

# Social Force Model을 활용한 보행자 대피행태 및 정보제공 시나리오분석: 세종시를 중심으로

## Analysis of Pedestrian Evacuation Behaviors by the Evacuation Information Scenarios Using Social Force Model: Focusing on Sejong City

최 승 현\* · 정 호 용\*\* · 도 명 식\*\*\*

\* 주저자 : 한밭대학교 도시공학과 박사수료

\*\* 공저자 : 한밭대학교 도시공학과 석사과정

\*\*\* 교신저자 : 한밭대학교 도시공학과 교수

Seung hyun Choi\* · Ho yong Jung\* · Myung sik Do\*

\* Dept. of Urban Eng., Hanbat National University

† Corresponding author : Myung sik Do, msdo@hanbat.ac.kr

Vol.17 No.1(2018)

February, 2018

pp.31~41

ISSN 1738-0774(Print)

ISSN 2384-1729(On-line)

<https://doi.org/10.12815/kits>

2018.17.1.31

Received 28 November 2017

Revised 19 December 2017

Accepted 28 December 2017

© 2018. The Korea Institute of  
Intelligent Transport Systems. All  
rights reserved.

### 요 약

본 연구에서는 세종시의 생활권역을 대상으로 Social Force Model을 활용하여 재난상황에서의 정보제공 시나리오에 따른 보행자 대피행태와 정보제공효과를 추정하였다. 분석을 위한 재난상황은 지진 등의 긴급재난의 발생으로 인하여 보행자가 보도를 통해 신속히 대피해야 하는 상황을 가정하였다. 대상지역 네트워크의 최적화를 위해 최소 평균통행시간을 기준으로 각 존에 대한 최적 대피소를 선정하였으며 이를 바탕으로 정보제공 수준에 따른 대피 시나리오분석을 수행하였다.

분석결과, 보행자간의 상충으로 인한 평균 통행시간 및 지체시간이 증가하는 현상도 나타났으나 재해발생에 따른 대피유도정보를 제공할 경우 대피완료시간이 감소하는 등 대피의 효과가 입증되었다. 본 연구는 향후 도시지역의 보행자를 위한 재난방지 계획 등의 기초 연구로 활용될 것으로 기대된다.

핵심어 : Social Force Model, 대피행태, 대피정보

### ABSTRACT

This study aims to analyze region-based pedestrian evacuation behaviors and information offering effect using Social Force Model, which is micro simulation.

All pedestrians were assumed to move to shelters through pedestrian roads according to guidance information at emergency situations, and the pedestrians were classified into adults and the handicapped. According to the results of the road network analysis and simulation analysis, the shelters to which pedestrians can move within the shortest time from each zone were selected as optimum shelters.

From this study, the analysis showed that the information provision effects are informative even though total evacuation time increases due to the increase of pedestrian conflict. This study can be used as baseline data for urban area's pedestrian disaster prevention plans.

Key words : Social Force Model, Evacuation behaviors, Evacuation information

# I. 서론

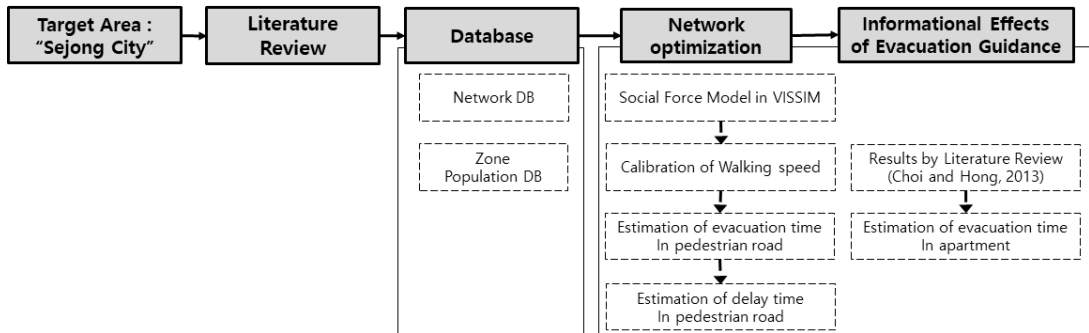
## 1. 개요

해외 선진국을 중심으로 도시 인프라의 재해에 대한 회복력(Hazard Resilience) 강화를 위한 다양한 노력을 기울이고 있으며, 국내에서도 세월호 참사 이후 2014년 11월 18일부터 안전관리 및 방재기능을 국가적 체계로 운영하기 위한 목적으로 국가적 재난 컨트롤 타워인 국민안전처(현 행정안전부)가 출범하는 등 국가와 지자체 모두 재난 및 안전관리 체계를 확립하여 재난예방 및 관리를 강화하고자 노력하고 있다.

과거의 경우, 1994년 10월 발생한 성수대교 붕괴사고, 1995년 6월의 삼풍백화점 붕괴사고, 2003년 대구 지하철 화재 사고, 2011년 7월의 우면산 산사태, 2012년 9월의 구미 산업단지 불산 누출사고, 2014년 2월의 남양주시 빙그레 공장 탱크배관 폭발사고 등 도시내에 입지하는 기반시설물과 국지적인 규모의 자연재해에 의한 피해가 주류를 이루었으나 최근에는 2016년 9월 국내에서 발생한 역대 최대 규모의 지진인 경주지진에 이어 2017년 11월에 포항지진이 연속적으로 발생하면서 도시규모에서의 피해가 증가하고 있어 이에 대한 도시주민의 대피를 포함한 방재계획 마련도 절실한 실정이다.

