



이산요소법을 이용한 보행흐름 해석

박 준 영^{*1}

STUDY FOR PEDESTRIAN FLOW USING DISCRETE ELEMENT METHOD

Junyoung Park^{*1}

Research about pedestrian flow in the view of sociology and psychology has been studied for more than a few decade. Due to the advance of computational facility, computational study for pedestrian flow extended to the field of architecture and traffic engineering. However, there is few study for the extremely high dense condition where pedestrian flow is driven by contact force among pedestrian. In this research, we analyze highly dense pedestrian flow using discrete element method

Key Words : 보행 흐름(Pedestrian Flow), 과밀도 보행(Pedestrian Conjection), 분체기술(Particle Technology), 이산요소법(Discrete Element Method)

1. 서 론

보행 흐름에 대해서는 사회학이나 심리학적인 측면에서의 연구가 이전부터 행해져 왔지만, 최근 컴퓨터의 발달에 의해서 군집보행의 시뮬레이션이 가능하게 되어, 건축 공학이나 교통 공학의 분야에서 행해지고 있다. 그러나, 인간사이에서 발생하는 접촉력의 계산 등의 물리적인 측면으로부터의 해석은 거의 되어지지 않고 있다. 따라서 본 연구는 고밀도 상태에서의 보행자 군집의 물리적 해석을 실시한다.

군집 보행의 계산 모델로서는, 군집을 연속체적인 유체로 간주하는 유체 모델과 개개의 보행자를 1개의 입자로 간주해 운동 방정식을 적용시켜 개개의 입자의 운동의 집합으로서 군집 운동을 요구하는 입자류모델을 들 수 있다. 본연구의 군집보행의 계산에서는 고밀도 상태를 대상으로 하고 있으므로, 개개의 보행자의 심리적인 요소나, 어른과 아이의 인간의 크기의 차이 등의 성질을 고려하는데 있어서는 입자흐름 모델이 유리하기 때문에 입자류 모델을 이용하여 해석을 행한다. 또한, 최근 입자흐름을 이용한 해석이 많이 행하여지고 있다[1].

본 연구에서는 비교적 간단한 직선 통로에서 왕복통행을 하는 군집 보행을 입자흐름을 이용하여 해석 한다. 특히, 본 연구에서는 인간끼리의 접촉을 피할 수 없을 만큼 높은 고밀도 상태에서의 군집 보행을 취급하므로, 역학적 요소와 심리적 요소를 동시에 고려할 필요가 있다. 이를 위해서, 분말등과 같은 입자 물질의 운동 해석을 위해서 넓게 이용되고 있는 이산요소법(Discrete Element Method: DEM)[2]에 심리적 요소를 첨가한 모델을 이용하였다.

2. 보행자 모델

2.1 운동방정식의 수정

이산요소법 에서는, 물체를 Spring-Dashpot-Mass System으로 나타내고, 접촉하는 물체의 법선 방향과 접선 방향에 있어서의 변형량을 스프링의 압축량과 동일시하여 계를 표현한다. 분체에 관한 이산요소법에서 뉴턴의 운동방정식은 아래와 같이 나타낸다.

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{\vec{f}}{m} \quad (1)$$

분체 등의 입자 운동에 관한 뉴턴의 운동 방정식을 수정하여 보행자의 심리적 요소를 고려한 운동 방정식을 아래와 같

1 정회원, 금오공과대학교 기계공학부

* TEL : (054) 478-7377

* E-mail: pcello@kumoh.ac.kr



은 식을 이용한다.

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{\vec{f}_a}{m} + \frac{\vec{f}}{m} \quad (2)$$

위 식에서 \vec{f}_a 는 보행자의 실제의 속도를 보행자의 회망속도에 근접하게 하는 힘이고, 가속력이라고 한다. \vec{f}_a 는 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} f_{ax} \\ f_{ay} \end{pmatrix} = c \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_x v_x^* - v_{ox} \\ \alpha_y v_y^* - v_{oy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

위 식에서 첨자 y는 보행자의 보행 회망 방향의 성분, x는 회망방향의 횡방향 성분을 의미한다. θ 는 보행자가 타인을 피하는 심리적 효과도 포함한 실제의 진행 방향을 의미하며, y방향에서 측정된 각도로 한다. 첨자 y는 진행 방향 성분, x는 진행 방향에 대한 수직 방향 성분을 의미한다. v_0 는 이전 시각에서의 속도이고, v^* 는 보행자가 가지는 보행 의욕에 기인하는 속도이며, 보행 의욕 속도라고 부른다. 보행 의욕이 있어도, 상황에 따르고 보행 의욕 속도에 도달하는 정도가 다르기 때문에 계수 α 를 이용했다. 계수 α 는 보행 의욕 계수라고 부른다. c 는 실험에 의해 결정되는 정수이다.

