

CA기반의 다방향 보행자 시뮬레이션 모형개발

Multi-directional Pedestrian Model Based on Cellular Automata

이 준 Lee, Jun	정회원 · 동경대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (E-mail : lee@trip.tu-tokyo.ac.jp)
배 윤 경 Bae, Yun Kyung	비회원 · 연세대학교 공과대학 도시공학과 박사과정 (E-mail : honghong@yonsei.ac.kr)
정 진 혁 Chung, Jin-Hyuk	비회원 · 연세대학교 공과대학 도시공학과 부교수 (E-mail : jinchung@yonsei.ac.kr)

ABSTRACT

Various researches have been performed on the topic of pedestrian traffic flow. At the beginning, the modeling and simulation method for the vehicular traffic flow was simply applied to pedestrian traffic flow. Recently, CA based simulation models are frequently applied to pedestrian flow analysis. Initially, the square Lattice Model is a base model for applying to pedestrians of counterflow and then Hexagonal Lattice Model improves its network as a hexagonal cell for more realistic movement of the avoidance of pedestrian conflicts. However these lattice models express only one directional movement because they express only one directional movement. In this paper, MLPM (the Multi-Layer Pedestrian Model) is suggested to give various origins and destinations for more realistic pedestrian motion in some place.

KEYWORDS

pedestrian, CA model, square lattice model, hexagonal lattice model, MLPM

요지

보행교통류를 주제로 다양한 연구들이 진행되었지만 초기의 보행연구는 차량의 교통류이론을 그대로 적용하여 해석하기도 하였다. 최근 보행교통류에 대한 다양한 모형들이 제시되고 있으며, 특히 CA모형은 보행교통류를 위한 시뮬레이션 모형으로 빈번하게 사용되고 있다. 대표적인 CA 모형으로 가스입자의 움직임을 이용하여 양방향의 보행교통류를 설명하기도 하였는데 초기에는 정방향의 Gas-lattice 모형이 제안되었으며 이후에 정육방 Gas-lattice 모형을 이용하여 보행자의 움직임과 회피를 묘사하기도 하였다. 하지만 이러한 모형들은 보행자의 움직임을 편의임의보행으로 가정하였기 때문에 단일방향으로의 움직임만을 설명할 수 있었다. 본 연구에서 제시된 MLPM(the Multi-Layer Pedestrian Model)은 어떤 공간에서 복수개의 기종점을 가진 경우에도 현실적인 보행자의 움직임을 설명할 수 있는 모형이다.

핵심용어

보행자, CA모형, 정방격자모형, 육각격자모형, 다층보행자 모형

1. 서론

보행교통류의 네트워크 모형은 다양한 방법으로 연구되고 있지만 특히 그 적용성과 간결성 때문에 셀 기반의 CA 모형을 이용한 분석이 다수 진행되고 있다. 기존모형들은 기본적으로 정방격자형(Square lattice) 모형으로 상·하·좌·우로 움직일 수 있는 4방향의 보행자의 움직임을 가정하고 있으며, 이후의 연

구에서는 상·하·좌·우뿐만 아니라 우대각, 좌대각 4방향을 추가하여 8방향의 보행자 이동을 고려하는 모형이 소개되기도 하였다. 대부분은 임의 보행모형(Random Walker Model)을 적용하고 있으며, 양방향(Bi-Direction)의 움직임을 시뮬레이션 하기 위하여 보행의 상충과 충돌에 대한 여러 보행규칙을 적용한 사례도 있다. 하지만 이러한 CA 기반의 보행시뮬레이션의

한계는 완벽히 평면상에서 단일목적지 방향으로 이동하는 규칙을 가지고 있기 때문에 내부적으로 소수의 기종점(origin-destination)만을 가질 수밖에 없었다. 그러므로 좌우측, 또는 전·후 방향으로 이동하는 보행교통류에 대해서만 시뮬레이션이 가능했으며, 직각으로 교차하는 보행의 표현에 있어서도 상층에 대한 회피만 가능할 뿐 우회전, 좌회전하여 이동하는 보행교통류의 설명이 불가능한 상태에서 이루어지고 있다.

