

# 개선된 Floor Field Model과 다른 피난시뮬레이션 모델의 비교 연구

남현우 · 곽수영 · 전철민<sup>†</sup>

## A Study on Comparison of Improved Floor Field Model and Other Evacuation Models

Hyunwoo Nam · Suyeong Kwak · Chulmin Jun<sup>†</sup>

### ABSTRACT

In this study, we propose an improved Floor Field Model(FFM) that considers the physical characteristics of pedestrians, i.e., body size, shape, and posture. Also we analyse limits of FFM and features of improved model compared with existing evacuation simulation models. FFM is a typical microscopic pedestrian model using CA, but it does not reflect the physical characteristics of pedestrians. Because of this, FFM is difficult to modeling phenomena such as collision, friction between pedestrians. As a result, FFM calculates a very short evacuation time when compared with the other models. We performed a computational experiment to compare improved model with other models such as FFM, Simulex, Pathfinder in an actual campus building. We carried out a comparison of evacuation aspect according to the change in number of evacuees. Also we compared evacuation aspect by exit. Finally, we confirmed that improved model reflects physical phenomena which were not reflected in FFM. Especially, experimental results were very similar to the Simulex.

**Keywords** : Microscopic Simulation, Floor Field Model, Evacuation Simulation, Pedestrian Dynamics, Simulex, Pathfinder

### 요 약

본 연구는 보행자의 물리적 특성(크기, 모양, 자세 등)을 적용한 개선된 플로어 필드 모델(Floor field model; FFM)을 소개하고, 개선된 모델과 널리 알려진 다른 피난시뮬레이션 모델과의 비교를 통해 FFM의 한계점 파악 및 개선된 모델의 특징을 분석하고자 한다. FFM은 셀룰라 오토마타(Cellular automata)를 이용한 대표적 미시적 관점 보행 모델이지만 보행자의 크기, 모양, 자세 등의 물리적 특성을 세밀하게 반영하지 않는다. 이로 인해 보행자들 간의 충돌, 마찰 등의 현상을 모델링하기 어려우며 결과적으로 다른 모델들과 비교하였을 경우에 매우 짧은 대피 시간을 산출하고 있다. 본 연구는 물리적 현상을 반영할 수 있는 개선된 FFM을 제시하며, 개선된 모델과 기존 FFM, 시뮬렉스(Simulex), 패스파인더(Pathfinder) 등 다른 모델들과의 비교 실험을 수행하였다. 실험은 실제 캠퍼스 건물의 일부 공간을 대상으로 진행되었으며, 대피 인원의 변화에 따른 대피 양상의 비교와 각 출구별 대피 양상의 비교가 수행되었다. 이를 통해 FFM에서는 반영되지 않던 물리적 현상들이 개선된 모델에서는 상용 모델 수준으로 적용되는 점과 특히 시뮬렉스와 유사한 형태의 대피 양상을 보임을 확인하였다.

**주요어**: 미시적 시뮬레이션, 플로어 필드 모델, 대피 시뮬레이션, 보행 역학, 시뮬렉스, 패스파인더

## 1. 서론

실내에서 화재, 붕괴 등의 재난이 발생하거나 테러의 위협 등으로 인해 모든 재실자들이 긴급히 대피해야 할 때, 현장의 상황(건물 구조, 열, 연기 등)에 따라 보행자들의 움직임을 모델링하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다(Kim et al., 2007). 보행자의 움직임을 바라보는 관

\* 이 논문은 2014년도 서울시립대학교 연구년교수 연구비에 의하여 연구되었음.

Received: 27 May 2016, Revised: 19 July 2016

Accepted: 20 September 2016

<sup>†</sup> Corresponding Author: Chulmin Jun

E-mail: cmjun@uos.ac.kr

University of Seoul, Department of Geoinformatics

점에 따라 거시적 모델과 미시적 모델로 나뉘며, 실내에서는 미시적 모델을 주로 이용한다. 미시적 모델 중에서는 소셜 포스 모델(Social force model)이 가장 대표적으로 알려져 있으며, 셀룰라 오토마타(Cellular automata) 방식을 이용한 플로어 필드 모델(Floor field model; 이하 FFM)도 주목받고 있다(Burstsedde et al., 2001).

FFM은 다수의 보행자들이 목적지를 향해 움직이는 상황을 간단한 연산만으로도 효과적으로 모델링한다(Kirchner and Schadschneider, 2002). 다만, FFM에서 설정하는 보행자의 크기 및 모양은 실제 보행자의 특성과 차이가 있다(Burstsedde et al., 2001; Kirchner and Schadschneider, 2002; Lim et al., 2006). 보행 상황에서 나타나는 보행자들 간의 세밀한 물리적 현상(충돌, 끼임 등)을 반영하기 위해서는 실제 보행자와 같은 모양(타원체)과 크기를 이용해야 하지만 FFM에서는 원형 모양의 보행자를 설정하고 있다. 원형 모양의 보행자는 연산을 단순화하여 빠른 결과 산출은 가능하나, 자세의 회전에 따른 끼임, 충돌 등의 영향을 반영하기 어렵다.

본 연구진은 FFM에 보행자의 크기, 모양, 자세, 회전 등의 효과를 부여한 개선된 보행모델을 개발하였다(Nam et al., 2014). 개선된 모델은 FFM의 장점인 빠른 연산 속도를 유지하면서 보행자들 간의 물리적 현상들을 반영할 수 있도록 하였다. 개선된 모델은 FFM의 기본적인 규칙들을 따르고 있으며 전술한 효과들을 부여하기 위해 보행자의 자세 추가, 크기 및 모양 변경, 격자 공간 변경, 자세 결정 확률 추가 등 여러 요소를 수정하였다. 수정 및 추가 사항 이외에는 FFM의 기본 규칙을 따르도록 하였다.

