

# 보행교통류 시뮬레이션 모형을 활용한 보행편의성 지표의 개발 및 분석

이주용\*

중앙대학교 일반대학원 도시공학과

## Assessment of Pedestrian Comfort Levels Based on the Microscopic Features of Pedestrian Traffic Flow

LEE, Joo-Yong\*

Department of Urban Engineering, Chung-Ang University, Seoul 06974, Korea

\*Corresponding author: jylee3302@naver.com

### Abstract

The pedestrian traffic flow has more complicated microscopic features than vehicular traffic flow. Without any designated lanes or any guidance, pedestrians naturally move and change their routes in two dimensional domain with ease. Thus the assessment of pedestrian comfort level should be considering the microscopic features of pedestrian flow. This study is aimed at developing pedestrian comfort criteria based upon pedestrian flow simulation model. This study suggests three criteria to determine pedestrian comfort level; the deviation of route, the acceleration of walk, and the number of collision. Each criterion, which can address the unique walking patterns of pedestrian flow, is represented as each different function with respect to traffic flow rate. The criteria can be the additional indicators to determine the level of service of pedestrian flow together with traffic flow rate and walking speed.

**Keywords:** LOS, pedestrian, pedestrian comfort, pedestrian flow, social-force

### 초록

보행교통류의 통행은 다른 교통수단과 비교하여 더 미시적인 움직임을 보인다. 정해진 차선의 구분 없이 통행하므로 2차원적인 움직임을 보일 수 있으며, 자유로운 방향전환 능력을 통해 이동할 수 있다. 이러한 이유로 보행교통류의 편의성을 평가하는 방법에 있어서도 보행교통류의 미시적인 특성이 반영되어야 한다고 할 수 있다. 만일 보행자만의 행태를 반영하여 편의성을 평가할 수 있다면 보행교통류의 통행 특성을 더 원활히 파악할 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 보행교통류의 특성을 반영하여 편의성을 판단할 수 있는 지표들을 시뮬레이션을 통해 제시하였다. 본 연구에서는 경로이탈도, 속도의 변화 크기, 그리고 충돌 횟수라는 세 편의성 지표를 통해 보행교통류의 편의성을 평가할 수 있음을 보였다. 각각의 지표들은 보행교통류의 고유한 통행 특성을 해석할 수 있으면서도, 교통류율의 변화에 따라 서로 다른 함수 형태를 보였다. 결과적으로 기존의 교통유율이나 속도와 더불어서 LOS를 판단할 수 있는 보조 지표로 활용될 수 있음을 알 수 있었다.

**주요어:** LOS, 보행자, 편의성, 보행교통류, Social-force

J. Korean Soc. Transp.  
Vol. 34, No. 6, pp.499-509, December 2016  
<https://doi.org/10.7470/jkst.2016.34.6.499>

pISSN : 1229-1366  
eISSN : 2234-4217

Received: 12 February 2016

Revised: 21 March 2016

Accepted: 8 December 2016

Copyright ©  
Korean Society of Transportation

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.

## 서론

### 1. 연구의 목표

현대 사회에서 승객의 통행 및 이동은 승용차, 철도, 선박, 그리고 비행기 등 다양한 교통수단을 통해 이루어지므로 복잡한 교통 체계를 구성하고 있다. 따라서 각 통행 수단별로 서로 다른 통행 특성을 보이며, 상이한 교통 현상을 보인다. 하지만 주로 이용하는 교통수단의 종류와 무관하게 대부분의 통행은 승객의 '보행'을 통해 시작되고 끝나는 공통점을 갖고 있다. 즉, 가장 단순한 교통수단이라고 일컬을 수 있는 보행이 사실은 전체 통행 과정의 시점과 종점을 구성하는 중요한 역할을 수행하고 있다고 할 수 있다.

하지만, 이러한 중요도와는 달리 보행자의 통행 특성을 해석하기 위한 연구는 타 교통수단에 비해 부족한 실정이다. 차량의 행태를 묘사한 모형은 많은 발전을 거듭해온 반면 (Gazis et al., 1959; Benekohal and Treiterer, 1988; Newell, 2002), 보행자 행태 모형은 상대적으로 역사가 짧고 그 수도 적은 편이라 할 수 있다. 이는 보행교통류가 다른 교통류와는 달리 차선의 구분 없이 자유롭게 2차원적인 이동 행태를 보일 수 있으며, 보다 자유로운 방향전환 능력을 통해 이동할 수 있으므로 다른 교통류에 비해 상대적으로 분석이 어렵다는 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이와 같이 타 교통류에서는 볼 수 없는 보행교통류만의 특성들을 분석하여, 보행자가 느끼는 편의성을 평가하였다. 특히 서비스수준 평가지표 중 하나인 교통류율의 변화가 보행자의 편의성에 끼치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 편의성은 보행자가 통행하는 과정에서 경험한 혼잡 및 편의를 정량화한 것으로, 본 연구에서 제시한 각 편의성 지표들은 보행교통류의 미시적인 통행 특성을 반영할 수 있도록 하였다.

### 2. 연구의 범위 및 방법

보행교통류는 기하구조 및 인구 구성 등에 따라 병목 통행과 피난 통행, 노약자 통행이나 장애인 통행 등으로 세분화할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 용이한 분석을 위해 피난 또는 대피 상황과 같은 특수한 경우를 제외하고 평범한 성인으로 구성되어 일상적인 통행 상태에 있는 보행교통류를 대상으로 분석을 수행하였다. 또한, 방향별 구분에 있어서도 단일 방향 보행교통류가 일방 통행하는 상태에 비해 두 보행교통류가 양방향으로 교행하는 상태(counter-flow)가 더 일반적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일상적인 상황에서 양방향 보행교통류가 교행하는 상태로 한정하여 보행교통류에 대한 편의성 분석을 수행하였다.

