

2024년 춘계학술발표대회 : 일반부문

군중행동 및 밀집 위험도 평가 모델 개발을 위한 기초연구

- 군중행동연구 고찰을 중심으로 -

Preliminary Study on the Development of Models for Crowd Behavior and Risk Assessment of Crowd Density

- Focused on the Literature Review -

○최예진*

Choi, Ye-Jin

한기성**

Han, Gi-Sung

이경훈***

Lee, Kyung-Hoon

Abstract

The ultimate aim of this study is to propose a model of Crowd Behavior and Density Risk Assessment. As a preliminary step, previous researches on crowd behavior were studied and analyzed in terms of methods of the research. They were analyzed by dividing experimental methods into animal experiments, controlled laboratory experiments with human subjects, evacuation drill experiments, virtual reality (VR) and hypothetical choice (HC) experiments, simulations and empirical methods such as analysis of pedestrian crowds' movement in natural environments, analysis of disasters, and post-disaster interview with survivors. Based on the summary, ideas for the future research were suggested as follows; Analysis of pedestrian crowds' movement in natural environments can be used as an effective tool for crowd behavior and should be quantified through simulation to complement each other.

키워드 : 군중행동, 군중밀집, 위험도평가, 문헌연구, 실증연구

Keywords : Crowd Behavior, Crowd Density, Risk Assessment, Literature Review, Empirical methods

1. 서론

1.1 연구의 배경

전 세계에서 최근 5년간 일어난 군중밀집에 의한 압박 사고는 17건으로 지속적으로 발생하며 많은 인명피해를 가져왔다. 텍사스에서 열린 Astroworld Festival(2021)에서 공연자가 등장하자 50,000명의 인파가 무대를 향해 쇄도하면서 군중압착에 의한 1,312명의 사상자가 발생하였다. 이 태원참사는 약 40m, 폭 3.2-4m의 좁은 내리막길 골목에서 다수의 인파가 물리면서 328명의 인명피해가 발생하였다.

표 1 최근 5년간 대형압사사고 발생 현황

행사명	발생 장소	인명피해 (사망자)
Itaewon Halloween crowd crush (대한민국, 2022)	보행로	328명 (158)
Kanjuruhan Stadium disaster after football match (인도네시아, 2022)	경기장	716명 (133, 583)
Astroworld music Festival (미국, 2021)	행사장	1,312명 (12, 1,300)
Religious celebration (이스라엘, 2021)	행사장	195명 (45, 150)
Crush resulting from a police raid on an illegal gathering (페루, 2020)	클럽	19명 (13, 6)
Qasem Soleimani funeral stampede (이란, 2020)	행사장	256명 (56, 200)

* 고려대학교 일반대학원 건축학과 석사과정

** 고려대학교 공학연구원 연구교수, 공학박사

*** 고려대학교 건축학과 교수, 건축학박사

(Corresponding author : Department of Architecture, Korea University, kh92lee@korea.ac.kr)

수많은 군중의 밀집으로 인한 대규모 사고로 이어질 수 있는 군중압착(Crowd Crush)에 대한 위험성이 커져가고 있으며, 코로나 종식 이후 대규모 군중이 밀집할 수 있는 행사가 늘어남에 따라서 군중관리(Crowd Management)를 위한 군중행동(Crowd Behavior)의 살펴볼 필요가 있다.

표1의 사례의 다수 사고발생지인 경기장 및 행사장에서 많은 관람객들이 모이는 공연이 주로 개최되고 있다. 공연현장 안전사고는 실신 및 호흡곤란 등 극심한 혼잡으로 비롯된 압박사고가 가장 많이 일어나고 있지만 개선대책이 안전요원의 인력에만 편향되어있어 보다 효과적으로 혼잡을 해소할 수 있는 대책이 강구되어야 할 필요성이 있다. 특히, 많은 인파가 한정적 공간에 모이는 밀집상황에서 안전사고를 예측하여 예방해야한다. 이에 정부차원에서 인파사고 재발방지 대책으로 지자체에서 안전관리계획을 수립하고 지자체 상황실과 통합관제센터를 연계하여 영상정보를 재난 관리에 활용할 수 있는 방안 등의 군중밀집 관리의 중요성을 시사하고 있다 (행정안전부, 2023).