현재 정부에서는 지진과 같은 자연재해 발생시 긴급재난문자의 발송을 통해 시민들에게 발생위치, 발생시기, 재해규모 등의 재난발생여부에 대한 정보를 시민들에게 제공하고 있으나 재난발생후의 대피시기, 대피방법, 피난처 등 재난발생후에 이루어져야 할 대피정보에 대해서는 정보전달이 이루어지지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 세종시의 일부 생활권역을 대상으로 지진과 같은 재난상황을 가정하여 보행자의 대피행태 및 정보제공에 따른 시나리오분석을 수행하였다. 보행자의 대피행태는 크게 건물내에서의 대피행태와 보행자도로상에서의 대피로 구분하여 보행자도로상에서의 대피행태는 VISSIM S/W의 Social Force Model을 통해 분석을 수행하였으며 건물내에서의 대피행태는 기존의 연구결과를 활용하였다. 시나리오분석을 위해 최소 대피시간과 최소 지체시간, 도보 범위 등을 기준으로 각 생활권역별 최적대피소를 선정하였으며 최적화된 OD를 기준으로 대피정보제공 시나리오에 따른 보행자의 대피행태를 분석하였다.



〈Fig. 1〉 Flow-chart for Study

## 2. 선행연구 고찰

국내의 경우 보행자의 재난대피와 관련된 연구는 크게 Social Force Model, Cellular Automata 기법 등을 활용하여 재난상황 등이 가정된 시설물 내에서의 대피행태에 대한 시뮬레이션 및 실증분석을 수행한 연구(Choi and Hong, 2013; Nam et al., 2016)와 GIS의 네트워크 분석 등을 활용한 도심지역 재난대피소의 최적입

지, 서비스영역, 수용능력분석 등에 관한 연구가 주로 수행된 것으로 나타났다(Kim et al., 2016). 이외에도 Lee(2013)는 비디오 영상자료를 바탕으로 일반상황과 재난상황에서의 보행행태 특성에 대한 기초연구를 수행하였으며 일반상황에 비해 실제 패닉상태에서의 본능적 보행은 빠른 직선보행과 보행불능으로 구분되어 지는 것으로 나타나 향후 시뮬레이션 분석 등에 접목할 경우 현실성 있는 분석이 가능할 것으로 예측하였다.

한편, 일본이나 미국과 같이 재난사고가 빈번한 외국의 경우 일찍이 태풍, 홍수, 지진, 화재, 테러, 원자력 사고 등의 다양한 재난에 대한 사전대책 및 대피·대응과 관련된 연구가 수행되어 왔다. Mas et al.(2013)은 페루의 La Punta 지역을 대상으로 쓰나미 상황을 가정한 대피 시뮬레이션 분석을 수행하였다. Agent based modeling을 활용한 모델을 독자적으로 개발하여 차량과 보행자에 대한 대피 수요를 동시에 고려한 시뮬레이션을 시행하였으며 보행자의 수평보행속도, 수직보행속도, 쓰나미대피소에 대한 대피수요 등을 고려하여 분석을 수행하였다. Wood and Schmidlein(2013)은 미국 워싱턴 인근의 지역을 대상으로 쓰나미 상황을 가정한 대피 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 대피시뮬레이션을 위해 Agent-based 모델과 LCD(least-cost-distance)모델을 동시에 고려하였으며 분석결과, 대상지역 중 쓰나미 피해의 발생 비율이 높은 지역 등 대상 지역의 지리학적 특성 및 거주지역에 대한 특성을 고려한 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

Yang et al.(2014)는 Guided crowd model이 적용된 Social Force Model의 시뮬레이션 분석을 통해 대피시간이 동일한 경우에 한해 대피인원이 크게 늘어나 대피효율이 증가함을 밝혔으며, Wei-Guo et al.(2006)은 출구가 한 개 존재하는 정사각형의 방을 대상으로 Social Force Model과 Cellular Automata Model을 활용하여 보행속도의 차이에 따른 대피시간, faster-is-slower 효과 등의 비교 검증을 수행하였다.

선행연구들을 고찰한 결과, 대체적으로 Agent based모형들을 활용한 건물내에서의 대피시뮬레이션 분석, 보행자의 군집행태에 따른 보행행태 분석과 현장실험을 통한 보행자의 대피행태분석, GIS의 네트워크분석을 활용한 대피소의 입지분석등 주로 보행속도를 주요 요인으로 고려한 연구가 이루어졌으나 건물과 보행공간을 동시에 고려한 대피모형과 대피정보에 의한 효과를 분석한 사례는 없는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 세종시의 일부 생활권역에 대해 지진과 같은 재난상황을 가정하고 대피정보의 전달수준에 따른 보행자의 대피행태를 VISSIM S/W의 Social Force Model을 기반으로 한 시뮬레이션 분석을 통해 알아보고 그 효과를 분석하고자 하였다.

## II. Social Force Model

보행자의 대피행태분석에 주로 사용되는 모델은 보행자의 관점에 따라 회귀분석모델, 경로선택모델, 대기행렬모델 등을 포함하는 거시적(Macroscopic) 모델과 Social forces models(이하 SF모델), Cellular automata models(이하 CA모델)등을 포함하는 미시적(Microscopic)모델로 구분되어지며 그 중에서도 군중 대피를 위한 시뮬레이션 분석에 가장 많이 활용되고 있는 것이 SF모델과 CA모델이다(Pelechano and Malkawi, 2008). 일반적으로 CA모델의 경우 다수의 보행자들이 목적지를 향해 움직이는 상황을 간단한 연산만으로도 효과적으로 모델링할 수 있지만 보행자의 크기 및 모양은 실제 보행자의 특성과 차이가 있어 실제 보행 상황에서 나타나는 보행자들 간의 세밀한 물리적 현상(충돌, 끼임)을 반영하기에는 어려움이 있다(Nam et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 보행자들간의 개인적인 특성, 보행자간 지체 등 미시적인 관점에서의 분석을 수행하기 위해 SF모델을 보행자 행태특성 분석에 활용하고 있는 VISSIM S/W를 통해 분석을 수행하였다.