하지만 다양한 교통류율 조건에서 서로 다른 보행교통류를 대상으로 각 편의성 지표들을 분석하기에는 관측이 어려운 뿐만 아니라 시간·공간·경제적인 제약이 따르는 문제점이 있다. 그에 따라 본 연구에서는 보행교통류를 묘사할 수 있는 모형식을 통해 시뮬레이션을 수행하여 각 편의성 지표들에 대한 분석을 수행하였다.

## 기존연구 고찰

보행교통류를 재현하기 위한 모형은 주로 이산형 모형과 연속형 모형으로 구분할 수 있다. 이산형 모형은 주어진 공간을 격자 형태의 cell로 구분한 뒤, 각 보행자가 주어진 단위 시간 동안 하나의 cell을 점유한다고 가정하는 모형이다. Burstedde et al.(2001)은 이산형 모형으로 분류할 수 있는 2차원 CA(Cellular Automata) 모형을 통해 보행교통류의 통행 행태를 해석하였다. 2차원 CA 모형은 보행자의 움직임을 단순하게 묘사할 수 있으므로 연산 속도가 빠르면서도 거시적인 통행 특성을 해석하기에도 유용한 것으로 알려져 있다.

한편, Helbing et al.(2000)은 연속형 모형을 활용하여 보행자의 이동 행태를 묘사하고자 '사회적 힘(Social-force) 모형'을 제안한 바 있다. 사회적 힘 모형은 연속형 모형에 속하므로 보행자의 이동 행태를 이산형 모형에 비해 더 정밀하게 묘사할 수 있는 장점이 있는 반면, 연산 과정이 복잡하여 연산 속도가 비교적 느리다고 할 수 있다. 해당

모형은 보행자의 이동이 가속력, 타인과의 반발력, 시설물로부터의 영향에 따라 결정된다고 가정하고 있으며, 이를 활용하여 피난 상황에 놓인 보행교통류의 통행 행태를 묘사하는데 유용한 것으로 알려져 있다.

Lee et al.(2016)은 기존의 사회적 힘 모형을 피난 상황이 아닌 일상 상황에서의 양방향 보행교통류의 교행 상태에 적용하고자, ‘추종 효과’와 ‘회피 효과’를 사회적 힘 모형에 추가 반영하여 모형식을 개발하였다. 이러한 두 효과는 보행교통류가 양방향으로 교행하는 상태에서 보행자간 충돌을 피하며 보다 원활한 통행을 이루는 데 긍정적인 영향을 끼치는 것으로 분석되었다.

그 외에 보행교통류의 통행 특성 및 편의성을 평가하기 위한 연구는 실제 보행교통류를 관측한 뒤 해당 보행교통류의 통행에 영향을 끼치는 것으로 추정되는 요소와 보행자의 통행 행태간의 관계를 분석하는 방법이 주를 이루고 있다.

Kim et al.(2013)은 차로변을 통행하는 보행교통류의 LOS (Level of Service)가 차량교통류의 통행에 영향을 받을 수 있음을 보인 바 있다. 차량교통류의 통행 속도와 교통량에 따라 보행자가 인지하는 LOS에서 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 차로와 인접한 보행교통류에 한정된 결과이긴 하나, 보행교통류의 통행이 그만큼 다양한 요인의 영향을 받아 복잡하게 이루어진다는 점을 보였다고 할 수 있다.

한편, Kim et al.(2014)은 충돌 회피 횟수를 통해 보행교통류의 LOS를 평가할 수 있음을 보인 바 있다. 다양한 보행교통류를 대상으로 보행교통류율과 충돌 회피 횟수간의 상관관계를 분석하여 충돌 회피 횟수를 통해 보행교통류의 LOS를 평가하였다. 충돌 회피 횟수는 보행교통류에서 관측될 수 있는 효과 척도로 보행교통류의 특성을 반영하여 LOS를 평가하는데 유용한 것으로 나타났다.

Atkins(2010)는 런던시의 보행자 편의성을 분석하기 위한 보고서에서 편의성 지표의 종류를 제시하고 각 통행 상태별로 편의성을 정량적으로 비교하였다. 해당 연구에서는 보행자의 편의성을 교통류율과 통행 제약 비율(Restricted Movement)을 통해 정량화하였다. 통행 제약 비율은 전체 보행자 중 속력 또는 경로의 변화, 가벼운 접촉 또는 충돌을 경험한 보행자의 비율을 뜻한다. 이러한 지표들을 기준으로 보행자의 편의성을 5단계로 구분하였으며, 각 단계별로 지표의 값을 제시하였다.

하지만, 기존의 연구는 조사 과정에서 보행자의 미시적 움직임을 추적하기가 난해하므로 보행자의 통행 특성 또는 편의성을 단순화하여 분석하고 있다는 한계를 갖는다. 실제 보행교통류의 통행을 지속적으로 관측하거나 또는 보행자의 통행을 반복해서 실험하기 위해서는 시간·공간·경제적인 제약이 따르기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 보행자의 미시적 움직임을 재현하고 이동 행태를 추적하였다. 이러한 방법을 통해 보행자의 이동 행태를 상세하게 분석할 수 있으므로, 이를 활용하여 보행자의 편의성을 보다 세분화하여 평가하였다.

