행위자 기반 모델을 이용한 홍수 대피 행동 분석

Examining Flood Evacuation Behaviors Using an Agent-based Model

윤소연* · 김유승** · 이동관*** · 윤동근****

Yoon, Soyeon*, Kim, Yuseung**, Lee, Dongkwan***, and Yoon, Dong Keun****

Abstract

This study explores the factors affecting evacuation behaviors during natural disaster emergency situations, such as flooding, by employing an agent-based model. To collect people's evacuation behavioral data, this study conducted telephone surveys. We designed four discrete scenarios based on the percentages of respondents who expressed an awareness of shelter locations, times of evacuation, and evacuation methods in emergency situations. Then, we conducted an agent-based simulation and analyzed the agent's arrival times in each scenario in order to compare outcomes. The results of this study reveal that knowing the location of a shelter and immediately responding to emergencies can reduce travel time to a shelter by up to 15%-57%. In particular, knowing the evacuation shelter location has a stronger effect than an immediate departure to the shelter. The results provide insight and direction for the future development of content for evacuation drills and training curricula by identifying factors that enhance the effectiveness of the evacuation process.

Key words : Agent-based Model, Simulation, Evacuation Behavior, Survey

요 지

본 연구는 홍수가 발생한 긴급 상황에서 대피행동에 영향을 미치는 요인들을 행위자 기반 모델을 이용하여 분석하였다. 먼저, 행위자들의 행동특성을 파악하기 위하여 시민들을 대상으로 설문조사를 수행하였다. 그리고 대피소 위치 인지여부, 대피시점, 이동수단의 선택에 대한 응답자 비율을 토대로 4가지 시나리오를 설계하였다. 마지막으로 영향요인에 따른 대피 효율성을 비교하기 위하여 행위자 기반 모델을 통해 시나리오별 대피 소요시간을 분석하였다. 모델 시뮬레이션 결과, 대피소의 위치를 정확하게 알고 있거나 재난 발생 후 신속하게 대피하는 행위자의 비율이 높을 경우 대피 소요시간이 15%-57% 단축될 수 있는 것으로 나타났다. 특히, 대피소의 위치를 알고 대피하는 것이 대피소로 신속히 출발하는 것보다 대피 소요시간을 단축하는데 더 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 대피 계획의 효과를 높이기 위해 고려되어야 할 요소들을 파악함으로써, 도시단위의 재난 대피 훈련 및 교육을 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 행위자 기반 모델, 시뮬레이션, 대피행동, 설문조사

1. 서 론

현대 도시에서 발생하는 재난은 인구의 밀집과 기반시설 따른 복잡성으로 인해 피해규모와 유형이 다양해지고 있다. 또한, 기후변화로 인해 태풍, 집중호우, 허리케인, 폭설 등

기상현상의 발생 강도가 증가하면서 대형 자연재난의 발생 빈도도 증가하고 있다. 21세기에 발생한 대형 자연재난들은 세계 곳곳에 대규모 피해를 발생시키며 주민 대피계획을 포함한 과학적인 방재대책의 필요성을 상기시켜 주었다. 특히, 미국의 허리케인 카트리나(Hurricane Katrina)와 동일

*정회원, 연세대학교 도시공학과 박사과정(E-mail: syoon100@yonsei.ac.kr)

Member, Ph.D Candidate, Department of Urban Engineering, Yonsei University

**서던메인대학교 공공서비스학부 부교수(E-mail: ykim2017k@gmail.com)

Associate Professor, Muskie School of Public Service, University of Southern Maine

***연세대학교 도시공학과 박사후연구원(E-mail: brightlee9@gmail.com)

Post-Ph.D, Department of Urban Engineering, Yonsei University

****교신저자, 정회원, 연세대학교 도시공학과 부교수(Tel: +82-2-2123-5893, Fax: +82-2-393-6298, E-mail: dkyoon@yonsei.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Urban Engineering, Yonsei University

본대지진의 사례는 대형재난에 대비한 사전 대피계획이 적절히 수립되지 않을 경우 재난 시 한꺼번에 몰려든 시민들로 인해 대피시간이 지연되고, 교통체계가 마비되어 대규모 재난으로 이어질 수 있다는 것을 보여주었다.

