한국철도학회 철도저널 18권 3호, 2015년 6월, pp. 103–108

보행자 행태를 반영한 보행공간 분석 프로그램

한 명 주
서울대학교 환경대학원 박사과정
gksaudwn82@hanmail.net

1. 서론

대중교통수단은 수송효율성, 친환경성, 에너지효율성, 안전성 등 다양한 측면에서 다른 교통수단보다 우수한 특성을 가지고 있다. 이에 대중교통수단의 수송분담율을 높이기 위해 다양한 연구와 정책방안이 제안되고 있으며, 특히 대중교통수단간 연계 및 환승체계 구축이 하나의 방안으로 주목받고 있다.

이용자 중심의 환승시스템 구축을 위해 환승센터 등 물리적 시설의 개선방안 뿐 아니라, 정보제공 등 소프트웨어적 정책방안도 제안되고 있다. 이와 더불어 신규로 건설되는 시설은 계획단계에서부터 이용자의 편의를 고려한 접근이 이루어지고 있다.

이러한 노력과 함께 환승센터의 개선안과 운영방안에 대한 적합성, 적정성 평가가 수행되어야 하나, 설계안의 평가, 보행공간의 분석을 위한 도구가 부족한 실정이다. 또한 환승센터와 같은 보행공간의 평가를 위해서는 보행행태에 대한 이해가 우선시되어야 하는데, 교통분야는 차량 중심의 연구가 지배적이었다. 다행히 최근 지속가능한 교통수단에 대한 관심과 함께, 보행연구가 활발히 이루어지고 있으나 보행행태는 여러 요인이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 이를 반영하는 것은 매우 어렵다.

본 연구는 먼저 보행공간 평가 및 분석의 기초가 되는 보행행태 연구동향을 살펴본 후, 복합 보행공간을 평가할 수 있는 "환승센터 설계 및 운영분석 프로그램[1](P-Sim, Pedestrian Simulator)"을 소개하고자 한다. 또한 지속가능한 보행교통을 위해 보행행태 연구에서 고려되어야 할 점을 제안하였다.

2. 보행행태 연구동향

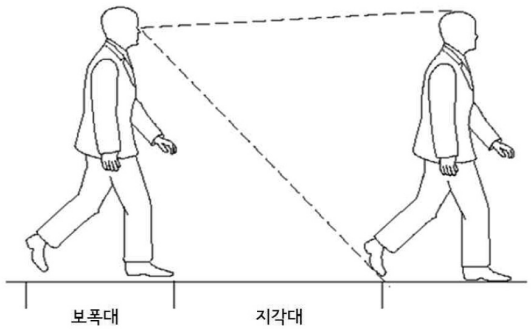
보행은 인간의 가장 기초적인 이동수단으로 모든 활동의 기반이 되며, 교통수단간 연계의 주요 수단이다. 최근 지속가능한 녹색성장에 대한 관심이 증가함에 따라 교통부문에서도 비동력교통수단인 보행에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 보행은 행태의 다양성과 공간의 복잡성으로 인해 이를 모형화하기가 쉽지 않다. 따라서 보행행태 분석을 위해 보행자의 특성을 면밀히 검토하여야 하며, 행태에 미치는 다양하고 복잡한 요인을 살펴보아야 한다.

2.1 보행특성

차량은 물리적으로 한정된 공간에서 이동하며, 신호 및 교통표지 등과 같은 특정 규칙을 기반으로 운행되는 반면, 보행자는 차량에 비하여 자율성과 임의성이 크며 독자적이며 유연한 행태를 보이기 때문에 보행은 차량 교통과는 다른 접근 방법이 필요하다.(Papadimitriou et al., 2009)

보행자의 연령, 성별, 신체조건, 보행목적뿐 아니라 보행자의 사회적 · 심리적 요인에 따라 보행행태는 다양하

1) P-Sim은 국가교통 R&D과제 "교통연계 및 환승시스템 기술개발"을 통해 개발된 프로그램이다.