본 연구에서는 기존의 CA모형에서 구현되는 보행교통의 이동규칙을 수준별(layer)로 구분하여 적용하고, 이를 이용하여 기종점을 가진 다방향이동(Multi-directional movement)을 묘사할 수 있는 MDPM(Multi-Directional Pedestrian Model)을 구축하였다.

2. 선행연구 고찰

2.1. Lattice Model

최근 보행교통류를 묘사하기 위하여 다양한 미시적·거시적 시뮬레이션기법의 개발이 시도되고 있다.

Muramatsu(1999)가 제시한 Square Lattice Model(SLM)은 보행자의 움직임을 가스입자의 움직임과 유사하다고 가정하고, 보행교통류를 해석하였다. Lattice Gas Model을 개선한 SLM에서 보행자는 정방격자에서 후방을 제외한 오른쪽, 왼쪽, 전방의 세 가지 방향 중 한 가지 방향으로 움직일 수 있는 Biased Random Walker로 정의되었다. 보행자는 한 시뮬레이션 단위 시간동안 한 칸만 이동할 수 있으며, 각 위치에는 오직 한 명의 보행자만 있을 수 있다. 또 다음 위치로 이동하기 위한 방향의 선택은 전진하려는 힘(Drift Strength)에 의해서 결정되는데, 그 값이 클수록 직진방향에 대한 선택확률을 높이고, 작을수록 좌우측으로 방향을 전환할 확률이 크다.

Mannicam(2002)은 보행자들의 움직임에 대한 가정은 유사하지만 SLM에서 보행자 움직임을 나타내기 위해 정의한 정사각형의 격자 대신 정육각형의 격자를 사용하여 보행자의 움직임을 표현한 Hexagonal Lattices Model(HLM)을 제시하였다. 이 모형은 SLM에 비해서 보행자가 선택 가능한 방향의 개수가 2개 더 많아졌으며 보행자간 상층에 대해서도 다양한 방향으로의 회피를 표현할 수 있다. 그러나 상층이 없을 때에도 목적지를 향해 지그재그로 이동해야 하기 때문에 보행자의 직선 움직임에 대해서는 적절한 표현을 하지 못한다는 한계점을 가지고 있다.

이준 외(2007)는 보행자의 움직임을 보다 현실적으로 반영하기 위해 기존의 SLM과 HLM을 개선한 회전육각격자모형(Rotated Hexagonal Lattice Model, RHLM)을 개발하였다. HLM의 육각격자 셀을 90도 회전하여 보행자의 움직임을 개선한 모형은 맞은편(Counterflow)의 보행자와 상층이 발생

하였을 때 90도의 방향전환을 하지 않고 60도의 방향전환만 하면서 회피 움직임의 표현이 가능할 뿐만 아니라 상층이 발생하지 않았을 때에는 전방을 향해서 직선으로 이동할 수 있는 보행행태를 반영할 수 있다.

하지만 이러한 CA기반의 모형들은 단지 보행자의 목적지는 출발지별로 단 한 개만 존재하므로 일정한 규칙에 따라 보행자가 이동하면 결국 정해진 목적지에 도착하도록 구현되었다. 그러므로 다양한 기종점을 가지고 있는 보행자의 행태에 대한 설명 및 묘사가 쉽지 않은 한계점을 가지고 있다.

2.2. NOMAD

최잠재모형(Potential Model)의 대표적인 상용프로그램인 NOMAD는 TU-Delft공대에서 개발되었다. Hoogendoorn(2004)은 보행공간에 임의의 통행비용등고선(Contour of Travel Cost)을 생성시키고 각각의 위치에서 통행비용이 최소가 되는 등고선을 찾아가면서 목적지를 향하도록 정의되었는데(그림 1), 비용함수는 진입하는 보행자의 수와 혼잡에 의하여 결정되게 된다. 그리고 비용등고선을 기종점에 따라 방향별로 설정을 하게 된다면 다양한 경로선택과 실시간 행태를 반영한 시뮬레이션이 가능하다.