SF모델은 일반적으로 공간상에서 보행자의 밀도가 높아지게 되면 보행자간의 충돌, 밀집과 같은 마찰이 발생하게 된다. SF모델은 보행속도에 의한 보행자 자신의 추진력(driving force)과 보행자간의 밀집효과, 보행자와 장애물간의 밀집효과(repulsive effects), 보행로 주변 환경에 의한 관심효과(attractive effects)로 구분되어

진다(Helbing and Molnar, 1995; Helbing et al., 2002; Yang et al., 2014).

먼저, 보행자의 추진력을 산정하기 위해서는 먼저 보행자의 이동방향에 대한 산정이 이루어져야 한다. 여기서, 보행자( $\alpha$ )는 목적지( $\vec{r}_\alpha^0$ )를 향해 가능한 가장 빠르게 이동할 수 있는 최단경로를 선택하게 된다. 보행자의 이동경로는 일반적으로  $\vec{r}_\alpha^1, \dots, \vec{r}_\alpha^n = \vec{r}_\alpha^0$  과 같은 다각형(polygon) 형태로 구성되어진다고 하면 보행자가 다음에 이동해야할 목적지가  $\vec{r}_\alpha^k$ 인 경우 보행자의 이동방향  $\vec{e}_\alpha(t)$ 는 식 (1)과 같이 결정되어진다.

$$\vec{e}_\alpha(t) = \frac{\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)}{\|\vec{r}_\alpha^k - \vec{r}_\alpha(t)\|} \quad (1)$$

여기서,  $\vec{r}_\alpha(t)$ 는 시간  $t$ 인 경우 보행자( $\alpha$ )의 실제 위치를 의미하며 만약 보행자의 행동이 방해받지 않는 상태에 있다면 보행자는 설계속도( $v_\alpha^0$ )를 준수하며  $\vec{e}_\alpha(t)$ 방향으로 이동하게 된다. 하지만, 실제 이동 중에 발생하는 다양한 요소들에 의해 보행자는 설계속도와는 편차를 갖는 속도  $\vec{v}_\alpha(t)$ 에 의해 목적지를 향해 이동하게 된다. 또한, 보행자는 변속과정 및 회피과정의 발생 후 완화시간(relaxation time)  $\tau_\alpha$  동안 설계속도로 돌아가려고 하는 경향이 나타나게 되며 이러한 보행자의 추진력은 식 (2)와 같이 설명할 수 있다.

$$\vec{F}_\alpha^0(\vec{v}_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) = \frac{1}{\tau_\alpha} (v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha - \vec{v}_\alpha) \quad (2)$$

나아가 보행자  $\alpha$ 의 실제속도  $\vec{v}_\alpha(t)$ 는 보행자의 최대가속도  $v_\alpha^{\max}$ 에 의해 제한되어지며 여기서  $\vec{w}_\alpha(t)$ 는 보행자의 선호속도(preferred speed)이며 SF모델에서는 이것을 식 (3)을 이용해 다음과 같이 산정하게 된다.

$$\frac{d\vec{r}_\alpha}{dt} = \vec{v}_\alpha(t) = \vec{w}_\alpha(t) g\left(\frac{v_\alpha^{\max}}{\|\vec{w}_\alpha\|}\right) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad g\left(\frac{v_\alpha^{\max}}{\|\vec{w}_\alpha\|}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } \|\vec{w}_\alpha\| \leq v_\alpha^{\max} \\ v_\alpha^{\max} / \|\vec{w}_\alpha\| & \text{otherwise.} \end{cases}$$

보행자( $\alpha$ )의 행동은 다른 보행자( $\beta$ )에게 영향을 미치게 된다. 특히, 보행자들은 공간상의 보행자밀도와 설계속도( $v_\alpha^0$ )에 따라 일정한 거리를 유지하며 이동하게 된다. 보행자들은 일반적으로 다른 보행자들이 접근해 올수록 불편함이 증가하게 되는데 이러한 효과를 밀침 효과라고 하여 식 (4)와 같이 정의하고 있다.

$$\sum_\beta \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \tau_\alpha - \tau_\beta) = \omega(\vec{e}_\alpha, -\vec{f}_{\alpha\beta}) \vec{f}_{\alpha\beta}(\vec{r}_\alpha - \vec{r}_\beta) \quad (4)$$

또한, 보행자( $\alpha$ )의 행동은 다른 보행자( $\beta$ )뿐만 아니라 벽, 기둥과 같은 사물( $B$ )에 의해서도 영향을 받게 되며 이는 식 (5)와 같이 정의되어진다. 마지막으로 보행자( $\alpha$ )는 이동시에 길거리 공연, 전시물, 조형물 등과 같은 다른 요소( $i$ )에 관심을 보이게 되며 이를 장소  $\vec{r}_i$ 에서의 관심효과  $\vec{f}_{\alpha i}$ 로 식 (6)과 같이 정의되어진다.

$$\sum_B \vec{F}_{\alpha B}(\vec{e}_\alpha, \tau_\alpha - \tau_B^0) = \omega(\vec{e}_\alpha, -\vec{f}_{\alpha B}) \vec{f}_{\alpha B}(\vec{r}_\alpha - \vec{r}_B) \quad (5)$$

$$\sum_i \vec{F}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{\tau}_\alpha - \vec{\tau}_i, t) = \omega(\vec{e}_\alpha, \vec{f}_{\alpha i}) \vec{f}_{\alpha i}(\vec{r}_\alpha - \vec{r}_i, t) \quad (6)$$