식 (3)을 식 (2)에 대입하면, 아래와 같은 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{c \{ (\alpha_x v_x^* - v_{0x}) \cos \theta \}}{m} \\ &+ \frac{c \{ (\alpha_y v_y^* - v_{0y}) \sin \theta \}}{m} + \frac{f_x}{m} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dt^2} &= \frac{c \{ -(\alpha_x v_x^* - v_{0x}) \sin \theta \}}{m} \\ &+ \frac{c \{ (\alpha_y v_y^* - v_{0y}) \cos \theta \}}{m} + \frac{f_y}{m} \end{aligned} \quad (5)$$

보행 의욕속도 v^* 의 x, y 성분의 값은 아래와 같이 부여한다.

$$v_x^* = 0.0 \quad (6)$$

$$v_y^* = 1.4 + v_{fluc}^* \quad (7)$$

여기서 v_{fluc}^*

는 속도의 속도의 분포를 나타내며, $-0.2m/s$ 에서 $+0.2m/s$ 사이의 값을 정규분포에 따라서 부여한다. 이것에 의해서 실제 통로에서의 보행자들과 같이 보행자간의 속도차이를 부여하였다. 보행 의욕계수 α 의 x, y성분의 기본값은 아래와 같이 부여한다.

$$\alpha_x = 0, \quad \alpha_y = 1 \quad (8)$$

이러한 α_y 의 기본값은 실제 보행자가 처한 상황에 따르는 회피행동에 따라서 변화한다.

2.2 회피 행동

보행자의 회피 행동은 진행각도 θ 와 보행의욕 계수 α 의 값에 의해 나타낸다.

2.2.1 측면 보행자와 반대방향 보행자의 회피

보행자 좌우의 둘 중에 한쪽에 다른 보행자가 존재하여, 다른 편의 공간이 비어 있는 경우는, 측면의 보행자로부터 멀어지려 하기 때문에 조정되어진 θ 를 아래와 같이 부여한다.

$$\theta = \pm \frac{\pi}{4} \quad (9)$$

또한 전방에 반대방향에서 접근하는 보행자가 존재하는 경우는, 그쪽과 반대편의 측면으로 회피하려고 하기 때문에 마찬가지로 조정된 θ 를 아래와 같이 부여한다.

$$\theta = \pm \frac{\pi}{3} \quad (10)$$

2.2.2 같은 방향 보행자의 뒤쫓기

밀도가 큰 반대방향 보행자 군집을 피하도록 하여, 같은 방향으로 나아가는 군집의 뒤를 쫓도록 한다. 보행자의 전방의 일정한 영역에서 반대방향 보행자의 밀도가 일정치를 넘으면, 반대방향 보행자의 밀도가 최소가 되는 영역의 방향으로 나아가도록 한다.

2.2.3 같은 방향 보행자의 앞지르기

보행자의 보행 의욕 속도와 같은 방향으로 나아가는 전방의 보행자의 속도와와 상대속도가 일정치 보다 작은 경우에는, 전방의 보행자를 추월하기 위해서 좌우로 진로를 변경하도록 θ 를 부여한다. 또, 좌우의 보행자의 밀도가 일정치 보다 큰 경우에는 진로를 변경하지 않고 속도를 떨어뜨려, 전방의 보행자의 속도에 맞추는 경향을 고려하여,

Table 1 Parameters of pedestrian contact

Normal spring constant [N/m]	2.0×10^5
Tangential spring constant [N/m]	2.0×10^5
Coefficient of restitution	0.1
Coefficient of friction	0.1
Cell size [m]	0.4
Simulation time step	1.0×10^{-3}

Table 2 Parameters of pedestrian model

	Adult	Child
Model size [m]	0.2	0.15
Mass [kg]	60	26
Ratio [%]	80	20

$$\alpha_y = \frac{v_{yj}}{v_y^*} \quad (11)$$

로 부여한다. 위 식에서 v_{yj} 는 전방 보행자의 y방향의 속도를 나타낸다.

2.2.4 감속행동

보행자는 전방의 보행자와 일정한 간격을 유지할수 없게 되면 감속한다. 이 일정한 간격을 감속거리라고 하고, 아래와 같이 나타낸다.

$$d_{dec} = \begin{cases} d_b - \frac{d_b - d_l}{\rho_l} & (\rho \leq \rho_{limit}) \\ d_l & (\rho > \rho_{limit}) \end{cases} \quad (12)$$

보행자와 전방의 보행자의 거리가 위의 감속거리 이하로 되고, $\Theta=0$ 의 경우에는 $\alpha=0$ 으로 감속한다.