재난 대피 계획은 실제 상황을 얼마나 잘 반영하여 계획되었는가에 따라 정책적 효과가 결정된다. 때문에 정부 및 지자체에서는 특정 재난 상황을 가정한 재난 대피 훈련을 통해 대피 계획을 수립하려는 노력을 하고 있다. 그러나 재난의 특성상 발생 범위와 규모를 예측하기 어렵고, 훈련의 시행과정에는 제약이 많기 때문에 국내·외 많은 국가들에서 재난 대피과정의 대응 및 계획 수립을 위한 도구로써 행위자 기반 모델(Agent-based Model, ABM)을 활용하고 있다(Murakami et al., 2002; Narzisi et al., 2006; Shi et al., 2009; Yu, 2012).

행위자 기반 모델은 미시적(Microscope) 보행 시뮬레이션 모형의 하나로 단순히 공간의 물리적 요소(출입구 위치, 개폐방향, 시설물 위치 등)에 따른 보행자의 움직임에만 초점을 맞추는 것이 아니라, 보행자 주변 환경 요소(보행시설, 교통신호, 건물 등)와 보행자간의 상호작용을 통한 보행시간, 보행속도, 보행거리의 변화를 고려하는 모델이다(Lee, 2008). 행위자 기반 모델은 공간의 구조적 특성과 함께 환경의 변화로 인해 나타나는 행위자들의 의사결정 변화를 반영할 수 있기 때문에 자연재해나 사회적 재난과 같은 위험상황에서의 다양한 행위자들의 대피 행태를 분석하는데 유용하다(Choi et al., 2018). 행위자 기반 모델은 재난 대피계획에서의 핵심적인 요소인 대피 소요시간 추정, 병목현상의 발생지점 등을 파악함으로써 정책입안자들이 제시하는 여러 정책 시나리오들에 대한 적용가능성과 실효성을 빠르게 평가할 수 있다(Sin and Joo, 2013). 특히 대피 소요시간은 시민들의 생존과 직결되는 요인으로써 시나리오 기반의 시뮬레이션 결과는 대피시간 단축을 위한 세부적인 지원방안을 구축하는데 활용될 수 있다.

본 연구에서는 설문조사를 수행하여 긴급 상황에서의 시민들의 일반적인 대피행동 특성을 파악한 후, 이를 모의설계 지역에 적용하였다. 대피소 인지여부, 대피시점, 이동수단 선택에 관한 응답자 비율을 토대로 4가지 시나리오를 설계하고, 홍수 발생상황을 가정한 중규모의 행위자 기반 재난 대피모델을 통해 영향요인들이 대피 소요시간에 미치는 영향을 분석하였다. 시나리오별 대피 소요시간을 비교하여 대피 계획의 효과를 높이기 위해 고려되어야 할 요소들을 파악하였다.

2. 관련 연구 동향

행위자 기반 모델(ABM)은 공간 시스템 내 행위자(agent)들의 상호작용을 모델링하여 전체 시스템에서의 행동 패턴을 분석하는 시뮬레이션 방법이다(Ariuntsetseg and Yom, 2013).

이는 행위자들의 특성을 고려하여 다양한 행동양식을 매개변수(parameter) 형태로 부여함으로써 실제에 가깝게 모사가 가능하다. 예를 들어 행위자들의 이동속도, 출발시간, 대피소까지의 이동거리, 목적지 정보 등의 다양한 변수들이 고려될 수 있다. 시뮬레이션이 진행되는 동안 알고리즘에 따라 부여된 정보를 기반으로 행위자들의 움직임을 관찰하여 행위자들의 위치, 대피소까지의 소요시간, 대피소별 도착인구 등을 파악할 수 있다. 그러나 행동양식을 가상공간에 적용하기 위해서는 각 매개변수들 간의 상관관계를 고려해야하며, 대상지의 범위가 넓거나 행위자의 수가 많아질수록 가상공간을 구성하는데 한계가 발생한다.