지금까지 살펴본 바와 같이 SF모델은 시간  $t$ 에서의 보행자 행태  $\vec{F}_\alpha(t)$ 를 식 (2)~(6)의 모든 효과를 종합한 식 (7)과 같이 산정하게 된다(Helbing and Molnar, 1995; Helbing et al. 2002; Yang et al, 2014).

$$\vec{F}_\alpha(t) = \vec{F}_\alpha^0(v_\alpha, v_\alpha^0 \vec{e}_\alpha) + \sum_\beta \vec{F}_{\alpha\beta}(\vec{e}_\alpha, \vec{\tau}_\alpha - \vec{\tau}_\beta) + \sum_B \vec{F}_{\alpha B}(\vec{e}_\alpha, \vec{\tau}_\alpha - \vec{\tau}_B) + \sum_i \vec{F}_{\alpha i}(\vec{e}_\alpha, \vec{\tau}_\alpha - \vec{\tau}_i, t) \quad (7)$$

한편 본 연구는 긴급재난상황시의 통제된 환경 및 실외 보행자도로에서의 대피를 가정하고 있으므로 길 거리 공연, 전시물, 조형물 등과 같은 다른 요소에 의해 발생할 수 있는 관심효과는 분석범주에 포함하지 않은 점과 SF모델의 주요변수인 보행자의 설계속도를 해당지역의 환경과 재난상황에 적합하도록 조정(Calibration)하여 분석을 수행한 것이 기존 SF모델과의 차별점이라 할 수 있다.

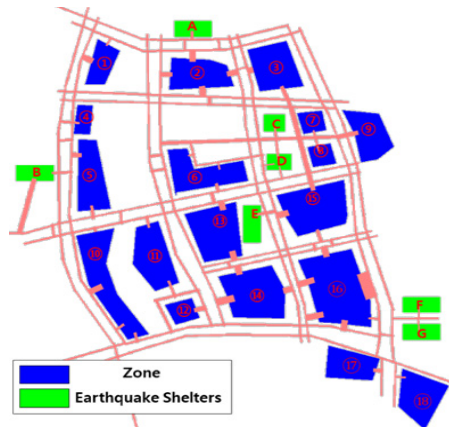
### III. 재난상황에서의 정보제공 시나리오분석

#### 1. 분석 개요

본 연구에서는 재난상황에서의 정보제공효과를 분석하기 위해 세종시의 도담동을 대상으로 분석을 수행하였다. 세종시의 경우 2012년 출범하여 현재 산업단지 뿐만 아니라 국가 주요 중앙행정기관 및 연구기관이 배치되어 있고, 앞으로도 추가적인 주요기관 이전이 계획되어 있어 사전 방재대책이 세워지지 않는다면 재난 발생 시 인적피해와 더불어 국가업무가 마비되는 등 사회적 손실이 큰 지역이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 세종시의 거주지역 중 2016년을 기준으로 가장 많은 인구(32,152명)가 거주중인 도담동(약 2.02  $km^2$ )을 분석지역으로 선정하였다. 대상지역은 도시계획 단위인 생활권을 기준으로 18개 권역과 7개의 대피소로 구분되어 있으며 각 권역별로 15층에서 30층의 아파트로 구성되어 있다. 시나리오분석을 위한 네트워크 구성을 위해 아파트단지에서 대피소까지 연결되는 보행자도로, 횡단보도의 폭 및 연장과 아파트 단지 및 대피소의 출입구 위치 등은 위성지도에서 측정된 값을 기준으로 작성하였다(Fig. 3).



<Fig. 2> Target Area



<Fig. 3> Target Network

분석을 위한 재난상황은 지진의 발생으로 인하여 대상지역에 거주중인 주민들이 국가에서 지정한 지진옥외대피소로 신속히 대피해야 하는 최악의 상황을 가정하였다. 나아가 보행자의 보행행태별 특성을 반영하기 위해 연령별 인구수 및 교통약자법(교통약자의 이동편의 증진법)에 의거한 교통약자의 정의를 기준으로 대피수요를 성인과 교통약자의 두 집단으로 구분하여 분석을 수행하였다(Table 1).

<Table 1> Evacuation demand of each zone

(Unit : Person)

| Zone | Adult | Handicapped | Zone | Adult | Handicapped | Zone | Adult | Handicapped |
|------|-------|-------------|------|-------|-------------|------|-------|-------------|
| 1    | 890   | 308         | 7    | 318   | 110         | 13   | 1,497 | 518         |
| 2    | 2,130 | 737         | 8    | 411   | 142         | 14   | 1,545 | 535         |
| 3    | 1,585 | 548         | 9    | 868   | 300         | 15   | 1,934 | 669         |
| 4    | 351   | 121         | 10   | 1,616 | 559         | 16   | 2,161 | 748         |
| 5    | 1,347 | 466         | 11   | 1,987 | 687         | 17   | 1,395 | 483         |
| 6    | 1,700 | 588         | 12   | 773   | 267         | 18   | 1,382 | 478         |

본 연구에서는 대피자가 거주하고 있는 아파트의 각 층에서 대피를 시작하여 지진옥외대피소로 이동할 때까지 소요되는 대피시간 및 지체시간 등의 요소들을 도출하고자 하였다. 즉 1)아파트 내에서 발생하는 대피시간과 2)보행자도로를 통해 이동 중에 발생하는 대피시간으로 나누어지게 된다. 여기서 보행자도로를 통해 이동 중에 발생하게 되는 대피시간 및 지체시간 등에 대해서는 VISSIM의 SF모델을 통한 시뮬레이션을 통해 산정하였으나 아파트 내에서 발생하는 대피시간에 대해서는 Choi and Hong(2013)의 연구 결과인 1개 층의 평균 이동 소요시간(13.6초)을 보행자 개인에게 적용하여 대피시간을 별도로 산정하였다.

