Journal of Korea Spatial Information Society Vol.22, No.2 : 53-62, April 2014
http://dx.doi.org/10.12672/ksis.2014.22.2.053
ISSN 2287-9242(Print)
ISSN 2287-9250(Online)

보행자의 물리적 특성을 반영한 CA기반 보행모델

Developing a Cellular Automata-based Pedestrian Model Incorporating Physical Characteristics of Pedestrians

남현우* · 곽수영** · 전철민***

Hyunwoo Nam · Suyeong Kwak · Chulmin Jun

요 약 Floor Field Model(FFM)은 실내에서 보행자의 움직임을 모델링하기 위한 CA기반 미시적 보행모델이며, static과 dynamic floor field를 이용하여 보행자의 움직임을 표현해낸다. 다만, 실제 보행자의 크기와 모양은 타원체나 직사각형과 유사한데, FFM에서는 정사각형 형태의 보행자를 설정하고 있다. 이로 인해 보행자들의 회전효과 부여에 어려움이 있으며, 보행자들끼리 발생하는 충돌, 끼임 등의 영향을 반영하기에 한계가 있다. 또한, 보행자의 자세 · 시야의 변경에 따른 영향들도 효과적으로 반영되고 있지 않다. 본 연구에서는 FFM이 가진 한계점을 개선하기 위해 보행자의 크기, 모양 등의 물리적 특성을 반영한 보행모델을 제시한다. 본 모델에서는 정사각형이 아닌 직사각형 형태로 보행자를 정의하며, 한국인의 실제 신체크기에 가깝도록 하였다. 또한, 보행자의 자세정보를 추가하였으며, 보행자들 간에 발생하는 충돌, 끼임 등의 영향을 반영할 수 있도록 정의하였다. 제안된 모델을 이용한 시뮬레이터를 개발하였으며, 개선된 모델과 기존 모델간의 비교 · 분석을 통해 차이점을 분석하였다. 이를 통해 기존 모델에서 발생하던 dynamic value 적용문제의 해결과 대피상황에서 발생하는 패닉현상의 반영을 확인할 수 있었다.

키워드 : 미시적 보행모델, Floor Field Model, Cellular Automata

Abstract The floor field model is the micro pedestrian model based on a cellular automata for modeling pedestrian movement in the interior space using the static and dynamic floor field. It regards a form of pedestrian as square but the actual pedestrian's shape and size are similar to ellipsoid or rectangle. Because of this, we are difficult to give a rotation effect to pedestrians and there is a limit to reflect an impact of clogging and jamming. Also, this model is not able to reflect an impact of a posture and visibility effectively in the pedestrian movement. In this study, we suggest the improved pedestrian model incorporating the actual shape and size of pedestrian. The pedestrian's shape is defined not square but rectangle which is close to the actual body size of Korean. Also, we define the model which is able to represent the impact of clogging and jamming between pedestrians by adding the pedestrian's posture. We develop the simulator for testing the suggested model and study the difference between two models by comparing a number of effects. As a result, we could confirm solving the problem with dynamic value in the existed model and reflecting the panic effect in evacuation situation.

Keywords : Microscopic Pedestrian Model, Floor Field Model, Cellular Automata

1. 서 론

보행자의 움직임을 모델링하기 위한 여러 기법들이 수십 년에 걸쳐 연구되고 있다[1]. 보행자의 움직임을 바라보는 관점에 따라 거시적 · 미시적 보행모델로 나뉘어서 연구되는데, 유사한 성질을 가진 보행자들을 군집으로 간주하고 군집들 간의 관계를 통해 보행자의 움직임을 나타내는 거시적 보행모델과 보행자 개개인의 움직임을 계산하고 그에 따른 전체적인 보행양상을 파악하는 미시적 보행모델이 있다[5].

실내에서 보행자의 움직임을 모델링하는 경우에는 주로 미시적 보행모델을 이용한다. 미시적 보행모델 중에서 Social Force Model(이하 SFM)과 Floor Field Model(이하 FFM)이 최근에 주목받고 있다. SFM은 보행자의 이동에 영향을 미치는 요인들을 힘으로 나타내며, 이는 사회적, 정신적, 물리적 영향을 계산하여

† This work was supported by the National Research Foundation of Korea Grant funded by the Korean Government (NRF-2012S1A5B8A03045234)

* Hyunwoo Nam, Ph.d. Candidate, Detp. of Geoinformatics, University of Seoul. hwnam@uos.ac.kr
** Suyeong Kwak, Ph.d. Candidate, Detp. of Geoinformatics, University of Seoul. sykwak@uos.ac.kr
*** Chulmin Jun, Professor, Dept. of Geoinformatics, University of Seoul. cmjun@uos.ac.kr (Corresponding author)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

산출한 것이다[4]. 계산된 여러 가지 힘들을 종합하여 보행자의 움직임을 나타낸다. FFM은 Cellular Automata (이하 CA)를 보행모델에 적용한 것으로, 보행자의 움직임에 영향을 미치는 요소로 출구와의 거리(static floor field, 이하 SFF), 주변 보행자들 간의 상호작용(dynamic floor field, 이하 DFF)을 고려하고 있다[9]. 두 가지의 필드를 이용하여 CA의 update rule에 따라 보행자의 움직임을 모델링한다.

FFM과 SFM 모두 보행자의 움직임을 유사하게 표현해주고 있다. SFM은 FFM보다 정교한 장점이 있지만 상대적으로 연산속도가 느린 단점이 있다[2]. 다만, FFM은 보행자의 움직임을 세밀하게 표현하기 어려운 한계점이 있는데, 보행자의 크기 및 모양이 실제 보행자의 물리적 특성과 차이가 있는 점에 영향을 받는다. 실제 보행자는 타원체나 직사각형 형태인 반면에 FFM에서는 정사각형 모양의 보행자를 설정하기 때문이다. 따라서 보행자가 회전하며 발생하는 주변 보행자들과의 충돌, 끼임 등의 현상을 반영하기에 한계가 있다.