1.2 연구의 목적

본 연구는 군중 밀집상황에서 나타나는 군중 행동 및 밀집 위험도 모델 개발하기 위한 기초자료를 마련하는 것을 연구의 목적으로 한다. 군중행동의 정의와 관련된 이론을 고찰하고, 기 수행된 실증연구의 군중행동 분석방법을 실험적 방법론 및 경험적 방법론에 따라 살펴봄으로써 추후 수행될 연구를 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 군중행동이론

보행자 이동행태는 거시적 접근법(macroscopic approaches)과 미시적 접근법(microscopic approaches)으로 분석할 수 있다.

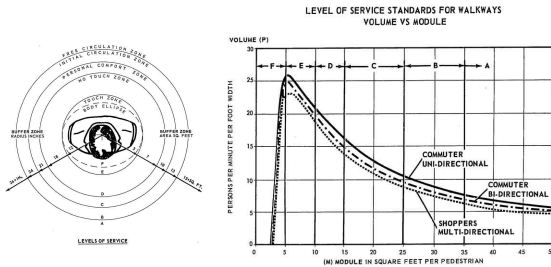


그림 1 Level of Service (Frui, 1971)

거시적 접근법은 보행자들을 동질적이고 연속된 흐름으로 가정하고 보행량-밀도-속도 관계식에 기반을 둔 분석 방법이다. Frui(1971)의 Level of Service(서비스수준, LOS)는 보행자의 보행속도나 보행흐름의 난이도를 결정하는 척도로서 보행자 1인당 점유면적을 기초로 하여 단계별로 설정한 기준을 말한다. 보행속도의 선택자유와 다른 보행자를 추월할 수 있는 자유를 측정 지표로 하여, LOS A는 보행속도를 자유롭게 선택할 수 있으나, LOS E는 일상적인 보행속도로는 걸을 수가 없고 보행용량에 따라 보행흐름이 잠시 정지하게 될 수 있고 LOS F의 상황은 보행교통흐름이 마비되고 보행 시 전적으로 앞사람의 보행에 의존하게 된다고 정의하였다. 서비스수준은 도시기반시설의 적합성을 평가하기 위한 지표로 사용된다.

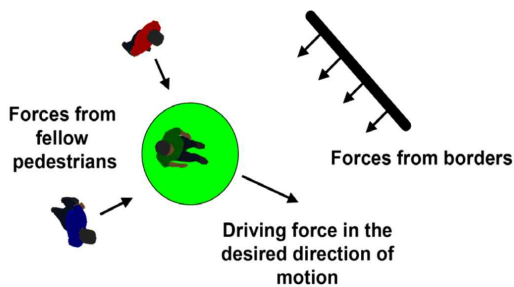


그림 2 Social Force Model (Helbing, 1995)

미시적 접근법은 개별 보행자 단위의 움직임과 상호작용을 분석한다. Helbing(1995)의 Social Force Model(사회역학모형)은 세 가지의 자연적인 현상에 따라 보행자의 행태를 묘사한다. 보행자가 목적지에 도달하기 위해 이동시 목적지를 향해 속도를 유지하려는 힘(driving force), 다른 보행자나 장애물과 적정 거리를 유지하려는 척력(repulsive force), 동반자나 상점 등 매력 요인에 더 가까이 가려는 인력(attractive force)의 영향력의 합으로 구성된다. 이를 기반으로 컴퓨터 시뮬레이션 시 보행자들이 같은 방향으로 움직이는 경우 지그재그 형태의 보행행태가 나타나는 것으로 분석되었다. Social Force Model은 보행자의 이동과 상호작용을 구현하여 Vissim과 같은 상용 시뮬레이터에 적용되고 있다.

3. 군중행동 분석방법

3.1 실험적 방법론

군중행동실험은 인간의 집단적 행동에 대한 행동모델로 활용되어져왔다. 동물실험은 피실험자의 안전을 해치지 않으면서도 인간을 대상으로 한 실험에서는 재현하기 어려운 다양한 현상을 조사 가능하며 개인의 행동이 아닌 집단적 움직임의 측정하기 위해 활용된다. 개미와 생쥐를 대상으로 한 실험이 일반적이지만 양 떼의 움직임을 기반으로도 연구가 이루어지고 있다. 연구대상이 과제를 수행하고 움직임을 시작하기 위해 주로 침습성 화학물질, 물, 열 및 기피제가 사용된다. 다수의 연구에서 측정된 침습성 수준을 행동의 통제가능한 대응치로 사용하였다.

