

연기 확산을 고려한 에이전트 기반 피난 모델 Agent-based Evacuation Model considering Smoke Spreading

이민혁* · 이재영** · 전철민***

Lee, Min Hyuck · Lee, Jae Young · Jun, Chul Min

요 旨

본 연구에서는 연기 확산을 고려한 에이전트 기반 피난 모델을 제안한다. 본 모델은 연기의 확산을 묘사하는 필드와 에이전트가 연기를 인지할 수 있는 필드가 추가된 확장된 형태의 Floor Field Model이다. 본 모델에서 연기를 인지한 에이전트는 위험요인이 적은 출구를 탐색하고, 개선된 이동 확률식을 바탕으로 우회 경로를 선택한다. 본 연구에서는 실제 건물 구조에서 다양한 인원분포를 가정하고 피난 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 시나리오별 피난완료시간 및 출구별 피난인원을 산출하였고, 보행자들 간의 충돌이 예상되는 취약구역을 분석할 수 있었다.

핵심용어 : 피난 시뮬레이션, 에이전트 기반 모델, Floor Field Model(FFM), 연기 확산

Abstract

In this study, we propose an agent-based evacuation model considering smoke spreading. This model is an extended floor field model with a field that describes smoke spread and a field where agents can recognize smoke. An agent who recognized smoke diffusion finds a exit with the lowest risk and chooses detour route based on improved transition probability. In this study, the evacuation simulations were performed assuming various occupant distributions in a building structure. As a result, total evacuation time for each scenario and evacuees for each exit were calculated, and the vulnerable area where collision between agents was expected could be analyzed.

Keywords : Evacuation Simulation, Agent-based Model, Floor Field Model (FFM), Smoke Spreading

1. 서 론

대형 건물에서의 피난안전성을 진단하기 위해 에이전트 기반 피난 모델이 활용되고 있다. 에이전트 기반 피난 모델은 개별 보행자의 움직임 및 보행자들 간의 상호작용을 연산하기 때문에, 보다 정교하게 대피시간 및 병목현상을 예측할 수 있다(Gwynne et al., 1999; Kuligowski et al., 2005). 피난안전성 진단에는 피난 모델과 열, 연기 등의 확산을 연산하는 화재 모델이 함께 적용되고 있다.

다만, 피난 모델과 화재 모델을 연계하는 기존 시뮬레이션 방식은 현실적인 피난 행태를 묘사하는데 한계가 있다. 보행자의 움직임이 화재로 인한 연기의 확산과 무관하게 연산되기 때문이다. 일부 시뮬레이터에서는 연기 흡입으로 인해 움직임이 둔해지는 보행자를 모델링한다(Gwynne et al., 2001). 하지만 가까운 혹은

친숙한 출구로 보행자의 경로 계획이 이루어지기 때문에, 열, 연기 등의 위험요인을 발견할 경우, 다소 멀리라도 안전한 출구 쪽으로 우회하는 실제 피난 행태와 차이가 발생한다.

이에 본 연구에서는 연기의 확산을 보행자가 인지할 경우, 우회 경로를 선택하는 행태를 고려한 피난 모델을 제안한다. 본 연구에서 제안하는 에이전트 기반 피난 모델은 확장된 형태의 Floor Field Model이다. 일반적인 FFM은 Fig. 1과 같이 2차원 격자 공간에 보행자를 위치시키고, 보행자는 인접한 8개의 격자에 할당된 값을 고려하여 최종 목적지까지 이동한다(Burstedde et al., 2001; Kirchner and Schadschneider, 2002; Nishinari et al., 2004; Zheng et al., 2009). 본 연구에서 제안하는 확장된 FFM은 Nam et al.(2016)에서 제안된 모델에 그래프 모델, 연기 인지에 따른 우회전략을 추가하여 피난 시뮬레이션을 묘사한다. 그래프 모델

Received: 2019.10.21, revised: 2019.11.18, accepted: 2019.11.22

* 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정(Ph. D. Student, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul, lmhl123@uos.ac.kr)

