

지하철 환승통로에서의 CA모형기반 보행자 이동 알고리즘 연구

An algorithm of pedestrian movements using the CA model at transfer
pathway in the subway

정 호 준

(서울대학교 환경계획학과 석사과정)

이 영 인

(서울대학교 환경계획학과 교수)

목 차

I. 서론	V. 모의실험 및 평가
II. 선행 연구 고찰	VI 결론 및 향후과제
III. 관련 이론 검토 및 적용	참고문헌
IV. 알고리즘 구축	

I. 서론

1. 연구의 배경 및 목적

인간의 이동은 차량이나 기타 운송수단을 이용할 뿐 아니라 자신의 몸에 있는 다리를 이용하여 이동하기도 한다. 이때 교통수단으로써 보행(步行)이란 사람의 다리를 이용하여 공간을 이동하는 가장 기본적인 교통수단이다. 인간은 단거리나 보행자 전용공간에 있어 보행을 이용하여 이동하게 된다.

보행자 전용공간, 예를 들어 역사 내부나 환승 통로에서 이동할 때 주요 교통수단은 보행이다. 엘리베이터나 무빙워크 등 보조수단이 있는 것은 하나 모두 보행을 바탕으로 이루어진다. 서울의 경우 포화상태인 자동차 통행을 줄이려는 정책으로 지하철이 건설되어와 지금의 지하철 네트워크에 자신의 목적지까지 환승을 통하여 이루어진다. 하지만 지하철 건설에만 열을 올렸을 뿐 역사 내에서 환승이 이루어질 때의 이용객의 행태에 관해서는 연구가 거의 없는 실정이다.

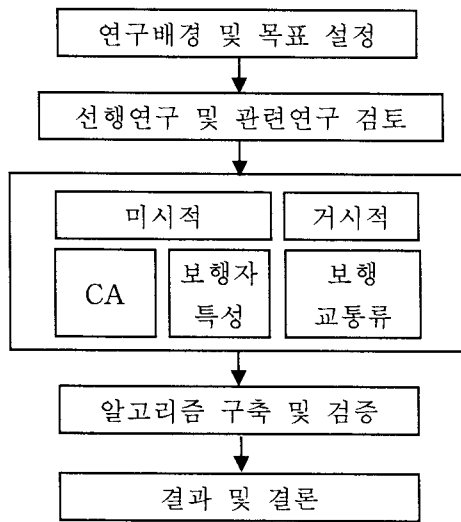
따라서 본 연구에서는 지하철 역사 내 환승 과정에서 보행자들의 행태를 연구하고 나아가

보행자 이동을 모사하기 위한 모형을 구축하고자 한다. 또한 지하철 내 환승과정에서 통행시간 및 통행행태를 파악함으로써 환승 통로에서 상태나 서비스수준을 알아낼 수 있는 도구로 활용하는데 목적을 두었다.

2. 연구의 내용 및 범위

환승 통로에서 보행자 이동 알고리즘은 보행로에서 보행자 이동 행태를 반영하여 구축하는 것이다. 이때 가장 기본이 되는 것은 CA(Cellular Automata)로 Cell 기반의 보행자 이동 모형이다. CA를 기반으로 하고 보행 교통류 이론을 적용한 보행자 이동 알고리즘을 연구하였다. 이에 대하여 모의실험을 통한 알고리즘을 검증하고자 한다.

특히 기존의 차량에 관한 모형과 이론을 보행 이동에 맞게끔 모형을 수정하는데 주안점을 두었으며 미시적인 CA 모형을 본 연구에 맞게 새로이 정립하였다.



