

FFM과 FDS를 이용한 화재 대피 시뮬레이션*

이재영¹ · 이민혁¹ · 전철민^{1*}

Fire Evacuation Simulation Using FFM and FDS*

Jae-Young LEE¹ · Min-Hyuck LEE¹ · Chul-Min JUN^{1*}

요 약

일반적으로 화재 및 대피에 대한 안전성을 진단하기 위해 화재 시뮬레이터와 대피 시뮬레이터를 독립적으로 활용하고 있다. 이 방식은 화재 확산을 고려한 보행자의 움직임이 반영되어 있지 않기 때문에 높은 정확도의 안전성 진단을 기대하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 화재 확산을 고려한 보행자의 움직임을 묘사할 수 있는 화재 대피 시뮬레이션 기법을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 시뮬레이션 기법은 FDS(Fire Dynamics Simulator)의 화재 확산 데이터를 보행모델 FFM(Floor Field Model)에 반영하여, 보행자가 화재를 인지하고 이를 바탕으로 우회하여 안전한 경로로 대피하는 상황을 묘사한다. 연구 범위는 FDS와 FFM 간의 데이터 연동 및 화재 확산을 고려한 FFM 개발로 구성되며, 제안한 방법론의 실험은 대피 시뮬레이터 EgresSIM을 이용하여 진행하였다. 시뮬레이션 결과에서는 화재의 유무에 따른 출구별 대피인원 변화가 나타났으며, 이에 따른 출구별 대피시간 증감과 병목현상의 심화를 확인할 수 있었다.

주요어 : 화재 대피 시뮬레이션, 보행모델, 화재 시뮬레이터, 실내 대피

ABSTRACT

In general, fire and evacuation simulators are used independently to diagnose the safety of building. Because this method does not reflect the movement of pedestrians considering fire spread, it is difficult to expect diagnosis of safety with high accuracy. In this study, we propose the simulation method that can describe the movement of pedestrians in the fire emergency. Our method reflects the FDS fire spread data into FFM and explains the situation in which a pedestrian recognize a fire and escapes to a safe route. This study consists of data linkage between FDS and FFM and development of improved FFM. Experiment of the proposed method is progressed using the EgresSIM. Simulation result

2018년 5월 15일 접수 Received on May 15, 2018 / 2018년 6월 15일 수정 Revised on June 15, 2018 / 2018년 6월 15일 심사완료 Accepted on June 15, 2018

* 이 논문은 2015년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015S1A5B8046775)

¹ 서울시립대학교 공간정보공학과 Dept. of Geoinformatics, University of Seoul

* Corresponding Author E-mail : cmjun@uos.ac.kr

shows that the number of evacuees on each exit is affected by the presence or absence of fire and it was confirmed that the evacuation time increase and the bottleneck phenomenon deepened by exit.

KEYWORDS : *Fire Evacuation Simulation, Floor Field Model, Fire Dynamics Simulator, Indoor Evacuation*

서 론

일반적으로 대형건축물에서는 화재 및 대피에 대한 안전성을 진단하기 위해 화재 시뮬레이터와 대피 시뮬레이터를 독립적으로 활용하고 있다. 대피 시뮬레이터를 통해 실내 보행자들이 안전한 장소까지 대피하는데 소요되는 대피요구 시간(RSET : Required Safe Egress Time)을 계산하고, 화재 시뮬레이터를 통해 화재가 보행자들에게 영향을 끼치지 않는 대피허용시간(ASET : Available Safe Egress Time)을 계산하여 두 시간의 비교·분석을 통해 건물의 안전성을 진단한다(Kim and Jeon, 2015). 이에 활용되는 대표적인 대피 시뮬레이터로는 Pathfinder, Simulex, buildingEXODUS 등이 있고 화재 시뮬레이터로는 FDS, CFAST, Smartfire 등이 있다.

하지만 화재 시뮬레이터와 대피 시뮬레이터를 독립적으로 이용하여 안전성을 진단하는 방식은 화재 확산을 고려한 보행자의 움직임이 반영되어 있지 않기 때문에 높은 정확도의 안전성 진단을 기대하기 어렵다. 보행자는 이동하던 경로 상에 연기 혹은 화재와 같은 위험요인을 발견하면 보다 안전한 경로로 우회하게 된다. 하지만 화재 시뮬레이션과 대피 시뮬레이션을 독립적으로 수행한다는 것은 화재 확산에 대한 묘사와 보행자의 움직임 묘사가 연관되지 않고 개별로 수행됨을 의미한다. 결과적으로 대피 시뮬레이션에서의 보행자는 앞서 언급한 상황이 발생하더라도 화재를 인지하지 못하고 우회경로를 선택하지 않는다.

이에 본 연구에서는 화재 확산을 고려한 보행자의 움직임을 묘사할 수 있는 화재 대피 시뮬레

이션을 제안하고자 한다. 본 연구에서 제안하는 화재 대피 시뮬레이션 기법은 화재 시뮬레이터 FDS의 화재 확산 데이터를 보행모델 FFM에 반영하여 화재를 고려한 대피 상황을 묘사하는 것을 목표로 한다. 이에 연구 범위는 FDS와 FFM 간의 데이터 연동 및 화재 확산을 고려한 FFM 개발로 구성되며, 제안한 방법론의 실험은 대피 시뮬레이터 EgresSIM을 이용하여 진행하였다.

관련 연구 분석

1. Floor Field Model

FFM은 셀로 구성된 공간에서 보행자의 미시적인 움직임을 모델링한다(Burstedde *et al.*, 2001). 보행자는 그리드 셀 공간에 배치되며, 그림 1과 같이 주변 8개 셀과의 상호작용을 통해 자신의 위치를 결정하고, 이를 반복하여 목적지로 이동하게 된다. 보행자와 주변 셀들과의 상호작용에는 크게 출구와의 거리 요소와 주변 이웃 보행자들과의 위치 요소가 있다. 각각의 요소는 개별적인 필드를 생성한다.

SFF(Static Floor Field)는 각 셀에 출구까지 접근하는데 용이한 정도가 할당되며 이는 대체로 거리 값을 이용한다. DFF(Dynamic Floor Field)는 각 셀에 보행자들 간의 상호작용에 대한 값이 할당되며 이는 서로 간의 이끌림 효과를 의미한다. 그림 2는 공간 데이터와 보행자 그리고 두 필드로 이루어진 FFM의 구조를 나타낸다. 보행자는 SFF의 값과 DFF의 값의 연산을 통해서 현재 위치에서 어떤 셀로 이동할 것인지를 매순간 결정하게 된다. 또한 FFM은 필드들의 값에 민감도 파라미터를 조정함으로써 암흑상황 등 다양한 상황에 대한 시뮬레이션이 가능하다(Nam *et al.*, 2016).