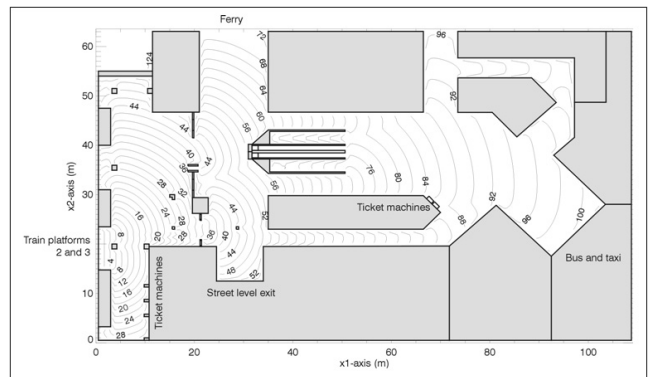


그림 1. Application example-Cais do soodre

NOMAD는 노드와 링크로 이루어져 있지 않으며 경로선택과 경로선택은 보행자 행태를 고려하여 확률적으로 구성되게 된다. 세부 기능으로 사전에 갔던 경험과 불확실성에 대한 설정이 가능한 것으로 알려져 있으며, 실제 관측과 실험을 통하여 검증하였다. 하지만 비용등고선의 설정과 기하구조의 반영에 따라서 보행자의 행태 및 결과가 달라진다는 한계점이 있다.

2.3. CTM for pedestrian flows

Asano 외(2007)는 CTM(a modified cell transmission model)을 이용하여 보행자의 다방향의 교통류현상을 설명하기도 하였다. 정사각의 셀에 상하좌우와 대각방향을 포함한 셀전이 규칙을 정의하고 대각방향의 왜곡된 거리를 시뮬레이션 시간을 늘림으로서 해결하였으며, 보행교통류의 교통류-

밀도관계를 설정하여 셀의 이동을 하게 된다. 또한 보행자의 이동경로(route)는 개인의 목적지와 사전정보에 의해서 결정되게 된다.

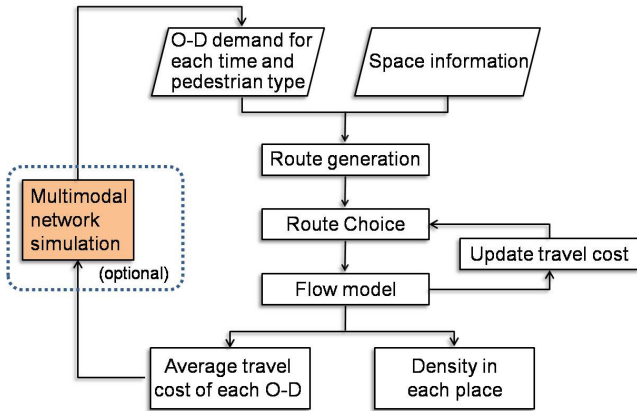


그림 2. 보행 시뮬레이션의 순서도

과 기하구조를 반영할 수 있다. 앞서 설명한 모형의 보행규칙을 각 층별로 적용하여 다양한 방향으로 이동이 가능하게 할 수 있다.