<그림1> 연구수행 순서도

II. 선행 연구 검토

보행자 이동에 관한 국내 연구를 보면 여러 논문이 있지만 그중에서 이동 알고리즘에 관한 것은 박우신(2002), 구석모(2007) 등이 있다. 박우신(2002)은 CA와 보행교통류를 이용하여 가장 기초적인 보행자 이동 알고리즘을 구축하였다. 구석모(2007)는 마찬가지로 같은 방법론을 이용하여 계단에서의 이동 알고리즘을 구축 및 평가하였다. 두 논문은 CA 모형과 보행교통류를 사용하였고 파라미터는 각자 비디오 관독에 의하여 설정하여 최대한 현실에 반영하고자 하였다. 하지만 모형의 검증 과정에 있어 네트워크에 보행자 이동 제약이 거의 없었으며, 또한 미시적 모형이라 하기에는 보행자 개별행태의 알고리즘이 부족하였다는 한계점을 보인다.

외국의 경우에는 국내보다는 활발히 이루어지고 있다 특히 네덜란드 Delft 공대에서 Winnie Daamen과 Hoogendoorn의 연구결과가 많이 인용되고 있다. Winnie Daamen(2004)는 연구 논문모음에서 보행 교통류 이론을 기초로 보행자 이동 알고리즘을 CA가 아닌 노드-링크 체계에서 그 설명을 하고 있다. 철도역사와 같은 대중교통시설에서의 보행자 이동은 노드-링크로 표현하여 그 이동 경로와 소요 시간 등을 구현하였다. Teknomo(2002)의 논문에서도 마찬가지로 보행 교통류 이론을 기초로 하지만 보행자 이동 알고리즘은 Foward Force방법을 이용하여 거시적으로 설명하였다. 이들 연구는 보

행 이동 모형을 미시적인 아닌 거시적인 방법으로 접근하여 점에서 존 연구에 적용시키는 데에는 한계가 있었다.

이에 반해 CA모형을 적용하여 보행 이동 알고리즘을 구축한 연구는 Victor (1998)(2000) 등이 있지만 이들 논문은 단순히 cell 안에 점유 주체가 차량이 아닌 보행자로 채웠을 뿐 보행자 세부 행태를 그다지 반영하지 못했다는 한계가 있다.

현재까지 보행자 이동에 관한 연구를 보면 이동 알고리즘에 관한 것은 거의 대부분 CA를 이용하여 구현하였다. 그 이유는 CA 모형이 미시적 모형임에도 불구하고 적은 메모리와 빠른 연산으로 대규모 네트워크에 적용이 가능하여 차로의 구분이 없는(lane-less) 보행로에서의 적용이 매우 용이하기 때문이다. 따라서 본 연구에서도 CA 모형을 기반으로 보행자 이동 규칙을 정립하였다.

III. 관련 이론 검토 및 적용

1. CA 모형에 대한 해석

CA(Cellular Automata) 모형은 1992년 Nagel K. and Schreckenberg M.에 의해서 교통분야에 소개되었다. CA 모형은 cell 단위에 0과 1의 digit number를 이용해 점유와 비점유를 구분한다. 네트워크를 기존의 노드-링크 체계가 아닌 cell 기반으로 하여 마치 차량이 cell 사이를 점프하는 형태로 구현된다.

이때 CA 모형 내에서 차량 이동은 크게 차량추종모형과 차로변경모형 두 개의 모듈로 구성되어있다. 차량추종(Car-following) 모형이란 앞차의 속도에 반응하여 자기 자신 차량의 속도 및 감가속도를 결정하고, 차로변경(Lane-changing) 모형이란 이동 가능한 차로로 변경하는 모형을 말한다.