또한, 개선된 보행모델이 기존 FFM의 한계점을 해결하고 있는지 확인하기 위한 모델간 비교 실험을 진행하였다. FFM과의 비교실험을 통해 개선점을 파악하려 하였으며, 개선된 정도가 널리 알려진 상용 모델인 시뮬렉스(Simulex), 패스파인더(Pathfinder)와 비교하였을 경우 어느 수준인지 확인하고자 하였다. 시뮬렉스와 패스파인더는 보행자의 움직임을 계산하는 방식이 서로 다름에도 불구하고 보행자들 간의 물리적 충돌 현상을 모델링하고 있다(Thompson et al., 1997; Thunderhead Engineering, 2009). 두 모델 모두 재실자의 연령, 성별, 크기 등을 설정할 수 있으며, 보행 속도, 반응 시간, 사람과 사람 간의 밀도 등의 세부 설정도 가능한 특징이 있다. 또한, 두 모델은 실제 대피실험 데이터와의 비교 및 검증이 진행되었으며, 이들과의 비교를 통해 개선된 모델의 성능 검증을 진행하고자 하였다(Thunderhead Engineering, 2015;

Choi et al., 2015).

대피 시뮬레이션 실험은 대학 캠퍼스 건물의 1층 공간을 대상으로 진행되었고, 대피 인원수에 따른 대피 시간의 변화와 동일한 인원분포를 가정하였을 때 나타나는 출구별 대피 인원 및 대피 상황의 변화를 비교하였다. 이를 통해 FFM에서는 거의 나타나지 않았던 보행자들 간의 충돌, 끼임 등의 물리적 현상이 개선된 모델에서 나타나는 것을 확인할 수 있었고, 상용 모델들과 유사한 대피 실험 결과를 산출하였다. 개선된 모델 파라미터의 변경을 통해 시뮬레이션 결과를 조정할 수 있으며, 시뮬렉스에서 나타나는 대피 양상과 비슷한 결과를 보이는 것을 확인하였다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 Floor Field Model

FFM은 2001년에 소개된 미시적 보행 모델이다(Burstsedde et al., 2001). FFM은 2차원의 CA 모델이며, 보행자의 움직임에 영향을 미치는 요인을 다수의 플로어 필드(Floor field)를 이용하여 나타낸다. FFM은 격자 형태로 분할된 셀(Cell) 공간을 이용하고 있으며, 하나의 셀은 보통 40cm x 40cm 크기의 정사각형이다. FFM은 셀의 크기에 맞춰 보행자의 크기 및 모양을 설정하고 있다. 따라서 FFM의 보행자는 40cm x 40cm 크기를 가지게 되며, 이는 실제 보행자의 크기 및 모양과 다르다. 실제 보행자는 정사각형 형태가 아닌 타원 형태로 정의될 수 있으며, 몸체의 회전, 특정 방향을 향하는 자세 등의 특성들이 반영되어야 한다(Lim et al., 2006). 다만, FFM에서는 정사각형 모양의 보행자를 설정함으로써 이와 같은 특성을 적용하기 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 개선된 FFM을 제시하는 연구들이 다수 진행되었다. 격자공간의 크기를 세밀하게 줄이거나(Kirchner et al., 2004; Fu et al., 2016), 보행자들 간에 발생하는 마찰에 대한 영향을 나타내는 필드를 추가하였다(Kirchner et al., 2003; Nishinari et al., 2004). 또한, 자세에 따른 회전 효과를 부여한 연구도 진행되었다(Yanagisawa et al., 2009).

하지만, 이러한 연구들은 FFM에서 정의한 공간 구조, 보행자 크기, 이동 방식 등을 그대로 이용하고 있다. 본 연구에서는 이들과 달리 FFM의 보행자 크기와 배치 방식 자체를 다르게 접근하였다. 보행자의 크기를 정사각형이 아닌 직사각형 형태로 정의하였고 보행자의 자세를 추가하였다. 또한, 자세 변경에 따른 충돌 현상도 적용할

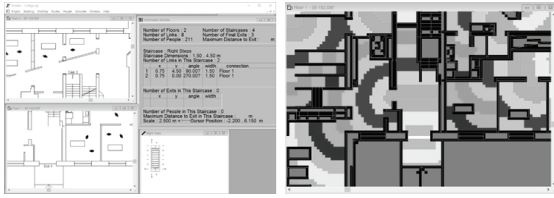


Fig. 1. User interface of simplex and distance map

수 있도록 하였다. 개선된 모델에 대한 자세한 설명은 3장에서 진행된다.

## 2.2 시물렉스

시물렉스는 CAD 기반 대피 시뮬레이션 모델이다 (Thompson et al., 1997). CAD 도면을 이용하여 공간 데이터를 구축할 수 있으며, 정의된 공간에 출구를 설정하고 다수의 보행자를 배치하여 대피 시뮬레이션을 수행할 수 있다. 또한, 다층의 건물에 대해서도 시뮬레이션 수행이 가능하도록 설계되었다.

시물렉스에서는 보행자들이 이동하는 층, 계단, 이들을 연결하는 링크, 건물의 최종 출입구 등의 데이터를 정의해야 한다. 이들 데이터의 정의가 완료되면 출구로부터 각 영역까지의 거리를 나타내는 디스턴스 맵(Distance map)을 계산한다(Fig. 1). 보행자들에 대해서는 배치 위치, 물리적 특성(보행자의 신체 타입), 심리적 특성(어떤 출구로 이동할 것인가, 대피에 얼마나 빠르게 반응할 것인가) 등을 설정할 수 있다.

보행자들은 대피 명령이 전달되면 각각의 반응속도에 따라 대피를 수행하게 되며, 대피 경로는 디스턴스 맵에 의해 계산된다. 이동 과정에서 각 보행자들의 보속은 사전에 설정된 보행자의 특성에 따라 결정되며 병목이 발생할 경우 보속은 0에 가깝게 느려진다. 또한, 보행자들은 자신의 몸을 자유롭게 회전할 수 있으며, 이로 인해 보행자들 간의 충돌, 끼임 등의 현상이 발생하게 된다.

## 2.3 패스파인더

패스파인더는 에이전트 기반 대피 시뮬레이터이다 (Thunderhead Engineering, 2009). 기본적인 보행 시뮬레이션뿐만 아니라 공간 데이터 저작 및 편집, 3차원 결과 분석기 등 시뮬레이션에 필요한 여러 기능들을 포함하고 있다. 패스파인더는 보행자들의 움직임을 결정하기 위해 두 가지 모델(SFPE, Steering)을 이용한다.