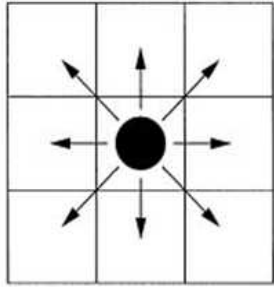


FIGURE 1. Movement of an agent

2. Fire Dynamics Simulator

FDS는 미국국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology)에서 화재로 인한 열이나 연기에 대한 해석을 위해 만든 화재 시뮬레이터이다(Kim *et al.*, 2013). 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 화재 실험 공간, 화재 규모, 실내 객체(벽면, 바닥, 가구 등)의 기하학적 형태, 실내 객체의 속성(재질, 밀도, 열전도 등), 배기 조건(환풍기, 공기순환), 소화장치(스프링클러), 해석 파라미터 등의 요소가 정의되어야 한다(McGrattan *et al.*, 2013). 열·연기의 확산은 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 기반으로 계산하며, 이에 대한 정성적 또는 정량적 해석을 위해 SmokeView라는 가시화 툴과 fds2ascii를 이용한 분석 결과 출력 기능을 제공한다(Rie, 2008).

3. 화재 대피 시뮬레이션

대피 시뮬레이터와 화재 시뮬레이터를 이용하는 연구의 방식은 두 시뮬레이터의 연계 수준에 따라 논커플링(Non-coupling), 세미커플링(Semi-coupling), 커플링(Coupling) 방식으로 나뉜다(Koo, 2017). 논커플링 방식은 서론에서 언급하였듯이 화재 시뮬레이션과 대피 시뮬레이션을 각각 수행하여 특정지점에서의 ASET과 RSET을 도출하여 비교·분석하는 방법으로 국내에서 일반적으로 활용되고 있다(Choi, 2011). 세미커플링 방식은 화재의 확산과 보행자의 이동을 동시에 확인하는 방법이다. 하지만 단순히 화재의 확산과 보행자의 움직임을 겹쳐 표현하

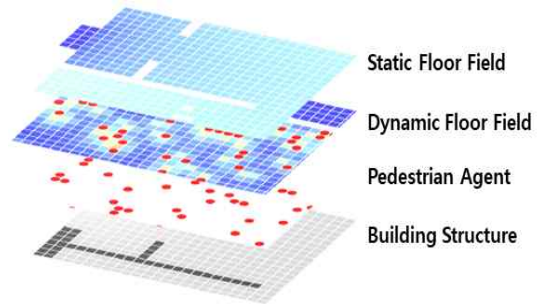


FIGURE 2. The structure of floor field model

는 것으로, 화재가 보행자의 행동에 영향을 미치지 못하여 현실적인 대피 묘사에 한계가 있다(Koo *et al.*, 2017). 커플링 방식은 화재가 보행자의 행동에 영향을 주어 실제 대피와 유사한 보행자의 대피를 구현한다. 대표적인 커플링 방식의 시뮬레이터로는 buildingEXODUS, FDS+Evac 등이 있다.

FDS+Evac은 보행자의 이동에 영향을 미치는 요소들을 벡터 형태의 힘으로 표현하고, 이를 계산하여 보행자의 움직임을 나타내는 SFM(Social Force Model)을 이용한다(Korhonen *et al.*, 2008). FDS+Evac은 FDS의 화재 분석 결과 중 연기 농도를 이용하여 보행자의 출구에 대한 가시 여부에 따라 보이지 않는 출구를 배제하는 출구 선택 알고리즘을 사용한다(Korhonen and Hostikka, 2010). 다만, SFM과 FDS는 연산복잡도가 높아 시뮬레이션 결과를 획득하기 까지 오랜 시간이 소요되는 단점이 있다(Nam, 2012). 따라서 두 모델을 사용하는 FDS+Evac은 인원 재배치 같은 사소한 시나리오 변경에도 결과 분석에 오랜 시간이 필요하다.

4. 관련 연구와의 차별성

본 연구에서는 FDS와 FFM을 이용한 커플링 방식의 화재 대피 시뮬레이션 기법을 제안한다. FFM은 보행 에이전트가 인접한 8개 셀만을 고려하여 이동을 결정하기 때문에 연산 속도가 빠르다(Helbing *et al.*, 2000). 하지만 이는 화재(열·연기)가 인접 셀까지 확산되기 전까지는 에이전트가 위험상황을 인지할 수 없다는 단점

이 되기도 한다(Lee *et al.*, 2017). 이에 본 연구에서는 기존 FFM을 보행 에이전트가 화재에 인접하지 않아도 화재를 인지할 수 있도록 개선하고 이를 바탕으로 에이전트가 안전한 출구로 우회할 수 있도록 개선하였다.

방법론

FFM과 FDS를 이용한 화재 대피 시뮬레이션 방법론은 크게 두 부분으로 구성된다. 첫 번째는 FDS의 화재 확산 데이터를 FFM에 반영하기 위해 데이터를 연동하는 부분이다. 데이터는 화재 확산 데이터뿐만 아니라 두 모델의 공간 데이터를 포함한다. 두 번째는 FDS와의 연동을 바탕으로 화재 확산을 고려한 FFM을 개발하는 부분이다. 개선된 FFM에는 보행 에이전트가 화재를 인지하는 알고리즘과 화재를 인지했을 경우, 안전한 출구로 우회하는 알고리즘이 적용된다.

1. 데이터 연동

데이터 연동은 두 과정으로 이루어진다. 첫 번째는 FFM의 공간 데이터를 FDS의 공간 데이터로 변환하여 화재 시뮬레이션을 수행하는 과정이고, 두 번째는 FDS를 통해 산출된 화재 확산 데이터를 FFM에 반영하는 과정이다. 이를 요약하면 그림 3과 같다.