** 서울시립대학교 공간정보공학과 석사과정(Master's Student, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul, llyda214@uos.ac.kr)

*** 교신저자 · 정회원 · 서울시립대학교 공간정보공학과 교수(Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul, cmjun@uos.ac.kr)

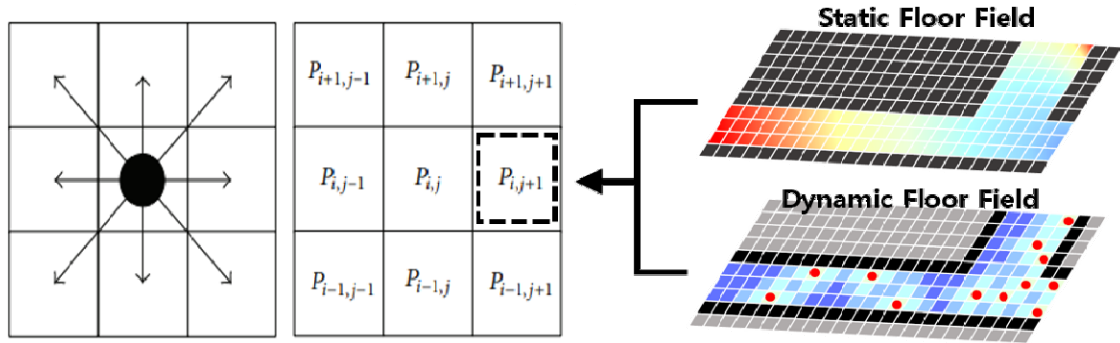


Figure 1. Moore neighborhood and the transition probability

은 보행자가 연기 인지 시, 우회 출구를 탐색할 때 활용되며, 보다 자세한 사항은 3장 방법론에 기술하였다.

2. 관련 연구 분석

FFM에서 각 격자에는 static floor field 와 dynamic floor field의 값이 할당된다. static floor field는 출구와의 거리(역수)를 나타내는 격자 공간, dynamic floor field는 다른 에이전트들의 흔적을 나타내는 격자 공간이다. 이는 보행자(에이전트)가 신속하게 대피하고, 위급 시 다행 보행자들을 따라가려는 속성을 고려한 것이다.

$$P_{ij} = N \exp(k_D D_{ij} + k_S S_{ij})(1 - \eta_{ij}) \epsilon_{ij} \quad (1)$$

각 에이전트는 매 타임스텝마다 주변 8개 격자로의 이동 확률을 고려하여 하나의 격자로 움직인다. 이동 확률 P_{ij} 는 Eq. (1)과 같다. N 은 주변 격자로의 이동 확률의 합이 1이 되도록 하기 위한 정규화 함수, S_{ij} 와 D_{ij} 는 격자 (i, j) 의 static 및 dynamic floor field의 값, k_S 와 k_D 는 static 및 dynamic floor field에 대한 민감도 파라미터이다. η_{ij} 는 벽과 같은 고정 장애물 여부를 나타내며, 장애물이 존재하면 1, 없으면 0이다. 마지막으로 ϵ_{ij} 는 다른 보행자의 점유 여부이며, 다른 보행자가 점유하고 있다면 0, 그렇지 않다면 1의 값을 갖는다.

화재로 인한 영향을 고려한 확장된 형태의 FFM은 일부 연구들을 통해 제안된 바 있다(Cao et al., 2014; Zheng et al., 2011; Zheng et al., 2017; Zheng et al., 2018; Lee et al., 2018). 하지만 대부분의 연구에서 화재를 고정 장애물로 가정하였다. 열이나 연기의 확산을 고려한 FFM은 하나의 방과 같은 소규모 공간에 대하

여 연구되었으며, 위험요인의 확산이 전역적 격자 공간으로 에이전트에게 적용되었다. 위험요인이 전역적 격자 공간으로 에이전트에게 제공됨은, 에이전트들이 어느 공간에 있더라도 화재의 발생 위치와 그 영향을 인지함을 나타낸다. 특정 위치에서 발생한 화재 정보를 건물 내 모든 보행자들이 인지한다는 것은 매우 비현실적인 가정이다.

그 밖에 화재 확산을 고려한 피난 시뮬레이션으로는 Pathfinder+FDS와 같이 화재 모델과 피난 모델의 가시화만 중첩하는 형태, Smartfire+buildingEXODUS와 같이 두 모델 간의 상호작용을 고려하는 형태가 있다. 서론에서 언급하였듯이, 상호작용을 고려한 모델이라도, 보행자의 경로계획이 전역 경로에 의존적이기 때문에 우회 전략이 제한적인 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 연기의 확산을 나타내는 격자 공간과 연기의 확산을 인지할 수 있는 격자 공간을 별도로 생성하여 FFM에 반영하였다. 그리고 연기의 확산을 보행자가 인지할 경우, 우회 경로를 선택하도록 기존 FFM의 이동 확률식을 개선하였다.

3. 연기 확산을 고려한 FFM

3.1 데이터 모델

본 연구에서 제안하는 연기 확산을 고려한 FFM은 30cm x 30cm 크기의 격자로 구성된 대상 공간과 위상(topology) 그래프를 이용하여 화재 상황에서의 에이전트 기반 피난 시뮬레이션을 묘사한다. 이로 인해 실내 공간에 대한 기하와 위상관계를 포함한 데이터 모델인 IndoorGML을 활용한다(Lee, 2013).