SFPE 모드는 (Nelson and MacLennan, 2002)의 개념에 따라 개발된 것이며, 보행자들의 움직임을 흐름을 통해 나타낸다. 또한 보행자들은 출구의 위치와 보행 밀도

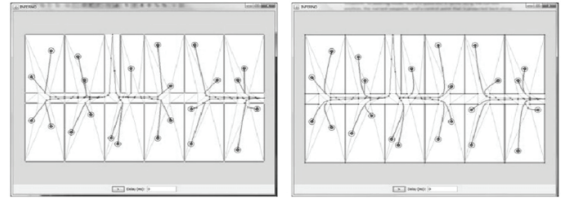


Fig. 2. Movement paths in SFPE model(left) and steering model(right) (Thunderhead engineering, 2009)

에 영향을 받아 보속을 동적으로 결정한다. 또한, 출구의 너비에 큰 영향을 받게 된다. SFPE 모드만의 특징은 보행자들 간의 물리적 충돌이 발생하지 않는 점이다. 따라서 비현실적인 상황이지만 수많은 보행자가 한 명의 보행자처럼 동일한 장소에 겹쳐지게 된다. 다만, 물리적인 충돌이 발생하지 않을 뿐이지 보행자들이 겹쳐지게 되면 해당 지역의 밀도가 증가하여 이로 인해 해당 지역에 위치한 보행자들은 매우 이동 속도가 느려진다. 즉, 병목이 발생했을 경우에는 해당 지역 보행자들의 이동 속도를 조절함으로써 병목에 의한 영향을 부여하였다.

스티어링(Steering) 모드는 (Amor et al., 2006)와 (Raynolds, 1999)의 개념을 발전시켜 개발한 모델이다. 스티어링 모드는 보행자들의 움직임을 자연스럽게 표현하는 부분에 초점이 맞춰져 있다. 출구에 걸리는 보행자들의 큐(Queue)나 밀도에 의한 영향을 통해 보행자의 움직임을 모델링하는 것이 아니라, 보행자들이 자연스럽게 움직이면서 발생하는 물리적 현상들에 의해 보행 상황이 모델링된다.

두 모드 모두 내비게이션 메시(Navigation mesh)로 분할된 공간에서 각 메시(Mesh)간의 이동 경로를 계산하게 되며, 자신의 이동 경로에 많은 보행자들이 배치됨으로 인해 임계치를 넘는 부하가 발생하게 되면 이동 경로를 재계산하게 된다. 이를 통해 병목 상황이 발생하게 되면 해당 지역으로 향하려던 일부 보행자들은 우회 경로를 선택하게 된다. 이동 경로의 재계산 횟수는 파라미터로 설정가능하다. SFPE 모드는 보행자들의 이동 경로가 직선 형태로 계산되고, 스티어링 모드는 비-스플라인(B-Spline) 알고리즘을 통해 SFPE로 계산된 경로보다 부드럽고 현실적인 이동 경로를 산출한다(Fig. 2).

## 3. 개선된 Floor Field Model

본 연구에서는 FFM이 가진 한계점을 개선하고 여러 세밀한 물리적 현상들(충돌, 끼임, 회전 등)을 반영할 수 있는 CA기반 보행 모델을 제시한다. 세부적으로는 보행

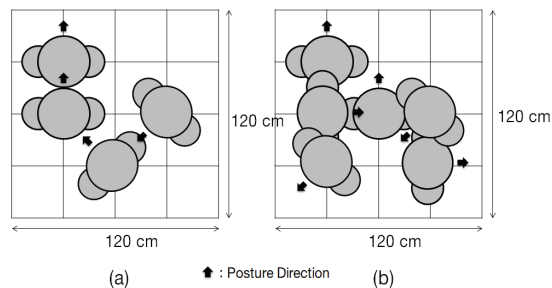


Fig. 3. An example of pedestrian placement; (a) possible situation; (b) impossible situation

자의 크기변경과 더불어 보행자의 보폭반영, 보행자의 자세 및 시야 요소 등을 모델에 추가하였다.

### 3.1 보행자의 크기 및 모양

보행자의 크기 및 모양은 (Lim et al., 2006)의 실험 결과에 따라 50cm x 30cm의 크기로 설정하였고, 정사각형이 아닌 직사각형 형태이다(Fig. 3). FFM에서는 40cm x 40cm의 셀을 이용하기 때문에 보행자도 그에 맞게 설정되었지만, 본 연구에서는 셀의 크기를 30cm x 30cm로 줄였으며, 보행자는 1개의 셀을 점유하는 것이 아니라, 4개 셀의 일부를 점유하도록 하였다. 따라서 50cm x 30cm 크기의 보행자는 4개의 셀을 하나의 개인이 모두 점유할 수도 있고 상황에 따라서는 두 명의 보행자가 하나의 셀을 공유할 수 있다. 이러한 방식은 래티스 개스 모델(Lattice gas model)의 배치 방식과 유사하다.

Fig. 3a를 보면 보행자들이 셀 간의 경계점에 배치되어 있으며, 하나의 셀은 한 명 혹은 두 명의 보행자에 의해 점유되고 있다. 다만, Fig. 3b와 같이 물리적으로 충돌이 발생하여 배치가 불가능한 상황은 허용하지 않는다. 따라서 보행자들의 영역이 겹치는 상황에 대한 제약조건을 설정하여 물리적 겹침 현상을 방지하였다.

### 3.2 보행자의 자세 및 자세 결정 확률

기존 FFM에서는 보행자의 자세 정보가 포함되어 있지 않다. 하지만 보행자의 자세는 보행자의 이동 방향, 시야, 판단 등에 영향을 주는 매우 중요한 요소이다. 따라서 개선된 모델에서는 보행자가 여러 방향의 자세를 가질 수 있게 하였다. 다만, 모든 방향으로 자세를 결정하게 되면 연산이 매우 복잡해지므로 자세의 방향은 8가지 방향으로 제한하였다.

보행자들은 주변 장애물과 보행자들의 배치 상황에 따라 회전을 자유롭게 할 수 있기도 하고, 회전이 불가능하

기도 하다. 주변에 아무런 제약이 없다면 자유롭게 자세를 변경할 수 있으며, 주변에 보행자들이 뽀뽀하게 몰려 있다면 회전이 불가능하게 된다. 즉, 보행자들 간의 자세가 서로 맞물리면서 영향을 주게 되고, 이러한 상호작용이 전체적인 보행 상황에 영향을 미치게 된다. 이는 기존 FFM에서는 나타낼 수 없던 현상이며, 이로 인해 보행자들 간의 끼임, 충돌 등의 물리적 현상이 나타나게 된다.