재난 상황을 가정한 행위자 기반의 대피모델은 실제 대상지의 공간구조 및 대피수요 인구를 가상공간에 반영하는 것, 예상되는 재해규모를 파악하여 피해범위를 예측하는 것, 비상상황에서 사람들의 행동패턴을 고려하는 것이 매우 중요하다. 이는 분석범위에 따라 실내 공간(건물, 지하시설, 항공기 등)을 대상으로 하는 재난 대피모델과 도시 내 재해영향권 지역의 실외 공간에 대한 재난 대피모델로 구분할 수 있다. 재난 대피모델과 관련하여 국내에서는 건물 내의 비상상황을 가정한 실내 보행자 대피행태 분석이 주로 수행되었다. 특히, 건축물 내부의 화재상황을 가정하고 재실자들이 피난하는데 소요되는 시간을 측정하거나 대피 공간 설계를 위한 연구들이 다수 수행되었다(Joo and Kim, 2011; Choi et al., 2013). 반면, 도시지역을 대상으로 하는 중규모 또는 거시적 단위의 재난 대피모델 연구는 상대적으로 매우 적은 것으로 조사되었다. 교통수요모형을 이용한 통행변화 연구(Na et al., 2013; Sin and Joo, 2013)나 도시 규모 대피모델의 적용가능성을 파악하는 연구(National Disaster Management Research Institute, 2008; Park and Yoon, 2017)가 일부 수행되기는 했지만, 도시 내 실제 재해영향권에서의 시민들의 대피 행태를 분석한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 또한, Yu (2012)은 GIS와 행위자 기반 모델을 서울시 양천동 일대의 소규모 공간에 적용하여 행위자들의 신체적 특성을 반영한 대피 경로 및 행태를 분석하였고, Choi et al. (2018)는 세종시 도담동 일대를 대상으로 지진 발생 시 보행자의 대피 속도와 정보제공에 따른 대피 소요시간의 변화를 추정하였으나, 재난 상황을 가정한 행위자 기반 재난 대피 모델의 경우 재난의 유형과 지역의 공간적, 인구학적 구성에 따라 결과가 달라질 수 있기 때문에 행위자의 행동특성과 함께 다양한 위험요인 및 공간적 요인을 고려한 연구가 필요하다고 판단된다.

3. 연구 방법

대피 시뮬레이션을 위한 행위자 기반 모델을 구축하는데 있어서 중요한 것은 대피 과정에서 나타나는 사람들의 행동양상을 파악하고, 이를 입력하여 모델을 실행시키는 것이라고

할 수 있다. 본 연구에서는 대피 과정에서 나타나는 시민들의 행동특성에 관한 데이터를 수집하기 위하여 설문조사를 수행하였다. 그리고 대피 모델을 적용하기 위한 모의실험 지역을 선정한 후, JAVA 프로그래밍 언어 기반의 상용 시뮬레이션 소프트웨어인 AnyLogic 을 이용하여 대피 모델을 구축하였다. AnyLogic 은 임의의 환경에서 나타나는 복잡성과 불확실성을 분석하기 위한 동적 시뮬레이션 도구로써 산업, 정책, 국방, 의료 등 다양한 분야에서 보편적으로 사용되고 있다 (Karpov et al., 2005; National Assembly Research Service, 2016). AnyLogic은 프로그램 내에 행위자 기반 모형(ABM), 시스템 다이내믹스(system dynamics), 이산 사건 시뮬레이션(Discrete-event simulation)의 모델링 도구를 제공한다.

3.1 설문조사

본 연구는 설문조사를 수행한 결과를 기반으로 행위자의 행동 패턴을 가정하고 대피 시뮬레이션에 적용하였다. 설문조사는 20세 이상 성인을 대상으로 전화응답 방식으로 실시되었으며, 2018년 6월 한 달간 진행되었다. 그 결과 341개 유효한 샘플을 얻을 수 있었다. 설문은 홍수로 인해 대피소로 이동해야하는 상황을 가정하고 개별 응답자가 어떻게 행동할지에 관하여 응답하는 내용으로 구성되었다. 예를 들어, 응답자가 대피소의 위치를 알고 있는지, 재난이 발생하고 언제 대피소로 이동하는지, 대피 시 이동수단은 무엇을 선택할 것인지에 대한 내용을 포함하였다.

