100sm/index.html>
 - Train, K., 2009, *Discrete Choice Methods with Simulation*, Cambridge University Press, Cambridge.
 - Ünal, A. E., Gezer, C., Pak, B. K. and Güngör, V. Ç., 2022, Generating emergency evacuation route directions based on crowd simulations with reinforcement learning, *In 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, 1-6.
 - Wang, G. Y., Wu, F. Y., Si, Y. L., Zeng, Q. and Lin, P., 2018, The study of the impact of obstacle on the efficiency of evacuation under different competitive conditions, *Procedia Engineering*, 211, 699-708.
 - Wang, X., Su, H., Zhou, T. and Miao, X., 2022, A subway station platform crowd simulation system, *In Proceedings of the 14th International Conference on Computer Modeling and Simulation*, 69-75.
 - Wolinski, D., J. Guy, S., Olivier, A. H., Lin, M., Manocha, D. and Pettré, J., 2014, Parameter estimation and comparative evaluation of crowd simulations, *Computer Graphics Forum*, 33(2), 303-312.
 - Xiao, H., Wang, Q., Zhang, J. and Song, W., 2019, Experimental study on the single-file movement of mice, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 524, 676-686.
 - Yanagisawa, D., Kimura, A., Tomoeda, A., Nishi, R., Suma, Y., Ohtsuka, K. and Nishinari, K., 2009, Introduction of frictional and turning function for pedestrian outflow with an obstacle, *Physical Review E*, 80(3), 036110.
 - Zhang, X., Zhong, T. and Liu, M., 2009, Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches, 44(3), 437-445.
- 교신: 지상훈, 02447, 서울특별시 동대문구 경희대로 26, 스페이스21 이과대학 지리학과(이메일: jish@khu.ac.kr, 전화: 02-961-9188)
- Correspondence: Sanghoon Ji, 02447, Department of Geography, College of Science, SPACE21, 26, Kyungheedaero, Dongdaemun-gu, Seoul, Korea(e-mail: jish@khu.ac.kr, phone: +82-2-961-9188)
- 최초투고일 2022. 12. 12
수정일 2022. 12. 29
최종접수일 2022. 12. 30