또한, FFM에서 이동 방향을 결정하는 확률인 이동 확률(Transition probability) 계산과 같은 방식으로 개선된 모델에서 보행자의 자세를 결정하는 확률인 자세 확률(Posture probability)을 정의하였다. 보행자는 자신이 향할 자세를 8가지 방향 중에 하나로 결정해야 한다. 일반적인 대피 상황이라면 출구 쪽으로 자세를 향하고 이동하게 되지만, 정전 등으로 인해 시야가 제한된 상황이라면 임의의 방향으로 자세를 취하게 된다. 따라서 FFM의 민감도 파라미터 조절을 통해 이와 같은 다양한 경우를 반영할 수 있도록 하였다.

전술한 사항들 외에도 보행자들의 보폭, 갱신 규칙(Update rule)의 변경 등 여러 사항들이 수정되었다(Nam et al., 2014). Fig. 4는 개선된 모델의 시뮬레이션 예시이다. 보행자들은 매 연산마다 주변 환경(보행자 점유, 장애물 등)을 고려하여 자신의 자세 및 이동 방향을 결정하게 되며, 이에 따라 결정된 출구로 이동하게 된다. FFM과 달리 보행자들이 직사각형 형태를 가지고 있으며 자신의 자세에 따라 모양이 다르게 나타남을 확인할 수 있다. Fig. 4에서는 직사각형 형태를 화살표로 표현하였고, 화살표 방향이 보행자가 취하고 있는 자세의 방향이다.

Fig. 4a는 시뮬레이션 시작 단계이다. 정사각형 형태의 방이 있고 상단에 2개의 출구가 있다. 보행자들은 임의의 위치에 배치가 되며, 자신이 취하는 자세를 화살표 방향으로 표시하고 있다. Fig. 4b는 시뮬레이션 중간 단계이다. 보행자들이 상단 출구로 이동하고 있다. Fig. 4c는 시뮬레이션 종료 후 각 셀의 점유도 나타낸다. 음영이 밝을수록 많은 보행자가 점유한 셀이며, 어두울수록 보행자의 점유가 적은 셀이다. 상단 2개의 출구 부근에 가장 많은 점유가 발생함을 확인할 가능하다.

## 4. 다른 피난 모델과의 비교 실험

본 연구에서는 개선된 보행모델을 통해 모델링된 시뮬레이션 상황 및 결과가 다른 피난 모델들과 비교하였을 때 어떤 특징을 가지는지 확인하고자 하였다. 따라서 개선된 모델, 기존 FFM, 시뮬렉스, 패스파인더(SFPE, 스트

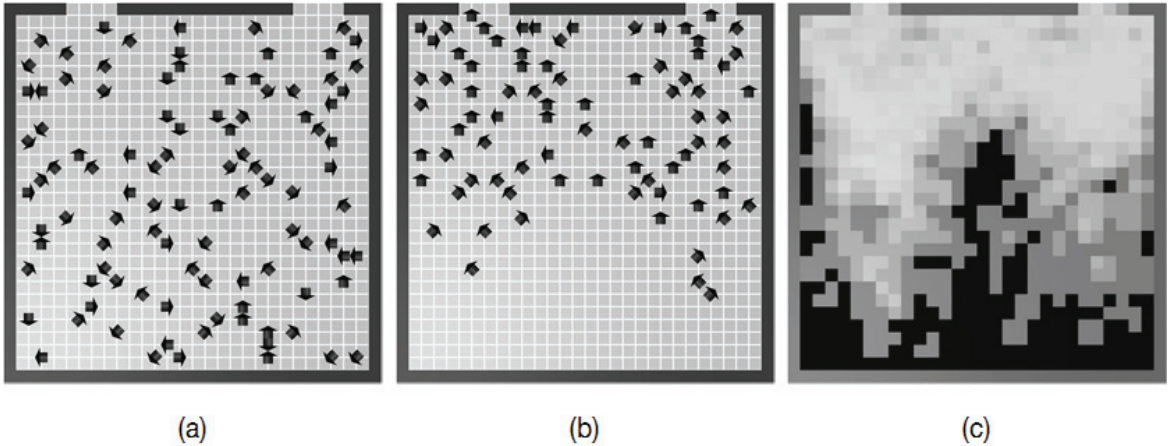


Fig. 4. A simulation example of the improved model; (a) initial stage; (b) middle stage; (c) visualization of cell occupancy degree after the simulation terminated

어링) 등 5가지 모델에 대한 비교 실험을 수행하였다. 실험 조건 및 방법과 결과는 다음과 같다.

#### 4.1 실험 조건

실험 공간은 대학 캠퍼스 건물의 1층 공간으로 설정하였다. 이 공간은 6개의 출구와 강의실, 도서관 등 다양한 크기의 공간들로 구성되어 있으므로 각기 다른 형태의 보행 상황을 관찰할 수 있다고 판단하였다(Fig. 5). 출구는 좌측 상단부터 시계방향으로 1부터 6까지 번호가 부여되었다. Fig. 5에서 출구 근처로 갈수록 바닥 음영이 어두워지며 출구에서 멀어질수록 음영이 밝아진다. 음영은 스태틱 플로어 필드(Static floor field)의 값에 따라 부여된 것이다.

실험은 두 가지로 나뉘어서 진행된다. 첫 번째는 대피

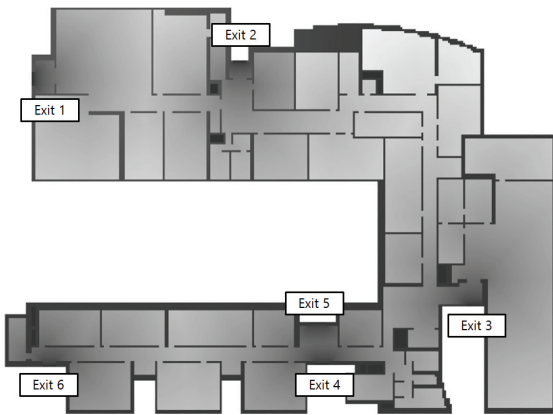


Fig. 5. Experimental space

인원을 증가시켜가며 계산되는 총 대피 시간의 추세를 비교하였다. 이는 대피 인원이 증가할수록 심화되는 병목, 충돌, 끼임 등의 현상이 각 모델에서 얼마나 영향을 미치는지 비교하기 위함이다. 두 번째는 병목이 심하게 발생할 정도의 대피 인원(1200명)을 설정하였을 때, 각 출구별 대피 인원의 비교와 시간의 경과에 따른 출구별 대피 상황을 비교하였다. 이는 동일한 인원이 대피하는 상황에서 모델별로 각 출구마다의 대피 상황을 세밀하게 비교하기 위함이다.