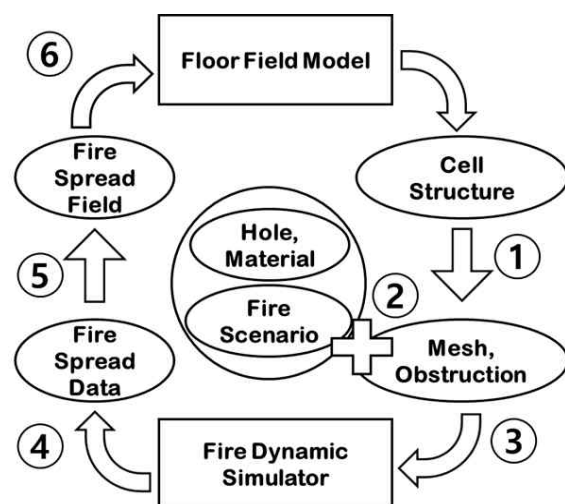


FIGURE 3. Data linkage in FFM and FDS

1) 공간 데이터 변환

FFM의 공간 데이터는 개별 셀들의 집합으로 구성된다. 각 셀은 그림 4의 (a)와 같이 보행 에이전트의 보폭을 고려하여 30cm 또는 40cm 크기의 정사각형 모양이며, 벽, 장애물 등을 의미하는 보행불가 셀과 자유로운 보행공간을 의미하는 셀로 구분된다. FDS는 그림 4의 (b)와 같이 3차원 공간 데이터를 이용하며 공간 데이터는 화재 상황이 구현되는 화재 해석 공간(Mesh)과 벽, 가구, 장애물 등을 표현하는 직육면체 형태의 객체(Obstruction)들로 구성된다. 화재 해석 공간은 복셀을 이용하여 세분화되며, 각 복셀은 사용자가 시뮬레이션 결과를 해석하는데 적용할 해상도를 의미한다.

본 연구의 FFM은 30cm 셀을 활용한다(Nam *et al.*, 2016(a)). 이에 FDS의 복셀 크기는 가로, 세로, 높이 각각 30cm로 정의하였고 화재 해석 공간은 대상 건물의 MBB(Minimum Bounding Box)보다 약간 더 크게 생성하였다. 실내 공간의 물리적인 구조를 표현하는 직육면체 객체들은 FFM의 각 셀을 대상 건물의 층별 높이만큼 확장시켜 생성하였다. 마지막으로 FFM에는 고려되지 않지만, 화재 시뮬레이션에서는 중요한 요소인 창문(Hole), 벽의 재질(Material) 등의 속성을 추가하여 공간 데이터 변환을 완료하였다.

2) 화재 확산 필드

변환된 공간 데이터와 함께 화재 발생 위치 및 화재의 크기를 FDS에 입력하면 화재 확산 데이터를 추출할 수 있다. 화재 확산 데이터에는 시간의 흐름에 따른 각 복셀에서의 열, 연기 농도, 시야 값이 저장되어 있다. 본 연구에서는 화재 확산 데이터를 FFM에 반영하여 가시화하고 보행 에이전트들이 인지할 수 있도록 하기 위해 FFM에 화재 확산 필드(Fire Spread Field)를 추가하였다.

화재 확산 필드는 특정 높이에서의 화재 확산 데이터를 의미한다. 공간적 범위는 특정 높이의 복셀 집합, 즉, 열, 연기 농도, 시야 값이 저장된 2차원 평면 셀들의 집합이다. FDS 수행 시, 사

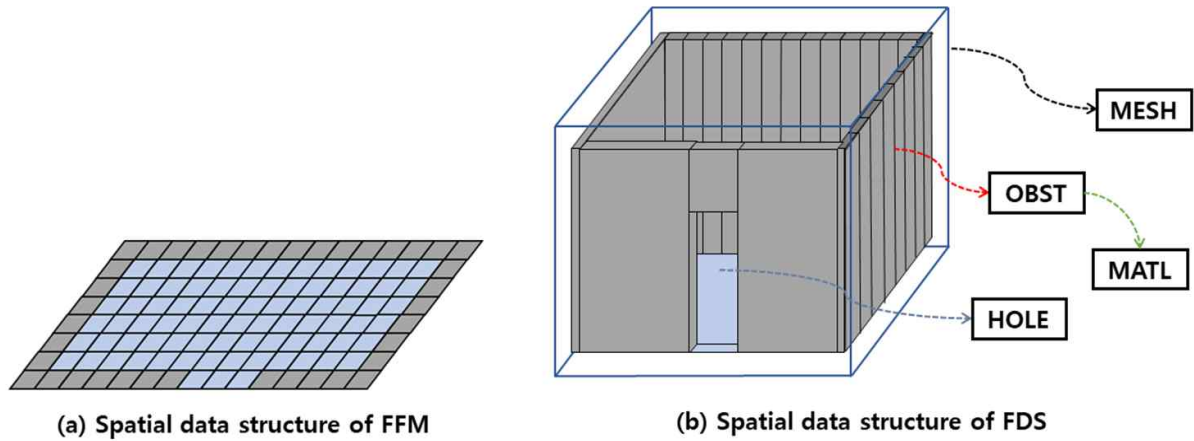


FIGURE 4. Spatial data structure

용자는 결과 해석을 위해 시간 간격을 입력하게 되고, 화재 확산 데이터는 해당 시간 간격에 따라 복셀 단위로 집계된 결과를 나타낸다. 따라서 전체 시뮬레이션 시간에 대하여 화재 확산 데이터가 N 번 집계된다면, 화재 확산 필드도 N 번 갱신된다.

2. 화재 확산을 고려한 FFM

FFM에서 보행 에이전트는 인접한 8개 셀만 고려하여 움직인다. 이는 연산복잡도가 낮다는 장점이 되기도 하지만 화재에 직접적으로 접근하기 전까지는 화재를 인지할 수 없다는 태생적 한계가 되기도 한다. SFF처럼 화재로 인한 위험도를 대상 공간 전체에 할당한다면, 화재에 접근하지 않고도 화재를 고려한 보행을 구현할 수 있다(Zheng *et al.*, 2017; Wang and Wang, 2016). 하지만 이러한 방법은 보행 에이전트가 전지적 시점으로 대상 공간을 바라보

면서 움직이는 것을 의미하고, 이는 현실적인 보행모델이라 할 수 없다. 이에 본 연구에서는 ‘보행자는 이동하던 경로 상에 위험요인이 발견되면, 우회 전략을 선택한다.’ 라는 가정을 전제하고, 다음의 두 가지 알고리즘을 통해 화재 확산을 고려한 대피 상황을 묘사한다.