## 모형식의 구성과 각 계수의 정산

### 1. 모형식의 구성

본 연구에서는 보행교통류의 편의성 지표를 개발하고 분석하기 위한 방법으로 보행교통류 모형식을 통한 시뮬레이션을 수행하였다. Helbing et al.(2000)이 제안한 기존의 사회적 힘 모형은 보행자의 가속력, 타인과의 반발력, 그리고 시설물로부터의 영향을 모두 반영하여 보행자의 이동 행태를 모형화한다. 질량이  $m_i$ 인 보행자  $i$ 의 희망속도( $v_i^0(t)e_i^0(t)$ )는 희망속력( $v_i^0(t)$ )과 희망이동방향( $e_i^0(t)$ )의 영향을 받아 결정된다고 가정하고 있다. 하지만 이러한 희망속도와 현재 속도( $v_i(t)$ )가 서로 다를 경우, 단위 시간( $\tau_i$ ) 동안의 가속력을 Equation(1)의 우측항 중 첫 번째 항목과 같이 연산하여 보행자의 이동을 묘사한다.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} f_{ij} + \sum_W f_{iW} \quad (1)$$

반면, Equation(1)의 우측항 두 번째 항목은 타인과의 반발력( $f_{ij}$ )이 보행자의 통행에 영향을 끼치는 상황을 가정하고 있다. 이러한 반발력은 Equation(2)와 같이 모형화할 수 있는데, 두 보행자의 반지름의 합( $r_{ij}$ )과 상호간의 거리( $d_{ij}$ )의 차이를 반영하여 반발력을 연산한다. 이 때 반발력의 방향은 보행자  $j$ 로부터  $i$ 로 향하는 단위 벡터( $n_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2)$ )에 따라 결정된다고 가정하고 있다.  $A'_i$ 와  $B_i$ 는 모형식의 계수이다.

$$f_{ij} = \{A'_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + \varphi g(r_{ij} - d_{ij})\} n_{ij} + \omega g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij} \tag{2}$$

if  $d_{ij} > r_{ij}$ , then  $g(r_{ij} - d_{ij}) = 0$   
 else, then  $g(r_{ij} - d_{ij}) = (r_{ij} - d_{ij})$

두 보행자가 서로 접촉하였을 경우에는 ‘인체 힘(body force)’와 ‘마찰력(sliding friction)’을 추가 반영할 수 있는데, 이는 각각  $\varphi g(r_{ij} - d_{ij}) n_{ij}$ 와  $\omega g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t t_{ij}$ 로 모형식에 적용할 수 있다. ( $t_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ ,  $\Delta v_{ji}^t = (v_j - v_i) t_{ij}$ ,  $\varphi$ 와  $\omega$ 는 각각 상수항)

Equation(1)의 우측항 세 번째 항목은 시설물로부터의 영향( $f_{iW}$ )을 뜻하며 Equation(3)과 같이 타인과의 반발력과 유사한 방식으로 모형화가 가능하다. 보행자가 보행 통로의 좌우에 위치한 벽 또는 통로 내에 위치한 기둥으로부터 떨어져서 통행하고자 하는 성질을 모형식에 반영할 수 있다.

$$f_{iW} = \{A_i \exp[(r_i - d_{iW})/B_i] + \varphi g(r_i - d_{iW})\} n_{iW} + \omega g(r_i - d_{iW}) (v_i t_{iW}) t_{iW} \tag{3}$$

하지만, 사회적 힘 모형은 본래 개발 목적이 피난 상태에 놓인 보행교통류의 통행 특성을 분석하는데 있다는 한계를 갖는다. 본 연구는 그와 같은 특수한 상황이 아닌 일반적인 상태에서 서로 교행하는 두 보행교통류를 대상으로 하고 있으므로 사회적 힘 모형을 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 이에 대해 Lee et al.(2016)은 사회적 힘 모형에 추종 효과와 회피 효과를 추가하여 양방향 보행교통류의 교행 상태를 해석할 수 있는 모형을 개발하였다. Equation(4)의 추종 효과는 목적지가 같은 보행자를 뒤쫓아 보행하는 특성을 나타내는 반면, Equation(5)의 회피 효과는 목적지가 다른 보행자와의 충돌을 피하기 위한 움직임을 모형화하고 있다.

$$Following\ effect_{ij} = C_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/D_i] \vec{v}_j + C_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/D_i] \overrightarrow{follow}_i^{lorr} \tag{4}$$

$$Evasive\ effect_{ij} = E_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/F_i] \overrightarrow{ref}_j + E_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/F_i] \overrightarrow{evade}_i^{lorr} \tag{5}$$

Figure 1과 같이  $\vec{v}_j$ 와  $\overrightarrow{follow}_i^{lorr}$ 는 각각 다른 보행자의 이동 방향과 위치를 추종하는 성질을 뜻하며,  $\overrightarrow{ref}_j$ 와  $\overrightarrow{evade}_i^{lorr}$ 는 각각 다른 보행자의 이동 방향과 위치에 따라 회피하고자 하는 성질을 뜻한다. 또한  $C_i$ ,  $D_i$ ,  $E_i$ 와  $F_i$ 는 정산이 필요한 계수이다. 본 연구에서는 정산 과정에서 각 효과 별로 서로 다른 계수를 사용하도록 기존 Lee et al.(2016)의 모형과는 달리 Equation(4),(5)와 같이 계수의 종류와 값을 수정하여 분석하였다.  $C_i$ 와  $D_i$ 는 각각 추종 효과의 크기( $N$ )와 추종 효과의 적용 거리( $m$ )를 나타내며,  $E_i$ 와  $F_i$ 는 각각 회피 효과의 크기( $N$ )와 회피 효과의 적용 거리( $m$ )를 나타낸다.