#### 4.2 대피 인원수에 따른 총 대피시간의 비교

Fig. 6은 대피 인원의 수를 늘려가며 5가지 모델에서 산출되는 총 대피시간의 변화를 요약한 것이다. 대피 인원의 수는 50명부터 1200명까지 증가시켰으며, 대피 인원은 각 방에 임의로 배치하였다. 시물렉스와 패스파인더의 두 모델에서 모델 파라미터는 기본 값을 이용하였고, FFM과 개선된 모델은 출구로 이동하려는 정도인  $k_s$ 는 2, 1.5 두 가지 상황으로 설정하였다.  $k_s$  이외의 파라미터들은 일반적인 대피 상황에 해당되는  $k_d = 1$ ,  $\alpha = 0.3$ ,  $\delta = 0.3$ 으로 부여하였다(Kirchner and Schadschneider, 2002).  $k_s$ 가 2인 경우가 1.5인 경우보다 보행자들이 출구로 향하려는 성향이 더 크다. 따라서  $k_s$ 가 2인 경우에서 더 짧은 대피 시간이 산출된다.

Fig. 6에서 각 모델별 결과를 자세히 분석하면 다음과 같다. FFM의 결과는 그래프의 가장 하단에 있는 2개의 굵은 점선이다. 대피 인원이 가장 적은 50명일 때는  $k_s = 2$ 인 경우에 29.4초,  $k_s = 1.5$ 인 경우에 34.1초를 산

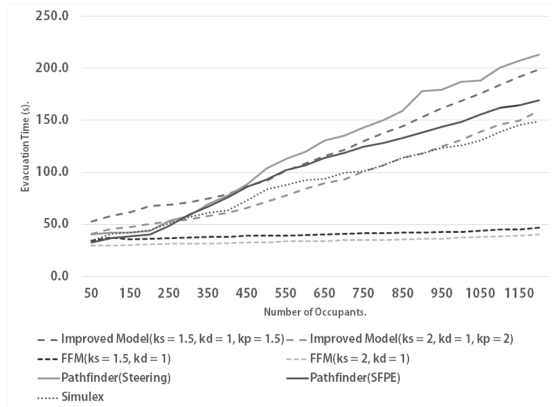


Fig. 6. Comparison of evacuation time

출하였고, 1200명일 때는  $k_s = 2$ 인 경우에 40.3초,  $k_s = 1.5$ 인 경우에 46.8초를 산출하였다. 대피 인원이 매우 많아지더라도 대피 시간의 변화폭은 미미한 수준이다. 실제 대피 상황에서는 대피 인원이 증가할수록 병목현상으로 인해 대피 시간이 급격히 늘어나게 되는데, FFM에서는 전술한바와 같이 보행자의 크기와 모양이 정사각형 형태이므로 병목 현상을 반영하기에 한계가 있음을 확인할 수 있다.

다음은 개선된 모델의 결과를 살펴보자. Fig. 6에서 2개의 파선이 개선된 모델에서 산출된 결과이다. FFM과 마찬가지로  $k_s = 2$ 인 상황이  $k_s = 1.5$ 인 상황보다 빠른 대피 시간을 산출하고 있다. 대피 인원이 50명일 때는  $k_s = 2$ 인 경우에 41.0초,  $k_s = 1.5$ 인 경우에 53.0초를 산출하였고, 1200명일 때는  $k_s = 2$ 인 경우에 159.1초,  $k_s = 1.5$ 인 경우에 199.2초를 산출하였다. FFM과 달리 대피 인원이 증가함에 따라 대피 시간이 일정한 수준으로 증가하고 있다. 이는 병목 현상에 대한 영향으로 예상할 수 있으며, FFM의 한계점을 개선한 것으로 판단된다.

시뮬렉스는 Fig. 6에서 매우 가느다란 점선으로 표현되어 있으며 개선된 모델의  $k_s = 2$ 인 상황의 결과와 매우 유사하다. 시뮬렉스는 보행자의 밀집 상황이 발생하면 서로 충돌하며 보행 시간이 지연되는 효과를 적용하고 있다. 따라서 개선된 모델도 이와 유사한 효과가 나타나고 있다고 판단할 수 있다. 패스파인더의 두 모델은 Fig. 6에서 실선으로 표현되어 있으며 개선된 모델 및 시뮬렉스와 같이 대피 인원이 증가함에 따라 대피 시간이 지속적으로 증가하고 있다. 450명 정도까지는 SFPE 모델과 스티어링 모델이 거의 유사한 결과를 산출하였고, 그 이후부터는 SFPE 모델이 스티어링 모델보다 좀 더 빠른 대피

시간을 산출하였다. 450~650명 구간에서는 SFPE 모델과  $k_s = 1.5$ 인 개선된 모델의 결과가 거의 동일하게 산출되었다.

실험을 통해 확인할 수 있었던 점은 FFM은 대피 인원이 소수인 경우에는 다른 모델들과 큰 차이를 보이지 않았으나, 대피 인원이 증가할수록 결과의 차이가 매우 커짐을 보였다. 이는 병목 현상 반영에 한계가 있다는 의미이며, 개선된 모델은 이러한 부분에서 확실한 개선점을 보이고 있다.