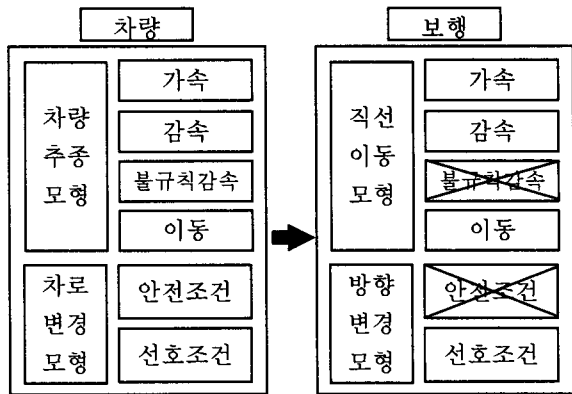
차량추종 모형은 차량이 최대속도까지 가속하기를 원하고 사고 방지를 위해 어느 정도 차량간 거리를 유지한다. 이때 세부 모형으로는 4개 항목으로 구성되어 가속, 감속, 불규칙 감속, 이동이 있다. 차로변경 모형은 차량이 차로를 변경할 때 고려하는 것으로 변경 선호조건 및

안전조건으로 구성되어 있다.

본 연구는 보행자 이동 모형 알고리즘을 구축하는 것이므로 기존 차량 이동 CA 모형을 다소 수정할 필요가 있다. 보행자는 차량과 다르게 신체의 에너지를 이용하여 이동하므로 속도의 편차가 차량만큼 크지 않다. 그리고 차로 변경에 있어서 단순히 속도를 낼 수 없다는 조건이 아닌 자신의 경로나 이동환경과 관계지어 설명하여야 할 것이다.

보행자는 차량과 다르게 앞사람을 추종하는 것 이외에도 주변의 환경에 따라 자기 자신의 속도를 조절한다. 그러므로 일반적인 경우는 불규칙한 감속이 없으므로 이 항을 제외하였다. 또한 차로변경이라는 사실이 없으므로 방향을 변경할 때는 개인의 선호에 따라 변경하며 안전조건은 불필요하므로 제외할 수 있다.

따라서 보행자 이동 CA 모형은 차량과는 다소 다르게 설정하였다. 아래의 그림은 차량과 보행자 이동 CA 모형을 비교하여 적용 사항을 정리한 것이다.



<그림2> 차량 CA 모형과 보행자 CA 모형 비교

2. 보행 교통류

Green-sheild 모형이란 차량 교통류에 있어서 속도, 교통량, 밀도의 관계를 규명한 것을 의미한다. 특히 속도와 교통량의 선형모형을 구축하여 현재 차량 교통류의 가장 기본적으로 사용되고 있다. 보행 이동에 대하여 이론적으로 접근한 보행 교통류 모형 역시 Green-sheild 모형을 이용하였다.

Green-sheild 모형에 입각하여 속도-교통량 모형은 보행 특성과 차량 특성을 구분하기 위

해 파라미터를 설정하였고, 관측치에 맞게 그 계수를 조절할 수 있게 하였다.

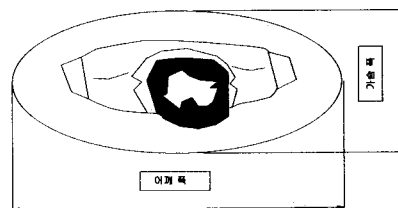
$$u = u_0 - \alpha k ; \alpha > 0$$

위의 식에서 보행속도 u 는 보행 자유 속도 u_0 와 밀도 k 에 따라 결정됨을 알 수 있다. 이 식을 기초로 여러 연구자가 실측에 입각하여 모형 및 파라미터를 정산하였는데 어느 것이 정확히 맞다고 하기는 힘들다. 따라서 본 연구에서는 그 중에서 Tanariboon(1986)의 싱가포르에서의 연구 결과를 인용하기로 하였다. 그 이유는 대부분의 속도방정식이 매우 유사하고 Tanariboon의 식이 동양에서 이루어졌기에 한국인의 것과 가정 비슷하다는 판단이기 때문이다.