본 연구에서는 FFM이 가지는 한계점을 개선하고 보행자의 물리적 특성을 반영할 수 있는 CA기반 보행모델을 제시하고자 한다. FFM이 가지는 장점을 유지하며, 보행자의 크기 및 모양, 자세 등의 물리적 특성을 추가적으로 부여하여 기존 모델의 한계점을 개선하고자 한다. 이를 통해 기존 FFM에서는 반영하기 어려웠던 여러 보행특성(보폭, 회전, 끼임 등)들을 반영할 수 있도록 한다.

기존 FFM에서 설정한 보행자 크기인 40cm × 40cm를 50cm × 30cm로 변경하고, 이를 효율적으로 배치하기 위한 격자공간과 이웃을 정의하였다. 또한 보행자가 보폭을 조절할 수 있도록 하는 반복이동요소를 추가하였으며, 보행자는 이동하며 자신의 자세를 8가지 방향 중, 한 가지 방향을 선택하여 취할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 정의한 보행모델의 시험을 위해 시뮬레이터를 개발하였으며, 기존 FFM에서 나타나는 보행양상과 본 모델에서 나타나는 결과를 비교·분석하여 여러 한계점들이 해결되었는지 파악해보고자 한다.

2. 관련연구

2.1 Floor Field Model

Burstedde[2]는 2001년에 FFM을 소개했다. 이 모델은 CA를 보행에 적용한 것이며, 2차원의 CA 모델을 설계하였고, 보행자의 움직임에 영향을 미치는 요인을 floor field라 불리는 필드를 이용하여 나타내었다.

FFM은 격자로 구성된 셀 공간를 이용하고 있으며, 격자의 크기는 보통 40cm × 40cm의 정사각형을 이용한다. 각각의 셀들은 값이 할당되어야 하는데, FFM에서는 건물의 구조물에 의해 결정되는 값과 출구와 현재 셀 간의 거리에 의해 결정되는 값인 SFF, 보행자들이 이동하면서 생기는 가상의 경로에 대한 값인 DFF, 보행자의 위치에 대한 값 등 하나의 셀에 여러 개의 값을 다중 레이어 형태로 부여하고 있다. 또한 현재 셀을 기준으로 인접한 셀을 정의해야 한다. FFM에서는 일반적으로 r = 1인 von Neumann과 Moore neighborhood를 이용한다[15]. r = 1인 경우를 이용하는 이유는 연산이 복잡해지는 점과 보행자의 이동속도를 고려한 점 두 가지의 이유가 있다. Figure 1에는 Moore neighborhood를 적용한 예시가 나타나 있으며, FFM에서는 이를 matrix of preference라고 부른다.

셀의 값과 이웃을 모두 정의한 후에 진화규칙을 정의해야 한다. FFM에서는 주변 셀 값들에 의해 어느 방향으로 이동할지를 결정하는 확률 값인 transition probability에 의해 진화규칙을 정의한다. 이 규칙에 따라 보행자들은 이동하게 되며, sensitive parameter에 이동 방향 및 행태가 영향을 받게 된다. Sensitive parameter의 조절을 통해 일반적인 상황에서 부터 대피하는 상황까지 여러 상황에서의 보행자 움직임을 나타낼 수 있다.

하지만 FFM은 보행자의 움직임을 간단한 연산을 통해서도 효과적으로 나타내주는 장점을 가지고 있음에도 불구하고, 세밀한 보행자의 움직임을 나타내기에는 한계점이 있다. 보행자들은 연령, 성별 등의 각각 개별적인 특성을 가지고 있다[9]. 하지만 FFM에서 보행자들은 한 가지 종류의 보행자로 설정되기 때문에 이와 같은 특성들을 반영하기 어렵다. 또한, 보행자의 크기도 실제 사람의 크기와 차이가 있기 때문에 대피상황 시 나타나는 보행양상도 차이가 나게 된다. 또한 보행자의 움직임에 영향을 주는 요소를 static과 dynamic 두 가지의 필드로 정의하였는데, 실제 보행자의 움직임에 영향을 주는 요소들은 물리적·심리적

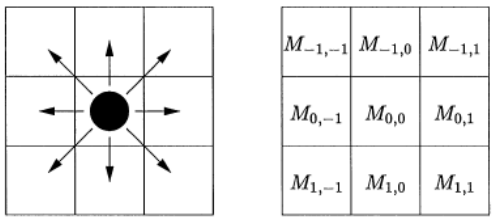

Figure 1. Matrix of preference (Burstedde [2])

으로 다양한 요인들이 존재한다. 따라서 추가 요인들을 반영해야 더 정교하게 보행자의 움직임을 표현할 수 있게 된다.

이러한 FFM의 한계점들을 극복하기 위해 많은 연구자들이 FFM에 새로운 보행 특성을 추가·보완한 개선된 FFM을 연구하였다. Kirik[10]은 FFM을 일반적인 상황에서 공황상황까지 적용하기 위해 transition probability를 수정하였다. 또한, 환경적인 요소들을 반영하기 위해 potential floor field를 추가하여 이를 반영한 연구를 진행하였다. Kirchner[7]는 FFM에서 적용한 셀의 크기를 더 세밀하게 변경한 연구를 진행하였다. 셀의 크기를 20cm × 20cm로 줄여 FFM에 적용하였으며, 보행속도도 기존에는 1칸을 움직이게 했다면, 이를 증가시켜 최대 4칸까지 이동할 경우에 나타나는 보행행태에 대한 분석을 수행하였다. 또 다른 연구에서는 보행자들이 하나의 셀을 동시에 점유하려고 할 때 발생하는 마찰을 고려한 friction parameter를 적용한 연구를 수행하였다[8]. Nishinari[14]는 보행자의 움직임에 벽과 관성이 주는 영향을 반영한 연구를 수행하였다. Kwak[11]은 출구와의 가시성이 보행에 주는 영향을 반영한 모델을 제안하였다. 또한, FFM을 기반으로 하는 보행자 대피모형에 대한 연구도 수행하였다[12].