1) 화재 인지 알고리즘

화재 인지 알고리즘은 보행 에이전트가 화재를 인지할 수 있는 공간을 계산하는 알고리즘이다. 해당 공간은 화재 인지 필드(Fire Recognition Field)로써 별도로 계산되며, 화재 인지 필드에 진입한 보행 에이전트는 우회 전략을 선택하게 된다. 화재 인지 필드의 계산은 다음의 순서로 진행되며, 그림 5는 이를 묘사한 것이다. 그리고 그림 6은 생성된 화재 확산 필드와 화재 인지 필드를 포함하는 개선된 FFM의 구조를 나타낸다.

Step 1. 화재 확산 필드에서 열·연기가 존

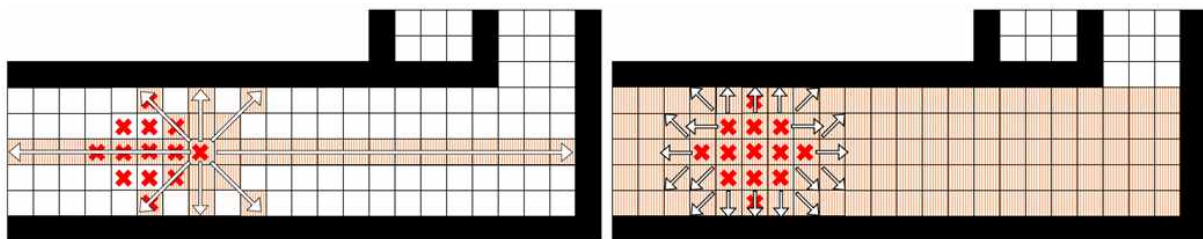


FIGURE 5. A process of fire recognition field computation

재하는 모든 셀들을 선택한다.

Step 2. 선택된 셀들 중 임의의 한 셀에 대하여 8방향(E, SE, S, SW, W, NW, N, NE)으로 존재하는 모든 보행 가능한 셀들을 화재 인지 필드에 추가한다.

Step 3. Step 2를 Step 1에서 선택한 모든 셀에 대하여 수행할 때까지 반복한다.

Step 4. 화재 확산 필드가 갱신되면 Step 1부터 반복하여 화재 인지 필드도 갱신한다.

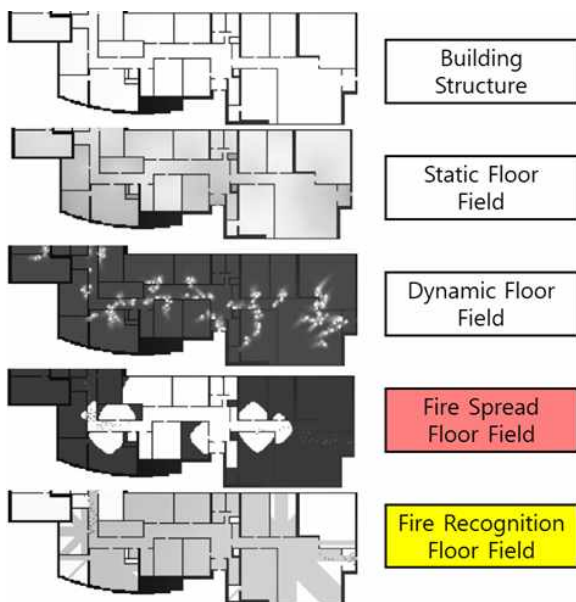


FIGURE 6. Structure of the improved Floor Field Model

2) 우회 알고리즘

화재 인지 필드에 진입한 보행 에이전트는 위험요인과 이동거리가 최소화된 출구로 우회하여 대피한다. 우회 알고리즘은 이를 묘사한 것으로 그래프 데이터 구조를 이용한다. 본 연구에서 제시하는 개선된 FFM은 기본적인 셀 데이터와 더불어, 보행 에이전트에게 우회 알고리즘을 적용하기 위한 그래프 데이터를 함께 사용한다.

그래프 데이터는 그림 7과 같이 셀 데이터와 위계적 관계를 형성한다. 대상 공간을 세부 구역으로 분할(Subdivision)하고 분할된 각 공간은 하나의 노드가 된다. 분할된 공간에 위치한

셀들은 해당 공간을 의미하는 노드의 하위 객체(부모-자식 차원)가 된다. 노드 간의 연결성을 의미하는 엣지에는 노드 간의 거리가 저장되는데, 이 값은 각 노드의 중심 셀 간의 거리(Static value) 차이이다.

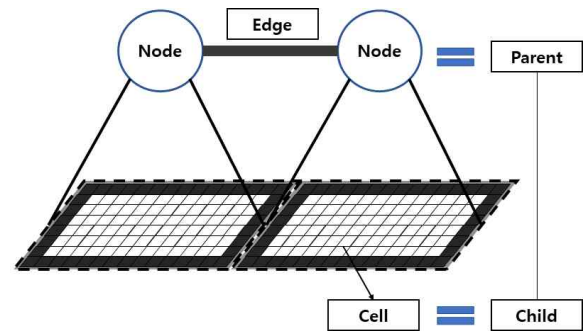


FIGURE 7. Hierarchical data structure of the improved Floor Field Model

열·연기가 존재(화재 확산 필드)하거나 화재를 인지(화재 인지 필드)하는 공간에 해당하는 노드에는 인접 노드와의 연결성에 가중치를 부여한다. 즉, 그림 8과 같이 안전한 노드 간을 연결하는 엣지에는 순수한 거리만 저장되고 위험 공간에 위치한 노드와의 연결성을 나타내는 엣지에는 거리와 함께 가중치가 저장된다. 화재 인지 필드에 속한 엣지의 가중치를 w 라고 한다면, 화재 확산 필드에 속한 엣지의 가중치는 w^2 이다. 이는 화재를 직접적으로 마주하는 경우와 화재를 시각적으로 인지만 하는 경우를 구별하기 위함이다. w^2 에는 무한대에 가까운 매우 큰 값을 할당한다. 거리와 가중치의 합을 대피 비용이라 할 때, 엣지의 대피 비용은 화재 확산 필드에 따라 갱신된다.