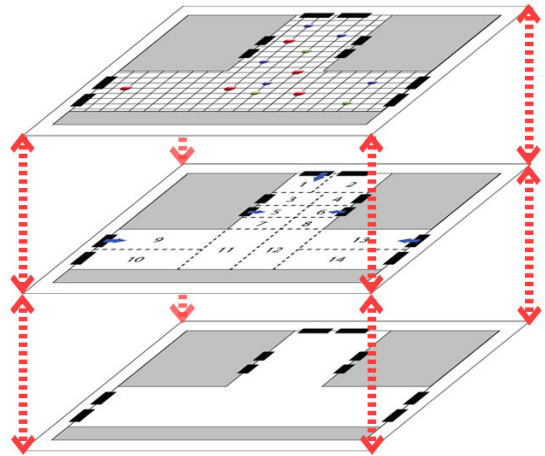


그림 3. 다층 CA모형 개념도

3. MDPM(Multi-Directional Pedestrian Model)

3.1. CA모형의 수준(Layer)별 구성

CA모형은 격자형으로 인접한 셀들간의 상호작용을 규칙화하여 프로그래밍한 셀들의 배열조합을 말하는 것으로 전체적으로도 셀 한 개와 같은 격자형 구조를 갖는다. CA모형의 배열은 띠모양, 1차원, 2차원 등 다양한 구조가 가능하다. 시뮬레이션이 진행되는 동안 일정한 규칙을 가지고 보행자의 이동을 설명하는 CA모형은 노선선택과정을 설명하기 어려우며 특히 회피에 의한 좌우 움직임은 설명이 가능하지만 목적지를 향하여 움직이기 위한 좌우회전의 구현은 이루어지지 않았다. 즉 보행자들 간의 회피움직임과, 최단거리 움직임은 이준(2008)의 연구에서도 가능하였지만 실제 직선구간의 간단한 기하구조를 반영한 것이며, Hoogendoorn(2004)의 연구에서도 직각교차하는 보행자가 동-서, 남-북 방향만 움직이는 행태를 가정하였으며 동-남, 서-북 방향과 같은 직각 움직임에 대한 설명은 할 수 없었다.

본 연구에서는 다방향 보행교통류를 CA모형에 적용하기 위해서는 기존에 CA모형을 개선하여 층(Layer)개념으로 의미를 확장하였다. 그림 3은 다층(Multi-layer) CA모형 개념도이다. 상층에는 보행자가 움직이는 공간이며, 중간층은 보행자의 움직임을 결정할 수 있는 절단면(Section)이 된다.

마지막 층은 출입구와 장애물(Barrier)과 기하구조(Geometric Structure)를 반영하고 있다. 각각의 층이 설정된 이유는 보행자의 움직임이 일련의 단일한 규칙을 다양한 층에서 적용하기 위함이다. 이로서 보행자의 회전과 목적지별 움직임을 설명할 수 있을 뿐만 아니라 보행자의 입·출입

3.2. 보행자의 움직임과 기종점의 설정

보행자의 움직임은 그림 4와 같으며 보행자가 현재 위치한 장소에 따라 이동가능한 방향이 다르다. 편이임의보행(Bias Random Walker)을 하기 위해서는 일반적으로 목적지를 향해서 3개의 방향으로 이동이 가능한데 동-서로 움직이던 보행자가 특정 공간에서 남-북으로 움직여야 목적지에 도착할 수 있을 때 적절한 지점에서 보행규칙이 바뀌어야 한다. 이와 같이 바뀌는 보행규칙은 두 번째 층인 절단면 별로 다른 정의를 하게 되며, 최종적으로 현재위치에서 이동 가능한 움직임이 어떤 방향으로 가능한지 기하구조를 반영하여 결정하게 된다.

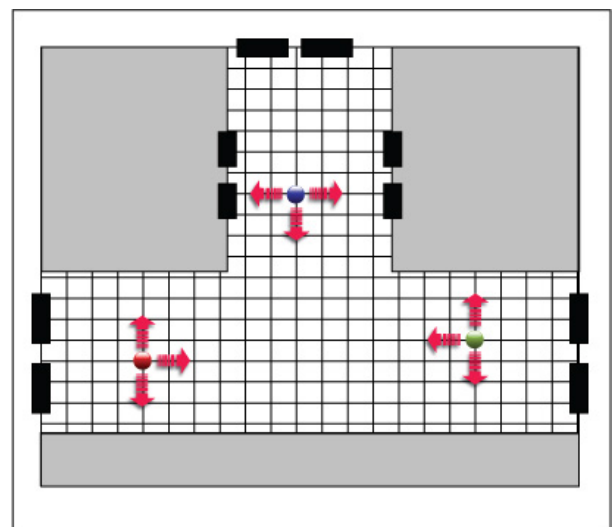


그림 4. 진입방향별 보행자의 보행규칙

4. 시뮬레이션

4.1. 시뮬레이션 환경설정

시뮬레이션을 하기 위해서는 시뮬레이션을 하기 위한 기하구조와 입·출입구를 설정하여야 한다. 그림 5와 같이 벽과 입·출입구를 분리하여 설정하게 되며 이 정보를 이용하여 보행자가 움직일 수 있는 방향을 결정할 때 갈 수 있는 곳과 갈 수 없는 곳을 결정하게 된다.