$$u = 1.23 - 0.26k$$

3. 보행자 특성

보행자는 차량과 마찬가지로 일정 공간을 점유하게 되는데 이때의 기준 보행자 면적을 인체 공간이라고 하며, 순수한 인체 공간 외에 주변 사물이나 다른 보행자와의 일정한 간격을 두게 되는데 이를 완충 공간(Buffer)라고 한다. 순수한 인체 공간과 완충 공간을 합한 것을 인체타원이라고 한다. 한국표준과학연구원(1999)에서 실시한 한국인 사람들의 표준체위 조사에 의하면 성인의 95percentile 값은 남자의 경우 $0.15m^2$ 가 되고 여자의 경우 $0.14m^2$ 가 된다. 따라서 이 두 가지 값 중 최대값인 $0.15m^2$ 를 한국인의 인체치수라고 판단할 수 있으며 이 값에 여유폭을 감안했을 때의 한국인 인체타원은 약 $0.20m^2$ 라고 할 수 있다.



<그림3> 인체타원

보행자는 차량과 다르게 일정한 속도를 가지고 움직인다. 보행속도는 보행자의 성별, 연령, 신체적 장애 등의 구성원에 따라 결정되며 나이가 많은 노약자나 어린이 등의 비율이 높아지면 전체적인 보행 평균속도는 낮아진다.

도로교통 안전공단에서 실시한 보행속도조사에 의하면 평균보행속도는 1.26m/초로 조사되었으며 보행속도를 연령별로 가중치를 반영하여 계산하면 1.28m/초이다. 그러므로 본 연구에서는 연령별 가중치의 평균 보행속도를 이용하였다.

연령	평균 보행속도 (m/초)	인구비율
20세 미만	1.36	25.6%
20-40세	1.33	32.9%
40-60세	1.25	27.8%
60세 이상	1.09	13.7%
평균속도	1.26	1.28

<표1> 연령별 평균 보행속도

IV. 알고리즘 구축

1. 보행 속도 결정

보행자 이동 모형은 크게 직선이동모형과 방향변경 모형으로 구성된다. 직선이동모형은 보행자가 앞으로 곧바로 나아가는 것이며 방향변경모형은 좌, 우로 움직이는 것이다.

서비스수준	밀도(인/m ²)	보행교통류율 (인/분/m)
A	≤ 0.3	≤ 20
B	≤ 0.5	≤ 32
C	≤ 0.7	≤ 46
D	≤ 1.1	≤ 70
E	≤ 2.6	≤ 106
F	> 2.6	-

<표2> 보행자도로에서의 서비스수준

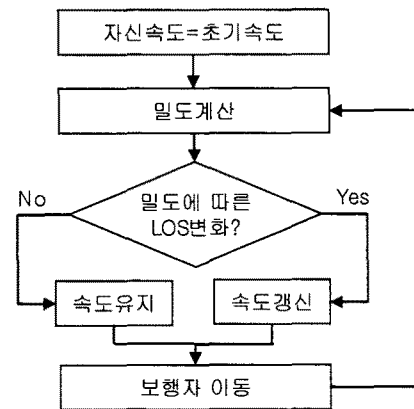
직선 이동 모형에서 보행자는 자신의 속도를 결정하는데 보행 교통류 모형을 이용하여 속도를 결정한다. 차량 이동 모형처럼 단순히 앞차의 속도로 가는 것이 아니고 보행자는 주변 환

경에 따라 속도를 변경한다. 그렇지만 매초마다 속도를 변경하는 것은 비현실적이므로 현재 보행자 주변의 혼잡도를 계산하여 임계 혼잡도마다 속도가 변하도록 설계하였다. 임계 혼잡도 기준은 도로용량편람(2004)의 서비스수준을 이용하였다.

각 서비스수준에 따른 밀도에 Tanariboon (1986)의 식을 이용하여 보행속도를 결정한다. 단 LOS A인 경우에는 평균 보행속도 값을 적용하도록 하였다.

$$\begin{cases} v_s^p = 1.23 - 0.26k_s^p & (k > 0.3) \\ v_s^p = 1.28 & (k \leq 0.3) \end{cases}$$

- v_s^p : s순간에서의 보행자 p의 속도
- k_s^p : s순간에서의 보행자 p의 밀도



<그림4> 보행속도결정 알고리즘

2. 방향 변경

보행자 이동 모형 중 방향 변경 모형은 직진을 할 수 없을 때 사용하는 알고리즘이다. 이때 개인의 선호에 따라서 그 방향 변경 여부와 변경할 방향이 결정된다.