#### 4.3 출구별 대피 인원의 비교

실험 건물에는 6개의 출구가 있으며 출구의 너비는 2.1~2.7m 정도이다. 본 실험에서는 병목이 많이 유발될 수 있을 정도의 많은 대피 인원인 1200명을 설정하였을 때, 5가지 모델에서 각 출구별 대피 인원수에 대한 비교를 진행하였다. 개선된 모델과 FFM은 모두  $k_s = 2$ 인 경우로 설정하였다. Fig. 7은 출구별 누적 대피 인원의 수를 나타낸다. 모든 모델에서 출구3은 가장 많은 인원이 대피하였고, 출구5는 가장 적은 인원이 대피하였다. 출구1은 패스파인더의 두 모델과 나머지 세 모델의 차이가 확연히 나타난다. 패스파인더의 두 모델에서 보행자들은 자신의 이동 경로에 많은 병목이 발생할 것으로 계산되면 우회 경로를 택하게 된다. 하지만 나머지 세 모델은 스테틱 플로우 필드와 디스턴스 맵에 의해 경로를 계산하므로 우회 경로를 따로 계산하지 않는다. 따라서 패스파인더의 경우 다른 출구로 향해야 할 대피 인원이 출구1로 우회하여 이동하는 결과가 계산되었고, 다른 모델들보다 약 90명 정도 많은 인원이 출구1로 대피하게 되었다.

출구2는 출구1의 결과와 반대의 상황이다. 출구2에서 병목이 발생하는 바람에 패스파인더의 모델들은 출구1로 보행자들을 우회시켰다. 따라서 출구2로 향하는 보행자의 수가 다른 세 모델보다 적게 계산되었다. 다른 모델에 비해 약 140명 정도의 인원이 적으며 출구1로 90명, 출구3이나 출구4로 50명 정도의 인원이 우회한 것으로 판단된다.

출구3과 출구4에서는 패스파인더의 모델끼리도 서로 다른 대피 인원을 보였다. 우회 연산을 적용하는 식이 약간 다르기 때문에 두 모델에서도 차이가 발생한 것을 볼 수 있다. 스티어링 모델에서 가장 많은 인원인 469명이 출구3으로 대피하였다.

출구5에서는 패스파인더의 두 모델을 제외한 나머지 모델에서는 거의 대피 인원이 없었다. 이는 출구4와 출구5는 복도를 사이에 두고 인접한 출구인데, 복도와 출구4

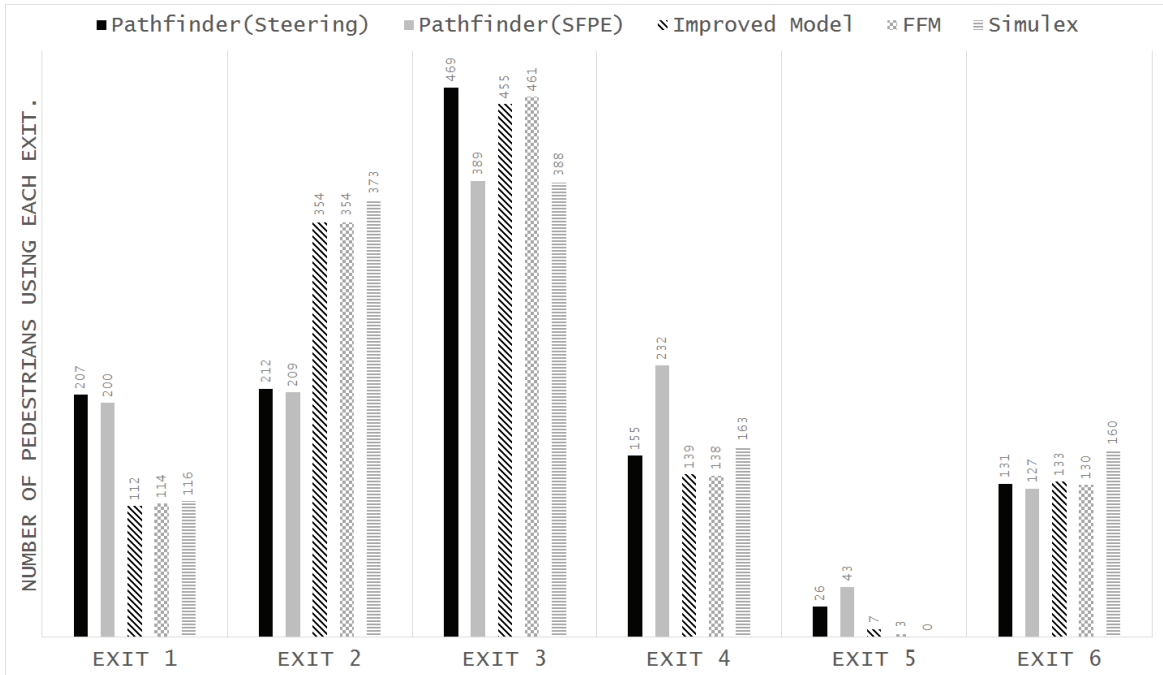


Fig. 7. Number of evacuating pedestrians by exit

가 더 가까워서 스택틱 플로어 필드와 디스턴스 맵 상에서는 복도에서 가까운 출구인 출구4로 보행자들을 안내하였기 때문이다(Fig. 5). 패스파인더의 두 모델은 우회 계산을 하므로 30명 정도의 보행자가 출구5로 대피한 것을 볼 수 있다.

마지막으로 출구6에서는 5가지 모델 모두 비슷한 수의 보행자들이 대피하였으며, 출구6은 구조상으로 동떨어진 출구이기 때문에 우회연산에도 큰 영향을 받지 않았다고 판단할 수 있다.

#### 4.4 출구별 대피 상황의 비교

4.3절에서 진행한 실험과 같은 상황에서 각 출구별 시간의 흐름에 따른 누적 대피 인원의 변화를 분석하였다. Fig. 8은 6개의 출구에서의 대피 양상을 나타내며, 각 그래프에 출구 번호가 기입되어 있다.

그래프의 가로축은 소요 시간이다. 가장 긴 대피 시간을 산출한 패스파인더의 스티어링 모델을 기준으로 설정하였다. 따라서 각 모델마다 그래프의 종료 시점이 다르다. 예를 들면 FFM은 40.3초에 대피가 종료되었으므로 Fig. 8의 출구1에서 40.3초에 그래프가 단절되어 있는 것을 볼 수 있다. 그래프의 세로축은 누적 대피 인원이다. 이 그래프를 통해 각 출구별 대피 속도를 비교할 수 있다. 모델별 대피 속도는 각 그래프의 기울기에 해당된다.

출구1에서 패스파인더의 두 모델은 그래프의 기울기가 거의 동일하며, 시물렉스는 가장 작은 기울기를 보이고, FFM은 가장 큰 기울기를 보인다. 이는 출구1에서 FFM은 가장 빠른 속도로 보행자들을 탈출시켰고, 시물렉스는 가장 느린 속도로 보행자들을 탈출시켰다는 의미이다. 시물렉스는 병목 현상의 반영이 가장 컸다는 의미로 해석할 수 있다. FFM은 출구1뿐만 아니라 모든 출구에서 가장 큰 기울기를 보이고 있다.