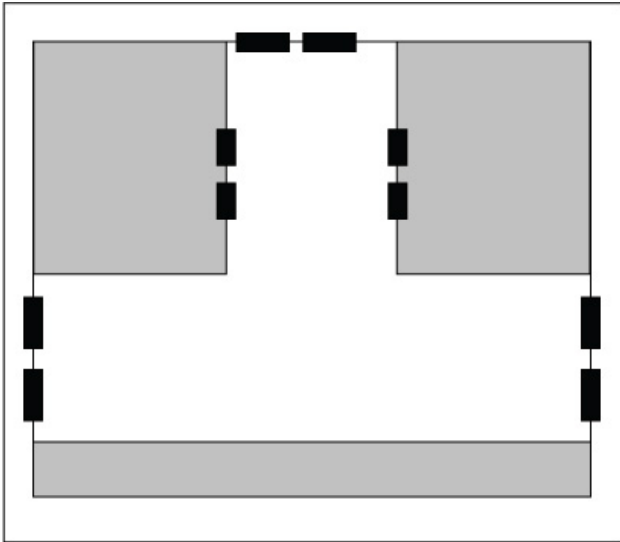


그림 5. 시뮬레이션 기초환경

다음으로 그림 6과 같이 절단면을 설정하게 되는데 절단면은 기종점이 다른 보행자별로 각 위치에서 목적지를 향한 편이임의 보행할 수 있는 방향을 결정하는 정보를 가진다.

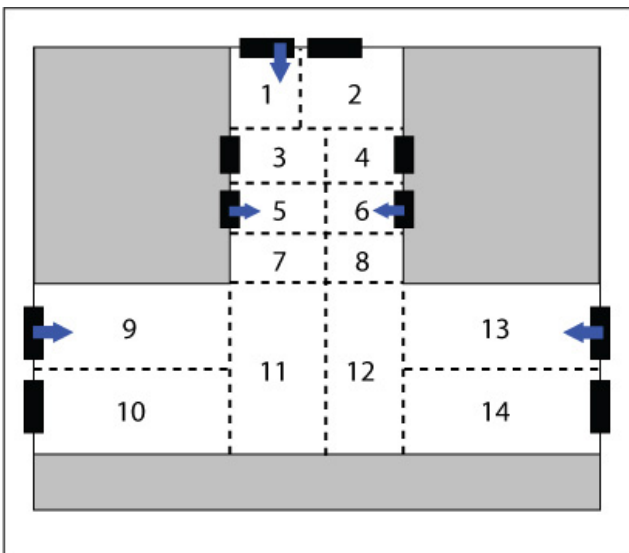


그림 6. 보행공간의 절단면(Section)

즉, 9번 절단면에서 7번 절단면으로 이동을 해야 하는 보행자라면 9번 절단면에서는 동·남·북 방향으로 이동이 가능하지만 11번 절단면에 들어가게 된다면 북·동·서 방향으로 이동할

수 있다. 또한 보행의 방해 받거나 임의로 선택한 위치가 12번 절단면에 들어가게 될 경우는 목적지를 향해서 서·북 방향으로 이동한다면 목적지를 위한 이동이 될 것이다. 이와 같이 목적지를 가지고 있는 보행자는 절단면 별로 이동 가능한 방향이 변하게 된다.

최종적으로 현재 보행공간에 이동하고 있는 보행자와 발생되는 보행자의 움직임이 결정되는데 그림 8과 같이 상충과 회피, 그리고 일반적인 보행 이동규칙에 의해서 움직이게 된다.¹⁾ 본 모형에서 보행자의 최종움직임은 Muramatsu(1999)의 이동규칙을 적용하였다.

본 연구에서는 선행연구에서와 같이 정방격자모형(SLM: Square Lattice Model)을 적용하기 위하여 먼저 네트워크를 생성(Network Generation)하고 진입하는 보행자(Pedestrian Generation)를 발생시켜 움직일 수 있는 공간을 찾는 Scanning과정과 이동방향을 결정(Selecting Direction)하여 이동(Moving)하는 과정을 제시하였다(그림 7).