위와 같이 많은 연구자들이 FFM에서 반영하지 못했던 다양한 요소들을 추가하는 연구를 진행하였다. 대부분의 연구들은 FFM에서 정의한 공간구조, 보행자크기, 이동방식 등을 이용하고 있다. 본 연구에서는 보행자의 크기, 자세, 시야 등을 적용한 새로운 보행모델을 제시하고자 한다. 보행상황에서 다양한 보행요소들을 반영하기 위해서는 보행자의 기본적인 특성이 제대로 반영된 모델이 필요하다는 관점에서 착안하여, 보행자의 크기, 자세, 시야 등은 보행상황을 결정하는 중요한 요소로 간주하고, 이를 반영한 CA기반 보행모델을 제시하고자 한다. 이를 통해 기본 FFM에서 다루지 못했던 보행자의 특성들을 보완하여 개선된 보행모델을 개발하고자 한다.

3. 모델의 원리

본 연구에서는 FFM이 가지는 장점을 유지하며, 보행자의 크기에 따른 한계점을 개선하기 위하여 실제 보행자의 크기와 유사한 직사각형 형태의 보행자를 설정한 CA기반 보행모델을 제시하고자 한다. 보행자의 크기변경과 더불어 보행자의 보폭반영, 보행자의 자세 및 시야 요소 등도 모델에 추가함으로써 기존 FFM에서 반영하기 어려웠던 여러 요소들을 모델에서 고려할 수 있도록 한다.

이를 위해서는 모델의 여러 원리들을 정의해야 하며, 본 모델에서 정의한 원리들은 다음과 같다. 3장에서 정의된 원리에 의해 모델이 구현되며 이를 통해 보행자들의 움직임을 나타낼 수 있게 된다. 모델의 정의를 위해 우선적으로 보행자들의 보행특성을 파악하였으며 기본적인 보행특성 및 대피상황에서 나타나는 특성들을 정리하였다.

3.1 보행행태의 특성

보행모델에서 보행자의 움직임을 반영하기 위해서는 우선 개별보행자들의 기본적인 보행행태의 특성을 파악해야 한다. 보행특성은 신체 크기, 성별, 나이, 인종 등에 영향을 받게 되고, 이러한 분류에 따른 보행특성을 측정해야 한다. 보행특성을 분석하기 위해서는 카메라와 3차원 보행측정 시스템 등의 특수 장비를 이용해야 한다.

Lim[13]은 한국인의 보행특성을 측정하기 위한 연구를 진행하였다. 연구에는 한국 20대 성인 남성 20명과 여성 12명이 참여하였으며, 보행에 불편이 없는 정상인으로 구성되었다. 측정 결과는 Table 1에 요약되어 있다. 보폭은 60cm ~ 65cm, 보속은 1 ~ 1.18m/s의 수치로 측정되는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 실제 보행특성을 반영하기 위해 보행모델에서 보폭과 보속을 이와 같이 설정하도록 하였다.

일반적인 보행특성뿐만 아니라 대피상황에서만 발생하는 특수한 현상들도 존재한다. Kirchner[9]는 대피상황에서 발생하는 여러 현상들에 대한 정리를 하였고, 각각의 현상들은 다음과 같다.

Table 1. Time-distance Variable Data of the Korean (Lim [13])

Variable	Men		Women	
	Mean	SD	Mead	SD
Stride width(m)	0.190	0.042	0.136	0.038
Walking speed(m/s)	1.175	0.108	1.084	0.139
Stride length(m/step)	1.320	0.078	1.192	0.094
Step length(m)	0.659	0.041	0.606	0.043
Cadence(steps/min)	107.2	7.8	109.3	10.7
Stance time(% of cycle)	59.6	1.3	60.5	1.5
Swing time(% of cycle)	40.5	1.3	39.5	1.5

- Jamming: 보행자들이 한 곳으로 몰리면서 밀도가 높아지게 될 때 발생한다. 예를 들어 많은 사람들이 출구로 동시에 몰리게 되면 발생하는 현상이다. 이 현상에서 사람들은 끼이게 되며(clogging), 병목현상(bottleneck)을 유발하게 된다. 끼인 사람들은 몸을 회전할 수 없게 되며, 현재 상황을 빠져나갈 수도 없고, 전체적인 사람들의 흐름에 맞춰 움직이게 된다. 또한, 보행자들이 서로 마주보고 오는 상황에서 대치하는 경우에도 jamming이 발생하게 된다. 이러한 경우에는 돌아가거나, 뒷걸음질을 치는 등으로 jamming을 해소한다.
- Lane formation: 서로 보행자들이 마주보고 오는 경우에, 충돌을 최소화하기 위해 각각 한쪽 방향으로 이동하는 현상을 말한다. 예를 들어 양쪽 보행자들이 서로 우측통행을 하는 경우에는 충돌이 최소화된다.
- Oscillations: 병목현상 등에서 보행자들은 동요하여 이동방향을 바꾸게 된다. 병목이 걸린 지점이 아닌, 반대 방향으로 이동하는 결정을 내리기도 한다.
- Trail formation: 보행자들이 이동한 경로가 다른 사람의 경로선택에 영향을 주게 된다. 즉, 보행자들이 다른 보행자들의 이동경로로 따라가려는 움직임을 보이는 것을 말한다.
- Panics: 공황 상황에서는 많은 반직관적인(counter-intuitive) 현상들이 나타나게 된다. 예를 들어 faster-is-slower, freezing-by-heating 등 일반적인 상황과는 다른 움직임이 나타나게 된다.

본 연구는 FFM에서 정교하게 반영되지 못했던 jamming, lane formation, panic 등의 특수한 보행 현상들을 반영할 수 있도록 모델을 정의하고자 한다.