전술한 데이터 구조를 바탕으로, 화재 인지 필드에 진입한 보행 에이전트가 발견되면, 해당 에이전트가 위치한 노드를 시작점으로 하여 다익스트라 알고리즘을 통해 최소 대피 비용이 산출되는 출구를 탐색한다. 출구가 탐색되면, 해당 에이전트의 SFF를 탐색된 출구만 존재하는 SFF로 변경한다. 이는 최소 대피 비용이 산출되는 출구로 에이전트의 목적지를 강제하는 것

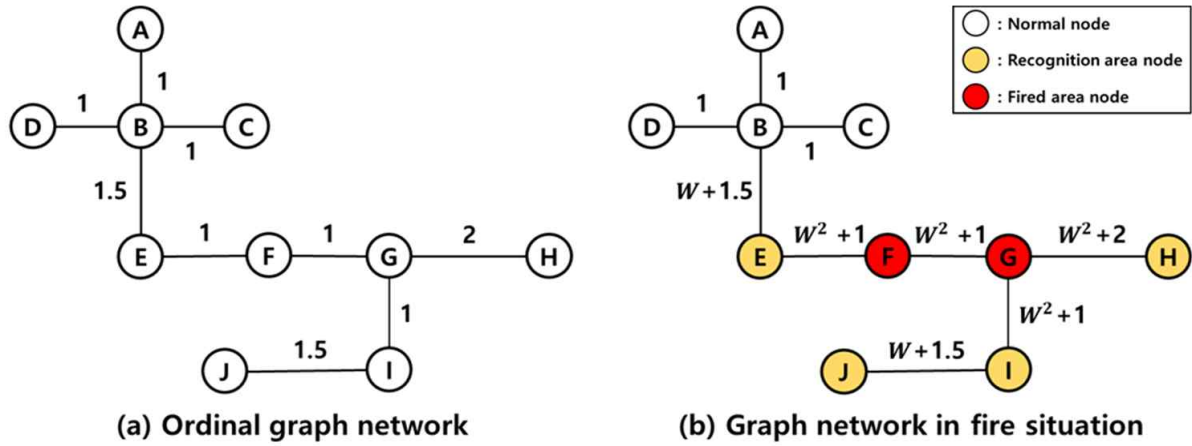


FIGURE 8. Graph network

으로, 초기에 선정한 출구로 더 이상 대피가 불가능할 때, 차선의 선택을 하는 보행자를 묘사한 것이다.

실 험

1. EgresSIM을 이용한 화재 대피 시뮬레이션

본 연구에서는 대피 시뮬레이터 EgresSIM을 이용하여 FDS와 FFM을 기반으로 한 화재 대피 시뮬레이션을 구현하였다(Nam et al., (b) 2016). 개발 과정은 EgresSIM에 FDS와의 데이터 연동을 위한 인터페이스 추가, 화재 확산 및 화재 인지 필드 가시화 기능 개발, 개선된 FFM 이식 순으로 진행하였다. 본 실험은 EgresSIM을 이용한 화재 대피 시뮬레이션으로, 화재가 발생하지 않은 상황과 화재가 발생한 상황의 대피결과에 대한 차이를 분석하였다.

2. 시나리오

그림 9는 시뮬레이션 대상 공간과 화재 발생 위치를 나타낸다. 대상 공간은 5개의 출구가 존재하는 실제 건물 구조를 이용하였고 약 300명의 인원이 공간 내 균일한 밀도로 존재하는 상황을 가정하였다. 화재는 1번과 2번 위치에서 발생하는 2가지 경우를 고려하였고 발열량은 100 Kw/m^2 으로 동일하게 유지된다고 설정하였다.

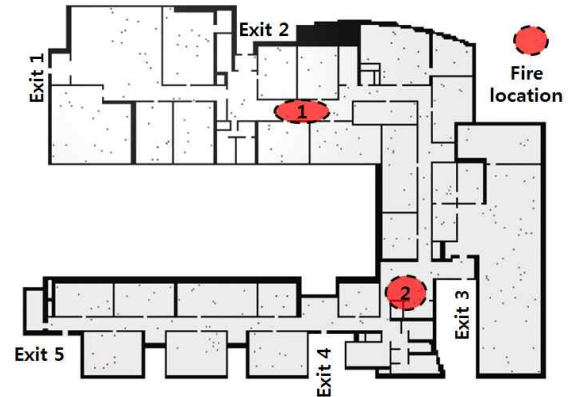


FIGURE 9. The test space with fire locations

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

시나리오를 바탕으로 상황을 세 가지로 나누어 시뮬레이션을 진행하였다. 상황1은 화재가 발생하지 않은 경우, 상황2는 1번 위치에서 화재가 발생한 경우, 상황3은 2번 위치에서 화재가 발생한 경우이다. 그림 10과 11은 상황2와 상황3의 시점별 시뮬레이션 모습이다. 시간의 흐름에 따른 화재 확산과 보행자들이 화재를 피해 대피하는 모습 등을 확인할 수 있다.

그림 12, 그림 13, 그림 14는 각 상황에 대한 출구별 누적 대피인원 및 보행자들의 대피 궤적을 나타낸 것이다. 가정한 인원분포에서는 화재가 발생하지 않을 경우, 출구2와 출구3에 인원들이 집중된다. 이로 인해 출구1과 출구5에