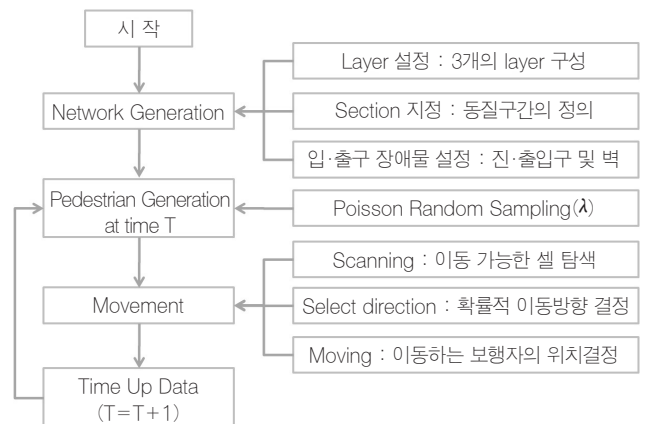


그림 7. 모형의 Flow Chart

시뮬레이션을 하기 위하여 각 layer를 구성하여 section을 지정하고, 실제환경과 유사하게 하기 위하여 장애물을 설정하여 network를 구성하였다. 평균이 람다(λ)인 포아송 분포임의 추출방법에 의하여 보행자를 발생시키고, 각 보행자가 이동할 수 있는 셀을 찾는 단계인 scanning 단계로 넘어간다. 확률적 선택과정을 통하여 이동방향을 결정하고, 결정된 방향으로 보행자가 이동하게 되는 흐름을 가지게 된다.

1) 보행자의 이동은 빈공간으로 이동이 가능하며, 다른 보행자에 의하여 점유된 공간으로 이동하지 못한다. 이동을 위한 전방방향에 다른 보행자에 의하여 이동하지 못하면 상층으로 간주하게 되며, 보행자는 편이임의보행으로 목적지를 계속 찾아 이동하게 된다.

