

Floor Field Model을 이용한 건축물의 대피시뮬레이션에 대한 연구

남현우 · 광수영 · 전철민*

A study on building evacuation simulation using Floor Field Model

Hyunwoo Nam · Suyeong Kwak · Chulmin Jun*

ABSTRACT

The floor field model (hereafter referred to as FFM) is a cellular automata (hereafter referred to as CA)-based walk model used to model pedestrian behavior. Existing studies on FFM conducted experiments with simple structures (that have one room or one obstacle in a room) or relatively complicated structures (that have many rooms). In order to apply the FFM to real buildings, it is necessary to have additional methodologies to process information about the number of rooms, floors, stairs, and exit doors. In particular, it is necessary to process exit doors during this procedure. Exit doors that are recognized by pedestrians are of many types such as exit doors in rooms, stairs connected to corridors, and exit doors in a building. When calculating the static floor field (hereafter referred to as SFF) in the FFM, information about exit doors is needed and simulation results will be different depending on how the SFF is calculated using an exit door among the above-mentioned exit doors. In this study, an XML-format building data model is proposed according to data structures required by the FFM. This study also defines a methodology to process a number of exit doors. Accordingly, this study developed a building data construction and evacuation simulator and simulation experiments were conducted with university campus building.

Key words : Microscopic Simulation, Floor Field Model, Evacuation Simulation, Pedestrian Dynamics

요 약

Floor Field Model(이하 FFM)은 보행자의 행동을 모델링하기 위한 Cellular Automata(이하 CA) 기반 보행모델이다. FFM에 대한 기존 연구들은 간단한 구조(하나의 방 혹은 방 안에 장애물이 있는 경우), 다소 복잡한 구조(여러 개의 방을 가지는 경우) 등에 대한 실험을 진행하였다. 다만, 실제 건물에 FFM을 적용하기 위해서는 다수의 방, 층, 계단, 출입문 등에 대한 정보들을 처리하기 위한 추가적인 방법론이 요구된다. 특히 이 과정에서 출입문에 대한 처리가 필요하다. 보행자들이 인지하는 출입문은 방의 출입문, 복도와 연결된 계단, 건물의 출입문 등 여러 종류가 있다. FFM에서는 Static Floor Field(이하 SFF)를 계산할 때, 출입문에 대한 정보가 필요하며, 앞서 언급한 출입문 중 어떤 것을 이용하여 SFF를 계산하는지에 따라 시뮬레이션 결과가 달라진다. 본 연구에서는 FFM에서 요구하는 데이터 구조에 따른 XML 형태의 건물 데이터 모델을 제시한다. 또한, 다수의 출입문을 처리하는 방법론을 정의한다. 이에 따라 건물 데이터 구축 및 대피시뮬레이터를 개발하였으며, 대학 캠퍼스 건물에 대해 시뮬레이션 실험을 수행하였다.

주요어 : 미시적 시뮬레이션, 플로어 필드 모델, 대피 시뮬레이션, 보행 역학

1. 서 론

* 본 연구는 국민안전처 재난안전기술개발기반구축사업("NEMA-기반-2014-116")의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

Received: 12 January 2016, **Revised:** 19 April 2016,
Accepted: 19 May 2016

* **Corresponding Author:** Chulmin Jun
E-mail: cmjun@uos.ac.kr
University of Seoul, Department of Geoinformatics

최근 의정부 아파트 화재 사고, 김해 병원, 김포 물류창고 등 대형건축물에서의 화재 사고가 연이어 발생하고 있고, 이로 인한 인명과 재산피해가 속출하고 있다. 사고로 인한 인명 피해를 최소화하기 위해서는 신속하고 정확한 대피 안내가 필요하고, 대피 경로 산출, 대피 상황 예측 등의 목적으로 시뮬레이션을 이용한 연구들이 진행

되고 있다 (Ahuja et al., 1993; Jang, 2010). 시뮬레이션 기술 중, 보행자의 움직임을 묘사하기 위한 보행 모델에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있으며, 모델링 접근 방식과 보행자를 다루는 관점에 따른 다양한 모델이 있다 (Henein, 2008). 그 중, CA를 이용한 FFM은 빠른 연산 속도를 가지며 여러 보행 상황을 표현할 수 있는 모델로 평가받고 있다 (Burstedde et al., 2001; Kirchner et al., 2002).

본 연구는 FFM을 이용한 대형 건축물의 대피시뮬레이션 기법을 제시한다. 기존 FFM에 대한 많은 연구는 간단한 형태의 공간(하나의 방 혹은 방 내부에 장애물이 있는 경우)에 대해 모델을 테스트한 연구들이 대다수이다 (Kirchner et al., 2003; Kirchner et al., 2004; Nam et al., 2014; Varas et al., 2007; Zhang et al., 2014). 따라서 다수의 방, 층, 계단, 출입문 등이 존재하는 복잡한 구조의 실제 건축물에 FFM의 논리를 바로 적용할 수 없다. 왜냐하면, 출구의 명확한 정의가 필요하기 때문이다. 출구의 경우 방, 복도, 건물의 출구 등 여러 형태의 출구가 존재하며 어떤 출구를 모델의 출구로 이용할 것인지에 따라 보행자들의 움직임이 달라진다. 또한, 층과 층을 연결하기 위한 계단의 적용 및 시각화 등을 위해서는 FFM을 위한 별도의 데이터 모델이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 실제 건축물에 FFM을 적용하기 위한 실내 데이터 모델을 제시한다. FFM은 격자형 자료를 이용하므로, 건물의 각 층, 계단 등을 격자형 자료로 저장할 수 있고, 각 방, 출구 등의 정보를 활용할 수 있는 XML 구조의 데이터 모델을 정의하였다. 또한, 여러 개의 출구를 적용하기 위한 방법론을 제시한다. 건물의 전체 출입문만을 출구로 이용하는 경우와 각 방의 출입문도 출구로 이용하는 경우에 따른 모델 적용 방법을 정의하였다. 제시한 방법론을 시험하기 위해 대학 캠퍼스 건물에 대한 데이터를 구축하였으며, 이를 시뮬레이션하기 위한 대피시뮬레이터를 개발하였다. 이를 통해 실제 건물에 대한 시뮬레이션 실험을 진행하였고, 출구의 이용 방식에 따른 대피 상황의 변화를 확인하였다.

2. Floor Field Model

FFM은 2001년에 Burstede et al.에 의해 소개된 CA 기반 보행모델이다 (Burstede et al., 2001). 보행자는 40cm x 40cm 크기의 격자 공간에 배치되며, 주변 8개의 셀(Cell)과의 상호작용을 통해 이동 방향을 결정한다. 즉, 주변 이웃 보행자들과 출구와의 거리 등을 고려하여 자

신의 위치를 결정하게 되고, 이를 반복하여 목적지로 이동하게 된다.