<Table 2> References of walking speed-related research

| Index        | Desired speed (m/s) | min/max (m/s) | Walking speed (m/s) | Disaster type | Assessment method    | References                 |
|--------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|----------------------|----------------------------|
| Adult (run)  | 2.60                | ±0.40         | 2.81                | Tsunami       | Video analysis       | Lee(2013)                  |
|              |                     |               | 3.20                | Earth-quake   |                      | D’Orazio et al.(2014)      |
|              |                     |               | 2.50                |               |                      |                            |
|              |                     |               | 2.40                |               |                      |                            |
|              |                     |               | 2.10                |               |                      |                            |
|              |                     |               | 2.55                |               |                      |                            |
| Adult (walk) | 1.40                | ±0.20         | 1.33                | Tsunami       | Simulation           | Mas et al.(2013)           |
|              |                     |               | 1.22                | Tsunami       | moderate walk        | Wood and Schmidlein (2013) |
|              |                     |               | 1.52                | -             | fast walk            |                            |
|              |                     |               | 1.65                | -             | -                    | Hong et al.(2011)          |
| Handi-capped | 1.00                | ±0.10         | 1.06                | Tsunami       | kids (1~11aged)      | Mas et al.(2013)           |
|              |                     |               | 0.93                | -             | Elders (60years old) |                            |
|              |                     |               | 1.10                | Tsunami       | slow walk            | Wood and Schmidlein (2013) |
|              |                     |               | 0.93                | -             | -                    | Hong et al.(2011)          |

또한 SF모델의 주요 변수 중 보행자의 보행속도에 관련된 파라메타의 보정(calibration)을 위해 보행대피 시뮬레이션, 재난시의 보행속도, 대피소 입지선정 연구 등에 활용된 문헌고찰을 수행한 결과, 빠른 걸음을 통해 이동하는 성인의 보행속도는 2.60m/s, 일반적인 상황에서 성인의 대피속도는 1.40m/s, 교통약자의 대피속도는 1.00m/s로 설정하였고 패닉에 따른 속도 변화를 고려하기 위해 보행유형에 따라 설계속도를 평균으로 하는  $\pm 0.1\text{m/s} \sim \pm 0.4\text{m/s}$  범위의 난수 값을 적용하였다(Table 2). 가속도의 경우 VISSIM S/W의 기본 값(성인  $1.5\text{m/s}^2$ , 교통약자  $1.3\text{m/s}^2$ )으로 설정하였다.

## 2. 최적대피소 선정

최적대피소의 선정을 위한 시뮬레이션은 성인 1.4m/s, 교통약자 1.0m/s의 보행속도를 기준으로 1개의 생활권역에서 1개의 대피소를 향해 15분 이내에 대피가 이루어지도록 설정하였다. 대상지역은 18개의 생활권역과 7개의 대피소로 구성되어 있으므로 총 126회의 시뮬레이션을 통해 각 생활권역에서 각 대피소로의 대피거리, 대피시간, 지체시간 등 대피자의 개별통행태 정보를 취득하였다. SF모델에 의해 산정된 대피시간에 아파트내에서의 대피시간을 추가로 고려하였으며 각 권역별 대피자의 평균대피시간과 평균지체시간이 최소가 되며 대피시설의 구축방침인 최대 허용 도보권(반경 667m)내에 포함되는 대피소를 <Table 3>과 같이 최적대피소로 선정하였다.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Y_{ijt} (ET_{ijt} + DT_{ijt}) : \text{minimize evacuation time and delay time} \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{t \in T} Y_{ijt} = D_{ij}, \quad \forall i \in I, j \in J \quad (\text{교통류 보존 제약})$$

$$\sum_{t \in T} \mu_t = 1, \quad 1 \geq \mu_t \geq 0 \quad (\text{일정의 범위})$$

여기서,  $ET_{ijt}$  = 시간  $t$ 에  $i$ 에서  $j$ 까지 대피하는 동안 발생한 대피시간  
 $DT_{ijt}$  = 시간  $t$ 에  $i$ 에서  $j$ 까지 대피하는 동안 발생한 지체시간  
 $Y_{ijt}$  = 시간  $t$ 에  $i$ 에서  $j$ 까지 이동하는 대피자의 수 ( $Y_{ijt} = \mu_t D_{ij}$ )  
 $T$  = 시간 간격의 집합,  $I$  = 생활권역의 집합,  $J$  = 대피소의 집합  
 $D_{ij}$  = 출발지( $i$ )와 목적지( $j$ ) 사이의 대피수요  
 $\mu_t$  = 시간  $t$ 에서의 대피수요비율