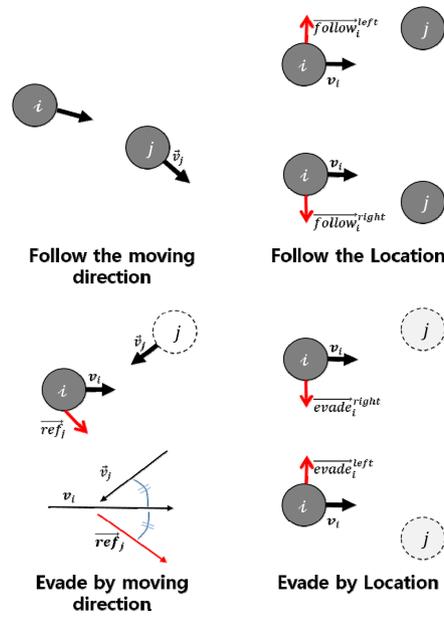


Figure 1. Follow effect and Evade effect

$$\begin{aligned}
 m_i \frac{dv_i}{dt} = & m_i \frac{v_i^0(t)e_i^0(t) - v_i(t)}{\tau_i} \\
 & + \sum_{j(\neq i)} \{f_{ij} + \textit{Following effect}_{ij} + \textit{Evasive effect}_{ij}\} \\
 & + \sum_W f_{iW}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

본 연구는 새로운 보행교통류 모형을 개발하는 것을 목표로 하고 있지는 않으며, 양방향 보행교통류의 교행 상태를 묘사하는데 용이한 모형을 활용하여 보행교통류의 편의성 지표를 제시하고 분석하는 것을 목표로 하고 있다. 이러한 모형식을 활용하면 다양한 상황에 놓인 보행교통류를 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 편의성을 분석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 사회적 힘 모형이 아니라, 양방향 교행 상태를 설명하는데 유용한 Lee et al.(2016)의 모형을 Equation(6)과 같이 활용하여 편의성 지표에 대한 분석을 수행하였다.

## 2. 각 계수의 정산

Lee et al.(2016)은 보행교통류의 최대 밀도가 낮고 통행이 원활한 상황을 대상으로 하여 모형식의 계수를 정산하였다. 하지만 이러한 경우 보행교통류의 통행량과 밀도가 다양하게 존재하는 상황에 대한 분석을 수행하는데 있어서는 한계를 갖는다. 특히, 보행교통류의 편의성에 대한 분석을 수행하기 위해서는 다양한 교통류율을 대상으로 분석이 이루어져야 한다.

따라서 본 연구에서는 최대 밀도가 비교적 높은 상황을 기준으로 모형식의 계수를 정산하였다. 일반적으로 보행자의 통행이 계속됨에 따라 초기에는 밀도가 낮고 원활한 통행이 이루어지다, 점차 밀도가 높아지게 되면 정체가 발생하게 된다. 하지만 경우에 따라 시간이 지나며 혼잡이 해소되어 다시 밀도가 낮은 상태로 되돌아가는 것도 가능하다. 본 연구에서는 이와 같은 사례를 대상으로 모형식의 계수를 정산하여 다양한 교통류율 조건을 반영할 수 있도록 하였다.

정산과정에는 Zhang et al.(2012)의 실험자료<sup>1)</sup>를 활용하였다. Zhang et al.(2012)은 2009년 독일 뒤셀도르프에

1) 해당 자료는 <http://www.asim.uni-wuppertal.de/database/own-experiments/corridor/2d-bidirectional.html>에 공개되어 자유롭게 이이 가능함을 밝힙니다.

서 폭 3.6m, 길이 8m의 보행 통로를 대상으로 양방향 보행교통류의 통행을 여러 번 실험한 뒤, 각 보행자의 궤적을 기록하여 분석한 바 있다. 이 때, 보행통로의 좌우로 각각 길이 4m의 여유 공간을 두어 진입 초기에 발생할 수 있는 혼란을 배제하고 실험을 수행하였다.

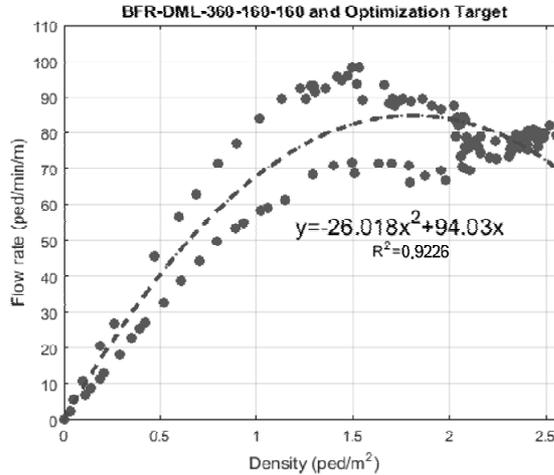


Figure 2. Density-flow rate of calibration data

실험 참가자는 총 350명으로 대부분이 학생으로 구성되었으며, 1인당 50€/일의 보수를 지급받고 실험에 참가하였다. 실험 참가자의 평균나이는  $25 \pm 5.7$ 세이며 평균키는  $1.79 \pm 0.09$ m로 이루어져 있다. 실험결과는 보행자의 ID, 단위시간(0.0625초), 그리고 보행자의 x, y, z좌표로 정리되어 공개되어 있다. 본 연구에서는 이러한 실험자료들 중 Figure 2와 같이 최대 밀도가 비교적 높은 자료인 ‘BFR-DML-360-160-160’를 대상으로 분석이 이루어졌다.

정산의 목표는 실험 자료의 밀도-교통류율 관계와 보행교통류 시뮬레이션을 통해 도출된 밀도-교통류율 관계가 유사한 결과를 도출하는 것으로 설정하였다. 두 밀도-교통류율 관계가 서로 유사하다면 주어진 밀도 영역에서 기대할 수 있는 교통류율이 서로 유사하므로 시뮬레이션을 통한 분석이 현실을 반영하고 있다고 할 수 있다. 이를 위해 본 연구의 결과와 실험 자료의 밀도-교통류율 회귀식간의 잔차제곱합(SSE)이 최소화되도록 계수의 정산을 수행하였다.