Fig. 2는 IndoorGML을 바탕으로 2차원 격자 공간과 격자 공간과 위계적 관계를 갖는 그래프를 생성한 예시이다. IndoorGML은 방, 문, 복도 등의 3차원 기하객체

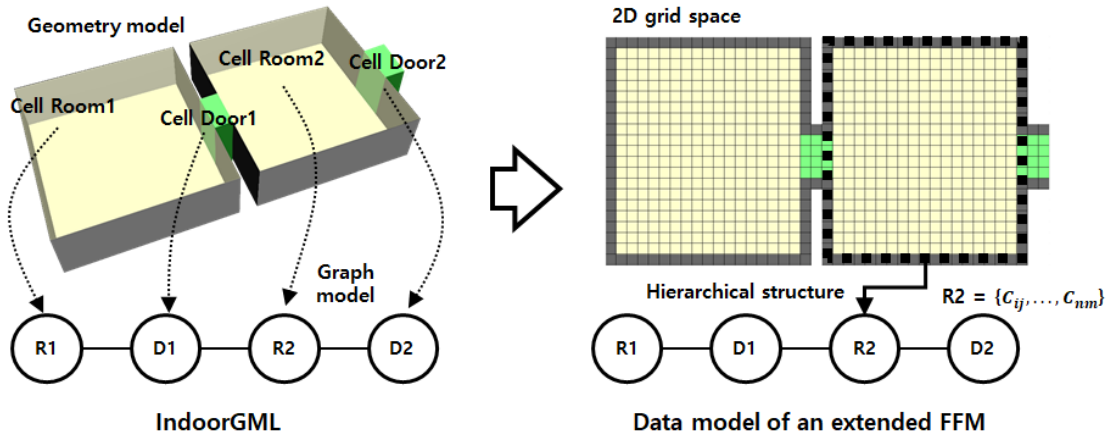


Figure 2. The data model of an extended FFM based on IndoorGML

를 하나의 셀로 표현함과 동시에, 노드와 에지로 구성된 그래프를 통해 셀과 셀 간의 위상관계를 표현한다. 본 연구에서는 IndoorGML의 3차원 기하 공간을 2차원으로 투영하여 FFM의 기본 격자 공간을 생성하였고, 각 격자(C_{ij})를 해당 격자가 의미하는 공간을 나타내는 노드와 매칭함으로써, 그래프 모델과 격자 공간의 위계적 구조를 구성하였다.

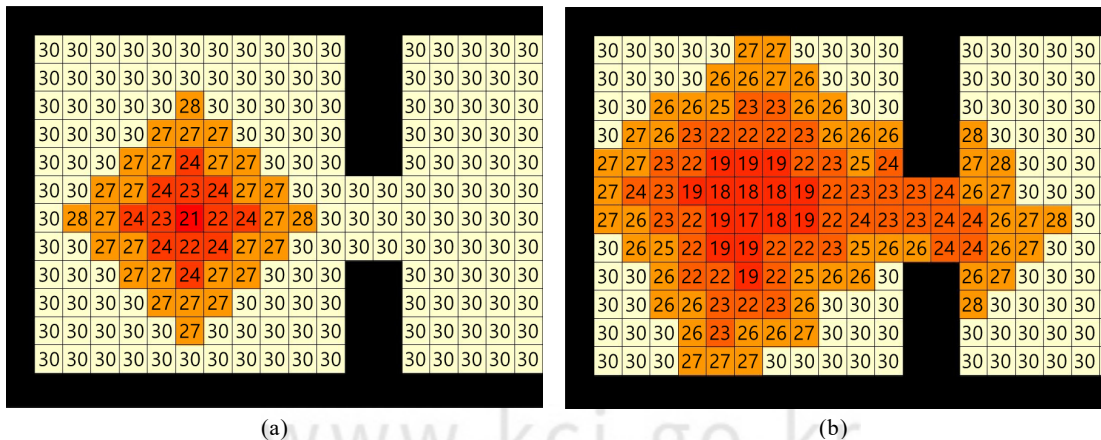
3.2 연기 확산 필드

확장된 FFM에서는 연기의 확산을 별도의 필드로 나타낸다. 연기의 확산은 fire dynamics simulator(FDS)를 이용하여 연산한다(McGrattan et al., 2013). FDS는 미국 국립표준기술연구소에서 개발한 화재 시뮬레이터로, 대상 공간과 화재 위치 및 발열량, 해석 해상도 등을 입력하면, 화재 진행에 따른 열, 연기 농도, 가시거

리 등의 분석 결과를 제공한다. 해석 해상도는 3차원 격자 공간으로, 사용자가 알고자 하는 단면(2D)의 화재 분석 결과에 대한 격자 해상도를 의미한다.

FFM의 격자 공간과 연기 확산 데이터의 좌표를 일치시키기 위해, FFM에서 벽면에 해당하는 격자들을 층고만큼 확장시켜 FDS의 입력 공간을 생성하였고, 해석 해상도는 한 변의 길이가 30cm인 격자로 구성하였다. 연기 확산 데이터로는 1.8m 높이에서의 시점별 각 격자의 가시거리 분석 값을 이용하였다. 연기가 존재하는 격자는 가시거리가 30m 미만이며, 농도가 짙어질수록 가시거리는 감소한다. 1.8m 높이는 국내 피난안전성 진단 기준을 적용한 것이다(Koo, 2017).