〈그림 1〉 보폭대와 지각대

게 나타날 수 있다. 또한, 보행행태 연구를 위해 다음과 같은 보행자 특성이 고려되어야 한다. 인체타원(body ellipse)은 보행공간이나 보행자를 위한 시설을 계획할 경우 기본적인 요소이며, 사회적 속성인 완충공간(body buffer zone)은 보행자 자신 주변의 개인적 공간을 의미한다. 이러한 완충공간은 개별보행자의 연령, 성별, 문화적 배경에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 또한 보행동작에 필요한 공간으로 보폭대와 지각대가 있는데, 보폭대는 발을 놓기 위한 공간을 의미하며, 지각대는 보행공간을 지각하고 판단하는 영역을 나타낸다. 보폭대의 거리는 직접 측정이 가능하나, 지각대의 거리는 심리적 · 사회적 영향을 받는다. 또한 시각과 거리판단 능력이 보행자의 행동에 큰 영향을 미칠수 있다.(Fruin, 1971)

2.2 보행행태 연구분류

본 연구에서는 보행행태 연구를 크게 보행자 관점과 보행행태 선택과정에 따라 다음과 같이 분류하였다.

보행자 관점에 따라
1) (거시적 관점) 보행 = Flow / 보행교통류
2) (미시적 관점) 보행자 = Individual Object / 개별보행자

보행행태 선택과정에 따라
1) Strategic level
2) Tactical level
3) Operational level

〈그림 2〉 보행행태 연구 분류

2.2.1 보행자 관점에 따른 분류

(1) 거시적 관점

거시적 관점 연구의 주요 목적은 보행자, 보행시설의 공간배치에 대한 것이다. 교통량(보행량)-밀도-속도 관계식을 기반으로 공간의 서비스수준을 분석하는 연구가 대부분이며, 1971년 Fruin의 연구를 시작으로 이와 관련된 연구가 활발히 진행되었다. 거시적 관점의 접근방식은 모형의 단순성, 적용의 용이성 등의 이유로 널리 사용되고 있다.

그러나 이러한 모형은 보행행태의 특정현상을 설명하기 어렵고 보행자간의 상호작용(interaction)을 반영하지 못하며, 보행량을 기준으로 보행공간을 평가하기 때문에, 여러 가지 운영기법(일방향 통행 vs 양방향 통행)의 효율성을 측정하기 어렵다. 또한 대부분의 연구가 정량적인 측면만을 반영하고 있어, 정성적인 측면(보행의 만족도)을 반영하지 못한다는 문제점이 존재한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 최근 개별행태를 반영한 미시적인 관점에서의 보행행태 연구가 활발히 진행되고 있다.

(2) 미시적 관점

미시적 관점의 연구는 개별보행자 단위의 보행행태 연구를 의미한다. 이러한 모형의 가장 중요한 특성은 보행자 간의 상호작용(interaction)을 반영한다는 점이다. 보행공간의 속성(spatial representation)에 따라 이산형 보행공간(일반적으로 셀 기반)과 연속형 보행공간으로 구분 가능하다.

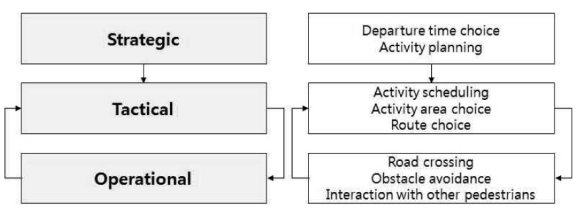
먼저, 이산형 보행공간은 분석대상공간을 cell 등의 이산적인 공간으로 표현하여 분석하는 것을 의미하며, 이러한 모형의 대부분은 사건 기반 시뮬레이션(event based simulation)기법을 이용한다. 이산형 보행공간 분석의 대표적인 예는 CA(Cellular Automata)로, CA는 생물학 분야에서 개발되어 여러 분야에 적용되고 있으며, 일반적으로 인접한 격자형 Cell간의 상호작용을 규칙화한 모형을 뜻한다. Gipps · Marksjo(1985)는 CA를 이용하여 보행자는 'as paticle in a cell'로 표현하고, 주변 9개 cell에 대한 점수를 계산하여 가장 높은 편익이 생기는 cell로 이동하는 규칙을 생성하였다. Blue · Adler(2001) 역시 CA기반 양방향 보행자 행태를 모형화하였다. Antonini et al.(2006)는