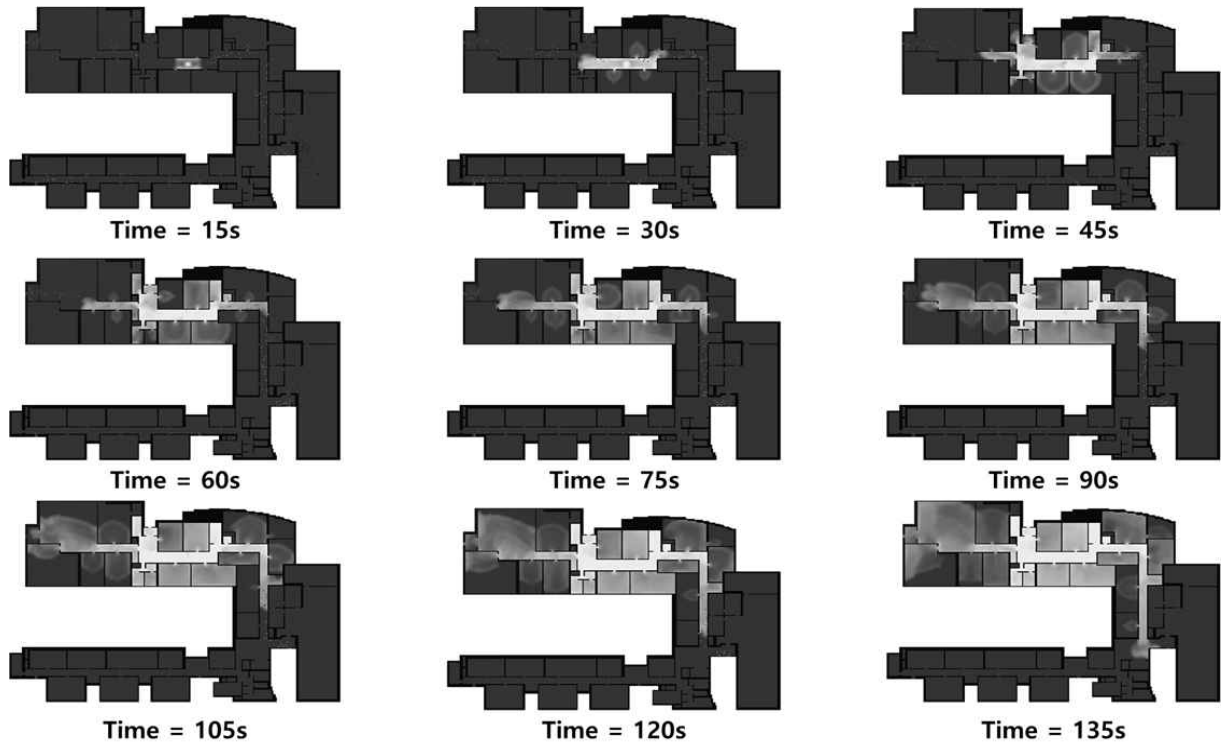


FIGURE 10. The simulation on Case 2

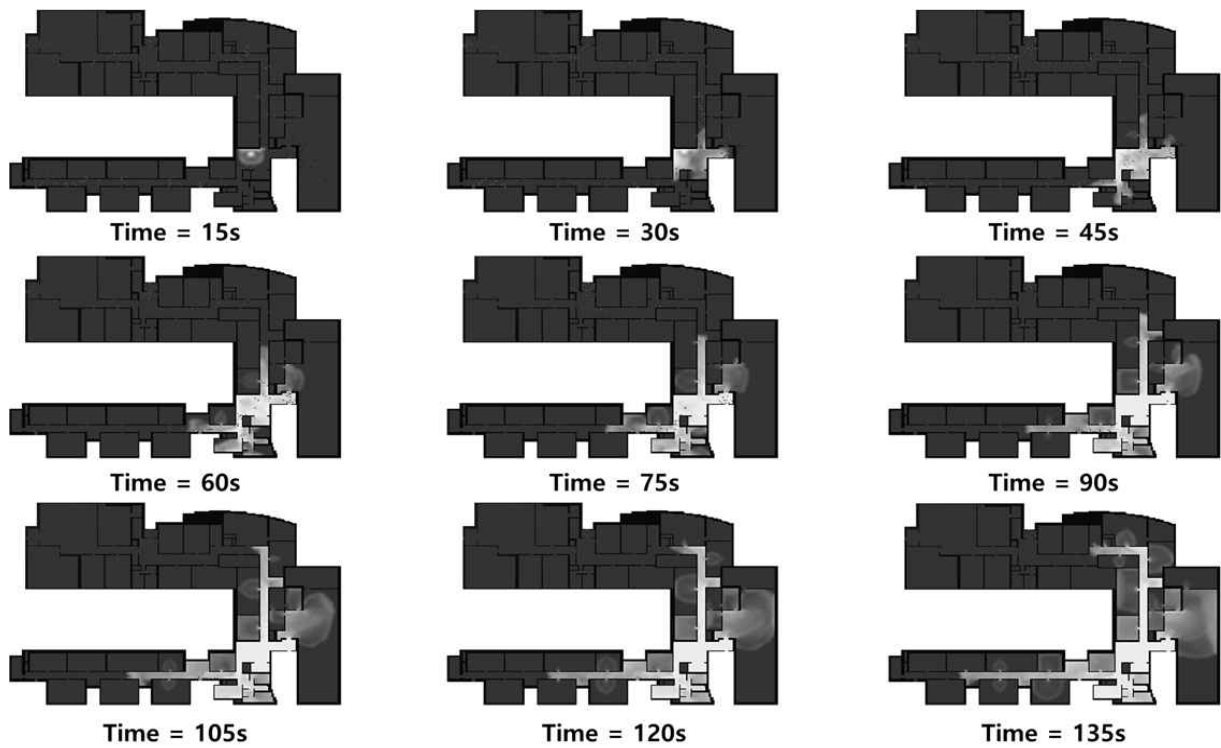


FIGURE 11. The simulation on Case 3

서의 대피시간이 약 60-70초 사이에 종료되는 반면, 출구3의 대피시간은 약 125초에 종료되는 것을 확인할 수 있다.

출구2 인근에서 화재가 발생할 경우(상황2)에는, 출구2로 향하던 인원들이 출구1과 출구3

으로 우회하게 된다. 이로 인해 출구1과 출구3은 상황1에 비해 대피 인원이 각각 23명, 41명이 증가하고 출구2는 63명이 감소한 결과가 나타난다. 대피시간은 출구2는 약 80초 단축되지만 출구1과 출구3은 각각 49초, 42초 증가한