따라서 연기 확산 필드의 각 격자(C_{ij})는 가시거리(V_{ij})를 저장하며, 연기가 존재하지 않는 격자는 30, 연기가 존재하는 격자는 농도에 따라 30보다 작은 값을

Figure 3. Smoke floor field; (a) t_1 , (b) t_2

갖는다. 각 격자의 가시거리 값은 타임스텝이 증가함에 따라 갱신되며 Fig. 3은 이에 대한 예시이다.

3.3 연기 인지 필드

연기 인지 필드는 연기의 확산을 에이전트가 시각적으로 인지할 수 있는 영역을 나타낸다. 이는 에이전트가 연기의 영향이 존재하는 격자에 인접하지 않아도, 경로 상에 화재 연기의 존재 유무를 판단하기 위함이다. 연기를 인지할 수 있는 영역에 진입한 에이전트는 우회 전략에 따라 다음 움직임을 결정한다.

연기 인지 필드는 연기가 존재하는 각 격자로부터 8방향(Fig. 1의 neighborhood 참고)으로 확산되며 생성된다. 각 격자로부터의 확산은 벽과 같은 고정 장애물을 만날 때까지 진행된다. 연기 인지 필드의 각 격자는 연기 인지 가능여부(R_{ij})를 저장하며, 인지 영역은 1, 불가능 영역은 0의 값을 갖는다. 연기 확산 필드가 갱신됨에 따라 인지 가능 영역도 확장되고, Fig. 4는 연기 확산 필드에 의해 갱신되는 연기 인지 필드를 나타낸 것이다.

3.4 이동 확률

연기 확산을 고려한 FFM은 앞서 언급한 4가지 필드

(static, dynamic, smoke, smoke recognition)와 그래프 모델을 이용하여 에이전트의 주변 격자로의 이동 확률 P_{ij} 를 연산한다. 보행자들 간의 이끌림을 의미하는 dynamic floor field는 기존 FFM의 연산방식과 동일하다. Table 1은 에이전트가 현재 위치한 격자 C_{ij} 의 값에 따른 상황별 이동 확률을 정리한 것이다.

만약 에이전트가 현재 위치한 격자가 연기를 인지할 수 없는 영역이라면, 기존 FFM과 동일하게 주변 격자로의 이동 확률을 계산하고, 이동할 다음 격자를 선택한다. 이 때, static floor field S_{ij} 는 Eq. (4)와 같이, 모든 출구로부터의 거리를 고려하여 산출된다. 대상 공간에 총 n 개의 출구가 있다고 가정했을 때, $d_{ij,k}$ 는 격자 (i,j) 에서 임의의 출구 k 까지의 최단 거리이다(Eq. (5)).

$$S_{ij} = \frac{1/d_{ij}^*}{\sum_{i,j} 1/d_{ij}^*} \quad (4)$$

$$d_{ij}^* = \min(d_{ij,1}, d_{ij,2}, \dots, d_{ij,n}) \quad (5)$$

에이전트가 연기를 인지할 수 있는 격자에 위치한다면, 주변 격자로의 이동 확률은 Eq. (2)와 같다. 연기가

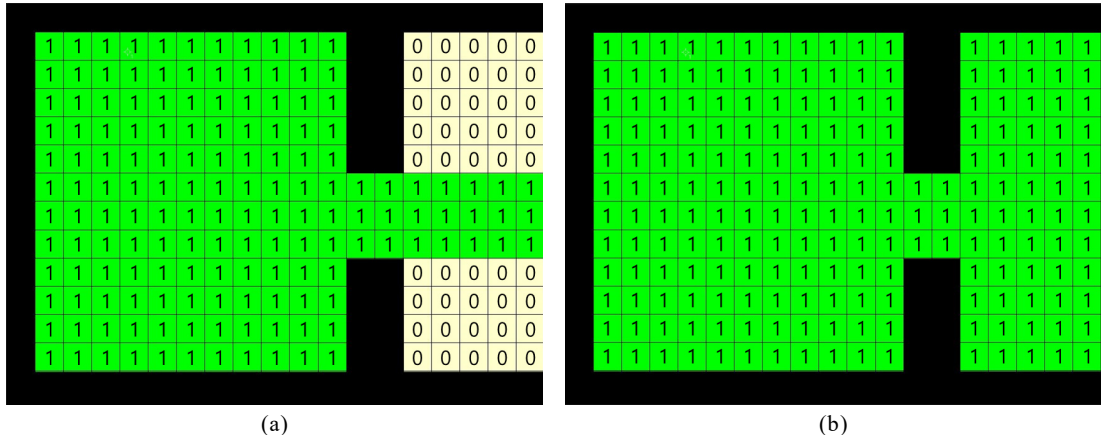


Figure 4. Smoke recognition floor field; (a) t_1 , (b) t_2

Table 1. Transition probability according to the cell value located an agent

Cell value (C_{ij})	State	Transition probability (P_{ij})
$R_{ij} = 0$	Before smoke recognition	$P_{ij} = \text{Nexp}(k_D D_{ij} + k_S S_{ij})(1 - \eta_{ij})\epsilon_{ij}$ (1)
$R_{ij} = 1$ and $V_{ij} = 30$	After smoke recognition	$P_{ij} = \text{Nexp}(k_D D_{ij} + k_S S_{ij,k})(1 - \eta_{ij})\epsilon_{ij}$ (2)
$V_{ij} < 30$	In the smoke diffusion area	$P_{ij} = \begin{cases} \text{Nexp}(k_D D_{ij} + k_S S_{ij,k})(1 - \eta_{ij})\epsilon_{ij} & H_t > 0 \\ 0 & H_t \leq 0 \end{cases}$ (3)