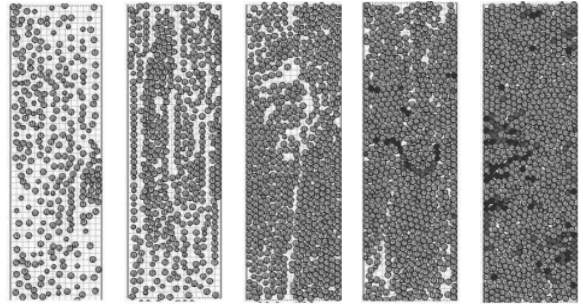
2.3 계산 조건

각각의 보행자 모델과 물리적 충돌에 관한 계산조건은 Table 1과 2에 나타내었다.

시뮬레이션 영역은 길이 20 m, 폭 6m 의 직선 통로로 하고, 양쪽방향에서 같은 수의 보행자들을 유동시켰다. 또, 보행자를 어른과 아이를 설정하여, 각각 다른 지름과 중량을 부여하였다. 보행자수는 50에서 900까지 변화시켜가면서 계산하였다.

3. 결과와 고찰

Fig. 1에 나타낸 것처럼, 주어진 시뮬레이션 영역에서, 900



(a)300p (b)500p (c)700p (d)800p (e)900p

Fig. 1 Flow pattern at 80sec

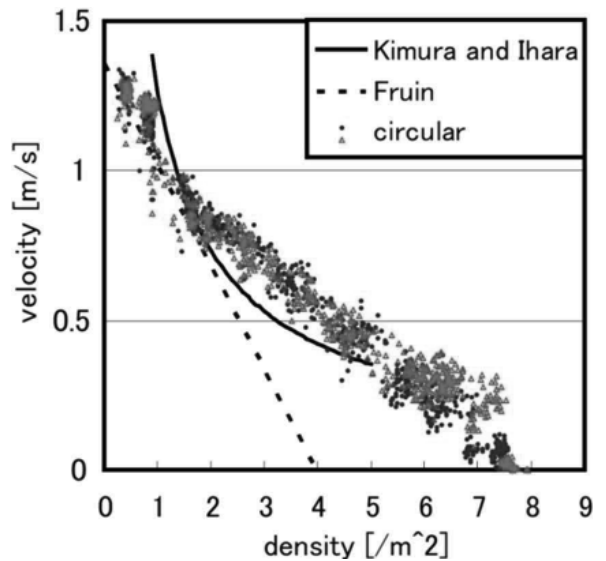


Fig. 2 Relationship between density and pedestrian velocity

명 이상이 되면 상당한 체증이 일어나고 정상적인 통행이 불가능 해지지만, 800명에서는 겨우 양방향의 흐름이 형성되는 것을 보여주고 있다. 그림 중 색이 진한 보행자와 옅은 보행자는 각각 위 방향과 아래방향으로 향하고 있음을 나타낸다.

군집 밀도와 평균 속도의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 예상되는 것처럼, 밀도가 증가할 수록실제적인 보행 속도가 감소하는 것을 보여주고 있다. 그림중의 곡선은 Kimura-Ihara[3]에 의해서, 직선은 Fruin[4]에 의해서 제안된 실험에 따르는 관계식을 나타낸다. Kimura-Ihara식과는 정량적으로는 상당히 일치한 결과를 얻을 수 있었다. 또, 시뮬레이션에서 얻을 수 있던 밀도 1 [Person/m²]이하에 대해서는 직선적인 경향을 나타내고 있는데, 이것은 Fruin식과도 정성적으로 일치하고 있다고 생각된다.



4. 결 론

이상으로 이산요소법에 심리학적인 요소를 결합한 모델을 이용하여 보행자의 군집보행을 시뮬레이션 할 수 있었으며 향후 이를 이용하여 압사사고에 관한 예측이 가능 할 것으로 여겨진다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)이 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2009-0070914)

참고문헌

- [1] 2004, Tsuji, Y., "Numerical Simulation Pedestrian Flow at High Densities," *PEDESTRIAN AND EVACUATION 2003*, CMS Press, pp.27-38.
- [2] 2003, Park, J., "Modeling the dynamics of fabric in a rotating horizontal drum," Doctoral Dissertation, Purdue University, West Lafayette, U.S.A.
- [3] 1937, Kimura, I. and Ihara, J, "Observation for state of pedestrian flow in building," *Proc. Jap. Arch. Eng.*, Vol.5, pp.307-316.
- [4] 1987, Fruin, J. J., *Pedestrian planning and design*, Elevator World Inc. New York.