격자로 구성된 각각의 셀들에 값이 할당되는데, FFM에서는 여러 개의 필드(Field)를 생성하며 각각의 필드별로 개별적인 값을 부여한다. 필드는 일반적으로 SFF와 Dynamic Floor Field(이하 DFF)로 구성된다. SFF는 출구까지의 거리, 가시성 등 건물의 구조적인 접근성을 각각의 셀에 연속적으로 할당한 값들을 의미하며, 보행자는 셀에 부여된 값에 의해 목표 출구를 결정하고 이동하게 된다. DFF는 보행자들의 단계적 움직임에 영향을 주는 가변적 요소들에 대한 값을 나타낸다. 따라서 보행자는 SFF에서 정의된 값들과 DFF에서 정의된 값들을 통해서 매 연산마다 어떠한 셀로 이동할 것인지를 결정하게 된다. 또한, 각 필드의 민감도(Sensitivity) 파라미터를 조정함으로써 여러 상황별 시뮬레이션이 가능하다. 민감도 파라미터는 SFF와 DFF의 영향력을 조절할 수 있게 한다. 예를 들어 보행자가 모여 있으면 DFF의 민감도를 증가시켜 시뮬레이션을 수행하고, 익숙하지 않은 환경이라는 설정에서는 SFF와 DFF의 민감도를 감소함으로써 여러 상황에 대한 시뮬레이션이 가능하다 (Kirchner et al., 2002).

FFM에서 주변 이웃하는 셀마다 선호도인 점수를 계산하는 수식은 다음과 같다. 해당 수식 때문에 보행자는 연산마다 주변 셀의 점수를 계산하고 이를 통해 이동할 셀을 탐색하게 된다 (Burstede et al., 2001).

$$score(i) = e^{-k_d D_i} e^{-k_s S_i} \zeta_i \eta_i \quad (1)$$

- $score(i)$: 주변 i 번째 셀 선호도 값
- D_i : 주변 i 번째 셀의 DFF 값
- S_i : 주변 i 번째 셀의 SFF 값
- k_d, k_s : 보행자 개개인의 움직임과 출구의 위치를 나타내는 민감도 파라미터
- ζ_i : 이진 값을 가지며, 0은 이동 불가능한 셀(벽, 장애물), 1은 그 외의 셀에 할당됨
- η_i : 이진 값을 가지며, 0은 보행자에 의해 점유된 셀, 1은 점유되지 않은 셀에 할당됨

3. FFM을 건축물에 적용하기 위한 방법론

3.1 실내 데이터 모델

FFM을 복잡한 대형건축물에 적용하기 위해서 우선 실내 공간에 대한 정보를 저장하기 위한 데이터 모델이 필요하다. 요구되는 데이터 모델은 대상 건물의 기하 정보와 속성 정보를 담고 있어야 하며, 여러 층 및 계단에

Table 1. Cell type and value

Cell type	value
Movable cell(room, corridor, exit)	0
Wall, Obstacle	1
Exterior	2

대한 처리가 가능해야 한다. 본 연구에서 ‘층’은 각 층의 평면정보를 의미하며, ‘계단’은 각 층을 연결하는 하나 혹은 여러 개의 면으로 구성된 계단을 의미한다.

기하 정보는 각 층 및 계단의 크기, 위치, 높이 등에 해당된다. FFM에서는 격자형 공간을 이용하므로, 정의하고자 하는 데이터 모델에서도 격자형 구조로 기하 정보를 저장해야 한다. 속성 정보는 각 층 및 계단의 ID, 층 번호, 높이, 방 정보, 출구 정보 등이 있다. 또한, 여러 층 및 계단에 대해서 각 자료(층, 계단) 간의 연결 정보를 부여해야 층-계단 간의 연속적인 이동이 가능하다.

본 연구에서는 층과 계단에 대해서 필요한 속성 및 기하 정보의 특징을 도출하였고 이를 저장하기 위한 실내 데이터 모델을 정의하였다. 우선, 기하 정보를 저장하는 방식을 정의하였다. 기하 정보는 격자 단위로 저장되며, 각각의 격자에 건물의 해당 공간에 대한 정보를 저장하였다. 기본적인 격자의 크기는 FFM에서 요구하는 40cm x 40cm로 결정하였고, 해당 건물의 셀 정보는 3가지 종류로 구분하였다. Table 1과 같이 보행자가 이동할 수 있는 공간인지 아닌지에 따라 0 또는 1의 값을 부여하였고, 건물의 외부 공간은 2를 부여하였다. 이에 따라 건물의 각 층 및 계단의 기하 정보는 격자형 데이터로 저장되며, 각 셀에는 0, 1, 2중 하나의 값이 부여된다.

다음은 건물, 각 층 및 계단에 대해 필요한 속성 정보를 도출해야 한다. 건물에 대해서 필요한 속성 정보는 건물의 이름, 건물의 셀의 크기이다. FFM은 40cm x 40cm 크기의 격자를 이용하지만, 이후에는 30cm, 20cm, 10cm 등 여러 가지 크기의 셀에 대해 FFM을 적용하기 위한 기법에 대한 후속 연구들이 진행되었다 (Kirchner et al., 2004; Nam et al., 2014). 따라서 셀의 크기를 건물에 대해 저장함으로써 후속 모델들에 대한 대응도 가능하도록 하였다.

각 층에 대해 도출한 속성 정보들은 다음과 같다. 각 층은 ID, 종류 구분자(층:0, 계단:1), 이름, 층 번호에 대한 정보가 필요하다. ID는 각 층 및 계단의 연결을 위해 필요하며, 종류 구분자는 층인지 계단인지 구분하기 위한 값이다. 각 층은 해당 층의 MBR(Minimum boundary rectangle)의 왼쪽 위, 오른쪽 아래 점의 좌표를 저장해야

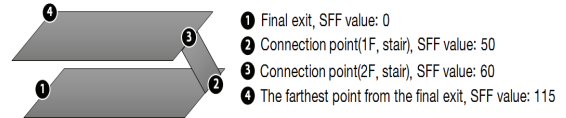


Fig. 1. SFF calculation example of a multi-story building

한다. 이를 통해 해당 층의 가로, 세로 크기를 계산할 수 있고, 층의 위치도 알 수 있다. 추가로 해당 층으로 진입하는 계단들의 ID, 해당 층에서 나가는 출구 정보, 각 방의 정보를 저장해야 한다. 개별 출구들의 정보를 따로 관리해야 출구별 대피 인원 및 상황을 파악할 수 있고, 각 방의 정보가 있어야 해당 방의 인원을 배정할 수 있다.