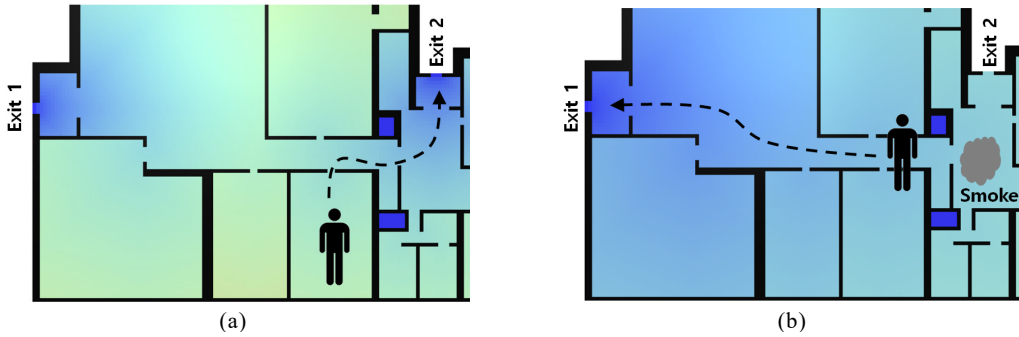


Figure 5. SFF replacement according to smoke recognition; (a) Before smoke recognition, (b) After smoke recognition

확산되지 않은 출구로 우회해야 하기 때문에, 안전한 특정 출구 k 로부터 계산된 static floor field $S_{ij,k}$ 를 고려하여 이동 확률을 계산한다.

$$S_{ij,k} = \frac{1/d_{ij,k}}{\sum_{i,j} 1/d_{ij,k}} \quad (6)$$

Fig. 5는 에이전트가 연기를 인지함에 따라 static floor field가 교체되는 예를 나타낸다. 고립된 공간을 제외하고 파란색이 진할수록, 출구와 가까운 격자이다. Fig. 5(a)에서 에이전트는 연기를 인지하지 못했기 때문에, static floor field $S_{ij,k}$ 값에 따라 출구 2쪽으로 향하게 된다. Fig. 5(b)와 같이, 에이전트가 어느정도 이동한 상태에서 연기를 인지했다면, 안전한 단일 출구로부터 계산된 static floor field $S_{ij,k}$ 의 영향을 받아 출구 1쪽으로 향하게 된다.

안전한 출구 k 는 그래프 모델을 기반으로 최소 비용 경로를 산출하는 다익스트라 알고리즘을 적용하여 탐색한다(Zhan and Noon, 1998). 연기 확산 및 인지 영역에 해당하는 노드와 연결된 에지에 노드 간 거리 외에 매우 큰 가중치($\approx \infty$)를 부여하여 최단거리에 위치한 출구 k 를 탐색한다. 노드가 의미하는 공간에 연기의 영향이 존재하는지에 대한 여부는 그래프 모델과 격자 공간의 위계구조를 통해 전달된다. 그래프 모델을 바탕으로 우회 출구를 탐색하는 이유는, 미시적인 격자공간에서 최단 경로를 산출하는 것이 연산속도 측면에서 비효율적이기 때문이다.

에이전트가 연기가 존재하는 격자에 위치해 있다면, 이동 확률은 Eq. (3)으로 계산한다. H_t 는 t 타임스텝에서 에이전트의 건강지수로, 초기값 H_0 는 1이며, H_t 가 0이 되면 에이전트는 사망한 것으로 판정한다. 즉, 에

이전트의 건강지수가 0보다 크다면, 우회 출구로의 이동 확률이 적용되고, 건강지수가 0이 되면 주변 격자로의 이동이 중단된다.

H_t 는 이전 스텝의 H_{t-1} 와 현재 위치한 격자의 가시거리 값(V_{ij})에 의해 결정된다. 가시거리 값의 범위는 $V_{ij} \in [0, 30]$ 이고, 국내 피난안전성 진단 기준에서는 가시거리가 5m 이하일 경우, 해당 공간의 재실자들은 사망할 것으로 판단한다(Koo, 2017). 이에 H_t 는 Eq. (7)과 같이, H_{t-1} 에서 사망 기준 대비 가시거리의 비율만큼 감소한 값을 적용한다(Zheng et al., 2018).