동물실험은 기 수행된 이론적 연구를 실증하기 위한 연구가 이루어지고 있다. Helbing(1995, 2000)의 연구에 의해 social force model을 기반한 단일 문에서 군중의 대피를 시뮬레이션에서 ‘더 빠를수록 느려지는’ 현상이 발견되었는데, 이 현상은 대피에 대한 욕구가 높아지면 실제로 대피 효율을 방해하고 더 느리게 만들 수 있는 반직관적 상황을 나타낸다. Altshuler(2005)는 개미를 보행자 모델로 사용하여, 개미의 무리행동을 Helbing(2000) 이론의 가정과 연결시킴으로써, 가정을 실증으로서 실험을 관찰하였다. 인간과 개미의 군중대피행동이 매우 유사하다고 제안하였고, 방에 갇힌 개인이 공황상태에서 두 개의 동일한 출구를 비대칭적으로 사용할 수 있는 반면 정상적인 조건에서는 거의 동일한 비율로 출구를 사용한다고 밝혔다. 이 효과를 ‘공황에 의한 집단화(panic-induced herding)’로 인한 ‘대칭성 파괴(symmetry breaking)’로 정의하였다.

통제된 환경에서 인간 피실험자 그룹을 대상으로 한 실험은 군중행동연구에 가장 신뢰성있는 방법론으로 사용되고 있다. 동물실험 현실성 부족의 한계를 벗어나서, 개인 수준분석 등 다양한 주제를 다룰 수 있다. 실험연구에서는 실험환경에서 피실험자의 특정 설계요소 조작의 영향을 받아 이루어진다. 그러나 가상현실 실험과는 피실험자가 실제 움직이고 자신을 둘러싼 물리적 환경뿐만 아니라 다른 사람의 존재를 느낀다는 점에서 차이가 있다. 또한, 이미지처리 및 비디오 추적기술의 발전으로 이러한 실험에서 피실험자의 행동을 정밀하게 모니터링하고 분석할 수 있다. 실험환경에서 개인의 정밀한 추적은 군중관리 및 통제에 대한 시사점을 제공하는 보행행동 분석과 정상적인 조건 및 비상상황의 모델링을 위한 요소 점검에 활용된다.

Moussaid(2009)는 층동회피의 통제 실험을 수행하여 다양한 상호작용 거리와 각도에 따른 보행자의 방향과 속도 변화를 조사하였다. 이후 후속연구에서 보행자의 양방향 흐름에서 자체적으로 조직화된 행렬형성 현상을 조사하여 자기 조직화된 행렬의 형성과 해체는 보행속도의 개인의 차이에 의해 결정된다고 밝혔다. 이외에도, 코너 움직임, 횡단 및 병합 등의 보행로의 형태에서 보행자의 움직임에 건축적 특징을 분석한 연구와 병목현상과 좁은 출구를 통과하는 보행자 흐름의 특성을 조사하는 연구 및 길찾기, 탐색 의사결정 등의 연구 주제로 이루어지고 있다.

대피 훈련 실험은 연구자가 설계한 임시 설정인 통제된 실험환경과 달리 실제 장소와 건물에서 진행된다. 피실험자가 실험 사실을 인지하고 있기 때문에 관측치가 완전히 자연스러운 것을 아니다. Heliovaara(2012)는 두 개의 출구가 비대칭으로 위치한 보복에서 실험을 진행하여 거시적 행동을 측정하였다. Kobes(2010)은 예고없이 대피하는 훈련을 실시하여 연기와 낮은 출구 표지판이 거주자의 반응에 미칠 수 있는 영향을 조사하였다.

가상현실 기술은 인간 군중 실험 및 대피훈련에서 실제 위험에 노출되지 않고 안전한 실험 수행을 위한 대안으로 사용된다. 실제 피실험자의 움직임을 수반한 실험에 비해 비교적 광범위한 주제를 다룰 수 있으며 동시에 동일한 장소에서 수십 명의 피실험자의 실험을 진행할 수 있다. 가상실험은 실험자는 피실험자에게 기하학적 설정 유형 측면에서 유연하게 대처할 수 있다. 실험자는 설계요인의 변동 제어 가능하며 언제 결정을 내려야 하는지, 어떤 유형의 결정을 내릴 수 있는지 등 반응유형을 설계할 수 있다.