다음은 계단에 대해 도출한 속성들이다. 계단은 층과 거의 유사하다. 다만, 차이가 있는 부분은 두 가지이다. 첫째, 층은 MBR의 왼쪽 위, 오른쪽 아래 좌표만 저장하고 있었지만, 계단은 네 꼭짓점의 모든 좌표를 저장해야 한다. 왜냐하면, 계단은 경사를 가지고 있으므로 경사가 어느 방향인지 파악하기 위해서는 네 꼭짓점의 x, y, z 좌표가 모두 필요하다. 둘째, 계단은 방 정보를 저장할 필요가 없다. 이외의 부분들은 층과 같다.

이와 같은 방식으로 건물의 모든 층, 계단의 기하 및 속성 데이터를 저장하면 FFM에서 요구하는 셀 구조의 데이터로 활용할 수 있다. 또한, 각 층, 계단의 연결 정보(입구 및 출구)를 이용하여 건물의 최종 출구로부터 모든 셀까지의 SFF 값을 계산할 수 있다. 건물의 최종 출구는 SFF 값이 0으로 할당되며 출구에서 멀어질수록 SFF 값이 커지게 된다. Fig. 1을 예를 들어 설명하면, 건물의 최종 출구인 ①은 SFF 값이 0으로 할당된다. 다음 1층 모든 셀의 SFF 값이 건물의 최종 출구를 기준으로 할당되게 된다. 1층의 모든 셀의 SFF 값이 할당되면 계단과 연결 지점인 ②로부터 계단의 SFF 값을 할당하게 된다. ②의 SFF 값이 50이라면 이를 시작으로 계단의 모든 셀의 SFF 값을 할당한다. 다음은 계단과 2층의 연결 지점 ③으로부터 2층의 SFF 값을 할당하게 된다. ③의 SFF 값이 60이라면 2층은 60을 시작으로 모든 셀의 SFF 값이 할당되게 된다. 이러한 과정을 통해 1층, 계단, 2층의 모든 셀의 SFF 값이 할당되며, 가장 SFF 값이 큰 지점은 2층의 구석 지점인 ④가 된다. SFF 값을 계산하는 자세한 방식은 이후에 설명된다.

본 연구에서 앞서 정의한 속성 및 기하 정보를 저장하기 위한 모델의 형식은 XML을 이용하였다. XML 형식에 맞춰 도출한 XML 모델 스키마는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에는 XML 모델의 노드들의 관계만 표현해놓았으며, 각 노드의 속성은 표현되어있지 않다. 최상위 노드는

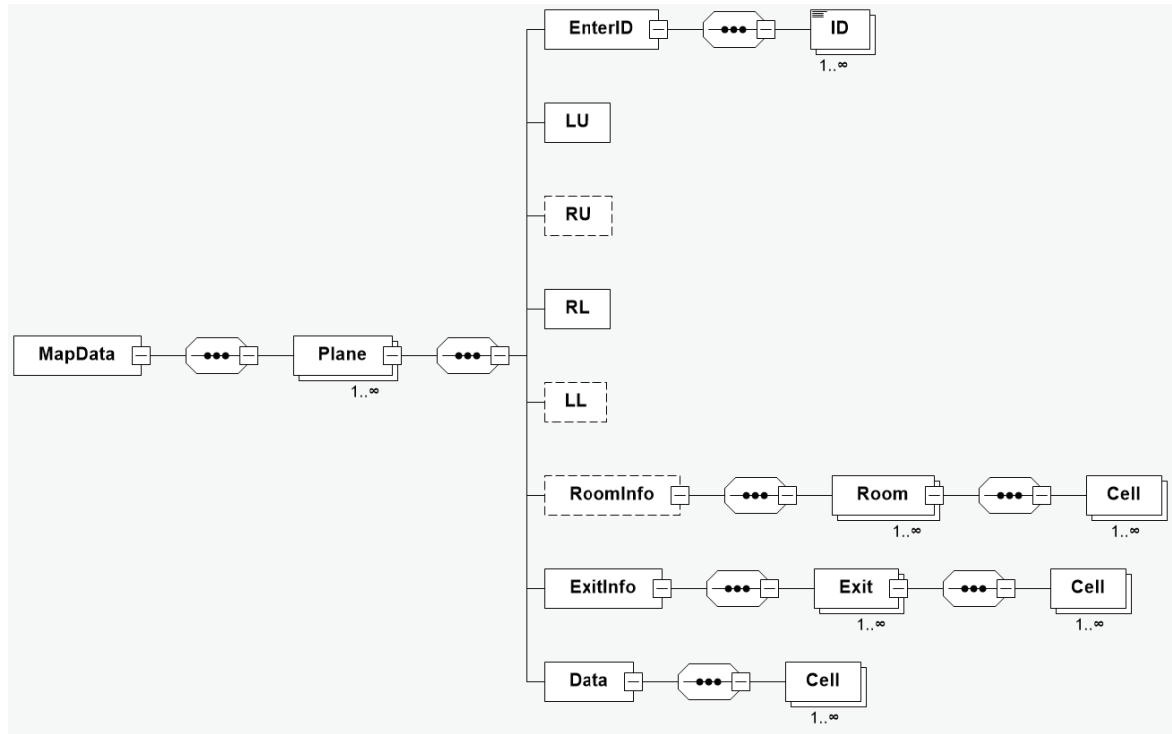


Fig. 2. XML Schema

40cm_21c - 전층.xml - XML Marker version 1.1

File Edit View Options Navigate Help

Tree View 0 warning(s), 0 error(s)

Table Selection Browser

2 Attributes:

Name	Value
name	40cm_21c - 전층
cellsize	40

27 Subtags:

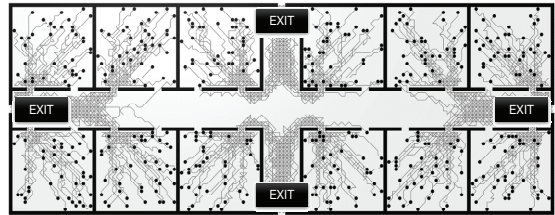
Tag name/Text	id	type	name	floorNo	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	0	0	1층	1	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	1	0	2층	2	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	2	0	3층	3	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	3	0	4층	4	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	4	0	5층	5	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	5	0	6층	6	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	6	0	7층	7	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	7	1	계단-7	1	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	8	1	계단-8	1	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	9	1	계단-9	1	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	10	1	계단-10	1	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL
Plane	11	1	계단-11	2	EnterID	LU	RU	RL	RoomInfo	ExitInfo	Data	RU	LL