출구2에서 개선된 모델과 시물렉스는 거의 동일한 대피 양상을 보인다. 두 모델은 출구2에서 매우 유사한 정도의 병목 효과가 나타난다고 볼 수 있다. 출구1과 비교하였을 때, 출구1에서는 패스파인더의 두 모델이 시물렉스, 개선된 모델보다 더 빠른 대피 속도를 산출하였으나 출구2에서는 시물렉스, 개선된 모델이 더 빠른 대피 속도를 보인다. 이는 출구에서의 대피 속도에 영향을 주는 요소가 보행자의 밀도뿐만 아니라 출구 근처의 공간 구조와도 연관이 있기 때문으로 판단된다.

출구3은 개선된 모델이 시물렉스보다 약간 빠른 대피 속도를 산출한 점을 제외하면 대부분 출구2와 유사한 양상을 보인다. 출구4는 FFM을 제외한 4개의 모델의 대피 속도가 비슷한 수준이며, 대피 인원의 수에 따라 종료 시점 및 누적 대피 인원에만 차이가 있음을 볼 수 있다. 출구5는 대피 인원이 매우 적어 모델별 특징을 비교하기에

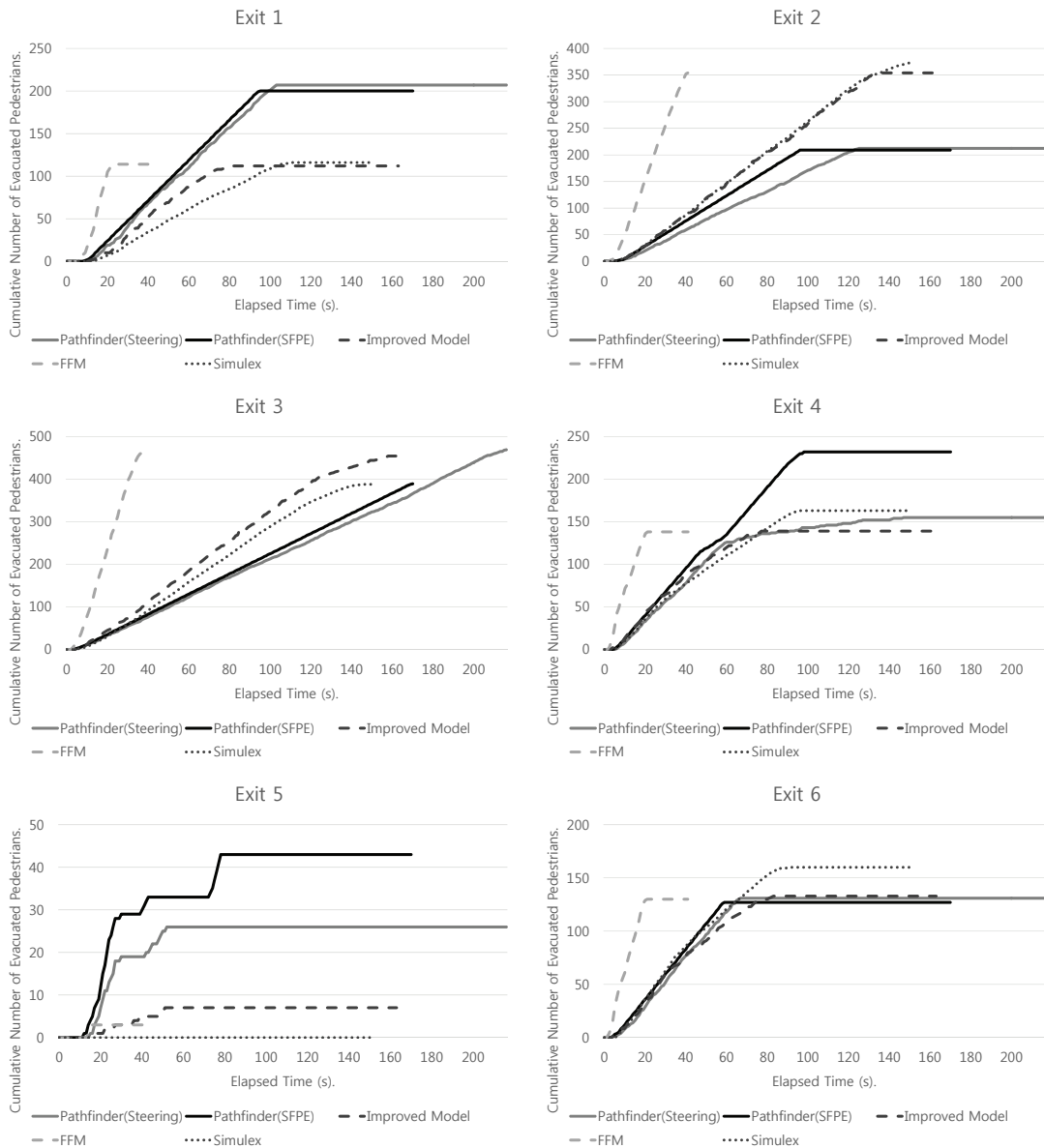


Fig. 8. Comparison of evacuation situations by each exit in the five models

는 데이터가 부족한 상황이다. 출구6은 4개의 모델이 매우 유사한 대피 양상을 보이며 FFM만 매우 빠른 대피 속도를 산출하였다.

종합하여 보면, FFM을 제외한 4개의 모델은 병목에 의한 영향이 유사한 수준으로 보인다. 출구의 구조에 따라 일부 출구에서는 대피 속도의 변화가 있긴 하나, 전체적으로는 비슷한 패턴을 산출하였다. 4개의 모델 모두 많은 보행자가 몰리고 있는 상황에서는 일정한 기울기(대

피 속도)를 유지하고 있다. 반면, FFM은 모든 상황에서 매우 빠른 대피 시간을 산출하고 있고, 이는 FFM의 한계점이 나타난 것으로 보인다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 FFM의 한계점을 개선하기 위해 개선된 모델을 제시하였고, 개선된 모델의 특징을 다른 모델들과

의 비교를 통해 파악하였다. FFM은 실제 보행자와 다른 크기 및 모양의 보행자를 이용하고 있으므로 보행자들 간의 충돌, 끼임 등의 현상을 반영할 수 없다. 따라서 이를 개선하기 위해 정사각형이 아닌 직사각형 형태의 보행자 설정, 보행자 배치 규칙 정의, 자세 적용 등의 여러 요소들을 추가하여 개선된 모델을 개발하였다. 이를 FFM과 시물렉스, 패스파인더 등의 다른 상용 모델들과 비교하여 개선된 효과가 적용되고 있는지 확인해보았다.