보행자가 이동가능한 대안을 속도, 방향에 따라 33개 이산적인 공간으로 표현하여 보행행태를 구현하였다. CA 등과 같은 이산형 보행공간 모형은 적용 용이성 등의 장점으로 인해 널리 이용되고 있으나, 차량과 달리 정해진 경로가 없고, 다양한 방향으로의 움직임(multi-direction movement)이 가능한 보행자의 특성을 세밀하게 반영하지 못한다는 단점이 존재한다.

연속형 보행공간 모형은 이러한 이산형 모형의 단점을 보완한 것으로, 연속적인 시 · 공간을 대상으로 한다. Okasaki(1979)의 Magnetic Forces Model과 Helbing · molnar(1995)의 Social Force Model이 대표적이다. Magnetic Forces Model은 보행자와 목적지에 양극과 음극이 존재한다고 가정하여 보행자의 움직임을 전기력으로 표현하였다. Social Force Model은 Vissim 등 교통분야 상용패키지에 광범위하게 이용되고 있는 모형으로, 당기고 미는 힘(attractive and repulsive force)을 수학적으로 표현하였다. 즉, 목적지로 향하는 힘, 타 보행자 · 장애물 등으로부터 멀어지려는 힘을 고려하여 보행자의 속도와 방향을 설정하게 되며, 이는 연속적인 모형으로 lane formation, self organization등의 현상을 반영하는 것으로 나타났다. 그러나 Social Force Model은 보행자의 복잡한 행동규칙, 다양성 등을 반영하기 어려우며, 또한 이는 근시안적인(myopic) 기법으로 보행자의 시각적인 능력을 고려하고 있지 않다는 문제점이 제기되고 있다.(Nasir, 2014)

2.2.2 보행행태의 선택과정에 따른 분류

보행행태와 관련된 연구는 거시적 관점에서 시작하여 개별보행자 행태를 구현한 미시적 관점의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 함께, 보행자의 자율성(autonomous)을 강조한 '행위자 기반 모형[2]'에 대한 관심이 증가하고 있다. 보행행태는 자극-반응과정이 아니며, 개별보행자의 자율성(autonomous)에 기반하며, 인적요인(human factors)등을 고려한 복잡한 의사결정과정이라는 접근과 함께, 보행자의 선택과정에 초점을 맞춘 연구가 진행되고 있다.



〈그림 3〉 계층적 의사결정구조

Hoogendoorn et al.(2002)은 보행행태의 유형에 따라 보행자의 계층적 의사결정과정을 다음과 같이 분류하였으며, 각각의 과정은 서로 상호연관성을 가진다.

(1) Strategic Level

Strategic Level은 출발시간 또는 보행공간 내 활동을 선택하는 과정으로, 출발 전 보행자의 의사결정을 의미하며, 이는 보행 목적에 따라 다양하게 나타날 수 있다. borgers · timmermans(1986)는 도심 상업지에서 보행자의 목적지 선택 모형을 제안하였고, timmermans et al.(1992)는 1986년 borgers · timmermans의 모형을 검토하고, 이를 네덜란드에 적용하였다.