1) 보행군에 의한 방향결정

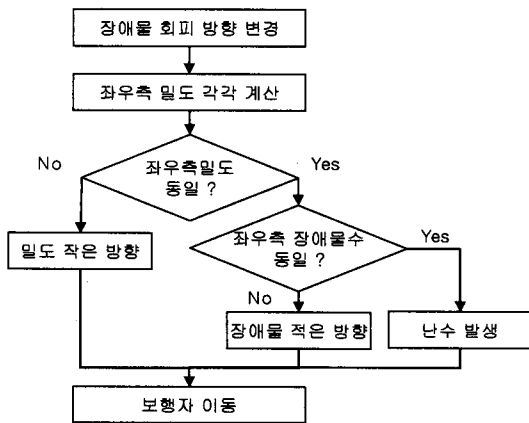
보행자의 이동은 차량과 달리 차로의 구분이 없지만 실제로 보행방향에 따른 공간이 구분된다. Teknomo(2002)의 논문에 의하면 현장 조사 결과 보행-lane을 형성하며 이동하는 행태

를 보인다고 하였다. 따라서 본 연구에서 변경할 방향을 결정할 때 보행-lane 판단을 먼저 실시하여 자신과 같은 방향의 보행-lane 방향으로 변경하는 알고리즘을 반영하였다.

2) 혼잡도에 의한 방향결정

보행자가 이동하다가 방향변경을 할 때 좌, 우측 이동 결정은 이동할 곳의 혼잡도에 의하여 진행된다. 만약 보행자가 장애물을 피해가기 위해 우측으로 이동하게 된다면 우측은 좌측보다 덜 혼잡할 것이다. 그러므로 보행자는 항상 주변의 밀도 정보를 파악하며 이동한다. 만약 좌우측이 혼잡도가 동일한 경우 고정 장애물 수가 적은 방향으로 이동하고 이마저 동일한 경우에는 임의의 상수를 발생하여서 이동하도록 하였다. 임의의 상수는 균일분포를 이용하여 좌, 우 방향 각각 50% 확률로 발생한다.

위의 두가지 방향결정 요소를 반영하여 보행 방향 변경 모형을 구성하였다.



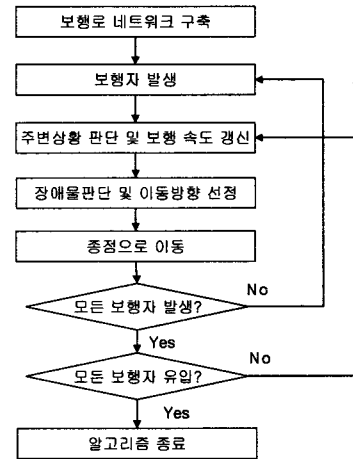
<그림5> 보행 방향 결정 알고리즘

V. 모의실험 및 평가

1. 모의실험 구축

CA 모형을 기반으로 하여 보행자 이동 알고리즘에 맞게 구성한 각 모형들을 전체의 알고리즘을 통합하여 구축하였다. 알고리즘 순서는 아래와 같으며 알고리즘 순서도 내의 3항과 4

항의 내용은 앞 절에서의 설명한 핵심 알고리즘이다.

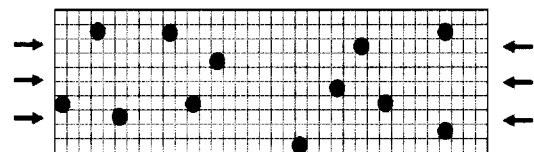


<그림6> 알고리즘 순서도

알고리즘을 구현하기 위하여 모의실험을 설계하였다. 보행자 이동 알고리즘이므로 보행자 공간 위에서 보행자 수에 따른 이동행태가 표현 가능하도록 설정하였다. 모의실험에 반영되어야 할 각 요소들은 아래와 같다.