3.2 물리적 요소 정의

본 모델에서 정의해야 할 물리적 요소들은 격자 공간, 이웃, 보행자, 자세가 있다. 첫째로 격자공간을 정의해야 하는데, 기존 FFM에서는 일반적으로 40cm × 40cm 크기의 셀을 이용하였다. 본 연구에서는 이를 축소하여 30cm × 30cm 크기의 셀을 이용하였다. 셀 크기를 줄임으로써 보행자 및 건물정보의 세밀한 표현이 가능해진다. 30cm × 30cm로 설정한 또 다른 이유는 보행자의 모양이 직사각형 형태인데 이에 적합한 셀 크기이기 때문이다.

둘째는 CA의 규칙에 따라 이웃을 정의해야 한다. FFM에서는 보통 von Neumann과 Moore방식을 이용

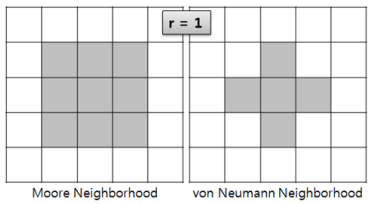

Figure 2. Comparison of Two Kinds of Neighborhood Method

하고 있으며, Figure 2에 나타나있다. 본 연구에서는 두 가지 방식의 장점을 혼합한 변형 Moore neighborhood를 연구하였다. 기본적으로 Moore와 같이 8방향으로 이동가능하며, 진행방향에 장애물-벽, 다른 보행자 등-이 없을 경우에는 1칸 더 이동할 수 있도록 한다.

이 방법을 이용하면 실제 보행자의 보폭을 반영할 수 있게 된다. 2.2절에서 살펴본 보폭정보에 따라 60cm ~ 65cm의 보폭은 30cm 길이의 셀 두 칸에 해당된다. 따라서 보행자는 일반적인 경우에 한 번에 2칸씩 이동할 수 있도록 해야 하며, 출구근처와 같이 보행자가 몰리는 지역에서는 보폭을 좁혀 1칸만 이동할 수 있도록 해야 한다.

셋째는 보행자의 크기 및 모양을 정의하는 것이다. 사이즈코리아에서 제공하는 한국인의 신체 크기 조사자료에 의하면, 가로크기 45cm, 세로크기 20cm정도임을 확인할 수 있다[6]. 실제로는 옷이나 장신구 등에 의해 크기가 약간 증가하게 되므로 약 가로 50cm, 세로 30cm 정도로 예상할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 보행자의 신체크기를 50cm × 30cm의 직사각형 형태로 정의하였다.

또한, 기존 FFM에서는 보행자를 셀 내부에 배치하는 방식을 이용하였다. 이는 정사각형 형태의 보행자를 이용할 때는 효율적인 방식이나, 직사각형 형태의 보행자를 설정하기에는 비효율적이다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 셀의 경계점에 보행자를 배치하는 방식을 제안한다. Figure 3에는 경계점에 보행자를

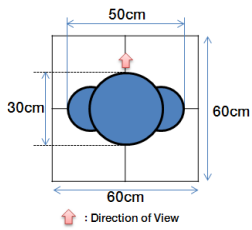

Figure 3. Illustration of the Pedestrian Placement on the Boundary Point between Cells

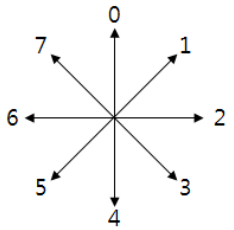

Figure 4. Position and Movement Direction of Pedestrians

배치한 형태가 나타나 있다.

마지막으로 보행자의 자세정보를 정의하였다. 기존 FFM은 보행자의 자세에 대한 정보를 다루고 있지 않다. 보행자의 자세는 보행자의 시야 및 회전에 영향을 미치게 되며, 이는 보행상황을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 보행자가 자세를 취할 수 있게 하며, 여러 방향으로 자세를 변경할 수도 있도록 한다. 모든 방향으로 자세를 취하면 연산이 매우 복잡해지기 때문에 Figure 4와 같이 8가지 방향으로만 자세를 취하도록 하였다.

3.3 Static & Dynamic Floor Field의 적용

기존 FFM에서 보행자의 움직임을 결정하는 두 필드인 static과 dynamic을 본 모델에서도 이용하도록 한다. 두 필드를 통해 보행자들은 출구로 이동하거나 다른 보행자들을 따라갈 수 있게 된다. 다만, 보행자를 셀 내부가 아닌 셀의 꼭짓점에 배치하기 때문에 기존 FFM에서 static과 dynamic을 적용하던 방법과 차이가 발생하게 된다.

기존에는 셀의 static과 dynamic 값을 이용하였지만, 본 연구에서는 꼭짓점을 기준으로 인접한 4개의 셀의 static과 dynamic 값의 산술평균값을 꼭짓점의 static과 dynamic 값으로 정의하여 보행자가 이용하도록 하였다.

3.4 확률 요소 정의

FFM에서는 transition probability를 이용하여 보행자의 이동방향을 결정하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 원리로 보행자의 자세도 결정할 수 있도록 하였다. 이를 posture probability라 명명하였으며, 자세한 사항은 다음과 같다.

보행자는 자신이 향할 자세를 8가지 방향 중에 하나로 결정할 수 있게 된다. 일반적인 대피상황이라면 출구 쪽으로 자세를 향하고 이동하게 되지만, 정전 등으로 인해 시야가 제한된 상황이라면 임의의 방향으로 자세를 취할 수도 있다. 따라서 보행자의 자세 결정 방법은 이와 같은 다양한 경우를 반영할 수 있어야 한다.

본 모델에서는 posture probability를 추가하여 이를 해결하였다. 이는 보행자 주변 8개의 꼭짓점에 대해 각각의 꼭짓점을 바라볼 확률을 계산하고 난수에 의해 어떤 방향의 자세를 취할지 결정하는 방법이다. 계산식은 다음과 같다.

$$p_{ij} = N\xi_{ij}\exp(-k_p S_{ij})$$

k_p는 보행자들이 static 값이 작은 방향을 선호하는 정도에 대한 가중치이다. 값이 클수록 static 값이 작은 방향-출구를 향하는 방향-을 선호하게 된다.