$$H_t = H_{t-1} - \frac{30 - V_{ij}}{25} \quad (7)$$

4. 피난 시뮬레이션

4.1 시나리오

Fig. 6는 시뮬레이션을 수행한 대상 공간과 발화지점

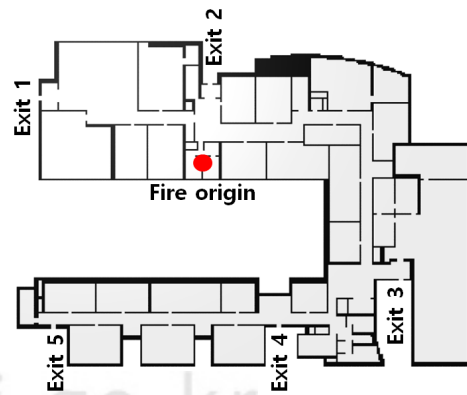


Figure 6. Evacuation environment

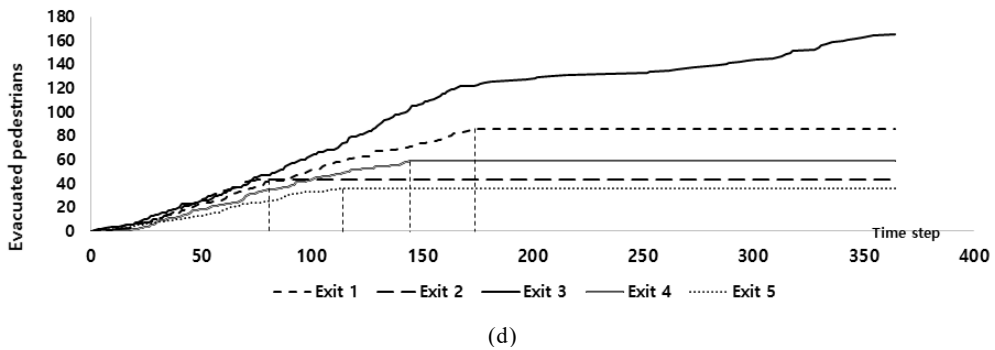
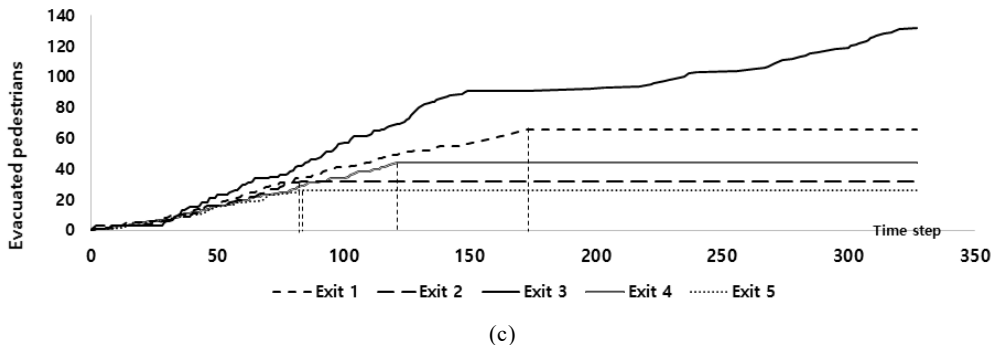
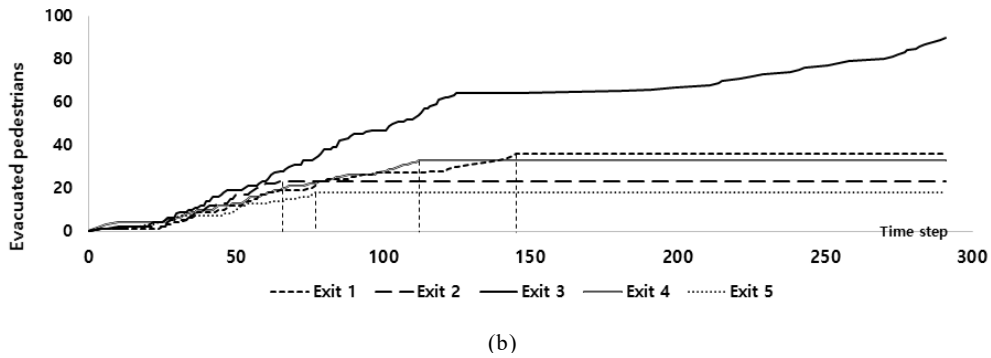
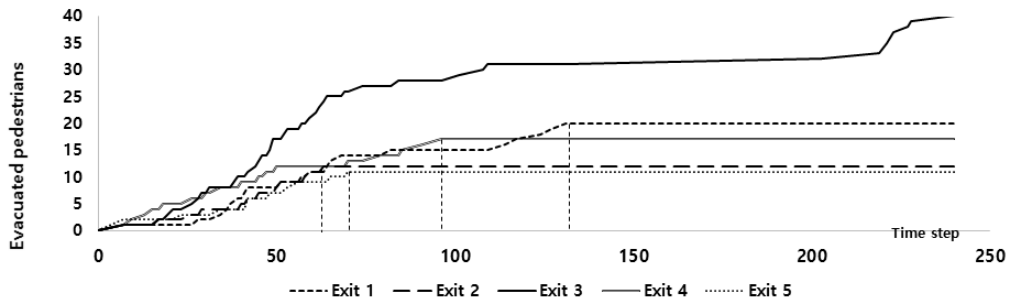