Table 1은 대피소의 위치 인지여부, 재난 발생 후 대피시점, 대피 시 이동수단에 관한 설문결과를 나타낸 표이다. 대피소 위치 인지여부와 관련하여 약 30% (103명)의 응답자들만이 거주하고 있는 곳 주변의 대피소 위치를 알고 있다고 응답하였으며, 나머지 70% (238명)는 모른다고 응답하였다. 대피시점에 관한 질문에서는 집을 챙기거나 이웃들이 대피하는 것을 확인한 후 대피하겠다는 응답자가 약 60% (204명)로 가장 높은 비율을 차지했으며, 바로 대피하겠다고 답한 응답자는 38.7% (132명)로 나타났다. 그리고 대피 시 이동수단은

로는 도보로 이동하겠다는 응답자가 75.4% (257명)로 가장 높았으며, 자동차를 이용하겠다는 응답자는 21.7% (74명)로 나타났다. 대중교통이나 자전거 등 다른 이동수단을 이용하겠다는 응답자는 2.9% (10명)를 차지했다.

3.2 모의설계지역 선정

도시 내 실제 재해영향권에서의 시민들의 대피행태를 분석하기 위하여 서울시 도림천과 안양천 일대를 모의 지역으로 활용하였다. 도림천 유역은 서울시에서도 상습 수해지역에 속하는 곳으로 2010년에 시간당 94.5 mm의 호우로 인해 2,647세대의 침수피해가 발생하였고, 2011년에는 시간당 113 mm의 호우로 인해 저층 가옥들을 중심으로 총 3,327세대의 침수피해가 발생한 바 있다. 모의 지역에 속하는 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구는 1990년부터 2014년 간 발생한 면적 대비 누적 침수피해 면적이 다른 구에 비해 높진 않았지만, 하천에 인접하고 지대가 낮아 인구대비 이재민(세대) 발생비율이 높은 지역에 속하는 것으로 나타났다(Table 2). 또한, 서울시 내에서도 단독주택 비율이 높은 지역으로 조사되어, 홍수 발생 시 대피소나 인근 고지대로의 대피가 필요한 지역으로 판단되었다.

본 연구에서는 이러한 정보를 바탕으로 Fig. 1과 같이 모의 지역을 구성하였다. 시뮬레이션에 적용된 모의 지역은 노란색으로 표시한 부분으로 영등포구, 구로구, 동작구, 관악구, 금천구의 5개 구(gu)를 포함하고 있으며, 구(gu) 내에서도 지대가 낮고, 하천 주변에 위치한 18개 동(748개 집계구)을 대상으로 하였다. 대상지 안에는 침수위험지역(빨간색) 세 곳이 포함되어 있으며, 하천(파란색)은 도림천과 안양천을 접하고 있다. 시뮬레이션 모델에 적용된 대피소(초록색)로는 국가재난대피시설로 지정된 곳 중에서 지하시설을 제외하고 침수 위험이 적은 고지대에 위치한 시설 세 곳을 활용하였다. 모의 지역의 총 면적은 16.15 km²이며, 인구는 311,791명으로 평균 나이는 40세이다.

Table 1. Disaster Evacuation Plan Survey Results

Questions	Answer	Respondent (N=341)	
		number	%
Awareness of shelter location	Yes	103	30.2
	No	238	69.8
Time of evacuation	Immediately	132	38.7
	After having packed luggage or confirmed that neighbors are evacuated	204	59.8
	After finishing own's work	5	1.5
Evacuation method	Walk	257	75.4
	Vehicle	74	21.7
	Others (public transport, bicycle, etc)	10	2.9

Table 2. Ranking of the Districts (gu) in Seoul (1990-2014)

Rank	Flood-affected households (%)	Flood-affected area (%)	Single house (%)
1	Yeongdeungpo	Gangseo	Gwangjin
2	Guro	Gangdong	Gwanak
3	Gangdong	Secho	Jungnang
4	Secho	Gangnam	Geumcheon
5	Dongjak	Guro	Jongno
6	Gwanak	Mapo	Dongdaemun
7	Seongdong	Songpa	Yeongdeungpo
8	Mapo	Seongdong	Dongjak
9	Yangcheon	Yeongdeungpo	Gangbuk
10	Yongsan	Nowon	Yongsan