$k_p \in [0, \infty]$

S_{ij}는 주변 경계점의 평균 static value이다.

$S_{ij} \in [0, \infty]$

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{자세를 취할 수 없는 방향이면} \\ 1, & \text{벽, 장애물이 없는 방향이면} \end{cases}$$

$$N = [\sum_{(i,j)} \xi_{ij}\exp(-k_p S_{ij})]^{-1}$$

모든 보행자들은 매 이동마다 위와 같은 posture probability를 계산하여 어떤 방향의 자세를 취할지 선택하게 된다. 변수로 Static 값을 이용하고 있으며, 가중치 k_p의 크기에 따라 출구 쪽으로 자세를 취할지 아니면 임의의 방향으로 자세를 취할지 조절할 수 있도록 하였다.

또한, 보행자는 현재 위치에서 다음 위치로 이동할 것인지, 이동한다면 방향은 어느 쪽일지, 제자리에 멈춰있을 것인지, 아니면 자세만 변경할 것인지 등의 행동을 취하게 된다. 이러한 행동결정을 위한 방법으로 기존 FFM의 transition probability를 수정하여 이용하였다. 본 연구에서 추가한 보행자의 크기 및 자세에 의한 영향을 반영할 수 있도록 식을 변경하였고, 계산식은 다음과 같다.

$$p_{ij} = N\exp(k_s S_{ij})\exp(k_d D_{ij})\xi_{ij}(1-n_{ij})(1-m_{ij})$$
$$N = [\sum_{(i,j)} \exp(k_s S_{ij})\exp(k_d D_{ij})\xi_{ij}(1-n_{ij})(1-m_{ij})]^{-1}$$

k_s는 SFF의 sensitive parameter이고, S_{ij}는 static value이다.

k_d는 DFF의 sensitive parameter이고, D_{ij}는 dynamic value이다.

$$\xi_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ 자세를 취할 수 없는 방향이면} \\ 1, \text{ 벽, 장애물이 없는 방향이면} \end{cases}$$

n_{ij}는 (i, j)방향에 보행자가 있으면 1, 없으면 0이다. m_{ij}는 (i, j)방향에 현재 보행자의 자세로 이동할 수 있는 지역인지 판단한다. 현재 자세를 취할 수 있는 지역이면 0, 취할 수 없는 지역이면 1이다.

모든 보행자들은 transition probability를 계산하여 이동을 결정하게 되고, 모든 보행자들이 이동을 마친 후에는 1회의 time step이 증가하게 된다. 매 time step마다 보행자들은 자세 및 이동을 결정하게 된다. 보행자들이 이동하는 경우에는 보행자의 보폭반영하기 위한 추가이동여부를 판단하게 된다. 장애물이 없는 보행상황이라면 평소 보폭인 2칸의 셀을 이동하기 위해 해당 time step에서 1칸을 추가로 이동하게 되고, 병목과 같은 상황이라면 추가이동 없이 1칸만 이동하고 time step을 종료한다. 즉, 1번의 time step마다 보행자는 이동을 하지 않거나, 이동을 하게 된다면 1 ~ 2칸의 셀을 이동하게 된다.

4. 기존 모델과 제안된 모델의 비교실험

3장에서 정의한 보행모델의 여러 원리들을 실험하기 위해 본 연구에서는 보행시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터를 통해 본 연구에서 제시하는 모델과 기존 FFM의 차이점을 살펴보고자 하였다. 본 연구에서 제시하는 모델은 기존 모델에서 반영되지 않았던 보행자의 물리적 특성인 크기, 자세, 시야 등을 반영하고 있는 점이 가장 큰 특징이며, 이를 반영함으로써 기존 FFM에서 산출되던 결과와 어떠한 차이점이 발생하는지 파악해보고자 하였다.

비교실험에는 동일한 장소와 파라미터를 이용하였으며, 두 가지 항목에 대한 비교를 수행하였다. 첫째는 대피인원의 변화에 따른 대피양상을 살펴보았다. 둘째는 출구 너비변화에 따른 대피양상의 차이를 살펴보았다. 본 연구에서 제시하는 모델은 보행자의 크기와 자세가 반영되어 있기 때문에 출입문 근처에서 발생하는 병목상황에서 보행자들 간의 충돌, 마찰 등의 요소가 고려되게 된다. 따라서 출입문의 너비변화가 보행양상에 미치는 영향이 기존 FFM과 차이가 있을 것이라 판단하여 이와 같은 실험을 진행하였다.

실험공간은 25m × 25m 크기의 정사각형 형태 공간이며 그 안에서 보행자들이 출구로 대피하도록 하였고, 출구는 1개로 설정하였다. 기본적으로 출입문의 너비는 2.1m(7개의 셀)로 설정하였다. 실내에 보행자들의 위치 및 자세는 임의로 배치되게 하였고, 모든 실험은 100회씩 수행되었다. 실험에 사용된 파라미터 셋은 Table 2에 정리되어 있으며, 3가지 상황에 대해 비교실험을 수행하였다.

Table 2. Parameter Settings and Meanings

Parameter	k_s, k_p : 0.4 k_d : 10.0	k_s, k_p : 1.0 k_d : 5.0	k_s, k_p : 5.0 k_d : 1.0
Meaning	The effect of the exit is small and interaction between pedestrians is large	The effect of the exit and interaction between pedestrians is appropriate	The effect of the exit is large and interaction between pedestrians is small

4.1 대피인원의 변화에 따른 비교

대피인원은 대피상황에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 대피인원이 증가할수록 대피시간도 증가하게 되며, 출입문, 좁은 복도 등 보행자들이 많이 몰리는 장소에서는 병목현상이 발생하게 되어 전체적인 대피양상에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 대피인원에 따른 대피시간의 변화를 살펴보기 위한 실험을 진행하였다. Table 2에서 설정한 3가지 상황의 파라미터를 이용하여 기존 모델과 개선 모델에서 인원별 대피시간의 변화 및 차이를 확인하는 실험을 진행하였다.