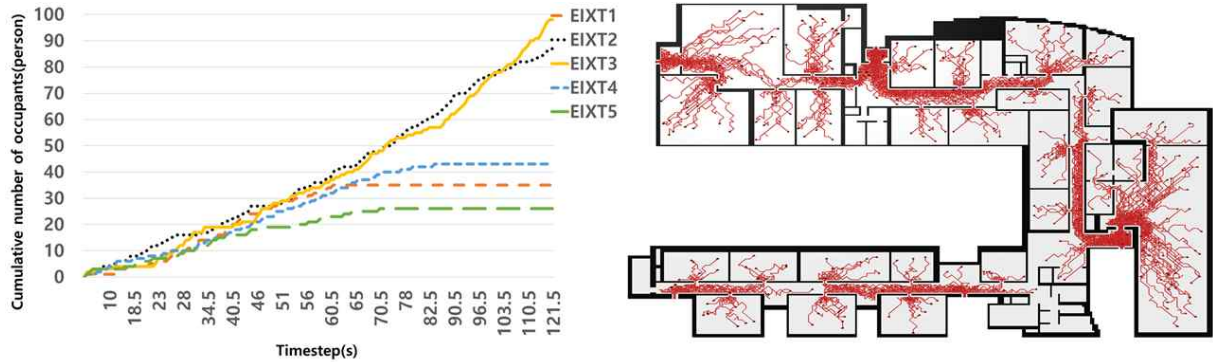


FIGURE 12. Case 1 : Evacuation when no fire occurred

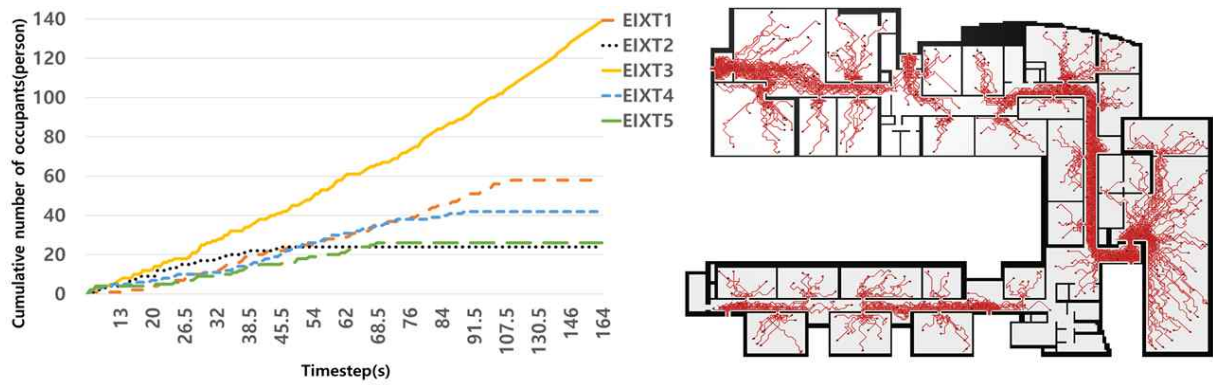


FIGURE 13. Case 2 : Evacuation when fire occurred in location 1

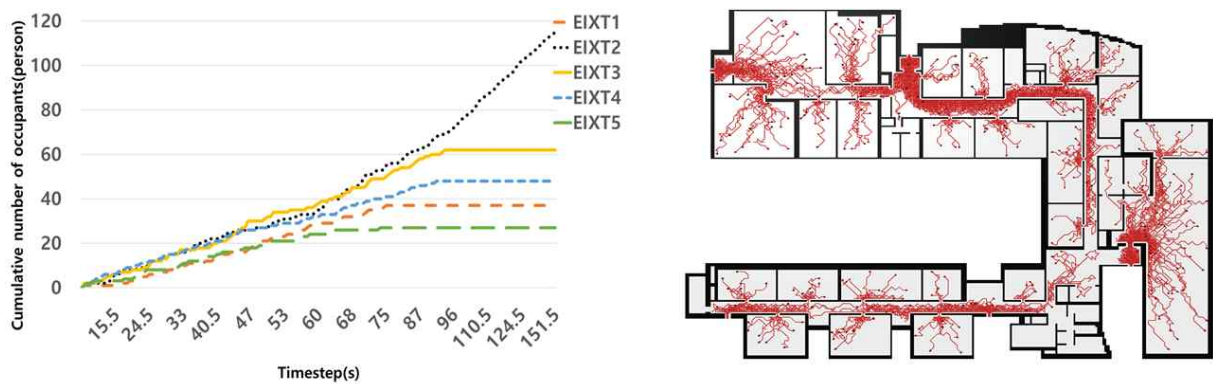


FIGURE 14. Case 3 : Evacuation when fire occurred in location 2


다. 결과적으로 출구3은 화재가 발생하지 않은 경우에도 병목현상이 발견되는데, 출구2 인근에서 화재가 발생하면 병목현상이 더욱 심화되므로, 대피인원들을 출구4로 우회시키는 전략이 필요할 것으로 사료된다.

출구3 인근에서 화재가 발생할 경우(상황3)에는, 출구2로 우회하는 인원들이 증가한다. 상황1과 비교하였을 때, 출구2의 대피인원은 28명 증가하고 출구3의 대피인원은 36명 감소한다. 이에 따라 대피시간도 출구3은 약 32초 단축되고 출구2는 약 33초 증가하여 전체 대피완료시간은 약 159초로 나타난다. 상황3에서는 출구2의 대피인원을 출구1로 우회시키는 전략이 필요하다. 출구1의 대피시간이 약 76초에 종료되기 때문에 출구2에 집중되는 대피인원들을 우회시킨다면, 전체 대피완료시간의 단축을 기대할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 FDS와 FFM을 이용한 커플링 방식의 화재 대피 시뮬레이션을 제안하였다. FDS의 화재 확산 데이터를 셀 구조로 변환하여 FFM에 반영하였고, 이를 바탕으로 화재 확산을 고려한 개선된 FFM을 개발하였다. 개선된 FFM은 FDS의 화재 확산 데이터를 기반으로 화재 확산 필드를 생성하고, 화재 확산 필드를 이용하여 에이전트가 화재를 인지할 수 있는 화재 인지 필드를 생성한다. 이후, 에이전트가 화재 인지 필드에 진입하면, 화재를 피해 경로를 변경하도록 하는 우회 알고리즘이 에이전트에게 적용된다.

본 연구에서는 화재가 발생하지 않은 경우와 발생한 경우를 가정하여, 개선된 FFM을 이용한 화재 대피 시뮬레이션을 수행하였다. 화재를 가정한 상황에서는 그렇지 않은 상황과 비교하였을 때, 에이전트들의 경로 우회로 인한 각 출구의 대피인원 변화가 두드러지게 나타났다. 이로 인해 출구별 대피시간 증감도 뚜렷하게 나타났으며, 병목현상이 심화되는 상황들을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안하는 화재 대피 시뮬레이션 기법은 화재 시뮬레이션과 대피 시뮬레이션을 독립적으로 수행하는 기존 방식보다 현실적으로 대피 상황을 묘사한다. 또한, 하나의 화재 시뮬레이션 결과에 대해서 다양한 인원분포를 적용하고 이에 대한 대피 시뮬레이션 결과를 빠르게 산출할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 다른 대피 시뮬레이터들과의 직접적인 비교실험을 진행할 수 없었기 때문에 결과에 대한 비교 지표가 부족하다는 한계가 있다. 추가적으로 화재 상황에서의 보행자 심리 및 행동패턴을 반영하지 못했고, 화재를 인지할 경우, 무조건적으로 우회한다는 하나의 논리가 적용된 한계가 있다. 또한, 화재 인지 필드의 경우, 열·연기가 존재하는 셀을 기준으로 8방향에 대해서 생성되기 때문에 한 공간 내에서 보행자들이 화재를 인지하기까지 서로 다른 시간이 걸린다는 한계점이 존재한다. 향후 연구를 통해 언급한 문제점들을 보완한다면 보다 현실적인 대피 시뮬레이션 기법을 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 

REFERENCES

- Burstedde, C., K. Klauck, A. Schadschneider and J. Zittartz. 2001. Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-Dimensional Cellular Automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 295(3-4):507-525.
- Choi, J.H. 2011. Development of Performance Based Egress Design and Modeling Method through Analyzing Evacuation Characteristic of a High-rise Building. Ph.D. Thesis, Kyungpook National University, Daegu, Korea. 5pp (최준호. 2011. 초고층 건축물의 피난특성 분석을 통한 성능기반 설계 및 모델링 기술 개발. 경북대학교 대학원 박사학위논문. 5쪽).
- Helbing, D., I. Farkas and T. Vicsek. 2000.