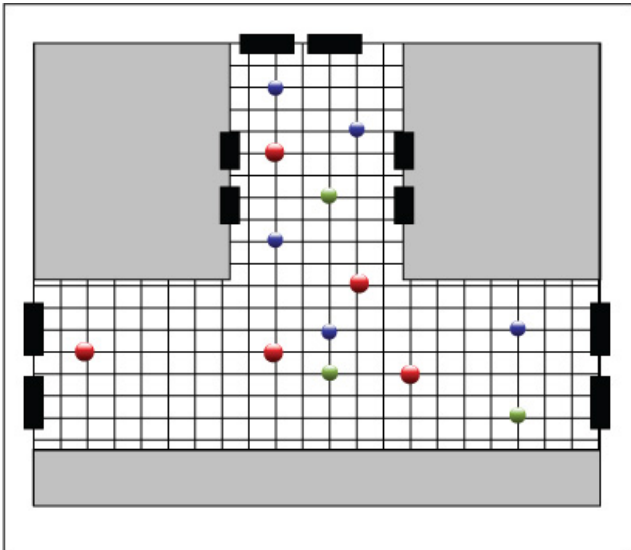


그림 8. Cell 단위의 보행자 이동

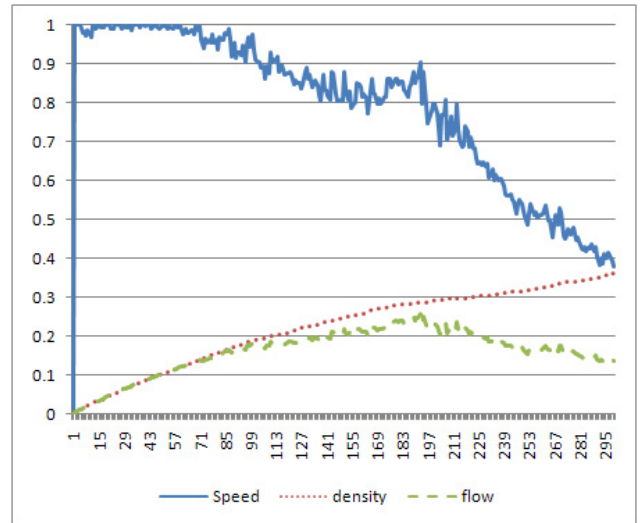


그림 9. MDPM : 속도, 밀도, 교통량

4.2. 시뮬레이션 결과분석

본 연구에서 구축된 MDPM을 이용하여 서울역의 임의공간에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 가로 25m이고 세로 30m인 공간에 5개의 기종점을 가질 수 있는 입·출구가 있다. 기하구조를 바탕으로 보행공간을 설정하였으며 각 방향에서 진입하는 보행자의 교통류율은 3600ped/hour로 설정하였으며, 시뮬레이션은 300초 동안 진행하였다. 인체타원의 경우 국내 평균넓이를 0.40m로 가정하여 셀의 크기는 정사각형으로 한 변의 길이를 0.4m로 설정하였다. 또한, 보행자의 평균이동속도는 1.0m/s로 가정하였으며 전방 또는 좌우로 이동할 때에도 동일한 속도로 움직이게 된다. 보행행태를 결정하는 중요한 파라미터로 직진강도²⁾(Drift Strength)를 들 수 있는데, 본 모형에서는 0.8을 사용하였다.

그림 9는 300초 동안 시뮬레이션을 실시한 속도, 밀도, 교통량을 나타내고 있다. 속도, 밀도, 교통량은 모두 보행공간 전체에서의 값을 의미하고 있다. 시뮬레이션 초기에는 빈 공간에 보행자가 진입하므로 보행자간의 상충이 없고, 원하는 방향으로의 이동이 가능하므로 속도는 초기에 감소하지 않는다. 71초 이후에 속도가 감소하는 현상은 교통류율과 관련이 있는데, 71초 이후부터는 보행자간의 상충에 의해 움직이지 못하는 보행자가 발생되어 교통류율이 감소하기 때문이다.

하지만 밀도의 경우 초기부터 183초까지 별다른 변화 없이 증가하는 것을 관측할 수 있는데, 이것은 보행자간의 상충이 진입하는 입구가 아닌 공간내부에서 발생하였기 때문이다. 즉, 보

행공간으로 진입하는 보행자는 입구에서 아직 상충이 없기 때문에 진입에 문제가 없어서 시간이 지날수록 동일공간에서 이동 중인 보행자의 수가 많아지고 있는 것이다. 197초 이후로는 교통류율도 감소하는 것을 관측할 수 있었는데, 이것은 밀도가 충분히 높아져서 공간 내 혼잡이 높아졌기 때문이다. 공간 내에서 아직은 대기할 수 있는 공간이 남아있으므로 밀도는 높아지고 교통류율과 속도는 감소하는 것이다. 본 모형에서 300초 이상 시뮬레이션을 실시하게 되면 결국은 아무도 움직이지 못하는 상황으로 속도 0, 밀도 1, 교통류율 0이 되게 된다.

본 모형으로 시뮬레이션한 상황은 25×30m²공간에 시간당 3600명이 진입하고 있으므로 혼잡한 상황이라 할 수 있다. 실험결과 시간당 공간으로의 진입인원이 600명인 경우에는 비교적 안정적인 속도, 밀도, 교통량을 가지고 있었으나 이에 대한 민감도와 안전성에 대한 연구는 향후연구로 남겨두었다.

그림 10은 본 모형의 교통량-밀도관계를 나타내는 도표이며 본 시뮬레이션 공간에 최대 0.25ped, 0.5sec로써 약

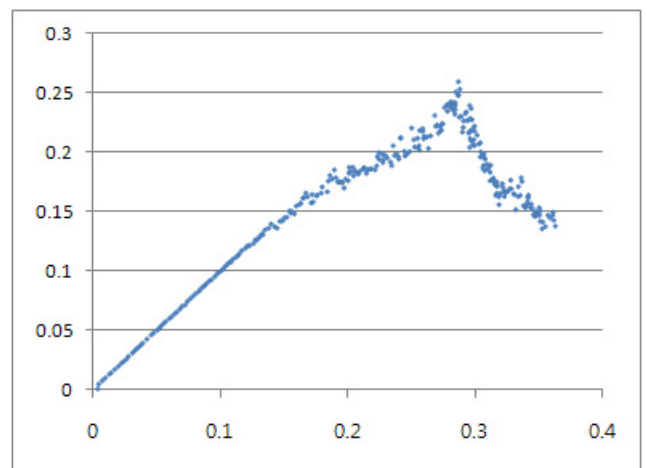


그림 10. MDPM : 교통량-밀도 관계

2) 직진강도는 Muramatsu(1999)에 의해서 제시되었으며 값은 0~1의 값을 가지게 된다. 전방·좌·우방으로 이동이 가능한 경우 보행자는 전방으로 이동하려는 성향이 강하므로 이에 대한 가중치를 부여하는 것이다. 1인 경우는 모두 전방만 선택하게 되고 0인 경우는 어느 방향으로도 가중치 없이 1/3확률로 이동방향을 선택하게 된다.