최근 사실적인 3차원 및 몰입형 환경 시각화의 발전과 대화형 설계가 가능해졌다. Occhialini(2016)는 다양한 위치와 환경 조건에서 출구 표지판의 지각을 평가하기 위해 신경활동분석을 사용하여 표지판을 인식할 수 있는 거리를 정량화하고 실제 실험의 거리와 비교했다. Kinatader(2014)는 사회적 영향력에 대한 인식도에 대하여 다른 가상 에이전트의 존재와 움직임이 피실험자의 경로선택에 영향을 미치지 않지만 목적지 선택에는 영향을 미치지 않는다는 것을 관찰했다. Haghani&Sarvi(2016)는 출구 선택에 있어서 피실험자의 발견의 개인차가 다른 사람들의 잠재된 특성과 더 밀접한 관련을 시사하였으며 개인 간 수용할 수 있는 출구선택과 관련된 행동을 확인하였다.

군중 시뮬레이션의 군중 행동모델은 개인은 관찰, 경험 및 보고된 행동을 포함하는 개념 모델과 시뮬레이션을 위한 컴퓨터 모델정보 처리와 관련된 개인행동 모델로 나누어진다. 군중 시뮬레이션의 대표적인 Exodus는 유체역학 모델을 채택하고 이를 인간 움직임의 개별 가상현실 시뮬레이션과 결합하여 건물 밖으로 나가거나 화재위험에 압도당하는 각 개인의 궤적을 추적하여 출구 통계에 미치는 영향을 평가한다. 또한, CA(Cellular Automata)모형은 공간 영역을 일정한 크기의 격자형 구조의 단위로 나누고, 각 단위 셀 사이의 상호작용 규칙을 프로그래밍하여 사용한다.

Helbing은 중간 및 높은 보행자 밀도에서 보행자 군중의 움직임이 가스 및 유체의 움직임과 유사성을 보인다는 것을 발견하였고 임계 밀도를 초과하면 균일한 보행 방향의 라인에서 자발적인 조직이 형성된다. 최문기(2022)는 행위자 기반 모델을 통하여 보행자 유동현상 및 상황통제의 변수에 따라 인구과밀현상의 위험도 변화양상을 분석 결과, 통로를 지나는 유동 인구수와 통로 길이가 인구밀도 증가에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 김서영(2023)은 Pathfinder를 사용하여 경사로에서 길의 폭과 가벽 설치 여부 등에 따른 군중 이동으로 군중 밀집도를 단순히 이동시간 비교를 통해 분석하여 밀집 위험도에 대한 군중 행동을 기반 근거를 도출하기에는 제약이 있다.

3.2 경험적 방법론

경험적 방법론에는 실제 환경에서 군중의 움직임을 관찰하는 방법과 군중 압박 사고사례를 조사하는 방법, 군중 압박사고 생존 피해자 인터뷰하는 방법 등이 있다.

군중의 움직임 관찰조사는 실제 환경에서 보행자의 보행에 대한 비디오 분석으로 이루어진다. 이러한 데이터는 반드시 응급행동이 나타나는 것은 아니지만, 근사치에 가깝게 보행 행동 모델을 보정하는데 효과적이며 관측치가 자연스럽다. 또한 실험환경구성에 비해 비용이 적게 들고 접근성이 좋아 개인단위의 연구가 가능하다. 보행에 대한 비디오 분석의 분석방법은 정적 및 동적으로 나뉜다. 정적 공간은 군중이 멈춰있거나 대기하는 공간이고 동적공간은 보행로로 군중이 이동하는 영역이다. 두 유형의 공간은 활용요소 및 밀도가 다르므로 위험도 측정변수 또한 달라진다. 유형별 주요 변수는 정적공간에서는 측정공간의 밀도와 사람의 점유공간이고, 동적공간에서는 보행자의 보행속도와 흐름률이다. 밀도가 증가함에 따라 흐름이 증가하지만 임계밀도에 도달할 때까지만 흐름증가가 가능하다.