비교 실험은 캠퍼스 건물의 일부 공간을 대상으로 진행되었다. 대피 인원의 증가에 따른 총 대피 시간의 변화 비교 실험에서, FFM은 대피 인원이 매우 많음에도 불구하고 너무 짧은 대피 시간을 산출하였다. 반면, 개선된 모델에서는 시물렉스와 거의 동일한 결과를 산출하였다. 이는 FFM에서 보여주는 한계점을 개선한 것이라고 판단된다. 또한, 출구별 대피 인원 및 상황 비교 실험에서는 출구별 공간 구조, 인원 배치 상황에 따라 각 모델의 대피 인원 차이가 있음을 볼 수 있었다. 패스파인더의 경우는 다른 모델들과 달리 우회 경로를 산출하는 모습을 보였다. 또한, FFM을 제외한 4개의 모델은 유사한 수준으로 병목 현상을 고려하고 있었으며, 출구의 공간 구조에 따른 약간의 차이점을 보였다. 반면, FFM은 출구의 구조에 관계없이 매우 짧은 대피 시간을 산출하였다.

실험 결과를 종합해보면, 본 연구에서 제시하는 개선된 모델은 FFM의 한계점을 개선하였다고 판단된다. 특히, 시물렉스와 매우 유사한 결과를 산출하고 있음을 볼 수 있었다. 추후에는 관성, 보속 등의 추가적인 물리적 요소를 적용하는 방안과 대피 상황에서 나타나는 심리적 요소를 모델에 적용하기 위한 연구를 진행할 계획이다.

## References

- Amor, H. B., Murray, J. and Obst, O., Fast, Neat, and Under Control: Arbitrating Between Steering Behaviors, S. Rabin(Ed.), AI Game Programming Wisdom 3, 2006.
- 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, 2001, 507-525.
- Choi, J., Lee, S. and Hong, W., "A Study on Reliability Assessment of Evacuation Simulation Models with respect to Full-scale Experiment vs. Egress Simulation Results from the High-rise Building Data-set", Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design, Vol.31, No.2, 2015, 269-276.
- (최준호, 이수호, 홍원화, "초고층 건축물에 대한 피난 시물레이션 모델의 신뢰성 평가에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 - 계획계, 제31권, 제2호, 2015, 269-276).
- Fu, L., Song, W., Lv, W., Liu, X., and Lo, S., "Multi-grid simulation of counter flow pedestrian dynamics with emotion propagation". Simulation Modelling Practice and Theory, Vol.60, 2016, 1-14.
- Kim, J., Joo, S. and Lee, J. "An Evaluation on Evacuation Safety in Multiplex Cinema based on Fire & Evacuation Simulation", Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol.1, No.1, 2007, 7-13.
- (김종훈, 주성용, 이정재, "화재 · 피난 시물레이션을 통한 복합영화관에서의 피난 안정성 검토", 한국건축친환경설비학회 논문집, 제1권, 제1호, 2007, 7-13).
- 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", J Stat Mech, Vol.10, 2004, P10011.
- Kirchner, A., Nishinari, K. and Schadschneider, A., "Friction effects and clogging in a cellular automaton model for pedestrian dynamics", Physical Review E, Vol.67, No.5, 2003.
- 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, 2002, 260-276.
- Lim, W., Ryu T., Choi, H., Choi, H. and Chung, M., "A Comparison of Gait Characteristics between Korean and Western Young People", Journal of the Ergonomics Society of Korea, Vol.25, No.2, 2006, 33-41.
- (임완수, 류태범, 최훈우, 최화순, 정민근, "한국인과 서구인 청년층의 보행특성 비교", 대한인간공학회지, 제25권, 제2호, 2006, 33-41).
- Nam, H., Kwak, S. and Jun, C., "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 보행모델”, 한국공간정보학회지, 제 22권, 제2호, 2014, 53-62).
- Nelson, H. E. and MacLennan. H. A. Emergency movement, P. DiNenno(Ed.), The SFPE Handbook of fire Protection Engineering, 3rd Edition, National Fire Protection Association, Quincy, 2002.
- Nishinari, K., Kirchner, A., Namazi, A. and Schadschneider, A., “Extended Floor Field CA Model for Evacuation Dynamics”, IEICETrans. Inf. Syst, Vol.E87-D, No.3, 2004, 726-732.
- Raynolds, C. W. “Steering Behaviors For Autonomous Characters”, Proceedings of the Game Developers Conference 1999, San Jose, California, 1999, 763-782.
- Thompson, P., Wu, J. and Marchant, E., “Simulex 3.0: Modelling Evacuation in Multi-Storey Buildings”, Fire Safety Science, Vol.5, No.185, 1997, 725-736.
- Thunderhead Engineering., “Pathfinder Technical Reference”, 2009, Available at [http://thunderheadeng.net/download/pathfinder-2013-docs/tech\\_ref.pdf](http://thunderheadeng.net/download/pathfinder-2013-docs/tech_ref.pdf) (Accessed May 27. 2016).
- Thunderhead Engineering., “Verification and Validation”, 2015, Available at [http://www.thunderheadeng.com/downloads/pathfinder/verification\\_validation\\_2015\\_1.pdf](http://www.thunderheadeng.com/downloads/pathfinder/verification_validation_2015_1.pdf) (Accessed May 27. 2016).
- Yanagisawa, D., Kimura, A., Tomoeda, A., Ryosuke, N., Suma, Y., Ohtsuka, K. and Nishinari, K., “Introduction of frictional and turning function for pedestrian outflow with an obstacle” Physical Review E, Vol.80, No.3, 2009.



**남 현 우** (hwnam@uos.ac.kr)

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

관심분야 : 대피시뮬레이션, 보행모델, 공간데이터모델



**박 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