(2) Tactical Level

Tactical Level에서는 활동스케줄링 및 중간목적지선택, 경로선택 등의 의사결정을 수행하는 단계이다. 이 중 보행자의 경로선택에 관한 연구가 다수 진행되고 있다. bovy · stern(1990)의 연구에서는 예루살렘을 대상으로 보행자의 경로선택 행태를 조사한 결과, 피실험자의 2/3이 이동거리가 가장 짧은 경로를 선택하는 것으로 나타났고 Seneviratne · morrall(1985), Verlander · Heydecker(1997) 등의 연구 역시, 보행자는 가장 단순하거나 이동거리가 짧은 경로를 선택하는 것으로 분석되었다.

(3) Operational Level

Operational Level은 장애물 회피 또는 타 보행자와의 상호작용 등을 나타내는 단계로, Antonini et al.(2006)의 연구는 이산선택모형을 이용하여 보행자의 속도 · 방향 선택 행태를 구현하였다. 또한 Hoogendoorn(2001)에서

2) 미시적 행위자의 특성에서 출발하여 시뮬내기를 통해 상향식(bottom-up)으로 거시적 현상의 동역학을 끌어내는 모형을 행위자 기반 모형(agent based model)이라고 한다.(채승병 외, 2007)

보행자는 효용을 극대화하는 선택을 하며, Operational Level에서의 비효용은 1) 계획된 경로에서 벗어남(deviation), 2) 보행자의 불편함(discomfort; walking too close to other pedestrians), 3) 빈번하고 급격한 감 · 가속 행태 등으로 정의하였다. Okasaki(1979)의 Magnetic Forces Model과 Helbing · molnar(1995)의 Social Force Model도 이에 해당된다.

2.2.3 기타

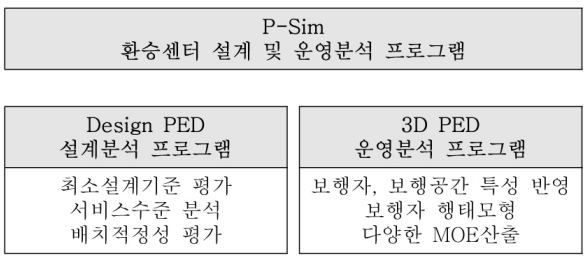
그 외에도 화재 등 긴급상황(evacuation) 시 보행행태에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Pan(2006)는 긴급상황에서 보행행태에 영향을 미치는 요인을 크게, 1) 보행자 물리적 특성, 2) 환경적 특성, 3) 사회 · 심리적 특성으로 분류하고 이를 고려한 보행행태 모형을 개발하였다.

2.3 P-Sim

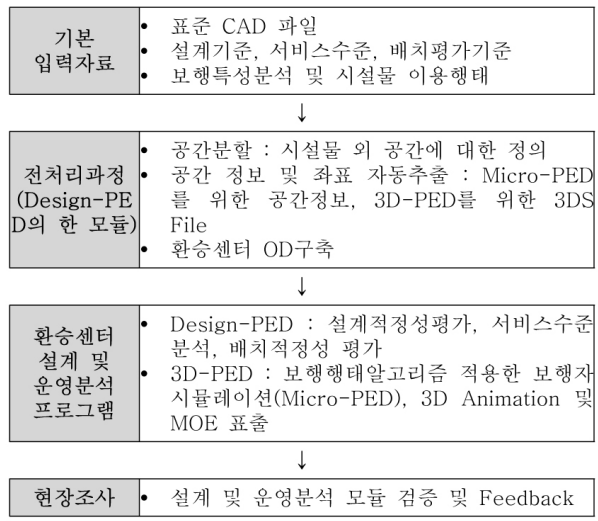
P-Sim은 Pedestrian-Simulator의 약자로, 보행공간에 대한 분석 및 보행행태 모의실험에 대한 포괄적 의미를 가지고 있다. P-Sim은 국토교통부 국가교통핵심기술개발사업(교통연계 및 환승시스템 기술개발)을 통해 5년간(2006-2011) 개발되었으며, 이는 크게 Design-PED(설계분석 프로그램), 3D-PED(운영분석 프로그램)로 구성된다.