- 보행자 공간 형태
- 보행자 공간 단위 cell 크기
- 발생 보행자 수
- 보행자 공간 내에 장애물 위치 및 수
- 보행 속도 결정 반영 범위
- 보행 방향 결정 반영 범위

보행자는 환승 통로 공간 좌우 양쪽 끝에 발생 및 유입이 이루어지며 좌에서 우로, 우에서 좌로 보행자들이 출입문에서 발생한다. 각 출입문을 이용하는 발생하는 보행자는 동시에 무작위로 발생하였다.



<그림7> 모의 네트워크

설사항목	내용
보행자 단위 크기	0.5m×0.5m
보행 속도 결정 범위	보행자 기준으로 전방 6.25㎡ (약 2평)
보행 방향 결정 범위	보행자 기준으로 전방 좌우 각각 전방 3㎡ 씩 (약 1평)

<표3> 모형의 기본 가정

2. 실험 시나리오 및 결과

모의실험은 각각 다른 수의 보행자를 발생시켜 실험 진행 시간대 별로 주어진 공간 내에서의 모의실험 보행자가 얼마나 잘 움직이는가를 측정하였다. 주어진 공간에 맞는 LOS값에 맞게 보행자를 발생하여 분석 시나리오를 설정하였다. 모의실험을 위하여 엑셀 Visual Basic을 이용 코딩하였다.

시나리오	발생 보행자 수	밀도 (인/㎡)	서비스 수준
1	27인	≤ 0.3	A
2	45인	≤ 0.5	B
3	63인	≤ 0.7	C
4	100인	≤ 1.1	D

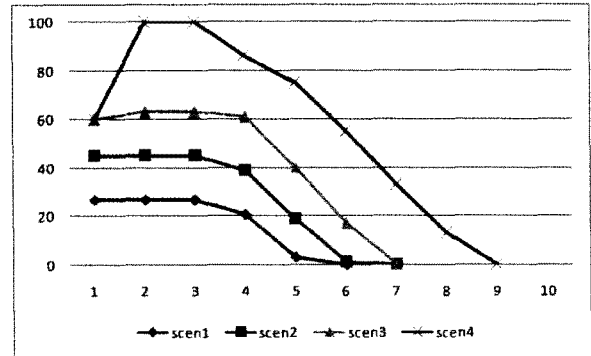
<표4> 분석시나리오

실험결과 아래와 같은 표를 얻을 수 있었다. 서비스수준이 좋을수록 빠른 시간 내에 보행이 이루어 졌다. 빠른 시간 내에 보행이 이루어졌다는 것은 보행 이동간의 장애물과 타보행자를 잘 파악하면서 이동했다는 의미이다.

Running Time 1분에서 2분 사이에서 출입구를 통해 모든 보행자가 발생하였고 모든 경우가 10분 이내에 모든 보행자가 목적지로 유입이 이루어졌다. 그 결과는 다음 그림의 그래프로 나타내었으며 LOS가 작을수록 완만한 형태의 곡선을 나타내었다.

여기서 실제로 보행자 통로를 이동하였을 때 과연 어느 정도의 시간이 소요되는지 예상하여 모의실험 결과값을 비교하였다. 이때 사용된 지표는 앞서 Tanariboon (1986)의 식을 이용한 수

정된 속도 관계식을 이용한 예상소요시간이다. 아래 표에 비교결과가 나타나 있는데 LOS가 A에서 C의 경우 예상소요시간보다 다소 빠르게 수렴하는 것을 보였다. 다만 LOS가 D인 경우에만 예상소요시간보다 약 13% 늦게 도착하는 형태를 보였다. 그 이유는 모의실험에서 보행자의 이동하는 데 있어 공간의 혼잡도 때문에 늦어진 것으로 판단된다.