Ready

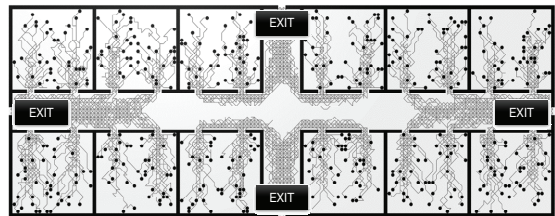
Fig. 3. XML Model Example

MapData이며 건물명과 셀 크기 속성을 가지고 있다. 자식 노드로 1개 이상의 평면(Plane)을 가지게 된다. 평면은 층 또는 계단으로 구성되며, 두 가지 모두 ID, 구분자, 이름, 층 번호의 속성을 가지고 있다. 자식 노드로는 해당 층 또는 계단으로 들어오는 평면의 ID인 EnterID가 있다. EnterID는 1개 이상의 ID 노드를 자식 노드로 가진다. MBR의 경우 층은 왼쪽 위(LU)와 오른쪽 아래(RL) 두 꼭짓점의 좌표(x, y, z)를 가지고 있으며, 계단은 오른쪽 위(RU), 왼쪽 아래(LL) 꼭짓점 좌표까지 가지고 있다. 방은 RoomInfo 노드에 저장되며, RoomInfo 노드는 1개 이상의 개별 방(Room) 노드를 가지고 있다. Room 노드는 방 이름 속성을 가지며, 1개 이상의 셀 좌표를 자식 노드로 가지고 있다. 출구는 ExitInfo 노드에 저장되며, ExitInfo 노드는 1개 이상의 개별 출구(Exit) 노드를 가지고 있다. Exit 노드는 출구 이름, 출구 연결 지점 ID 속성을 가진다. 여기서 출구 연결 지점 ID는 해당 출구로 나갔을 경우 다음에 연결되는 공간의 ID를 의미하는데, 건물의 최종 출구의 경우는 다음에 연결되는 공간이 없으므로, 음수(-1)를 저장하도록 하였다. Exit 노드는 1개 이상의 셀 좌표를 자식 노드로 가지고 있다. 마지막으로 건물의 각 층, 계단의 기하 데이터에 해당하는 Data 노드는 각각 개별 셀의 좌표와 셀 값(type)으로 구성된다. 좌표 중 z 좌표는 이미 MBR을 정의하는 부분에서 저장했으므로 Data 노드에서는 x, y 좌표만 저장하면 된다. RoomInfo, ExitInfo, Data의 셀 노드는 모두 x, y 좌표만 저장하고 있다.

본 연구에서 정의된 XML 스키마에 따라 실제 건물의 XML 모델을 구축한 예시는 Fig. 3과 같다. 대학 캠퍼스 건물을 대상으로 XML 모델을 구축하였다. Fig. 3은 4가지 부분으로 나뉘어 있는데, 왼쪽 위 그림에서는 MapData의 속성인 name, cellsize를 확인할 수 있고, 자식 노드로 다수의 Plane이 정의되어 있는 것을 볼 수 있다. 오른쪽 위 그림은 실제 XML 파일의 텍스트를 보여주고 있다. 첫 번째 Plane의 속성, 자식 노드들이 표현되고 있다. 오른쪽 아래 그림에서는 전체 MapData의 자식들을 확인할 수 있다. ID가 0~6인 Plane은 1층부터 7층까지 층에 해당하는 데이터이며 ID가 7부터는 계단 데이터이다. 층은 자식 노드로 RoomInfo를 가지고 있고, MBR의 오른쪽 위(RU)와 왼쪽 아래(LL)는 가지고 있지 않다. 반대로 계단은 자식 노드로 RoomInfo가 없으며, 오른쪽 위(RU)와 왼쪽 아래(LL)는 가지고 있다. 그 이외 부분은 층과 계단의 속성 및 자식 종류가 동일하다. 좌하단 그림은 1층의 RoomInfo의 자식들을 확인한 부분이다.



(a) Use only entrance of the building



(b) Use entrance of the building and door of each room

Fig. 4. A comparison of two situations

1층에는 R101, R102 등 총 24개의 방이 있으며, 각각의 방은 다수의 셀을 가지고 있다. R101은 336개, R102는 391개 등 각 방마다 지정된 크기와 모양에 맞게 셀 좌표 데이터를 가지고 있다.

3.2 다중 출입문 처리 기법

3.2.1 출입문 판단 및 SFF 계산

FFM을 이용하여 보행자들을 목적지로 이동시키기 위해서는 출구에 대한 정의가 필요하다. 따라서 실내 데이터 모델에서도 각 평면(층, 계단)의 출구를 지정해주었다. 본 연구에서는 건물의 출입문뿐만 아니라 각 방의 출입문들도 출구로 정의하였다. 각 방의 출입문을 출구로 지정하는 것과 지정하지 않는 것은 대피 경로 산출에 큰 차이를 가져온다. 두 경우의 차이를 예시를 통해 설명하면 다음과 같다. Fig. 4(a)는 대상 건물의 출입구 4개(상, 하, 좌, 우)만 이용했을 때 산출된 대피 경로이다. 그림 내 원은 한 명의 보행자를 의미하며, 선은 보행자가 이동한 경로이다. 건물 내 방은 12개가 있으며, 건물 전체에는 500명의 보행자가 배치되어 있다. 각 보행자는 4개의 출입구 중 가까운 출입구를 찾아서 이동하였다. Fig. 4(b)는 같은 대피 실험인데 각 방의 출입문도 출구로 인식하게 하였을 때의 결과이다. 모든 방은 2개의 출입문을 가지고 있으며, 방마다 2개의 출입문을 출구로 정의하였다.