정산 과정은 유전 알고리즘을 통해 이루어졌다. 정산이 필요한 총 5개의 계수( $A'_i, C_i, D_i, E_i, F_i$ )를 염색체로 하여, SSE를 최소화하도록 유전 알고리즘이 활용되었다. 이 때, 유전 알고리즘의 해집단은 30개, 변이율은 10%로 설정하였으며 Ranking 선택법을 통해 상위 60%의 해집단이 다음 세대까지 생존할 수 있도록 하였다. 그리고 유전 알고리즘을 80세대 반복하여 도출된 결과를 통해 계수를 정산하였다.

각 계수의 범위는  $A'_i$ 가 1,500-2,000,  $C_i$ 와  $E_i$ 가 0-500,  $D_i$ 와  $F_i$ 가 0-1 이내에서 정산이 되도록 하였다. 반발력의 크기( $N$ )에 관한 계수인  $A'_i$ 의 경우 그 값이 1,500보다 작아질 경우 보행자간 반발력이 너무 작아져 서로 접촉하는 횟수가 증가하기 때문에 이와 같이 범위를 설정하였다. 마찬가지로 각 효과의 크기( $N$ )에 관한 계수인  $C_i$ 와  $E_i$ 는  $A'_i$ 의 정산 결과가 최대  $500N$ 까지 변화할 수 있으므로 그만큼을 상쇄하기 위해 0-500을 정산 범위로 설정하였다. 각 효과의 적용 거리( $m$ )에 관한 계수인  $D_i$ 와  $F_i$ 는 기존 모형에서 반발력의 적용 거리가 0.08m로 설정되어 있으므로 최대 12.5배의 범위 이내에서 정산하여 계수를 추정하는 것으로도 충분하다고 판단하여 정산범위를 0-1 이내로 정하였다. 이 때,  $A'_i, C_i, E_i$ 는 정수 단위에서 반올림하였으며,  $D_i, F_i$ 는 소수점 셋째 자리에서 반올림한 값을 활용하였다.

Figure 3에 따르면 유전 알고리즘의 반복 횟수가 많아지며 점차 SSE가 작아지는 것으로 나타났다. 이는 다시 말해 본 연구에서 정산한 계수의 값이 실험자료와 유사한 결과를 도출할 가능성이 그만큼 높아졌다는 뜻이며, 본 연구에서 활용한 모형이 실제 보행교통류의 통행을 원활히 묘사한다고 판단할 수 있다.

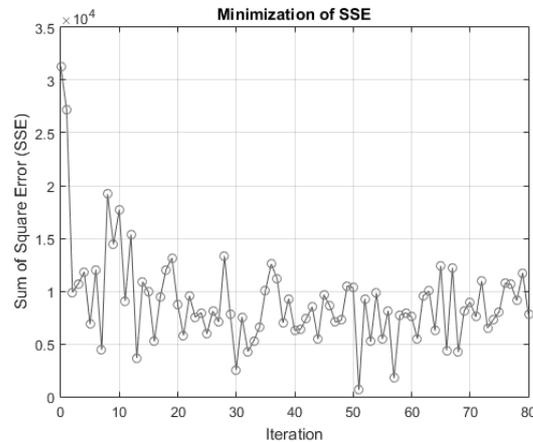


Figure 3. Calibration by genetic algorithm

모형식의 계수 정산 결과는 Table 1과 같다. 각 계수는 반발력의 크기 및 추종 효과, 회피 효과의 크기와 적용거리를 대표한다. 또한, 실제 보행교통류를 대상으로 정산되었으므로 본 연구에서 활용한 모형식이 보행자의 통행 행태를 용이하게 재현하도록 한다.

각 효과의 적용 거리에 관한 계수인  $D_i$ 와  $F_i$ 를 비교할 경우, 추종 효과가 적용되는 거리( $D_i$ )가 회피 효과의 적용 거리( $F_i$ )보다 더 짧은 것으로 나타났다. 이는 회피 효과의 경우 마주오는 보행자가 비교적 멀리 위치해 있는 반면, 추종 효과의 경우 추종의 대상이 되는 보행자가 비교적 가까이 있기 때문인 것으로 추정된다.

Table 1. Calibration Result of each coefficient

	Coefficient	Calibration Result (unit)
Repulsive	$A'_i$	1,995 (N)
Following	$C_i$	270 (N)
	$D_i$	0.08 (m)
Evasive	$E_i$	114 (N)
	$F_i$	0.25 (m)

또한, 각 효과의 크기에 관한 계수인  $C_i$ 와  $E_i$ 를 비교할 경우, 추종 효과가 적용되는 크기( $C_i$ )가 회피 효과의 적용 크기( $E_i$ )보다 더 큰 것으로 나타났다. 이는 회피 효과의 경우 비교적 먼 거리에서부터 작용하므로 그 힘의 크기는 상대적으로 작은 반면, 추종 효과는 비교적 가까이에 있는 보행자의 움직임에 즉각적으로 반응하고자 그 힘의 크기가 상대적으로 크게 정산된 것으로 추정할 수 있다.

## 시뮬레이션 및 편의성 지표 분석

### 1. 시뮬레이션의 수행

본 연구에서는 Zhang et al.(2012)의 실험 결과와 동일한 기하구조인 길이 8m, 폭 3.6m의 보행통로를 대상으로 가상의 보행자를 통행시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때, 실험 조건과 동일하게 좌우에 각각 4m 길이의 여유 공간을 두었으며, 동일한 방향별 보행자 수와 유입교통류율로 양방향 통행이 이루어지도록 하였다. 시뮬레이션은 MATLAB을 통해 이루어졌으며, 시뮬레이션 예시는 Figure 4와 같다.