Figure 5는 기존 모델에서 인원변화에 따른 대피시간의 변화를 나타낸 것이다. k_s=0.4, k_d=10.0인 경우에는 대피시간이 매우 큰 값으로 들쭉날쭉한 값이 산출되었다. 대피인원의 수에 상관없이 매우 큰 값이 산출

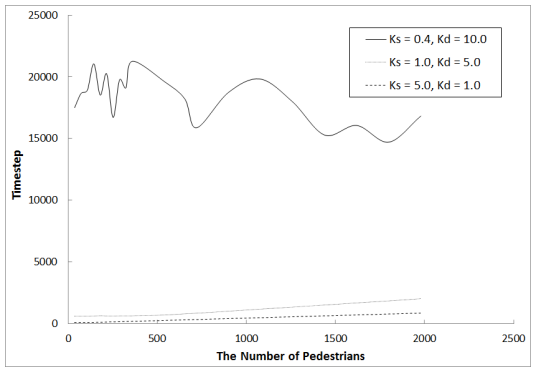

Figure 5. Changes in the Evacuation Time in Accordance with Changes in Pedestrian Volume in an Existing Model

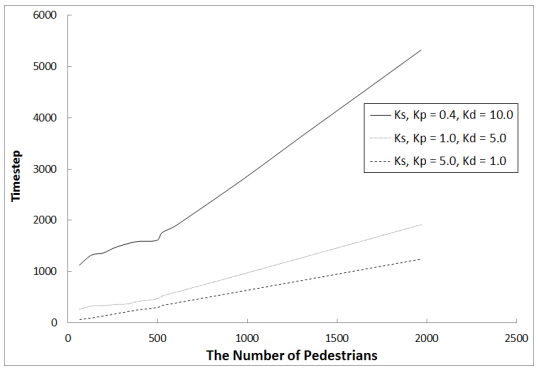

Figure 6. Changes in the Evacuation Time in Accordance with Changes in Pedestrian Volume in an Improved model

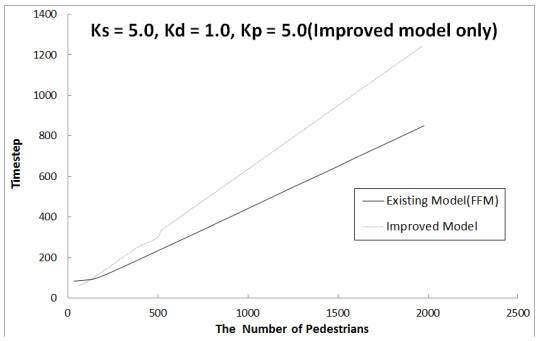

Figure 7. Comparison of Changes in the Evacuation Time in Accordance with Changes in Pedestrian Volume in Two Models

되었는데 이는 k_d값이 크기 때문에 발생한 것이라고 해석할 수 있다. k_d는 보행자가 이동할 경우에 생기는 가상의 경로가 다른 보행자들에게 주는 영향을 조절한다. 10이라는 매우 큰 k_d값을 설정하였기 때문에 다른 보행자들은 DFF의 영향을 많이 받게 된다.

다만 보행자 자신이 이동하며 생기는 경로에 자신이 영향을 받는 현상이 발생하면서 비현실적인 실험결과가 도출되었다. 기존 모델의 계산식에는 자신의 DFF에는 영향을 받지 않도록 하는 조건이 포함되어 있지 않다. 따라서 보행자는 자기가 이동했던 지역을 반복하여 이동하게 되고 출구 방향으로는 거의 이동하지 않게 되면서 매우 큰 time step을 소모한 후에야 대피가 종료되는 상황이 발생하였다.

k_s=1.0, k_d=5.0인 경우와 k_s=5.0, k_d=1.0인 경우에는 대피인원이 증가함에 따라 대피시간이 정비례하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. k_s=5.0, k_d=1.0인 경우가 출구로 이동하려는 경향이 더 강하게 작용하여 가장 빠른 시간 내에 대피를 완료하는 결과를 산출하였다.

Figure 6은 개선 모델을 이용하여 인원의 변화에 따른 대피시간의 변화를 나타낸 것이다. Figure 5와 비교하여 볼 때, k_s=0.4, k_s=10.0인 경우에 큰 차이가 있다. 이외의 다른 경우에서는 대피인원의 증가할수록 대피시간이 증가하는 비슷한 경향을 보이고 있다.

본 연구에서 제시하고 있는 개선 모델에서는 k_d가 10.0으로 설정되었음에도 불구하고 대피시간이 급격하게 증가하는 현상이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 개선 모델에서는 보행자의 자세가 반영되었기 때문으로 판단할 수 있다. 개선 모델에서는 보행자가 이동하면서 발생하는 dynamic 값은 보행자의 뒤쪽에 생성되기 때문에 자신의 dynamic 값은 자신의 경로에 영향을 주지 않도록 설정되어 있다. 기존 모델에서는 보행자의 뒤쪽에 생성되더라도 보행자의 자세가 없기 때문에 자기 자신이 남긴 dynamic 값에 영향을 받게 된다. 즉, 개선 모델에서는 자세의 영향으로 자기 자신이 남긴 dynamic 값에 영향을 받지 않게 되며 이는 기존 모델에서 발생하던 문제점이 해결된 것으로 판단된다.

Figure 7은 k_s=5.0, k_d=1.0에서 두 모델을 비교한 것이다. 대피인원이 극소수인 경우에는 병목현상이 거의 발생하지 않기 때문에 보폭이 더 큰 개선모델에서 대피시간이 짧게 산출되었다. 하지만 대피인원이 증가함에 따라 병목현상이 발생하기 때문에 보폭이 좁아지고 병목, 끼임, 충돌 등의 현상이 영향을 미쳐 대피시간의 증가폭이 더 커진 것으로 해석할 수 있다.