Fig. 4의 대피 경로는 확연한 차이를 보인다. Fig. 4(a)에서는 각 방의 출입문이 2개이더라도 출입구와 가까운 출입문으로만 대부분의 보행자들이 이동하였다. 따라서

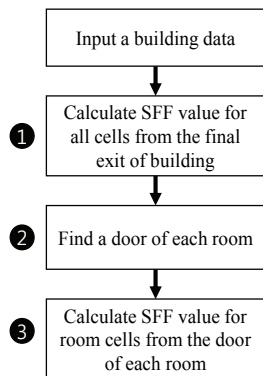


Fig. 5. Process for finding a door of each room and SFF calculation

다른 하나의 출입문이 비어있음에도 불구하고 한쪽 출입문으로만 보행자들이 몰리게 되었다. 반면 Fig. 4(b)에서는 각 방의 보행자들이 우선 방의 2개 출입문으로 이동한 후에 복도로 나가게 된다. 다음 복도에서 건물의 출입구를 향해 이동하여 건물을 탈출하였다. 이 두 가지 상황은 결국 보행자가 대피 상황을 어떻게 인지하느냐의 차이라고 볼 수 있다. Fig. 4(a)의 경우는 보행자가 건물 출입구만을 출구로 인지하고 이동하고 있는 것이며, Fig. 4(b)의 경우는 보행자가 우선 해당 방의 출입문을 출구로 인지한 후, 방을 나가게 되며 다음에 도착한 복도의 출입문인 건물의 출입구를 출구로 인지하고 이동하게 된 것이다.

본 연구에서는 출입구를 정의하는 방식으로 Fig. 4(b)와 같은 방식을 이용하였다. 이를 위해서는 건물의 출입구와 각 방의 출입문에 대한 정보가 필요하다. 건물의 출입구 정보는 데이터 모델에 저장되어 있으므로 따로 계산할 필요가 없다. 반면 각 방의 출입구 정보는 계산을 통해서 파악해야 한다. 출입구 파악 및 SFF 계산 과정의 흐름은 Fig. 5와 같다. 건물 데이터를 입력받으면 건물의 출입구를 기준으로 모든 셀의 SFF 값을 계산한다. 다음은 방마다 출입문의 셀 위치를 탐색한다. 탐색된 출입문을 기준으로 하여 각 방의 SFF 값을 추가로 계산한다.

우선 Fig. 5 ①단계인 건물의 출입구로부터 모든 셀의 SFF 값을 계산하는 과정은 Fig. 6의 예시에 해당한다. 건물의 출입구인 하단 2개의 셀은 SFF 값이 0으로 할당되며, 이를 기준으로 상, 하, 좌, 우의 이동은 1을 더하고 대각선 이동은 1.4를 더해준다. 하나의 셀에 두 개 이상의 값이 부여될 경우 작은 값을 셀 값으로 한다. 이는 Varas et al.의 SFF 계산 방법을 이용한 것이다 (Varas et al., 2007). 이와 같은 방법으로 건물 내 이동 가능한 모든 셀의 SFF 값을 계산해준 것이 Fig. 6의 모습이다. 가장 큰

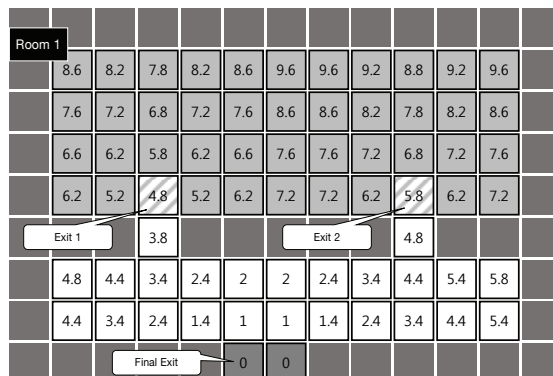


Fig. 6. SFF calculation example (entrance of the building)

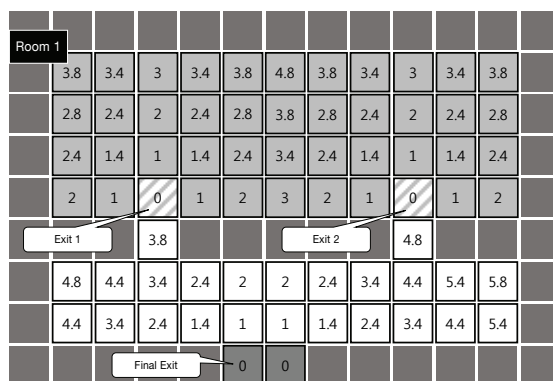


Fig. 7. SFF calculation example (entrance of the room)

값은 방의 구석으로 9.6의 값이 할당되었다.

다음은 방의 출입문을 탐색해야 한다(Fig. 5 ②). 출입문을 탐색하는 기준은 3가지이다. 첫째는 출입문에 인접한 셀이 해당 방의 셀이 아니어야 한다. 즉, 방의 가장 바깥쪽 셀에 대해서만 탐색을 해야 한다. Fig. 6의 방은 총 44개의 셀로 구성되어 있다. 이 중 인접한 셀이 해당 방의 셀이 아닌 것들은 방의 외곽 부분의 24개의 셀이 된다. 이들은 벽과 닿아 있거나 복도와 연결된 셀이다. 둘째는 인접한 셀 중 해당 방의 셀이 아닌 곳이 벽이나 장애물이 아니어야 한다. 이 과정을 통해 24개의 셀 중 하단 출입문과 연결된 빗금이 쳐진 2개의 셀만 남게 된다. 셋째는 인접한 셀 중 해당 방의 셀이 아닌 곳의 SFF 값이 자신의 SFF 값보다 작아야 한다. 이는 인접한 셀 쪽으로 이동하는 것이 출구에 가까워짐을 의미한다. 남아있는 2개의 셀의 SFF 값은 4.8과 5.8이며, 이들과 연결된 외부 셀의 SFF 값은 3.8과 4.8이다. 2개의 셀 모두 SFF 값이 외부로 나가면 작아지므로 출구로 향하는 출입문으로 판정된다. 따라서 빗금이 쳐진 2개의 셀(exit 1, exit 2)이 방의 출입문 셀로 결정된다.

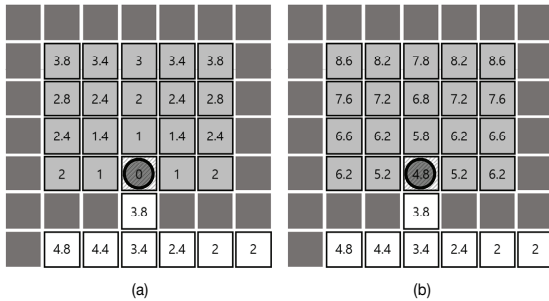


Fig. 8. Situation a pedestrian arrives at the room door

모든 방의 출입문 결정을 마친 후에 각 방의 SFF 값을 추가로 계산해준다(Fig. 5 ③). SFF 계산 방법은 기존 방법과 같다. 출입문의 SFF 값을 0으로 할당하고 1 또는 1.4의 값을 더해주며 해당 방의 모든 셀의 SFF 값을 계산한다. 계산을 마친 결과는 Fig. 7과 같다. 방의 출입문은 SFF 값이 0이며, 이를 기준으로 방의 셀 SFF 값을 계산한 것이다.