Figure 7. The number of evacuated pedestrians according to time steps for each case; (a) $n=100$, (b) $n=200$, (c) $n=300$, (d) $n=400$

을 나타낸다. 실제 캠퍼스 건물 1층에 해당하는 공간으로, 23개의 강의실과 5개의 출구로 구성되어 있다. 발열량은 약 400kW로 설정하였으며, 피난인원은 100명, 200명, 300명, 400명 등 총 4개의 케이스로 구성하였고, 대상 공간에 균일하게 인원들이 배치되는 분포를 가정하였다. 민감도 파라미터 k_s 와 k_D 는 기존 연구에서 적용되었던 3과 2를 할당하였다(Nam et al., 2014;

Kwak et al., 2016).

4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 7은 각 케이스에 대하여, 타임스텝에 따른 출구별 피난인원을 나타낸 그래프이다. 그래프의 기울기가 수평이 되는 시점은 해당 출구를 통과하는 인원이 없음을 의미한다. 모든 케이스에서 출구 3에 가장 많은 인



Figure 8. Agent-based evacuation simulation considering smoke spreading; (a) $t=0$, (b) $t=50$, (c) $t=100$, (d) $t=150$, (e) $t=200$, (f) $t=250$



Figure 9. Evacuation paths of agents in R104, R109, R116

원이 물렸고, 출구 3을 마지막으로 통과한 인원의 피난 시간이 피난완료시간으로 기록되었다. 피난인원이 100명인 경우(Fig. 7(a))부터 400명인 경우(Fig. 7(d))까지, 피난완료시간은 각각 약 230, 300, 330, 360step으로 나타났다. 보행속도 조절에 따라 달라질 수 있으나 2step은 약 1초에 해당한다.

모든 케이스에서 출구 3에 대한 피난인원은 꾸준히 증가하는 추세를 보이다가, 얼마동안 피난인원이 증가하지 않고, 다시 증가하는 경향을 보였다. 이는 화재로 인해 연기가 확산되면서 이를 인지한 에이전트들이 출구 1과 출구 3으로 우회하기 때문이다. 출구 3으로 향하는 에이전트들의 경로가 상대적으로 더 길기 때문에, 경로를 우회하는 인원들이 출구에 도착하기 전까지 출구 3을 통과하는 인원이 잠시동안 없는 것이다.

Fig. 8은 피난인원이 300명일 때, 50step 간격으로 인원의 분포 및 연기의 확산 정도를 가시화 한 것이다. 타임스텝이 50일 때(Fig. 8(b))는 출구 2로 인원들이 몰리고, 타임스텝이 100일 때(Fig. 8(c))는 해당 인원들이 각각 출구 1과 출구 3쪽으로 우회하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 점선 박스를 보면 많은 인원들이 뒤엉킨 모습을 확인할 수 있다. 이는 아직 연기를 인지하지 못한 인원들은 가까운 출구 2쪽으로 향하려고 하고, 연기를 인지한 인원들은 출구 3쪽으로 우회하려고 하여, 두 집단 간의 충돌 현상이 나타난 것이다.

점선 박스 부분은 깎아진 복도 형태로, 104호와 116호의 피난인원들은 연기를 인지하는데 어려움이 있다. 피난인원이 300명인 케이스를 10회 반복하였을 때, 해당 공간에서 평균적으로 사망자는 약 0명, 최대 3명이 나타났다. 피난인원이 400명인 케이스에서는 10회 시뮬레이션에서 평균 사망자가 약 10명으로 분석되었다.

본 피난 모델은 에이전트들 간의 의사소통을 고려할 수 없기 때문에 실제 피난현상과는 차이가 있을 수 있으나, 서로 다른 방향으로 향하는 보행자 집단 간의 충돌이 발생할 수 있는 공간이기에 피난계획 시 고려해야 할 요인으로 판단된다.

Fig. 9는 연기로 인해 우회하는 일부 에이전트들의 피난 경로를 나타낸 것이다. 104호, 109호, 116호의 에이전트들은 가까운 출구 2로 향하려다, 연기의 영향이 없는 출구 1과 출구 3으로 경로를 바꾸는 모습을 보여준다. Fig. 9에서는 Fig. 8에서 살펴보았던 점선 박스 부근에서의 충돌현상이 보다 잘 드러난다.

5. 결론

본 연구에서는 연기 확산을 고려한 확장된 FFM을 제안하였다. 관련 연구에서 제안되었던 기존 FFM에서는 화재를 고정 장애물로 고려하거나, 화재로 인해 확산되는 위험요인을 전역적 변수로 에이전트에게 적용하였다. 본 연구에서는 연기 확산 필드와 이를 시각적으로 인지할 수 있는 연기 인지 필드를 별도로 생성하여 에이전트의 우회 움직임을 구현하였다.