2.3.1 Design-PED

Design-PED(설계분석 프로그램)는 환승센터 설계안에 대한 평가를 수행하는 툴로, 설계편람을 기반으로 최소 설계기준 만족 여부 판단, 환승센터 내 교통수단의 배치적정성 평가, 환승센터 보행공간의 서비스수준 분석을 수행한다. 이는 CAD 기반의 설계도면을 대상으로 전처리 과정을 통해 실제 분석에 필요한 공간 정보, 시설물 정보를 자동으로 생성하고, 이를 통해 설계안에 대한 분석을 수행한다. Design-PED를 통해 신규 환승센터의 설계분석 또는 기운영중인 환승센터의 개선안을 제시할 수 있으며, 상세 기능은 <표 1>과 같다.



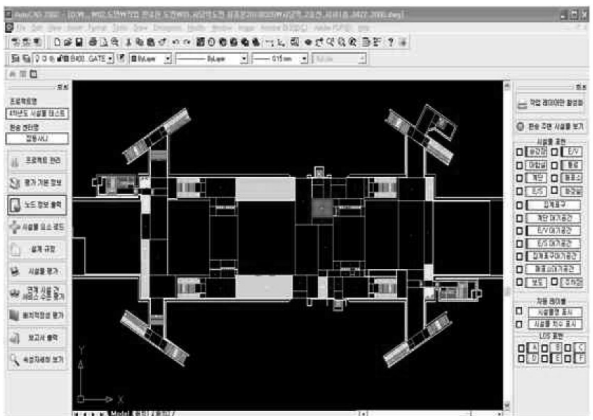
〈그림 4〉 P-Sim 구성도



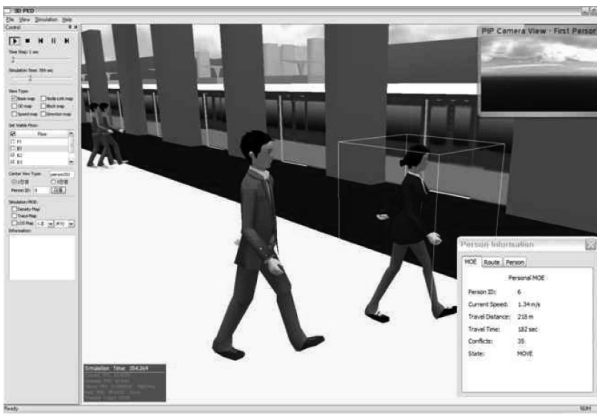
〈그림 5〉 P-Sim 분석흐름도 의사결정구조

〈표 1〉 설계분석 프로그램 기능

기능	내용
최소설계기준 평가 (설계 적정성 평가)	설계지침에서 제시하고 있는 시설의 최소기준 만족 여부를 평가한다. 예를 들어 "계단부는 승강장 연단으로부터 충분한 공간(최소 2.5m 이상)을 확보한다." 등의 설계기준을 적용하여 설계대안 시설의 설계적정성을 설계도면으로 자동 평가한다. 이를 통해 환승센터 및 보행공간의 설계측면의 문제점을 분석한다.
서비스 수준 분석	환승센터 이용수요를 고려하여 설계지침에 제시되어있는 서비스수준을 적용하여 개별시설의 서비스수준을 평가하고, 이용자의 주요 동선을 고려하여 연계시설에 대한 서비스수준 평가를 수행하는 기능을 가지고 있다. 또한 용량측면의 문제구간에 대한 개선책을 제시하는 기능을 가지고 있다.
배치적정성 평가	환승 승객의 주요 동선을 고려하여 여러 설계대안의 시설 배치 적정성을 평가한다. 환승센터의 접근수단에 대한 배치적정성 평가와 내부시설(출입구-개찰구)간의 배치적정성 평가를 수행한다.