Antonini(2006)은 보행자 각 시점에서 다음 단계의 선택을 예측하기 위해 점유공간, 이동방향, 목적지 및 이동각도와 같은 다양한 요소를 변수로 보행자의 보행행동 및 충돌회피에 대한 이산선택모형을 제시하였다. Rudloff(2011)과 Zeng(2014)은 영상에서 추출한 보행자 궤적을 사용하여 사회적 힘 모델에 대한 매개변수를 보정하는데 사용했다. 임진경(2004)는 비디오분석을 통해 보행속도 및 밀도, 보행흐름율의 각 변수사이에 관계모형 구축하였고 정래혁(2015)은 지하철 역사 내 통행행태를 분석하기 위해 이용자를 추적하여 통과한 경로와 경로상 존재하는 시설물, 경로를 통과하는 시간을 추적조사 하였다.

사고사례조사는 응급상황에서의 사람들의 본능적인 행동관찰을 통해 사고의 근본적인 원인을 식별하여 사고 사례로부터 사고경위파악 및 재발방지를 위한 결론을 도출할 수 있다. 실험적 방법론 보다 군중행동의 신뢰성이 높지만 제한 가능성 및 측정의 정확도, 관측의 다양성 등 데이터를 사용하여 조사할 수 있는 현상의 범위가 좁다. 사고사례의 군중압박 상황을 분석하기 위해 실제 사고의 CCTV 영상자료가 요구된다. CCTV를 통한 자료의 수집은 사건의 시작 전부터 종결 이후까지 전체적인 영상 및 여러 장소, 각도의 영상이 필요하며 영상의 화질저하의 문제도 발생한다. 이를 보완하기 위해 현장의 목격자의 동영상도 활용되지만, 현장의 목격자의 동영상은 중요상황이 포함되는 경우가 많으나 분량이 짧아 전체적인 상황을 파악하기 어려워 자료를 보충하는 용도로 사용된다.

2010년 독일에서 발생한 러브퍼레이드 군중사건을 사고 사례 조사한 Helbing&Mukerji(2012)는 현장영상 및 시뮬레이션에 대한 질적분석을 통해 사건의 원인이 집단공황(mass panic) 보다는 군중난기류(crowd turbulence)에 의한 군중해임을 밝혀냈다. Krausz&Bauckhage(2012)은 사건에 대한 자동 비디오 기반 군중이 압착되었을 때 군중의 흐름률과 이동속도 분석을 제시하고 군중 밀집현상을 특징짓는 동작패턴을 감지할 수 있는 시스템을 개발하였다.

현장관찰이나 사고영상분석방법을 사용하는 것 이외에 군중압박사고의 경험을 가진 생존 피해자로부터 인터뷰를 통해 데이터를 얻을 수 있다. 실제사고 시 생존자의 위치와 행동, 경험, 감정 등을 확보하면서 그것이 어느 시간, 이벤트, 장소에서 발생되고 증강, 감소, 변화되었는지를 현장의 상황정리와 연계하여 인터뷰해야 한다. 사고시각과 인터뷰시각의 시간차 단기기억의 많은 부분이 소멸될 수 있어, 빠른 시간 내에 조사하는 것이 중요하다. 하지만 생존 피해자의 공황상태 기억이 왜곡될 가능성이 있어 신뢰성 떨어지고 조사할 수 있는 현상의 범위가 제한적이다.

2001년 911테러 공격에서 살아남은 세계무역센터 타워의 거주자들을 인터뷰를 진행한 Kuligowski&Mileti(2009)은 경로 회기분석을 사용하였고, Sherman(2011)은 선형회귀모델을 사용하여 대피 전 지연 문제를 분석하였다.

4. 결론

본 연구는 군중행동 및 밀집 위험도 평가 모델 개발을 위한 기초를 마련하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 관련 이론을 살펴보고, 선행연구에 대해 연구방법적 측면에서 분석하여 향후 수행될 연구 방향을 제시하였다.

군중행동연구에 있어 가장 좋은 연구방법은 실제 사람들이 밀집되어있는 상황에서의 행동을 관찰 및 실험하는 방법이다. 그러나 군중을 대상으로 하는 연구의 경우, 윤리적 및 안전 문제로 인하여 실제 사람이 군중밀집에 참여하는 연구는 수행되기 어렵다.