Fig. 1. Simulation Study Area

3.3 대피 시뮬레이션 모델 개발

본 연구에서는 재난 발생 시 대상지에 있는 모든 사람들이 대피소로 이동한다는 것을 기본 전제로 하여 대피 모델을 구축하였다. 모의실험 대상지 18개동에 포함된 748개 집계구의 인구데이터를 기반으로 행위자를 구성하였으며, 홍수라는 위험 상황을 가정하였기 때문에 고지대에 위치한 대피소 3곳을 목적으로 설정하였다(Fig. 2). 선택된 3개 대피소의 수용인원은 340명으로 대피 대상인원에 비하여 극히 적으나, 대피소가 고지대에 위치하고 있기 때문에 대피소 지점까지만 도달해도 홍수로 인한 피해를 피할 수 있어 대피소의 수용인원의 한계는 고려하지 않았다.

본 연구에서 구축한 대피 모형은 다음과 같은 단계로 작동된다. 먼저, 모형을 작동시키면 행위자들은 GIS로 구축된 환경에서 집계구 인구수 별로 각 집계구의 중심에 배치된다. 모델에서 하나의 행위자는 10명의 거주인구를 대표한다. 홍수가 발생하면 모든 행위자들이 동시에 재난을 인지하게 되고,

재난 인지 후 행위자들은 거주하고 있는 블록에서 가장 가까운 도로망으로 나와서 도로망을 따라 대피소로 이동한다. 그리고 도로망으로 나온 행위자들은 가장 짧은 노선이 아닌 도로 용량을 고려한 가장 빠른 노선을 선택한다. 대피소의 위치를 아는 행위자는 곧장 대피소로 이동하지만, 대피소의 위치를 모르는 행위자들은 다른 행위자들을 따라 대피소로 이동하거나, 대피소가 아닌 고도가 높은 지역으로 대피한다. 대피소의 위치를 모르는 행위자들은 대피소까지 이동하는데 두 배의 시간이 소요된다. 모든 행위자들이 대피소에 도착하거나 홍수 지역에서 빠져나왔을 때 모형은 종료된다.

대피 모델의 행위자 비율은 대피소 위치에 대한 인지여부, 대피시점, 대피 시 이동수단의 3가지 항목에 대한 설문조사 응답자 비율을 활용해 구성하였다. 그리고 대피소 위치정보와 대피시점을 기준으로 다음과 같은 4가지 시나리오를 설정하였다. 단, 이동수단에 따른 행위자 비율은 모든 시나리오에 동일하게 적용하였다.

- 시나리오 I (S1): 설문조사 결과를 그대로 적용하여 현재 상황에 대한 모의실험을 실시
- 시나리오 II (S2): 모든 행위자들이 대피소의 위치를 알고 있는 것으로 가정하고 모의실험을 실시, 대피시점에 따른 행위자는 설문결과에 나타난 비율을 적용
- 시나리오 III (S3): 행위자의 대부분(90%)이 재난 발생을 인지한 후에 즉시 대피소로 출발하는 것을 전제로 하여 모의실험을 실시, 대피소 위치 인지여부에 따른 행위자 비율은 설문결과를 반영
- 시나리오 IV (S4): 가장 이상적인 상황으로 행위자들이 모두 대피소의 위치를 알고 있으며, 대부분(90%)이 재난을 인지한 후에 즉시 대피소로 이동하는 것을 가정하여 모의실험을 실시

행위자들이 재난을 인지한 후에 대피하기까지 소요되는 시간은 즉시 대피하는 경우에는 0분, 짐을 챙기거나 이웃들이 대피하는 것을 확인한 후 대피하는 경우에는 30분, 중요하게

Fig. 2. User Interface

Table 3. Agent Percentages in Each Scenario

Scenario	Awareness of shelter location		Time of evacuation			Evacuation method		
	Yes	No	0 min	30 min	120 min	walk	vehicle	others
S1	30.2%	69.8%	38.7%	59.8%	1.5%	75.4%	21.7%	2.9%
S2	100%	0%	38.7%	59.8%	1.5%	75.4%	21.7%	2.9%
S3	30.2%	69.8%	90%	10%	0%	75.4%	21.7%	2.9%
S4	100%	0%	90%	10%	0%	75.4%	21.7%	2.9%