다만, 기존 SFF 값을 지우고 새롭게 계산한 SFF 값을 할당하는 것이 아니다. 새롭게 계산된 값은 별도의 필드에 저장된다. 즉, 방 출입문 셀의 SFF 값은 4.8, 5.8이며, 해당 방에서만 계산된 SFF 값은 0인 것이다. 두 개의 값을 모두 이용하게 되므로 두 값을 따로 저장해야 한다. 본 논문에서 두 개의 값을 구분하기 위해 건물 출입구를 기준으로 계산된 SFF 값은 '건물 SFF 값'이라 하고 각 방의 출입문을 기준으로 계산된 SFF 값은 '방 SFF 값'이라고 하겠다.

3.2.2 보행자 이동 방법

전술한 바에 따라 대상 건물의 '건물 SFF 값'과 모든 방의 '방 SFF 값'을 계산한 후에 보행자의 이동 방법을 정의해야 한다. 기존 FFM에서 보행자의 이동 방향을 결정하는 이동 확률(Transition probability) 계산에서는 여러 개의 SFF 값을 이용하지 않으므로 본 연구에 바로 적용할 수 없다. 따라서 여러 개의 SFF 값을 이용하기 위해 이동 확률 계산 방법을 수정하였다. 보행자의 이동 과정은 보행자가 방에 위치할 경우와 그렇지 않을 경우로 나뉘어서 진행된다. 현재 보행자의 위치가 방이면 '방 SFF 값'을 이용하고 방이 아니면 '건물 SFF 값'을 이용한다.

여기서 예외로 처리해야 할 상황이 있다. 보행자가 방의 출입문에 도착했을 경우이다. 이 경우는 아직 방 안에 있지만 '방 SFF 값'을 이용하지 않는다. Fig. 8(a)에서 방의 출입문(중앙 빗금인 셀)에 보행자(원)가 도달한 상황이다. 이 상황에서 '방 SFF 값'을 이용한다면 더는 진행

할 곳이 없게 된다. 이미 '방 SFF 값'이 0인 지점에 도달했기 때문이다. 따라서 다음 셀인 하단 셀로 이동하기 위해서는 '건물 SFF 값'을 이용하여 이동해야 한다. Fig. 8(b)는 '건물 SFF 값'을 이용하는 경우이다. 현재 셀은 SFF 값이 4.8, 하단 셀은 SFF 값이 3.8이므로 하단 셀로 이동할 확률이 높아지게 되고 하단 셀을 거쳐 복도의 출입구로 이동하게 된다.

이와 같은 과정을 반복하여 모든 보행자는 방, 복도, 계단 등을 거쳐 이동하게 되고 건물의 출입구로 탈출하게 된다. 본 연구에서 언급하지 않은 FFM의 여러 요소들(격자 공간, 이웃 정의, DFF 등)은 모두 기본 방법을 따른다(Burststedt et al., 2001; Kirchner et al., 2002).

4. 대피시뮬레이션 실험 및 결과 분석

실험을 위해 본 연구에서 제시한 실내 데이터 모델을 따르는 건물 데이터를 구축하였다. 또한, 구축된 데이터 로드 및 다중 출입문 처리 기법을 적용한 FFM 시뮬레이터를 개발하였다. 이를 통해 다층 구조의 건물에서 FFM 시뮬레이션이 오류 없이 수행되는지, 시뮬레이션에 필요한 데이터들이 데이터 모델에 잘 정의되어 있는지 등에 대한 모델 적용 실험을 수행하였다. 또한, 건물의 출입구만 출구로 지정하였을 경우와 각 방의 출입문도 출구로 지정하였을 경우에 대한 대피 경로 차이를 분석하기 위한 실험을 진행하였다.

두 실험을 위해 구축한 건물 데이터는 3가지이다. 첫째는 교내 캠퍼스 건물을 구축하였고 둘째는 서울시 청량리 지하철 역사를 구축하였다. 마지막으로 다중 출구 비교 실험을 위해 가상으로 생성한 건물이다. 세 데이터 모두 실내 데이터 모델의 정의에 따라 층, 계단 데이터를 생성하였다.

4.1 실내 데이터 모델 적용 실험

다수의 층과 계단으로 구성된 건물에 대한 데이터 모델 적용 및 대피시뮬레이션 실험을 진행하였다. 대학 캠퍼스 건물과 서울시 청량리 지하철 역사를 XML 모델로 구축하여 대피시뮬레이션 실험을 수행하였다. Fig. 9(a)는 대학 캠퍼스 건물, Fig. 9(b)는 서울시 청량리 지하철 역사를 시뮬레이터에서 불러온 화면이다. 캠퍼스 건물은 총 7층으로 되어 있으며, 총 27개의 평면으로 정의되었다. 그중 7개는 층이고 20개는 계단이었으며, 건물의 전체 출입문은 총 8개이다. 방은 1층 24개, 2층 22개, 3층 31개, 4층 29개, 5층 28개, 6층 25개, 7층 19개로 구

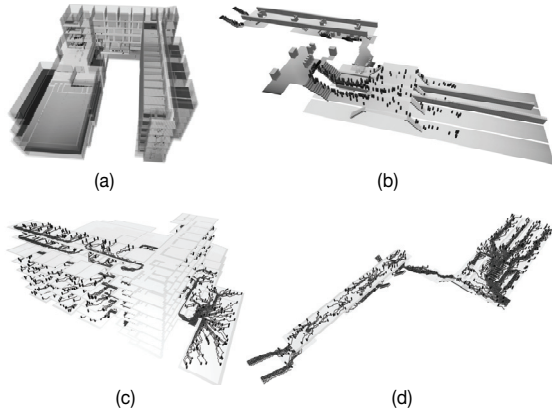


Fig. 9. (a) Campus building; (b) Subway station; (c), (d) Simulation result

성되었다. 서울시 청량리역사는 총 5층으로 되어 있으며 29개의 평면으로 정의되었다. 지하철 역사이다 보니 계단이 많이 있었고, 24개의 계단으로 구성되었다. 두 건물 모두 다수의 층과 계단, 방, 출입구를 가지는 복잡한 구조임에도 실내 데이터 모델에 따라 구조화되어 구축되어 있었고, 따라서 시뮬레이터에서 데이터 모델의 파싱, 건물 모델링, 시뮬레이션 수행 등 여러 과정을 체계적으로 진행할 수 있었다.