<Table 3> Result of optimal shelter analysis

| Zone | Optimal Shelter | Avg.ET(s)<br>+Avg.DT(s) | Avg.Distance<br>(m) | Zone | Optimal Shelter | Avg.ET(s)<br>+Avg.DT(s) | Avg.Distance<br>(m) |
|------|-----------------|-------------------------|---------------------|------|-----------------|-------------------------|---------------------|
| 1    | A               | 299.3                   | 439.8               | 10   | B               | 462.6                   | 647.7               |
| 2    | A               | 132.3                   | 197.0               | 11   | E               | 441.6                   | 639.5               |
| 3    | C               | 273.9                   | 382.1               | 12   | E               | 553.9                   | 844.8               |
| 4    | B               | 197.3                   | 288.5               | 13   | D               | 225.2                   | 333.6               |
| 5    | B               | 174.3                   | 250.5               | 14   | E               | 305.6                   | 424.3               |
| 6    | D               | 253.3                   | 381.3               | 15   | E               | 131.8                   | 203.7               |
| 7    | C               | 147.1                   | 221.5               | 16   | G               | 305.1                   | 459.8               |
| 8    | C               | 155.8                   | 237.5               | 17   | F               | 321.0                   | 463.9               |
| 9    | C               | 241.3                   | 367.8               | 18   | F               | 305.5                   | 456.0               |

여기서 12번 생활권역의 경우 대피거리가 최소 844.8m에서 최대 1,254.1m로 나타나 대피거리가 최소가 되는 E대피소를 최적 대피소로 선정하였으며, 향후 대피소의 신설 등 입지적인 요소를 고려한 연구가 필요한 것으로 사료된다. 나아가, <Table 4>는 최적 대피소 선정결과를 바탕으로 각 대피소에 대한 수용인원을 분석한 결과이다. 각 대피소별 수용인원의 산정은 각 대피소의 면적을 기준으로 민방위 대피시설 1인당 최저 소요면적 0.33m<sup>2</sup>를 기준(Choi et al., 2016)으로 산정하였으며 모든 대피소에서 대상 인원의 수용이 가능한 것으로 나타났다.

<Table 4> Result of analysis considering shelter demand

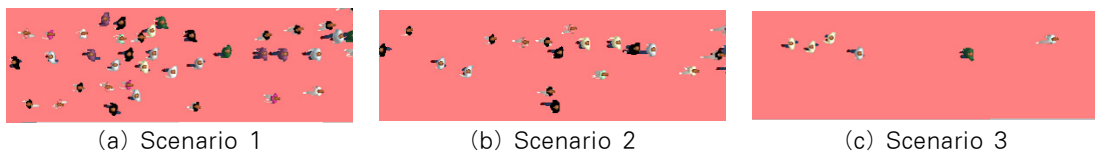
| (unit: person)         | Shelter |       |       |        |        |       |       | Total  |
|------------------------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|
|                        | A       | B     | C     | D      | E      | F     | G     |        |
| Area (m <sup>2</sup> ) | 2,996   | 2,504 | 2,322 | 3,566  | 3,603  | 1,458 | 2,337 | 18,786 |
| Capacity               | 9,079   | 7,588 | 7,036 | 10,806 | 10,918 | 4,418 | 7,082 | 56,927 |
| Evacuation demand      | 4,065   | 4,460 | 4,282 | 4,302  | 8,397  | 3,738 | 2,909 | 32,152 |

### 3. 정보제공 시나리오분석

재난 발생시 주민들의 대피행태에 관한 연구에서 Itoigawa(2013)는 쓰나미 재해를 직접 경험한 주민 20,189명을 대상으로 설문조사를 수행한 결과, 재해가 발생한 경우 바로 대피를 시작한 비율이 약 51%, 15분 이내에 대피를 시작한 비율이 약 82%, 30분 이내에 대피를 시작한 비율은 98%로 나타나 재해 후 30분 이내에는 대피를 시작한 것으로 나타났다. 또한, Yamada et al.(2011)는 주민들을 대상으로 실시한 대피훈련에서 주민 전체의 대피에 30분정도가 소요되는 것으로 나타났으며 대피정보의 제공후 대피를 시작하기 까지 평균 4.6분에서 최대 10분이 소요되는 것으로 나타나 재난 발생에 대한 정보를 제공받은 주민들은 평균적으로 30분 이내에는 대피를 시작하는 것으로 나타났다.

따라서 정보제공 시나리오분석을 위한 시뮬레이션은 최적 대피장소에 대한 정보를 사전에 인식하고 있다는 것을 전제로 긴급재난문자 발송시에 1) 빠른 시간 안에 대피를 시작하도록 발생여부정보와 대피유도정보를 동시에 제공하는 경우(15분 이내 대피시작), 2) 발생여부정보만 제공하는 경우(30분 이내 대피시작), 3) 재해관련 정보를 제공받지 못하는 경우(60분 이내 대피시작)를 고려하였다. 나아가, 성인의 보행을 빠르게 유도하는 경우에 대한 대피행태를 비교·분석하기 위해 성인의 보행속도를 1.40m/s와 2.60m/s로 유도하는 경우로 구분하여 각 시나리오별 분석에 적용하였다.

보행자 대피 시뮬레이션 분석에 있어 평균 대피시간, 최대대피시간, 대피인원 등의 지표가 많이 활용되고 있으며 본 연구에서는 위에서 제시한 지표외에 평균지체시간에 대한 지표를 추가적으로 제시하였다(Vermuyten, 2016). 분석결과를 비교하기에 앞서 <Fig. 4>는 동일한 시각, 동일한 구간에 대한 시뮬레이션 영상을 시나리오별로 보여주고 있으며 60분간 대피가 이루어지는 시나리오3에 비해 빠르게 대피를 유도하는 시나리오 1과 2의 구간 밀도가 높은 것으로 나타나 보행자의 대피를 빠르게 유도할수록 보행자도로에 대한 밀도가 높아지는 것을 알 수 있다.