4.2 출구너비의 변화에 따른 비교

출구의 너비도 대피에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 출구가 넓어질수록 보행자들은 대피하기 쉬워지며, 출구가 좁아질수록 대피에 어려움을 겪게 된다. 출구가 좁아지면 병목현상이 심화되면서 충돌, 끼임 등의 현상이 더 많이 발생하게 된다.

기존 모델은 보행자의 크기, 모양, 자세가 반영되어 있기 않기 때문에 출구에서 병목현상이 발생하더라도 평소 보행하는 형태와 비슷하게 출구에서도 이동하게 된다. 따라서 출구의 너비 증가가 대피시간의 감소를 일으키긴 하지만 출구가 좁다고 해서 병목현상이 심하게 발생하지는 않을 것으로 예상할 수 있다. 개선 모델은 보행자의 크기, 모양, 자세가 반영되어 있기 때문에 출구에 병목현상이 발생할 경우 보행자들 간에 끼임, 충돌 등이 발생하여 출구의 너비가 넓은 경우

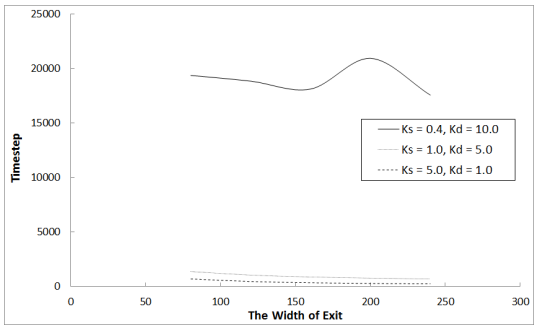

Figure 8. Changes in the Evacuation Time in Accordance with Changes in the Exit Width in an Existing Model

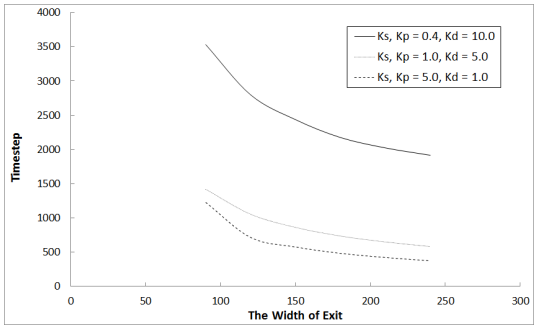

Figure 9. Changes in the Evacuation Time in Accordance with Changes in the Exit Width in an Improved Model

보다 좁은 경우에 대피시간이 훨씬 더 오래 걸릴 것으로 예상할 수 있다.

기존 모델은 셀의 크기가 40cm이고 개선 모델은 30cm이다. 기존 모델은 출구의 너비를 80cm, 120cm, 160cm, 200cm, 240cm 총 5가지 경우에 대한 실험을 진행하였고, 개선 모델은 90cm, 120cm, 150cm, 180cm, 210cm, 240cm 총 6가지 경우에 대한 실험을 진행하였다. 모든 실험의 대피인원은 656명으로 설정되었고, Table 2에서 정의한 세 가지 상황에 대해 두 모델의 비교실험을 진행하였다.

Figure 8은 기존 모델에서 출구너비 변화에 따른 대피시간의 변화를 나타내고 있다. k_s=0.4, k_d=10.0인 경우에는 출구의 너비에 관계없이 대피시간이 매우 큰 값이 산출되고 있는데 대피인원의 변화에 따른 실험에서 언급한 바와 같이 dynamic value의 영향으로 분석할 수 있다. 그 외, 2가지 경우에서는 출구너비가 넓어질수록 대피시간이 감소하는 경향을 보이고 있다.

Figure 9는 개선 모델에서 출구너비 변화에 따른 대피시간의 변화를 나타내고 있다. 출구너비가 넓어질수록 대피시간이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 출구너비가 90cm에서 120cm로 변화할 경우에 대피시간의 감소폭이 가장 크며, 출구가 매우 좁을 경우(90cm)에는 평소보다 지체가 심해지는 현상이 나타나고 있다. 120cm부터 240cm까지는 순차적으로 대피시간이 감소하고 있는 것을 확인할 수 있다.

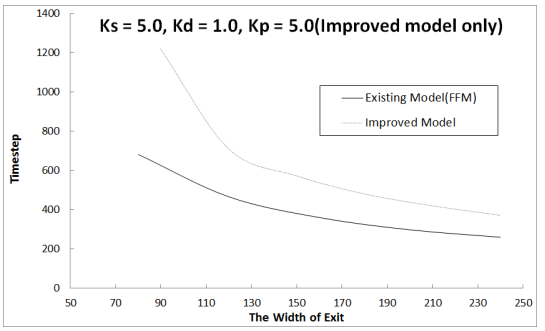

Figure 10. Comparison of Changes in the Evacuation Time in Accordance with Changes in the Exit Width in Two Models

Figure 10은 k_s=5.0, k_d=1.0에서 두 모델을 비교한 것이다. 두 모델 모두 출구의 폭이 커짐에 따라 대피시간이 감소하고 있지만, 출구 폭이 매우 작은 경우에 병목현상의 영향 정도가 다른 것을 비교할 수 있다. 이러한 현상은 보행자의 자세, 크기, 모양에 따른 보행자들 간의 충돌, 끼임 등의 물리적 요소가 보행에 반영되어 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 보행자의 물리적 특성 중 하나인 자세, 모양, 크기 등을 반영한 CA기반 보행모델을 제시하고 있다. 대표적인 CA기반 보행모델인 FFM은 보행자의 자세, 모양, 크기 등을 반영하고 있지 않다. 따라서 보행자들 간에 발생하는 물리적인 충돌, 끼임 등의 현상들이 제대로 반영되고 있지 않기 때문에 실제 보행양상과 차이가 있는 결과를 산출하고 있다고 분석하였다.