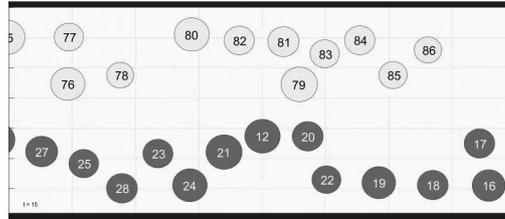


Figure 4. Simulation sample

시뮬레이션의 신뢰성을 분석하기 위해 실험 결과와 시뮬레이션 결과간의 비교가 이루어졌다. 본 연구에서는 실험 결과와 동일한 조건에서 모형식의 각 계수들을 정산하였으며, 정산이 이루어진 계수들을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 따라서 시뮬레이션 결과와 실험 결과간의 통행 특성이 유사하게 분석된다면 본 연구에서 활용한 시뮬레이션이 타당하다고 할 수 있다.

두 결과간의 유사도 비교는 보행교통류의 서비스수준을 판단하는 효과적도인 교통류율, 밀도, 그리고 속도를 기준으로 분석되었다. Table 2에 따르면 교통류율과 밀도의 경우 실수범위에서 두 결과간 차이를 보였으며 정확하게 일치하지는 않는 것으로 나타났다. 하지만 도로용량편람(2013)에서 제시하는 서비스 수준을 기준으로 비교할 때, 두 결과는 모두 동일한 서비스 수준인 교통류율 LOS D 또는 밀도 LOS E에 속하는 것으로 나타났다. 속도에 있어서는 두 결과가 실수 범위에서 비교적 적은 차이를 보였으며, 모두 LOS E에 속하는 것으로 분석되었다.

Table 2. Validation of Simulation Result

	Flow rate (ped/min/m)	Density (ped/m <sup>2</sup> )	Velocity (m/s)
Simulation Result	55.08 (LOS D)	1.46 (LOS E)	0.76 (LOS E)
Experiment Result	64.55 (LOS D)	1.52 (LOS E)	0.75 (LOS E)

이러한 결과를 볼 때, 본 연구에서 활용한 시뮬레이션이 실제 현실에서의 보행교통류를 재현하고 있다고 할 수 있다. 이는 유전 알고리즘을 통해 계수를 정산하였기 때문이라 할 수 있다. 실제 보행교통류의 밀도-교통류율 관계를 기준으로 정산이 이루어졌기 때문에 정산된 계수를 활용한 모형이 실제 보행교통류의 통행 행태를 잘 묘사할 수 있는 것으로 판단된다.

다만, 실험결과와 시뮬레이션 결과 모두 밀도와 속도는 LOS E로 분석된 반면, 교통류율은 LOS D로 분석되었다는 점에서 한계를 갖는다. 이러한 차이는 실험 참가자의 대상이 한정적이었기 때문에 그 영향을 받은 것으로 추정된다.

Zhang et al.(2012)의 실험은 25 ± 5.7세의 젊은 학생을 대상으로 이루어져 비교적 신체조건이 우수한 보행자를 대상으로 하고 있다. 이러한 보행자 구성은 노약자 및 중장년층의 보행자가 섞여있는 일반적인 보행교통류의 보행자 구성과는 차이가 있다. 또한, 실험은 독일인을 대상으로 수행된 반면, 본 연구에서 활용한 도로용량편람(2013)의 LOS 분석은 한국인을 기준으로 삼고 있으므로 그에 따른 신체적 차이가 영향을 끼칠 수 있다. 이러한 이유로 인해 실험 결과에서 밀도, 속도와 비교하여 교통류율의 LOS가 다르게 분석되었으며, 그러한 실험 결과가 본 연구의 시뮬레이션에도 반영되었다고 할 수 있다.

## 2. 편의성 지표의 개발

앞서 언급했듯이 보행교통류는 타 교통류와는 달리 2차원적인 움직임을 보이며, 자유로운 방향전환 능력을 통해 이동하는 등 미시적인 움직임을 보인다. 이러한 미시적 특성을 각 서비스수준에 따라 단계별로 분석하여 정량적으로 제시할 수 있다면, 보행교통류의 편의성을 평가하기 위한 지표로서 유용하게 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 보행자의 미시적인 이동 행태를 반영하기 위해 ‘경로 이탈도( $\theta$ )’, ‘속도의 변화 크기( $\|a\|$ )’, 그리고 ‘충돌 횟수(Collision)’라는 총 3개의 지표를 통해 편의성을 세분화하여 제시하였다. 각각의 지표들은 보행자의 미시적인 움직임에 해당하며, 보행자가 통행 과정에서 인지할 수 있는 편의성을 정량화하는 역할을 수행한다.

경로 이탈도( $\theta$ )는 보행자가 직선으로 통행하는 것에 비해 얼마나 큰 각도로 경로를 벗어나 통행하였는지를 보여 준다. 직선 형태의 보행통로에서는 일직선으로 통행하는 것이 일반적으로 최단 거리로 통행하는 것이라 할 수 있다. 이러한 최단 거리 통행을 벗어나 일직선으로 통행하지 못한다면, 벗어난 각도에 따라 보행교통류의 통행이 차이를 보일 것이므로 편의성을 판단하기 위한 지표로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 보행통로에서 직선 주행하는 상태를 통행 각도가  $0^\circ$  인 상태로 정의한 뒤, 그보다 큰 각도로 좌우로 벗어나 통행한 상태를 경로를 이탈한 것으로 정의하였다. 이 때, 경로 이탈도는 보행자의 속도 벡터와 직선 주행시의 벡터 ( $0^\circ$  방향)가 이루는 각도(단위: 도)를 통해 정량화 할 수 있다.

속도의 변화 크기( $\|a\|$ )는 보행자의 속도가 어느 정도 크기로 변화하였는지를 나타낸다. 만일 보행자의 속력이 자주 변화하여 가다-서다를 반복하게 될 경우 속도의 변화 크기가 커지게 된다. 또한, 속도의 방향이 크게 변화할 경우에도 속도의 변화 크기가 크게 영향을 받게 된다. 속력이 자주 변화하며 진행 경로도 큰 각도로 변화할수록 보행자는 불안정한 통행을 하게 될 것이며, 그렇지 않을 경우 더 안정적인 통행을 하였다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 속도의 변화 크기를 통해 보행교통류가 얼마나 불안정한 상태에서 통행하였는지 평가할 수 있다.