1800ped/hour의 인원이 최대용량인 것으로 분석되었다. 일반 교통류와 같이 용량이 존재하는 것을 관찰할 수 있었으며, 용량 근처에서 교통류의 불안정한 속도변화를 관측할 수 있었다.

표 1은 교통특성 파라미터에 대한 3600초 동안의 평균값으로 속도는 1.0보다 감소하였으며 밀도의 경우는 그림 9에서와 같이 시간이 갈수록 증가하고 교통량은 증가이후 감소하게 된다. 상충은 자신이 원하는 방향으로 이동하지 못하는 경우의 횟수를 더한 값으로 이 또한 시간이 갈수록 늘어나는 것을 알 수 있었다.

표 1. MDPM 시뮬레이션 결과

항 목	평균값	단 위
속도(Speed)	0.79176	m/sec
밀도(Density)	0.22331	ped/m ²
교통량(Flow)	0.16131	ped/sec/m
상충(Collision)	403.16	회

5. 결론 및 향후연구과제

본 연구는 기존 CA모형에서 보행자의 다양한 기종점에 대한 움직임 적용이 어려웠던 한계를 개선하기 위하여 다층(Multi-Layer)구조의 CA모형을 개발하였으며, 보행자의 복수의 목적지를 묘사할 수 있는 MDPM(Multi- Directional Pedestrian Model)을 구축하였다.

보행공간의 기하구조와 위치별로 다른 보행규칙을 적용할 수 있으며, 다양한 기종점을 적용하여 보행자의 상충과 회피 그리고 우회를 표현할 수 있었다. 또한 비교할 수 있는 실측데이터를 구축하지 못하였기 때문에 시뮬레이션 결과만이 제시되었으며, 실측데이터와의 확인 과정을 실시하지는 못하였다. 하지만 다양한 목적지의 보행공간을 묘사할 수 있는 개선된 CA모형을 개발하고 특정 공간에 대한 묘사가 가능하게 되었다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0077147).

참고 문헌

- 이준·허민국·정진혁, "정방격자모델을 이용한 양방향 보행 교통류의 특성연구", *대한교통학회 제 59회 학술발표회*, pp.997-985, (2008)
- Asano 외, "Dynamic Cell Transmission-Based Pedestrian Model with Multidirectional Flows and Strategic Route Choices", *Transportation Research Board*, pp. 42-49, (2007)
- D. Helbing, J.J. Farkas, "T. Vicsek, *Simulation Dynamical Features of Escape Panic*", in: *Nature* 407, pp. 487-490, (2000)
- Masakuni Muramatsu, Tunemasa Irie, Takashi Nagatani, "Jamming transition in pedestrian counter flow", *physica A* 267, pp.487-498, (1999)
- S. Maniccam, "Traffic jamming on hexagonal lattice, *Physica A* 321", (2002)
- S.P. Hoogendoorn, P.H.L. Bovy, "Simulation of Pedestrian Flows by Optimal Control and Differential Games", *Optimal Control Applications and Methods* 24, pp. 153-172, (2003)
- S.P. Hoogendoorn, W. Daamen, R. Landman, "Microscopic Calibration and Validation of pedestrian Models-Cross-Comparison of models using Experimental data, *Transport & Planning Department*", Delft University of Technology, (2004)
- S.P. Hoogendoorn, W. Daamen, "Pedestrian Behavior at Bottleneck", W. Daamen, "PedScience 3len. pp. 147-159, (2005)

접 수 일 : 2009. 8. 25

심 사 일 : 2009. 9. 9

심사완료일 : 2010. 10. 12