- Simulating Dynamical Features of Escape Panic. *Nature* 407(6803):487-490.
- Kim, J.Y. and Y.H. Jeon. 2015. The Case Analysis through Fire Simulation FDS and Evacuation Simulation Pathfinder. *Asia-Pacific Journal of Business Venturing and Entrepreneurship* 10(6):253-260 (김종윤, 전용한. 2015. 화재 시물레이션 FDS와 피난시물레이션 Pathfinder 사례분석. *벤처창업연구*10(6):253-260).
- Kim, M.G., Y.J. Joo and S.H. Park. 2013. Risk Evaluation and Analysis on Simulation Model of Fire Evacuation based on CFD - Focusing on Incheon Bus Terminal Station. *Journal of Korea Spatial Information Society* 21(6):43-55 (김민규, 주용진, 박수홍. 2013. CFD기반 화재 대피 시물레이션 모델을 적용한 위험도 평가 분석-인천터미널역 역사를 대상으로. *한국공간정보학회지* 21(6):43-55).
- Koo, H.M. 2017. A Study on Improvements Performance-Based Design Standards through a Comparison of Life Safety Assessment Results according to Three Coupling Methods of Fire and Evacuation Simulation. MA, Pukyong National University. Pusan, Korea. 3pp (구현모. 2017. 화재 피난 시물레이션의 커플링 방식 별 인명 안전성평가 결과 비교를 통한 성능 위주 설계 수행기준 개선에 관한 연구. *부경대학교 대학원 석사학위논문*, 3쪽).
- Koo, H.M., R.S. Oh, S.H. Lee, S.H. Ahn, C.H. Hwang and J.H. Choi. 2017. A Comparative Study on Life Safety Assessment Results depending on Whether Coupling of Fire & Evacuation Simulation for Performance Based Design. *Proceedings of 2017 KIFSE Annual Spring Conference*. pp.47-48 (구현모, 오륜석, 이수호, 안성호, 황철홍, 최준호. 2017. 성능위주 설계 시 화재 및 피난 시물레이션의 커플링 수행여부에 따른 인명안전성평가 결과 비교. *한국화재소방학회 학술대회 논문집*. 47-48쪽).
- Korhonen, T. and S. Hostikka. 2010. Fire Dynamics Simulator with Evacuation : FDS+EVAC Technical Reference and User's Guide. VTT Research Note, Finland.
- Korhonen, T., S. Hostikka, S. Heliövaara and H. Ehtamo. 2008. FDS+Evac: An Agent Based Fire Evacuation Model .4th Intl. Conference on Pedestrian and Evacuation Dynamics. Germany, Wuppertal, Feb. 27-29, 2008, pp.109-120.
- Kwak, S.Y., H.W. Nam and C.M. Jun. 2016. Microscopic Evacuation Simulation in Large-scale Buildings using EgresSIM. *Journal of the Korea Society for Simulation* 25(1):53-61 (곽수영, 남현우, 전철민. 2016. EgresSIM을 이용한 대형건축물의 미시적 대피시물레이션. *한국시물레이션학회 논문지* 25(1):53-61).
- Lee, J.Y., H.W. Nam and C.M. Jun. 2017. A study on Evacuation Model Based on Floor Field Model Considering Fire Spreading. *Conference on Geo-Spatial Information 2017 Fall*. pp.74-77 (이재영, 남현우, 전철민. 2017. 화재 확산을 고려한 Floor Field Model 기반 대피모델에 관한 연구. *한국지형공간정보학회 학술대회*, 74-77쪽).
- McGrattan, K., S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt. 2013. *Fire Dynamics Simulator User's Guide*. NIST, USA.
- Nam, H.W. 2012. Developing a Cellular Automata-Based Pedestrian Model Incorporating Microscopic Behavior.

- Ph.D. Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea. 2-3pp (남현우. 2012. 미시적 행태를 반영한 CA기반 보행모델. 서울시립대학교 대학원 석사학위논문. 2-3쪽).
- Nam, H.W., S.Y. Kwak and C.M. Jun. 2016(a). A study on building evacuation simulation using Floor Field Model. Journal of the Korea Society for Simulation 25(2):1-11 (남현우, 곽수영, 전철민. 2016(a). Floor Field Model을 이용한 건축물의 대피시뮬레이션에 대한 연구. 한국시뮬레이션학회 논문지 25(2):1-11).
- Nam, H.W., S.Y. Kwak and C.M. Jun. 2016(b). A Study on Comparison of Improved Floor Field Model and Other Evacuation Models. Journal of the Korea Society for Simulation 25(3):41-51 (남현우, 곽수영, 전철민. 2016(b). 개선된 Floor Field Model과 다른 피난시뮬레이션 모델의 비교 연구. 한국시뮬레이션학회 논문지 25(3):41-51).
- Rie, D.H. 2008. A Study on the Development of Performance Based Fire Risk Assessment Program. Journal of the Korean Society of Safety 23(5):1-6 (이동호, 2008, FDS를 활용한 성능위주 화재위험성평가 프로그램개발에 관한 연구, 한국안전학회지 23(5):1-6)
- Wang, C. and J. Wang. 2016. A Modified Floor Field Model Combined with Risk Field for Pedestrian Simulation. Mathematical Problems in Engineering 2016:10.
- Zheng, Y., B. Jia, X. G. Li and R. Jiang. 2017. Evacuation Dynamics Considering Pedestrians' Movement Behavior Change with Fire and Smoke Spreading. Safety Science 92:180-189. [KAGIS](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.05.010)