<그림8> 보행자 이동 실험결과

시나리오	소요시간 (초)	예상소요 시간(초)	오차율
1	330	391	-15.6%
2	370	410	-9.8%
3	420	430	-2.3%
4	540	477	13.2%

<표5> 예상소요시간과의 오차율

VI. 결론 및 향후과제

보행자의 이동행태를 파악하고 보행관련 시설물에 적용 및 이용 가능하도록 보행 이동 알고리즘을 설계 및 모의실험 하였다. 모의실험에 의한 보행로 내에서 이동 소요시간과 예상소요시간을 비교한 결과 통행 소요시간의 관점에서 보았을 때 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 보행자 이동 행태 규명하기 위하여 교통학 관점에서 접근하였고 모의실험도 실시하였다. 하지만 현재까지 이와 관련된 연구가 많이 부족하고 관련 자료도 미비한 실정이어서 연구 진행에 많은 어려움이 있었다. 이에 대하여 차후 연구과제 및 필요사항으로써 가치를 꼽아 보았다.

첫째로 보행 이동 알고리즘을 검증하기 위한 관련 현장 조사가 필요하다. 현장 실측치를 통하여 모의실험을 평가 하는데 더욱 설득력이 생길 수 있다고 생각된다. 둘째로는 보행 이동 행태뿐만 아니라 교통에서의 이동경로와 같이 보행 이동 경로 선택 알고리즘에 대해 더붙어 연구해야할 필요가 있다. 보행 이동 경로 선택을 통하여 좀 더 현실감 있는 알고리즘이 개발 가능할 것이다. 마지막으로 외국에서 개발된 보행자 시뮬레이션의 알고리즘과 연구 개발된 알고리즘 간의 실험결과를 비교분석하여야 할 것이다. 외국에서의 보행자 시뮬레이터의 알고리즘을 연구하고 장단점을 배운다면 본 연구의 알고리즘 개발의 질적 향상이 있을 것으로 판단된다.

보행자 이동에 연구는 그동안 미비했으나 현재 활발히 이루어지고 있다. 하지만 이는 국외의 이야기일뿐 국내 연구는 미약하다. 그러므로 본 연구를 통하여 부족한 점은 그 한계를 극복하는 방안으로 연구가 진행하여야 한다. 그리하여 교통계의 관심을 보행분야에도 눈을 돌리고 나아가 한국형 보행 이동 알고리즘이 개발하는데 주요 전환점이 될 수 있기를 기대한다.

주 : 본 연구는 건설교통부 국가교통핵심기술개발사업 중 “교통연계 및 환승시스템 기술개발”의 연구과제 진행 중 일부 내용임

참고문헌

1. 구석모, “CA이론을 이용한 환승계단의 보행자 행태 모형 구축 및 평가”, 서울시립대학교 석사학위 논문, 2006.
2. 박동주, “보행목적에 따른 보행교통류 특성에 관한 연구”, 서울대학교 석사학위 논문, 1993.
3. 박우신, “보행 교통류 Simulation 모형 개발”, 명지대학교 석사학위 논문, 2002.
4. 윤종현, “CA(Cellular Automata) 이론 기반 양방향 보행자 이동행태모형에 관한 연구”, 서

울시립대학교 석사학위 논문, 2003.

5. 홍영석, “교통류 시뮬레이션을 위한 하이브리 모형 개발 - CA와 CT 모형의 수평적 결합”, 명지대학교 박사학위 논문, 2005.
6. Teknomo, Microscopic Pedestrian Flow Characteristics : Development of an Image Processing Data Collection and Simulation Model, Tohoku Univ. Ph.D. Dissertation, 2002.
7. Winnie Daamen, Modelling Passenger Flow in Public Transport Facilities, Delft Univ, Trail Thesis Series, 2004.