다양한 연구방법 중에서 경험적 방법론의 군중의 움직임 관찰조사를 사용하는 연구의 경우, 실제 응급상황이 아닌 한계가 존재하지만, 근사치에 가깝게 행동모델을 보정하는 용도로 효과적이며 관측치가 자연스럽다는 점에서 과거의 기억에 의존하는 인터뷰 또는 설문조사 방식이나 가상의 상황 및 환경을 전제로 진행되는 실험연구에 비하여 데이터 자체가 갖는 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 살펴보고자 하는 군중행동 및 밀집 위험도는 군중의 움직임 관찰조사로는 당시의 상황 및 환경의 조건을 정확하게 파악할 수 없다는 점에서 정량적으로 측정할 수 있는 데이터가 추가적으로 필요하다.

실험연구의 경우, 연구자가 연구목적에 고려하여 의도적으로 조작한 환경에서 피실험자의 행동을 관찰하고, 이를 정량적으로 평가할 수 있다는 점에서 연구방법 상의 이점이 많지만, 실제 환경에서 행동과 실험 환경에서의 행동이 동일할 것이냐에 대한 의문이 꾸준히 제기되고 있다. 이와 관련하여 최근에는 3D 시뮬레이션의 기술이 발전하고 있어 병목현상으로 인한 에이전트의 개개인의 움직임 확인 및 최단거리 출구와 경로, 지정출구로 경로 선택 행동 알고리즘에 따라 시뮬레이션 결과에 대한 데이터 제공이 가능하다. 시뮬레이션만으로 연구를 설계하기에는 실제 인간의 행동을 모사하는 수준의 한계 때문에 설계상 검토 및 보완사항을 제시하는 정도로 사용되고 있다. 따라서 실제 군중의 움직임의 관찰데이터와 시뮬레이션을 통한 데이터를 정량화 하여 상호보완적 연구가 진행되어야 한다.

- Haghani, M., & Sarvi, M. (2018). Crowd behaviour and motion: Empirical methods. *Transportation research part B: methodological*, 107, 253-294.
- 왕순주. (2023). 군중집회 시의 안전: 군중압박의 기초조사. *한국방재안전학회 논문집*, 16(1), 49-60.
- FRUIN, J. J. (1970). *Designing for pedestrians a level of service concept*. Polytechnic University.
- Helbing, D., & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5), 4282.
- Han, M., Jung, D., Lee, Y. I., & Lee, S. (2022). Modeling pedestrian movement behavior using social force model and fuzzy inference. *Journal of Korean Society of Transportation*, 40(2), 218-229.
- 신대섭, 이선하, 안우영, & 하동익. (2010). Social Force Model 을 활용한 다중이용시설의 긴급대피계획 수립 연구. *교통연구*, 17(4), 63-74.
- Knoblauch, R. L., Pietrucha, M. T., & Nitzburg, M. (1996). Field studies of pedestrian walking speed and start-up time. *Transportation research record*, 1538(1), 27-38.
- Antonini, G., Bierlaire, M., & Weber, M. (2006). Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), 667-687.
- Rudloff, C., Matyus, T., Seer, S., & Bauer, D. (2011). Can walking behavior be predicted?: Analysis of calibration and fit of pedestrian models. *Transportation research record*, 2264(1), 101-109.
- Zeng, W., Chen, P., Nakamura, H., & Iryo-Asano, M. (2014). Application of social force model to pedestrian behavior analysis at signalized crosswalk. *Transportation research part C: emerging technologies*, 40, 143-159.
- Helbing, D., & Mukerji, P. (2012). Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. *EPJ Data Science*, 1, 1-40.
- Krausz, B., & Bauckhage, C. (2012). Loveparade 2010: Automatic video analysis of a crowd disaster. *Computer Vision and Image Understanding*, 116(3), 307-319.
- Kuligowski, E. D., & Mileti, D. S. (2009). Modeling pre-evacuation delay by occupants in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001. *Fire Safety Journal*, 44(4), 487-496.
- Sherman, M. F., Peyrot, M., Magda, L. A., & Gershon, R. R. M. (2011). Modeling pre-evacuation delay by evacuees in World Trade Center Towers 1 and 2 on September 11, 2001: A revisit using regression analysis. *Fire Safety Journal*, 46(7), 414-424.
- 박지환, 오승훈, & 이종호. (2012). 보행환경개선에 따른 환승역 보행행태 분석 연구. *대한토목학회논문집 D*, 32(3D), 189-196.