〈그림 6〉 설계분석 프로그램 UI



〈그림 7〉 운영분석 프로그램 UI

〈표 2〉 운영분석 프로그램 기능

기능	내용
보행자 정의	•보행자 특성(물리적 보행자 공간) :개별보행자의 보행행태모형 정립을 위한 보행자의 특성을 인간중심점, 인체타원, 완충공간, 시야, 인지공간으로 정의 •보행자 계층 : 보행자의 연령, 성별, 신체조건, 보행목적 등에 따라 보행자의 개별특성을 다양하게 반영
보행공간 정의	•보행공간은 크게 보행자 이동공간(보도 및 환승통로 등), 보행활동시설(매표소, 화장실 등), 보행자 생성소멸시설(출입구, 플랫폼 등)등으로 구분되며, 이러한 보행공간에 대한 보행행태분석을 위하여 Block과 Node-Link 체계로 구현하였음
보행자의 활동선택	•환승센터 내부에서 활동을 선택하는 과정을 중심으로 활동선택 모형 정립
보행자의 경로선택	•최단거리탐색알고리즘과 Space Syntax이론을 적용한 최대인지도 경로탐색알고리즘을 적용
보행자의 미시적 행태 (회피, 시설물 이용 행태)	•보행자 인체타원을 나타내는 물리적 영역과 타 보행자 및 장애물 인식에 따른 회피 또는 방향전환을 하게 되는 인지영역에 대한 기준을 정하고 그에 따른 보행자 회피 원칙을 정립 •또한 보행자들이 시설물을 이용하는 일련의 과정을 모형화
다양한 MOE출력	•개별보행자 관련 MOE(보행거리, 보행시간, 시설물 이용횟수 등) •시설물 관련 MOE(총 이용자수, 평균 서비스시간, 대기시간 등) •시뮬레이션 관련 MOE(총 통행시간, 통행거리 등)

2.3.2 3D-PED

3D-PED(운영분석 프로그램)는 개별보행자의 행태 알고리즘을 개발하여, 환승센터와 같은 보행공간의 미시적 수준의 분석을 수행하는 보행자 시뮬레이터의 한 종류이다. 3D-PED는 환승센터의 주요 시설, 수단(보행자, 철도 등)의 행태를 3D로 모사하여 환승센터의 운영효율성, 설계안의 적정성을 미시적, 행태적 측면에서 현실적으로 평가 · 검증할 수 있는 분석도구이다. <표 2>는 3D-PED의 상세 모듈 및 행태 알고리즘을 설명하고 있다.

P-Sim은 다양한 시나리오에 대한 모의실험 및 MOE 분석, 보행자 수요에 따른 환승행태(환승시간 및 거리) 분석, 교통약자 등 다양한 보행군에 대한 분석, 환승센터 설계안 평가(규모, 시설배치 등의 적정성 평가) 등 보행공간 분석이 가능하다.

환승센터의 계획단계, 운영단계 등 전 과정에 걸친 문제점 분석, 개선안 제시를 통해 환승센터 및 보행공간 운영 방향 결정에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

3. 결론

본 연구에서는 환승센터 등 보행공간 평가의 핵심이 되는 보행행태 연구동향을 살펴보았다. 보행은 모든 활동의 기반이 되는 중요한 이동수단으로, 지속가능한 교통수단에 대한 관심이 증가함에 따라 이와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다.

보행행태 연구는 거시적 관점의 보행교통류 접근방식으로부터 시작되어, 최근에는 개별보행자 단위의 미시적 연구가 활성화되고 있다. 이와 더불어 개별보행자의 자율성(autonomous)을 강조한 모형이 주목받고 있다. 또한 보행공간 평가를 위해 국가교통 R&D과제로 개발한 P-Sim의 소개와 간략한 기능을 살펴보았다.

보행행태에 영향을 미치는 요인은 다양하고 복잡하다. 개별보행자의 속성 뿐 아니라, 보행공간의 속성, 주변 여건, 사회적·심리적 요소 등이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 이러한 행태 매커니즘을 정의하는 것은 매우 어렵다. 이러한 이유로 최근 보행을 복잡계[3]의 한 요소로 보는 시각이 생겨나고 있다.