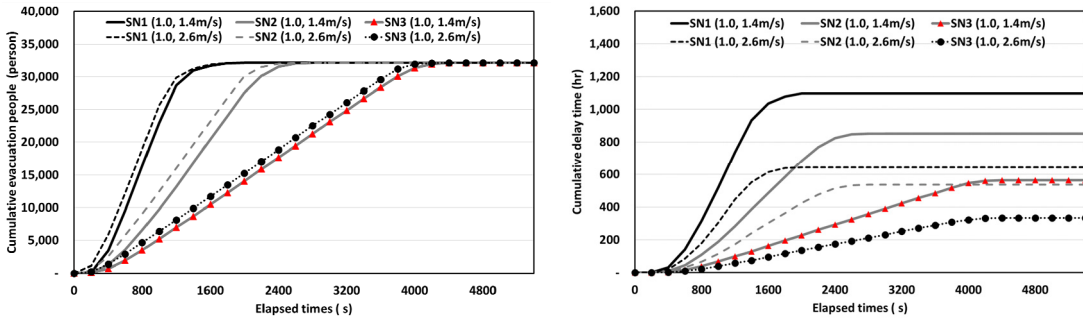


(a) Scenario 1 (b) Scenario 2 (c) Scenario 3  
<Fig. 4> Density examples of pedestrians road by each scenario



시나리오별 대피완료시간과 지체시간에 대한 분석결과는 <Fig. 5>와 같다. 모든 대피인원이 대피를 완료하기까지 시나리오 1의 최종 대피완료시간은 30.5분, 시나리오 2는 44.3분, 시나리오 3은 74.5분으로 나타나 발생여부 정보, 대피유도 정보가 제공될 경우 최종대피완료시간이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

성인을 빠르게 대피하도록 유도할 경우 대피군집전체에 대한 누적 지체시간이 시나리오 1은 약 40%, 시나리오 2는 약 53%, 시나리오 3은 약 55%로 크게 감소하는 것으로 나타났으며 동일시간 대비 대피완료인원은 성인의 보행속도를 빠르게 유도한 경우가 많은 것으로 나타났다. 하지만, 최종 대피완료시간의 경우 성인의 대피속도에 상관없이 시나리오별로 유사한 것으로 나타났으며 이는 본 분석에서의 대피수요가 특정한 분포형태를 따라 일정하게 발생하였기 때문으로 판단된다.



(a) Evacuation Completion time

(b) Delay time

<Fig. 5> Results of scenario analysis

<Table 5> Results of scenario analysis

| Type                     |             | Scenario 1 (15min) |              | Scenario 2 (30min) |              | Scenario 3 (60min) |              |
|--------------------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|
|                          |             | (1.0,1.4m/s)       | (1.0,2.6m/s) | (1.0,1.4m/s)       | (1.0,2.6m/s) | (1.0,1.4m/s)       | (1.0,2.6m/s) |
| Avg. Evacuation time (s) | Adult       | 578                | 365          | 561                | 359          | 539                | 355          |
|                          | Handicapped | 787                | 782          | 777                | 774          | 736                | 733          |
|                          | Total       | 677                | 587          | 672                | 573          | 640                | 550          |
| Avg. delay time (s)      | Adult       | 101                | 19           | 81                 | 14           | 59                 | 11           |
|                          | Handicapped | 140                | 115          | 103                | 100          | 63                 | 60           |
|                          | Total       | 121                | 72           | 92                 | 58           | 61                 | 36           |

시나리오별 평균 대피시간과 평균 지체시간에 대한 분석결과는 <Table 5>와 같다. 평균 대피시간의 경우 대피유형에 상관없이 제공되는 정보의 양이 많아질수록 증가하는 것으로 나타났다. 이는 정보의 제공을 통해 대피가 빠르게 시작될 경우 보행자 도로의 밀도가 증가하여 보행자의 지체시간이 증가하기 때문으로 판단된다. 또한 시나리오에 상관없이 성인의 보행속도를 빠르게 유도하는 것이 교통약자의 지체시간감소로 이어지는 것으로 나타났으며 이와 같이 성인의 대피를 빠르게 유도하는 정보를 제공할 경우 교통약자의 대피시간 감소효과가 발생하는 것으로 나타났다.

분석결과를 종합적으로 살펴보면 최대한의 정보제공(발생여부정보와 대피유도정보를 동시에 제공)을 통해 신속한 대피를 유도할 경우 보행자도로상의 밀도가 증가함에 따라 보행자 1인의 지체시간, 대피시간이 증가하는 것으로 나타났지만 최종대피완료시간에 있어서는 가장 신속하게 대피가 완료되는 것으로 나타났다

다. 이와 같이 보행자 1인의 평균대피시간이 많이 소요됨에도 불구하고 빠른 시간내에 대피를 완료시키는 것이 재난·재해의 특성상 무엇보다 중요하다고 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 지진과 같은 재난상황에서의 정보제공여부가 보행자의 대피행태에 주는 영향을 VISSIM의 SF모델을 통한 시뮬레이션 분석과 기존의 연구결과를 활용한 분석을 통해 대피정보의 제공효과를 검증하고자 하였다. 이때, 대상지역은 세종시의 도담동으로 설정하였으며 대상지역의 연령별 인구수 및 교통약자법에 의거한 분류기준에 의거하여 대피수요를 성인과 교통약자로 구분하여 분석을 세분화하였다.

대피정보제공에 대한 시나리오분석에 앞서 각 생활권역별로 평균대피시간(지체시간포함)과 허용도보범위를 고려하여 생활권역별 최적 대피소를 선정하였다. 정보제공 시나리오분석을 위한 시뮬레이션을 위해 1) 빠른 시간안에 대피를 시작하도록 발생여부정보와 대피유도정보를 동시에 제공하는 경우(15분 이내 대피시작), 2) 발생여부정보만 제공하는 경우(30분 이내 대피시작), 3) 재해관련 정보를 제공받지 못하는 경우(60분 이내 대피시작)를 고려하였다. 나아가, 성인의 보행을 빠르게 유도하는 경우에 대한 대피행태를 비교·분석하기 위해 성인의 보행속도를 1.40m/s와 2.60m/s로 유도하는 경우로 구분하여 각 시나리오별 분석에 적용하였다.