마지막으로 충돌 횟수(Collision)는 보행자가 통행하며 반대 방향 보행자와 충돌한 횟수를 나타낸다. 보행교통류는 차량 및 철도 교통류와 같은 다른 교통류와는 달리 상호간 충돌에 더 관대한 경향이 있다. 치명적인 부상을 당할 염려가 없는 경우에 한해 보행자간 가벼운 접촉 수준의 충돌은 일반적으로 용인 가능하다 할 수 있기 때문이다. 하지만 이러한 충돌 횟수의 경우에도 교통류율이 변화할수록 그 값이 바뀔 수 있으므로 보행교통류의 편의성을 평가하기 위한 지표로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 반대 방향 보행자와의 거리가 0.1m 이하로 근접한 경우를 충돌이 발생한 것으로 정의하였다. 이는 도로용량편람(2013)에서 정의하는 여유폭을 포함한 한국인의 인체면적이  $0.2m^2$  이므로 비교적 합리적인 가정이라 판단하였다.

본 연구에서 제시하는 세 개의 편의성 지표들은 보행교통류만의 미시적인 이동 행태를 반영하기 위해 제시되었다. 보행자는 경우에 따라 직선 주행하지 않고 정해진 경로를 다소간 벗어난 상태에서도 움직임을 계속할 수 있다. 이러한 성질을 보행교통류를 평가하는 과정에 반영하기 위해 경로 이탈도라는 개념을 제시하였다. 또한 타 교통류에 비해 속도의 변화가 더 자주 발생할 수 있으므로 속도의 변화 크기를 통해서도 보행교통류의 통행을 평가할 수 있다. 마지막으로 통행 중 상호간의 충돌에 타 교통류보다 더 관대하여 충돌이 발생할 수 있다는 특성에 기인하여 충돌 횟수라는 개념을 보행교통류의 편의성 지표로 제시하였다.

이러한 지표들은 보행자의 움직임 중에서도 미시적인 성질을 대표하므로 실제 보행교통류를 관측하여 자료를 습득·분석하는 방법에는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 보행교통류를 재현하였으며, 이를 통해 각 편의성 지표들에 대한 분석을 수행하였다.

### 3. 편의성 지표에 대한 분석

계수의 정산 및 검증이 이루어진 모형을 활용하여 교통류율의 변화에 따른 각 편의성 지표들의 결과를 분석하였다. 교통류율을 기준으로 삼은 이유는 이를 통해 보행 통로의 용량 상태를 판단할 수 있는 등 보행교통류의 통행 상태 및 혼잡의 정도를 판단하기에 용이하였기 때문이다. 반면, 보행교통류의 통행 속도는 보행자의 미시적 움직임의 영향을 받으므로 본 연구에서 제안한 편의성 지표들과 상관관계를 가질 수 있어서 기준으로 삼지 않았다.

Figure 5와 같이 교통류율이 매우 낮은 단계에서부터 용량 상태까지 22단계로 교통류율을 분류한 뒤, 각 교통류율 단계별로 시뮬레이션을 10회씩 실시하여 편의성 지표들의 결과를 연산하였다. 각 편의성 지표들은 교통류율과의 관계를 보다 명확히 확인하기 위해 회귀식을 통한 분석이 이루어졌다.

교통류율이 비교적 낮은 경우, 그 값이 증가함에 따라 경로 이탈도와 속도의 변화 크기, 충돌 횟수 모두 증가하는 경향을 보였다. 다시 말해 혼잡이 점차 심화됨에 따라 보행자가 정해진 경로를 벗어나 통행하게 되며, 가다-서다를 반복하여 더 불안정한 통행을 하고, 맞은 편 보행자와 더 자주 충돌하게 된다고 판단할 수 있다.

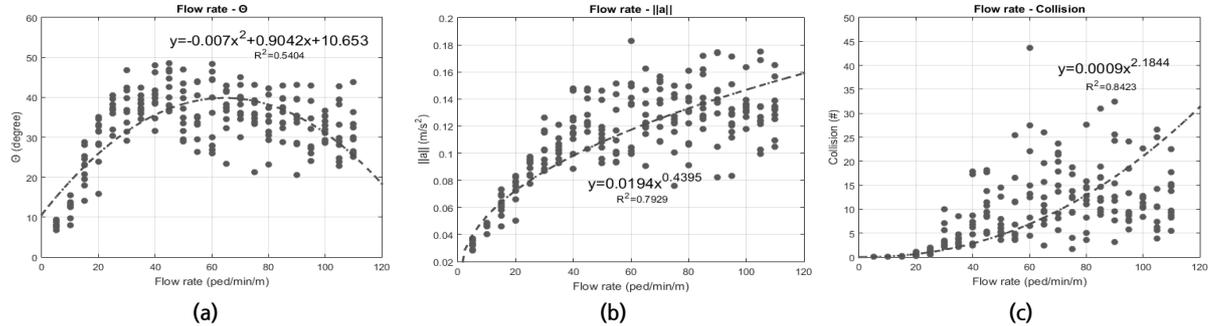


Figure 5. Flow rate-pedestrian comfort relationship

다만, 경로 이탈도( $\theta$ )의 경우 교통류율이 약 40인/분/m보다 높을 경우 증가 추세가 감소 추세로 전환되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 혼잡이 가중되며 보행자간의 밀집이 생기기 때문인 것으로 판단된다. 교통류율이 비교적 낮은 상태에서는 보행자가 경로를 이탈하여 다른 방향으로 이동할 수 있으므로 혼잡이 증가함에 따라 경로 이탈도도 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 교통류율이 비교적 높은 경우 보행 통로에 단위 시간 동안 더 많은 보행자가 통행함에 따라 보행자간 밀집이 생기게 된다. 이러한 현상은 결과적으로 보행자가 방향을 전환할 수 있는 여유공간을 감소시켜 방향 전환을 제한하게 되며 경로 이탈도를 감소시키는 것으로 나타났다.