보행공간 평가를 위해서는 실제 현상을 보다 정확히 반영한 보행행태 모형이 구축되어야 하며, 이를 위해 개별보행자의 복잡한 의사결정 과정을 반영한 행태모형이 구축되어야 할 것이다. 또한 이러한 의사결정 과정은 개별보행자의 주관성, 불확실성 등의 특성을 보이므로 이를 정량화할 수 있는 방안이 필요하며, 이와 더불어 개발된 모형의 검증 및 평가가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

♣ 참고문헌

[1] 국토교통부(2011), "교통연계 및 환승시스템 기술개발 최종보고서".

[2] 채승병 외(2007), "행위자 기반 모형과 그 응용", 물리학과 첨단기술, 16(10).

[3] A.Borgers, H.Timmermans(1986), "A Model of Pedestrian Route Choice and Demand for Retail Facilities within Inner-City Shopping Areas", Geographical Analysis, 18(2), pp.115-128.

[4] D.Helbing, P.Molnar(1995), "Social force model for pedestrian dynamics" Physical Review E, 51(5), pp.4282-4286.

[5] E.Papadimitriou et al.(2009), "A critical assessment of pedestrian behaviour models", Transportation Research Part F, 12(3), pp.242–255.

[6] G.Antonini et al.(2006), "Discrete choice models of pedestrian walking behavior", Transportation Research Part B, 40(8), pp.667–687.

[7] H.Timmermans et al.(1992), "Transportation systems, retail environments and pedestrian trip chaining behavior", Transportation Research Part B, 26(1), pp.45-59.

[8] J.J.Fruin(1971), Pedestrian planning and design.

[9] M.Nasir et al.(2014), "A genetic fuzzy system to model pedestrian walking path in a built environment", Simulation Modelling Practice and Theory, 45, pp.18–34.

[10] N.Q.Verlander, B.G.Heydecker(1997), "Pedestrian route choice: An empirical study", Proceedings of the PTRC European Transport Forum, pp. 39–49.

[11] P.H.L.Bovy, E.Stern(1990), "Route Choice: Wayfinding in Transport Networks", Studies in Operational Regional Science, 9.

[12] P.N.Seneviratne, J.F.Morrall(1985), "Analysis of factors affecting the choice of route of pedestrians", Transportation Planning and Technology, 10(2), pp.147-159.

[13] P.G.Gipps, B.Marksjo(1985), "A micro-simulation model for pedestrian flows", Mathematics and Computers in Simulation, 27(2–3), pp.95-105.

[14] S.Okazaki(1979), "A Study of Pedestrian Movement in Architectural Space, Part 1:Pedestrian Movement by the Application on of Magnetic Models", Transactions of Architectural Institute of Japan, 283, pp.111-119.

[15] S.P.Hoogendoorn(2001), Normative Pedestrian Flow Behavior: Theory and Applications, Delft University of Technology.

[16] S.P.Hoogendoorn et al(2002), "Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling", Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer, pp. 123–154.

[17] V.J.Blue, J.L.Adler(2000), "Cellular automata micro-simulation for modeling bi-directional pedestrian walkways", Transportation Research Part B, 35(3), pp.293–312.

[18] X.Pan(2006), "Computation modeling of human and social behaviors for emergency egress analysis", Ph.D. thesis, Stanford.

3) '수많은 구성요소들이 비선형 상호작용을 통해 얽혀 있어 거시적으로 보았을 때 창발현상이 나타나는 계'를 의미하며, 구성요소의 다양성 및 복잡성, 구성요소 간 상호작용의 비선형성, 구성요소간의 상호작용의 환류성, 시스템 경계의 불확실성 및 구성요소 자체가 또 다른 복잡계를 이룬다는 특성을 가지고 있다.(채승병 외, 2007)