본 연구에서는 이러한 한계점을 개선하고자 보행자의 물리적 특성을 반영한 보행모델을 제시하였다. 보행자의 크기, 모양 등을 실제 사람의 신체크기에 맞게 설정하였고, 이를 적용하기 위한 대상 공간, 이웃 등을 정의하였다. 또한, 보행자의 자세를 결정하기 위한 posture probability를 추가하여 보행자가 이동하면서 자세에 대한 영향을 받도록 모델을 설계하였다. 또한,

FFM에서 보행자의 움직임을 결정하는 static과 dynamic 요소를 이용함으로써 기존 모델의 특징은 유지할 수 있도록 하였다.

본 연구에서 제시한 모델의 실험을 위해 보행시뮬레이터를 개발하였고, 기존 FFM과 비교하여 개선된 점을 파악하고자 하였다. FFM과 본 연구에서 제시한 모델을 이용하여 대피인원의 수와 출구의 너비의 변화에 따라 나타나는 보행특성 및 대피결과에 대한 실험을 수행하였다. 대피인원의 수를 증가시키면 두 모델 모두 대피시간이 증가하는 결과를 산출하였다. 다만, 기존 모델은 dynamic 값이 자기 자신에게 영향을 미치는 현상 때문에 비현실적인 대피시간을 산출하였지만 본 모델에서는 이러한 현상이 해결된 것을 확인하였다. 또한, 출입구 너비의 변화를 통한 비교실험에서는 출입구의 너비가 증가할수록 두 모델 모두 대피시간이 감소하는 경향을 보이고 있었으며, 특히 본 모델에서 출입구의 폭이 매우 좁은 경우(90cm)에는 병목현상이 심화되어 대피시간의 급격한 증가가 일어나는 것을 확인할 수 있었다.

대피상황에서 나타나는 물리적 충돌, 끼임 등의 현상이 적절하게 반영되었는지에 대한 정량적인 지표는 없지만, 본 모델과 기존모델의 실험 결과 비교하여 보면 본 모델이 기존 모델보다 출구근처에서 발생하는 물리적 현상들이 대피에 큰 영향을 미쳤음을 판단할 수 있었다. 또한, 기존 모델에서 dynamic 값의 적용이 제대로 되지 않았던 문제점이 본 모델에서는 해소된 결과를 산출하고 있다.

기존 모델은 보행자의 크기, 자세가 반영되지 않기 때문에 모델에 추가할 수 있었던 보행특성들이 제한적이었지만, 본 연구에서 제시하는 모델을 기본으로 하여 보행자들의 물리적·심리적 특성들을 추가한다면 실제와 유사한 보행자들의 움직임을 나타낼 수 있는 보행모델로 발전 가능할 것으로 사료된다.

References

[1] Ahuja, R. K; Magnate, T. L; Orlin, J. B. 1993, Book Title, Network Flows: Theory, Algorithms and Applications.

[2] Burstedde, C; Klauck, K; Schadschneider, A; Zittartz, J. 2001, Simulation of Pedestrian Dynamics using a Two-dimensional Cellular Automation, Physica A, 295:507-525.

[3] Helbing, D. 2001, Traffic and Related Self-driven Many-particle Systems, Rev. Mod. Phys, 73: 1067-1141.

[4] Helbing, D; Farkas, I; Vicsek, T. 2000, Simulating Dynamical Features of Escape Panic, Nature, 407:487-490.

[5] Henein, C. M. 2008, Crowds Are Made of People: Human Factors in Microscopic Crowd Models, Ph.D. thesis, Carleton University, Canada.

[6] KATS, 2010, The Korean Human Dimensions Direct Measurement Research Project, [Online] Available: sizekorea, http://sizekorea.kats.go.kr.

[7] Kirchner, A; Klupfel, H; Nishinari, K; Schadschneider, A; Schreckenberg, M. 2004, Discretisation Effects and The Influence of Walking Speed in Cellular Automata Models for Pedestrian Dynamics, J Stat Mech 10:P10011.

[8] Kirchner, A; Nishinari, K; Schadschneider, A. 2003, Friction Effect and Clogging in a Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics, Phys. Rev. E, 67, 056122.

[9] Kirchner, A; Schadschneider, A. 2002, Simulation of Evacuation Processes using a Bionics-inspired Cellular Automaton Model for Pedestrian Dynamics, Physica A, 312:260-276.

[10] Kirik, E; Yurgel'yan, T; Krouglov, D. 2007, An Intelligent Floor Field Cellular Automation Model for Pedestrian Dynamics, Proceedings of The Summer Computer Simulation Conference, The Mission Valley Marriott San Diego, California, 1031-1036.

[11] Kwak, S. Y; Nam, H. W; Jun, C. M. 2010, An Indoor Pedestrian Simulation Model Incorporating the Visibility, Journal of Korea Spatial Information Society, 18(5):133-142.

[12] Kwak, S. Y; Nam, H. W; Jun, C. M. 2012, An Optimal Model for Indoor Pedestrian Evacuation Considering the Entire Distribution of Building Pedestrians, Journal of Korea Society for Geospatial Information System, 20(2):23-29.

[13] Lim, W. S; Ryu T. B; Choi, H. W; Choi, H. S; Chung, M. K. 2006, A Comparision of Gait Characteristics between Korean and Western Young People, Journal of the Ergonomics Society of Korea, 25(2):33-41.

[14] Nishinari, K; Kirchner, A; Namazi, A; Schadschneider, A. 2004, Extended Floor Field CA

Model for Evacuation Dynamics, IEICETrans. Inf. Syst, E87-D:726-732.

[15] Yanagisawa, D; Kimura, A; Tomoeda, A; Ryosuke, N; Suma, Y; Ohtsuka, K; Nishinari, K. 2009, Introduction of Frictional and Turning Function for Pedestrian Outflow with an Obstacle, Phys. Rev. E 80, 036110.

논문접수 : 2014.01.16
수 정 일 : 2014.04.22
심사완료 : 2014.04.23