SF모델을 통한 시뮬레이션 분석결과 시나리오 1의 최종대피완료시간은 30.5분, 시나리오 2는 44.3분, 시나리오 3은 74.5분으로 나타났으나 1인당 대피시간 및 지체시간은 최종대피완료시간에 반비례하는 것으로 나타났다. 이는 재난발생여부정보, 대피유도정보 등의 제공을 통해 빠르게 대피를 유도하여 보행자도로상의 상대적인 밀도가 높아짐에 따라 대피자간의 상충으로 인한 지체가 발생했기 때문으로 판단된다. 이와 같이 보행자 1인의 평균 대피시간이 증가함에도 불구하고 정보제공을 통해 신속하게 안전한 대피를 유도하는 것이 재난·재해로부터 시민의 안전을 지킬 수 있음을 확인할 수 있다.

다만 본 연구에서는 시뮬레이션 분석의 특수성 및 연구 범위의 한계로 인해 대상지역을 세종시 도담동으로 한정하여 분석을 수행하였음을 밝히며, 향후 대상지역의 네트워크적인 특성 및 보행자도로의 서비스수준, 폭, 밀도 등이 고려된 연구를 통해 신뢰성 높은 연구결과와 도출이 가능할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구는 아파트내에서의 대피요소를 고려하기 위해 기존의 연구결과를 활용하였으나 향후 SF모델의 적용을 통한 분석이 필요하다고 판단된다. 나아가, 본 연구에서는 대피수단을 보행자도로를 통한 보행으로만 한정하였으나 자전거 또는 차량 등의 다른 대피수단을 활용한 추가적인 시뮬레이션은 향후 과제로 남기고자 한다.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1D1A1A01058764). 본 논문은 한국ITS학회의 2017년도 추계학술대회에 발표되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

#### REFERENCES

- Choi J. H. and Hong, W. H.(2013), “Two-way Evacuation Modelling and Human Behaviour Analysis from a Full-scale High-rise Apartment Data-set,” *Journal of the architectural institute of Korea planning & design*, vol. 29, no. 10, pp.233-240.
- Choi K. H., Lee H. M., Cho K. H., Hwang D. Y. and Nam S. I.(2016), “A Study on the Improvement

- of Civil Defense Facilities for Civil Defense Residents,” Korea Research Institute for National Strategy.
- D’Orazio M., Spalazzi L., Quagliarini E. and Bernardini G.(2014), “Agent-based model for earthquake pedestrians’ evacuation in urban outdoor scenarios: Behavioural patterns definition and evacuation paths choice,” *Safety science*, vol. 62, pp.450-465.
- Helbing D. and Molnar P.(1995), “Social force model for pedestrian dynamics,” *Physical review E*, vol. 51, no. 5, pp.4282-4286.
- Helbing D., Farkas I. J., Molnar P. and Vicsek T.(2002), “Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations,” *Pedestrian and evacuation dynamics*, vol. 21, no. 2, pp.21-58.
- Hong H. R., Seo D. G., Hasemi Yuji. and Kown Y. J.(2011), “A study on the walking speed of crowd for safety evacuation design of the elderly,” *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, KIFSE, vol. 25, no. 1, pp.19-26.
- Itoigawa E.(2013), “Urban Risk Management,” Corona, Japan.
- Kim M. K., Kang S. H., Kim S. P. and Sohn H. K.(2016), “A Spatial Analysis of Shelter Capacity Using Floating Population,” *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, vol. 34, no. 1, pp.1-10.
- Lee J.(2013), “A Basic Study on Different Waking Behaviors of Pedestrians and Evacuees,” *Journal of Transport Research*, vol. 20, no. 1, pp.43-54.
- Mas E., Adriano B. and Koshimura S.(2013), “An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La Punta, Peru,” *Journal of Disaster Research*, vol. 8, no. 2, pp.285-295.
- Nam H. W., Kwak S. Y. and Jun C. M.(2016), “A Study on Comparison of Improved Floor Field Model and Other Evacuation Models,” *Journal of the Korea Society for Simulation*, vol. 25, no. 3, pp.41-51.
- Pelechano N. and Malkawi A.(2008), “Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches,” *Automation in construction*, vol. 17, no. 4, pp.377-385.
- Vermuyten H., Beliën J., De Boeck L., Reniers G. and Wauters T.(2016), “A review of optimisation models for pedestrian evacuation and design problems,” *Safety science*, vol. 87, pp.167-178.
- Wei-Guo S., Yan-Fei Y., Bing-Hong W. and Wei-Cheng F.(2006), “Evacuation behaviors at exit in CA model with force essentials: A comparison with social force model,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 371, no. 2, pp.658-666.
- Wood N. J. and Schmidlein M. C.(2013), “Community variations in population exposure to near-field tsunami hazards as a function of pedestrian travel time to safety,” *Natural hazards*, vol. 65, no. 3, pp.1603-1628.
- Yamada F., Kakimoto R., Yamamoto M., Fujimi T. and Tanaka, N.(2011), “Implementation of community flood risk communication in Kumamoto, Japan,” *Journal of advanced transportation*, vol. 45, no. 2, pp.117-128.
- Yang X., Dong H., Wang Q., Chen Y. and Hu X.(2014), “Guided crowd dynamics via modified social force model,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 411, pp.63-73.