그러나 속도의 변화 크기( $\|a\|$ )와 충돌 횟수(Collision)의 경우에는 교통류율이 증가함에 따라 각 편의성 지표의 값이 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 다시 말해 혼잡이 증가함에 따라 보행자가 가다-서다를 더 자주 반복하거나 또는 더 많은 보행자와의 충돌을 경험하게 된다고 할 수 있다.

각 편의성 지표들을 대상으로 회귀 분석을 수행하여 결정 계수( $R^2$ )를 최대화하는 회귀식을 분석한 결과, 회귀식의 유형 및 계수에 있어서 각 편의성 지표들은 서로 차이를 보였다. 먼저 경로 이탈도는 증가와 감소 추세가 모두 관측될 수 있는 이차방정식의 회귀식을 갖는 것으로 나타났다. 그에 반해 속도의 변화 크기와 충돌횟수의 회귀식은 거듭제곱식의 형태를 띠며 교통류율이 증가함에 따라 지표의 값도 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

하지만, 속도의 변화 크기와 충돌횟수는 거듭제곱 회귀식의 지수에서 서로 차이가 있는 것으로 나타났다. 속도의 변화 크기는 거듭제곱식의 지수가 1보다 작아 교통류율이 증가할수록 그 값의 변화가 점차 작아지는 것을 알 수 있다. 반면, 충돌 횟수의 경우 거듭제곱식의 지수가 1보다 크기 때문에 교통류율의 증가에 따라 지표의 값이 변화하는 크기가 점차 커지는 것으로 나타났다.

각 편의성 지표가 교통류율의 변화에 따라 서로 다른 형태를 보이는 것을 볼 때, 각각의 편의성 지표들은 기존의 LOS 효과척도 등이 반영하고 있지 않은 보행자의 이동 행태를 반영하고 있다고 할 수 있다. 그에 따라 본 연구에서는 각 편의성 지표들이 보행자의 미시적 이동행태를 반영하고 있다고 판단하였으며, 기존 LOS 효과척도와 더불어 보행교통류의 통행을 평가할 수 있는 보조 지표로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 결론

본 연구에서는 보행교통류의 통행 특성을 반영한 편의성 지표를 제시하였다. 보행교통류는 다른 교통류와는 차이를 보이는 고유한 통행 특성을 갖고 있으므로 이를 해석할 수 있는 지표를 통해 보행자의 편의성을 보다 명확히 평가할 수 있다.

분석 결과에 따르면 본 연구에서 제시한 편의성 지표들은 교통류율에 따라 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 이를 통해 보행교통류의 편의성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다. 각 편의성 지표들이 교통류율에 따라 변화하는 추세에 있어서도 서로 차이가 있는 것으로 나타나, 보행자의 편의성을 다양한 관점에서 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

하지만, 본 연구에서는 이러한 결과를 시뮬레이션 분석을 통해 도출했다는 한계를 갖고 있다. 모형식이 실제 보행자의 통행을 재현할 수 있도록 계수를 정산하였으므로 분석 결과가 합리적이라 할 수 있다. 하지만 다른 보행시뮬레이션을 활용할 경우 본 연구와 다른 결과를 도출할 수도 있는 한계를 갖는다. 이는 시뮬레이션의 현실 재현 능력에 따라 차이를 보일 것이므로 보행교통류의 편의성을 보다 정확히 평가하기 위해서는 다양한 조건에 놓인 실제 보행교통류를 대상으로 각 편의성 지표를 분석한 뒤, 이를 토대로 시뮬레이션의 현실성을 보완할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by the Research Grant from Yonsei University through the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government(Project No.: 16RTRP-B067918-04).

## REFERENCES

- Atkins (2010), Pedestrian Comfort Guidance for London-Guidance Document, Transport for London
- Benekohal R. F., Treiterer J. (1988), CARSIM: Car-following Model for Simulation of Traffic in Normal Stop-and-go Conditions, Transportation Research Record, 1194, 99-111.
- Burstedde C., Klauck K., Schadschneider A., Zittarz J. (2001), Simulation of Pedestrian Dynamics Using a Two-dimensional Cellular Automaton, Physica A, 295, 507-525.
- Gazis D. C., Herman R., Potts R. B. (1959), Car-following Theory of Steady-state Traffic Flow, Operations Research, 7(4), 499-505.
- Helbing D., Farkas I., Vicsek T. (2000), Simulating Dynamical Features of Escape Panic, Nature, 407, 487-490.
- Kim S., Choi J., Kim S. (2013), Roadside Walking Environments and Major Factors Affecting Pedestrian Level of Service, International Journal of Urban Sciences, 17(3), 304-315.
- Kim S., Choi J., Kim S., Tay R. (2014), Personal Space, Evasive Movement and Pedestrian Level of Service, Journal of Advanced Transportation, 48, 673-684.
- Lee J., Kim T., Chung J.H., Kim J. (2016) Modeling Lane Formation in Pedestrian Counter Flow and Its Effect on Capacity, KSCE Journal of Civil Engineering, 20(3).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, Korea (2013) Korean Highway Capacity Manual, 618 (in Korean).
- Newell G. F. (2002), A Simplified Car-following Theory: A Lower Order Model, Transportation Research B, 36(3), 195-205.
- Zhang J., Klingsch W., Schadschneider A., Seyfried A. (2012), Ordering in Bidirectional Pedestrian Flows and Its Influence on the Fundamental Diagram, Journal of Statistical Mechanics, 2012(02), P02002.