본 연구에서는 실제 건물 구조에서 가상의 화재를 가정한 뒤, 100명, 200명, 300명, 400명의 피난인원을 대상으로 미시적인 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과, 피난완료시간은 각각 230, 300, 330, 360step 등으로 나타났고, 피난인원이 300명 이상일 경우, 사망자가 발생할 수 있음을 보였다. 화재로 인해 보행자들의 혼란이 야기되면, 보행자들 간의 충돌이 발생할 수 있는 취약지역도 나타났다. 본 모델은 상용 피난 시뮬레이터 중 Pathfinder와 유사한 결과를 보이는 FFM에 기초하

고 있고(Nam et al., 2016), FDS는 신뢰도가 높은 화재 모델이기에, 본 실험 결과는 해당 건물의 피난안전성을 진단하는데 시사하는 바가 있다고 판단된다.

보다 다양한 화재 및 인원분포 시나리오에서 추가적인 실험들을 수행한다면, 피난안전성 진단에 활용 가능한 수준까지 모델의 신뢰도가 향상될 것으로 기대된다. 또한 실내 공간 데이터의 표준 모델인 IndoorGML과 대표적인 화재 모델인 FDS를 활용하여 모델을 개발하였기에, 표준화된 공간 데이터와 오픈소스 화재 시뮬레이터를 활용한 실내 화재 피난 시뮬레이션의 표준화 연구로도 발전할 수 있을 것이라 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토공간정보연구사업의 연구비지원(19NSIP-B135746-03)에 의해 수행되었습니다.

References

- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and Zittartz, J., 2001, Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 295, No. 3-4, pp. 507-525.
- Cao, S. C., Song, W. G., Liu, X. D., and Mu, N., 2014, Simulation of pedestrian evacuation in a room under fire emergency, *Procedia engineering*, Vol. 71, pp. 403-409.
- Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., and Filippidis, L., 1999, A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment, *Building and environment*, Vol. 36, No. 6, pp. 741-749.
- Gwynne, S., Galea, E. R., Lawrence, P. J., and Filippidis, L., 2001, Modelling occupant interaction with fire conditions using the buildingEXODUS evacuation model, *Fire Safety Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 327-357.
- Kirchner, A., and Schadschneider, A., 2002, Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics, *Physica A: statistical mechanics and its applications*, Vol. 312, No. 1-2, pp. 260-276.
- Koo, H. M., 2017, A study on improvement performance-based design standards through a comparison of life safety assessment result according to three coupling methods of fire and evacuation simulation, Pukyong National University.
- Kuligowski, E. D., Peacock, R. D., and Hoskins, B. L., 2005, A review of building evacuation models, Gaithersburg, MD: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.
- Kwak, S., Nam, H., and Jun, C., 2016, Microscopic evacuation simulation in large-scale buildings using EgresSIM, *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 25, No. 1, pp. 53-61.
- Lee, J. Y., Lee, M. H., and Jun, C. M., 2018, Fire evacuation simulation using FFM and FDS, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 21, No. 2, pp. 56-67.
- Li, K. J., 2013, Geocoding scheme for multimedia in indoor space based on IndoorGML, *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol. 21, No. 4, pp. 35-45.
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., and Overholt, K., 2013, Fire dynamics simulator user's guide, NIST special publication, Vol. 1019, No. 6.
- Nam, H., Kwak, S., and Jun, C., 2014, Developing a cellular automata-based pedestrian model incorporating physical characteristics of pedestrians, *Spatial Information Research*, Vol. 22, No. 2, pp. 53-62.
- Nam, H., Kwak, S., and Jun, C., 2016, Comparison of improved floor field model and other models, In *Proceedings of the 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence*, pp. 95-101.
- Nishinari, K., Kirchner, A., Namazi, A., and Schadschneider, A., 2004, Extended floor field CA model for evacuation dynamics, *IEICE Transactions on information and systems*, Vol. 87, No. 3, pp. 726-732.
- Zhan, F. B., and Noon, C. E., 1998, Shortest path algorithms: an evaluation using real road networks, *Transportation science*, Vol. 32, No. 1, pp. 65-73.
- Zheng, X., Zhong, T., and Liu, M., 2009, Modeling crowd evacuation of a building based on seven methodological approaches, *Building and Environment*, Vol. 44, No. 3, pp. 437-445.

17. Zheng, Y., Jia, B., Li, X. G., and Jiang, R., 2017, Evacuation dynamics considering pedestrians' movement behavior change with fire and smoke spreading, *Safety science*, Vol. 92, pp. 180-189.
18. Zheng, Y., Jia, B., Li, X. G., and Zhu, N., 2011, Evacuation dynamics with fire spreading based on cellular automaton, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 390, No. 18-19, pp. 3147-3156.
19. Zheng, Y., Li, X., Zhu, N., Jia, B., and Jiang, R., 2018, Evacuation dynamics with smoking diffusion in three dimension based on an extended Floor-Field model, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 507, pp. 414-426.