Fig. 9(c), (d)는 두 건물의 시뮬레이션 결과를 시각화한 것이다. 두 상황 모두 1,000명의 보행자를 건물에 임의로 배치하였고 FFM에 따라 건물을 빠져나가게 하였다. 보행자들은 현재 위치한 공간(방, 복도, 계단 등)의 출입구를 향하여 이동하였으며, DFF의 영향에 의해 주변 보행자들을 따르는 상호작용의 모습도 나타났다. 또한, FFM의 민감도 파라미터를 여러 가지 설정으로 변경해가며 서로 다른 상황에 대한 시뮬레이션 실험도 가능한 것을 확인할 수 있었다.

4.2 다중 출입문 처리 기법 적용 실험

다중 출입문 처리에 따른 대피 경로의 차이를 확인하기 위한 실험을 진행하였다. 해당 실험은 별도의 가상 건물 데이터를 구축하고, 이를 대상으로 진행되었다. 가상의 건물 데이터는 다중 출입문 처리 여부에 따라 대피 경로를 시각적으로 비교하기 쉽도록 실제 캠퍼스 건물을 간략하게 변형한 데이터이다.

Fig. 10은 가상의 건물 데이터를 시뮬레이터에서 불러온 화면이다. 해당 건물은 16개의 방과 3개의 출구가 있다. 두 개의 그림 중, Fig. 10(a)는 건물의 출입구 3개만 출구로 적용하였을 때의 모습이다. 바닥의 음영을 자세히

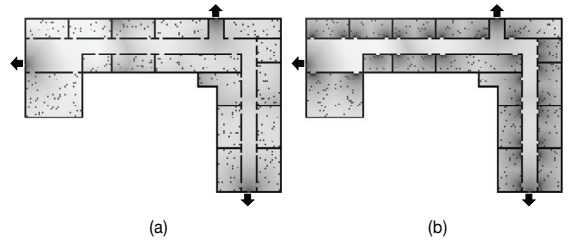


Fig. 10. Experimental space

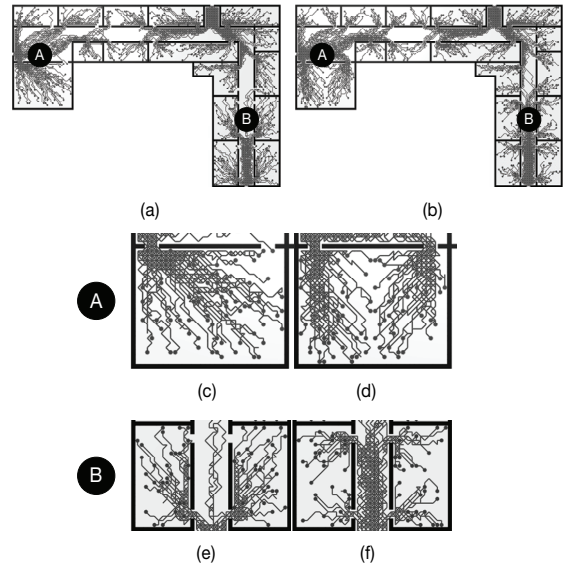


Fig. 11. Visualization of evacuation route

보면 건물 좌측, 상단, 하단에 음영이 진한 부분이 있다. 이 세 지역이 출입구가 위치한 곳이다. 그림에서 화살표 방향으로 출구를 나와 보행자가 대피하게 된다. Fig. 10(b)는 건물의 출입구뿐만 아니라 각 방의 출입문도 출구로 적용하였을 때의 모습이다. 각 방의 출입문에도 진하게 음영이 표시된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 두 상황에 대한 대피 경로의 차이를 보여준다. Fig. 11(a), (b) 모두 500명의 보행자를 임의로 건물 내에 배치한 후 3개의 출구로 빠져나가게 실험한 것이다. FFM의 민감도 파라미터 $k_s=2.0$, $k_d=1.0$, $\alpha=0.3$, $\delta=0.3$ 을 부여하였다. 이 파라미터는 보행자들이 일반적으로 출구로 향하고 있으며, 다른 보행자들과의 상호작용도 적당히 있는 상황이다 (Kirchner et al., 2002). Fig. 11(a), (b)는 방의 출입문을 적용하는지에 대한 차이가 있으므로 이에 따라 각 방 내에서 보행자의 경로 차이가 확연하게 드러난다. 이 중 가시적으로도 큰 차이를 보이는 두 지역을 자세히 살펴보자. A 지역과 B 지역으로 Fig. 11(a),

(b)에 표시되어 있으며, 두 지역을 확대한 것이 Fig. 11(c), (d), (e), (f)이다. A 지역은 좌측에 바로 출입구가 있으며 16개의 방 중 가장 큰 크기를 차지하고 있다. 방에는 2개의 출입문이 있는데, 건물의 출입구만 적용한 경우인 Fig. 11(c)는 우측 출입문으로는 1명의 보행자만 빠져나갔고 다른 모든 보행자는 왼쪽 출입문으로만 대피하였다. 반면 방의 출입구를 적용한 Fig. 11(d)는 양쪽의 출입문으로 보행자들이 고르게 빠져나간 것을 확인할 수 있다. B 지역은 중앙 복도와 양쪽에 방이 하나씩 있는 지역이다. 이 지역의 하단에 가까운 출구가 있어서 배치된 보행자들은 모두 하단으로 이동하였다. 건물의 출입구만 적용한 Fig. 11(e)는 양쪽 방 모두 하단의 출입문으로만 보행자들이 빠져나갔으며 상단의 출입문으로는 아무도 나가지 않았다. 방의 출입구를 적용한 Fig. 11(f)는 양쪽 방에서 보행자들이 두 개의 출입문을 모두 고르게 이용한 것을 확인할 수 있다.

두 경우의 차이를 통해 확인할 수 있는 점은 건물의 출입구만 적용할 경우에는 특정 출입문에 과도한 병목이 발생할 수 있다는 것이다. 보행자들이 건물의 출입구와 가까운 특정 출입문에만 몰려드는 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 이를 해결하기 위해서 각 방의 출입문도 출구로 적용하는 방안이 효과적임을 확인하였다. 보행자들이 모든 출입문으로 고르게 빠져나갔고, 복도로 이동한 후에 건물의 출입구로 대피를 마치게 되었다. 다만, 각 방에서 보행자들이 적절하게 방의 출입문으로 분배되어 건물의 출입문으로 향하더라도, 건물의 출입문에 모여드는 보행자의 수는 큰 차이가 없으므로 두 상황에서 대피 시간은 유의미한 차이가 나타나지 않았다.

5. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 FFM을 이용하여 실제 건축물의 대피시뮬레이션을 수행하기 위한 방법론을 제시하였다. 대피시뮬레이션을 수행하기 위해서는 FFM에서 요구하는 정보(격자형 데이터)뿐만 아니라 건물의 층과 계단의 연결 처리, 방, 출구, 벽 등과 같은 기하 및 속성 정보 등 추가적인 정보들이 요구된다. 따라서 이러한 정보들을 효율적으로 저장하고 관리하기 위한 실내 데이터 모델을 제시하였다. 건물 내 여러 층과 계단을 평면(plane)이라는 형식으로 정의하였고, 평면은 ID, MBR 좌표, 방 및 출구 정보, 격자형 기하데이터 정보 등을 저장하게 하였다. 또한, 정의된 모델을 따르는 XML 스키마를 설계하였다.

다음은 건물의 출입구, 방의 출입문 등 다중 출입문을 처리하는 규칙을 제시하였다. FFM에서 보행자를 목적지로 이동시키기 위해서 이용하는 것이 SFF이다. SFF를 계산하기 위해서는 목적지의 정보가 필요한데, 건물의 출입구만을 목적지로 이용하는 것보다는 각 방, 복도, 계단 등의 구분된 공간마다 목적지를 각각 지정하여 보행자를 이동시키도록 하였고, 최종적으로 건물의 출입구로 탈출하도록 하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 각 방의 출입구를 탐색하는 방법을 정의하였고, 각각의 방마다 별도의 SFF를 계산하여 보행자가 현재 공간의 SFF인 ‘방 SFF 값’을 활용할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제시하는 실내 데이터 모델의 적용 가능성을 확인하기 위해 모델을 따르는 가상의 건물 및 실제 건물 데이터를 XML 형식으로 구축하였다. 또한, 구축된 모델을 불러와 FFM 시뮬레이션을 수행하는 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터를 통해 여러 건물의 모델을 불러와 대피시뮬레이션 실험을 진행할 수 있었다. 특히, 가상의 건물을 대상으로 건물의 출입구만 이용하였을 경우와 각 방의 출입문을 추가로 이용하였을 경우의 대피 상황 차이를 확인하는 실험을 진행하였고, 이를 통해 각 방의 출입문을 출구로 지정하는 방식이 방 내부에서 병목을 덜 유발하는 대피 경로를 산출한다는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험 결과는 FFM에서 요구하는 출구를 어떻게 정의하는가에 대해 같은 모델을 이용하였음에도 불구하고 서로 다른 결과를 산출할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 또한, 대학 캠퍼스 건물, 서울시 청량리 지하철 역사 등 구조가 복잡한 실제 건축물에 대해서도 모델의 구축 및 시뮬레이션이 원활하게 진행되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 기존 FFM 관련 연구에서 서술되지 않던 실내 데이터 모델의 필요성 및 정의를 했다는 것과 여러 가지 종류의 출구 처리 방법을 제시했다는 것에 의의를 둘 수 있다. 앞으로는 기본 FFM에서 정의하는 40cm 크기의 격자뿐만 아니라 다른 크기의 격자를 이용한 데이터의 구축 및 적용 실험을 진행해볼 것이며, 더 크고 복잡한 대형건축물에 대해서도 모델의 적용에 문제가 없는지 확인해봐야 할 것으로 판단된다. 또한, 다중 출구 적용 여부에 따른 결과 분석에서 대피 경로의 차이를 정량적으로 분석할 수 있도록 하는 분석 기법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

References

- Ahuja, R.K., Magnati, T.L. and Orlin, J.B., *Network flows : Theory, algorithms, and Applications*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1993.
- Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A. and Zittartz, J., "Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton", *Physica A:Statistical Mechanics and its Applications*, Vol.295, No.3-4, 2001, 507-525.
- Henein, C., "Crowds Are Made of People: Human Factors in Microscopic Crowd Models", Ph.D Thesis, Carleton University, Canada, 2008.
- Jang, B.O., "Design and Implementation of Evacuation Simulation of Indoor Environment Fire", *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol.19, No.2, 2010, 1-8.
- (장병옥, "건물 내에서 화재시의 대피 시뮬레이션 설계 및 구현", *한국시뮬레이션학회논문지*, 제19권, 제2호, 2010, 1-8).
- Kirchner, A. and Schadschneider, A., "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, 2002, 260-276.
- Kirchner, A., Nishinari, K. and Schadschneider, A., "Friction effect and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics", *Physical Review E*, Vol.67, No.5, 2003.
- Kirchner, A., Klupfel, H., Nishinari, K., Schadschneider, A. and Schreckenberg, M., "Discretisation Effects and The Influence of Walking Speed in Cellular Automata Models for Pedestrian Dynamics", *Journal of Statistical Mechanics-Theory and Experiment*, Vol.10:P10011, 2004.
- Nam, H.Y., Kwak, S.Y. and Jun, C.M., "Developing a Cellular Automata-based Pedestrian Model Incorporating Physical Characteristics of Pedestrians", *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol.22, No.2, 2014, 53-62.
- (남현우, 곽수영, 전철민, "보행자의 물리적 특성을 반영한 CA기반 보행 모델", *한국공간정보학회지*, 제22권, 제2호, 2014, 53-62).
- Varas, A., Cornejo, M.D., Mainemer, D., Toledo, B., Rogan, J., Munoz, V. and Valdivia, J.A., "Cellular automaton model for evacuation process with obstacles", *Physica A:Statistical Mechanics and its Applications*, Vol.382, No.2, 2007, 631-642.
- Zhang, L., Wang, J.H. and Shi, Q.Y., "Multi-Agent Based Modeling and Simulating for Evacuation Process in Stadium", *Journal of Systems Science & Complexity*, Vol.27, No.3, 2014, 430-444.



남 현 우 (hwnam@uos.ac.kr)

2010 서울시립대학교 공간정보공학과 공학사
2012 서울시립대학교 공간정보공학과 공학석사
2012~ 현재 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정

관심분야 : 대피시뮬레이션, 보행모델, 공간데이터모델



곽 수 영 (sykwak@uos.ac.kr)

2010 서울시립대학교 공간정보공학과 공학사
2012 서울시립대학교 공간정보공학과 공학석사
2012~ 현재 서울시립대학교 공간정보공학과 박사과정

관심분야 : GIS, 공간분석, 공간 데이터베이스, 실내대피



전 철 민 (cmjun@uos.ac.kr)

1988 서울대학교 도시공학과 공학사
1990 서울대학교 도시공학과 공학석사
1997 Texas A&M University 도시 및 지역계획학 박사
1997~1999 North Carolina RTI GIS 전문요원
1999~현재 서울시립대학교 공간정보공학과 정교수

관심분야 : GIS, 공간 데이터베이스, 3차원 모델, 네트워크 알고리즘