Table 4. Travel Speed by Agent Types

Awareness of shelter location	velocity (m/s)		
	walk	vehicle	others
Yes	1.2 m/s	10 m/s	5 m/s
No	0.6 m/s	5 m/s	2.5 m/s

진행하던 일을 끝낸 후 대피하는 경우에는 120분의 시간차를 두었다. 또한, 시나리오Ⅲ과 시나리오Ⅳ의 대피시점은 노약자, 거동 장애인 등을 포함한 사람들이 재난 인지 시 즉각 대피할 수 없는 현실을 반영하여 10%의 행위자들은 재난 인지 30분 후에 출발하는 것으로 가정하였다. 각 시나리오별 행위자 대피 특성에 따른 비율은 Table 3에 나타나 있다.

반면, 행위자들의 속도는 대피 시 이동수단과 대피소 위치에 대한 인지에부를 기준으로 설정하였다. Table 4는 대피소의 위치를 아는 경우와 모르는 경우 이동수단에 따른 행위자의 속도를 나타낸 표이다. 설문조사 응답 결과에 따라서 이동수단을 세 그룹(도보, 자동차, 그 외)으로 구분하였으며, 각각의 속도는 선행연구를 바탕으로 설정하였다(Laplante

and Kaeser, 2004; Boufous et al., 2018). 대피소의 위치를 모르는 행위자는 대피소의 위치를 알고 있는 행위자에 비해 대피소까지의 도달 시간이 두 배 소요될 것으로 설정하였다.

결과적으로 대피소 위치에 대한 인지에부 2개 유형(알고 있음 K, 모름 N 으로 표기), 재난 발생 후 대피시점 3개 유형(0분, 30분, 120분), 대피 시 이동수단 3개 유형(도보 W, 자동차 V, 그 외 O 으로 표기)의 선택에 따라서 시나리오 별로 총 18개의 그룹이 도출되었다. 각 그룹에 속한 행위자 수는 선택된 유형에 해당되는 행위자의 비율을 곱하여 산정하였으며, 행위자 수가 1% (약 311명) 미만인 경우는 모의실험에서 제외하였다. 모의실험에 적용된 각 그룹별 행위자 수는 Table 5에 제시하였다.

Table 5. Number of Agents used in Scenarios

Type	S1	S2	S3	S4
K0W	2,753	9,092	6,384	21,162
K0V	705	2,630	1,827	6,096
K0O	1	506	67	826
K30W	4,258	14,054	654	2,336
K30V	1,252	4,046	9	647
K30O	3	635	0	0
K120W	1	426	0	0
K120V	0	1	0	0
K120O	0	0	0	0
N0W	6,351	0	14,768	0
N0V	1,804	0	4,260	0
N0O	56	0	637	0
N30W	9,808	0	1,631	0
N30V	2,828	0	623	0
N30O	584	0	0	0
N120W	30	0	0	0
N120V	0	0	0	0
N120O	0	0	0	0
Total	30,343	31,389	30,851	31,067

4. 모델 결과

4.1 행위자 비율별 대피 소요시간

Fig. 3은 시나리오별로 대피소에 도착하는 행위자의 비율과 소요시간을 나타낸 그래프이다. 먼저, 시뮬레이션 결과 대상지의 모든 행위자들이 대피를 완료하는데 걸리는 시간은 시나리오 I, II, III에서 약 200분으로 나타났다. 그러나 이상적인 상황(모든 행위자들이 대피소의 위치를 알고 있고, 재난 발생 시 빠르게 대피를 시작할 경우)을 가정한 시나리오 IV에서는 대피를 완료하는데 116분이 걸리는 것으로 분석되어 다른 시나리오에서보다 대피효율이 시간적으로 약 1.72배 높은 것으로 나타났다. 시나리오 I, II, III에서의 대피 완료시간이 비슷한 이유는 각 시나리오에서 가장 늦게 대피소에 도착하는 행위자(본 모델에서는 약 2%)가 동일한 조건을 갖기 때문으로 판단된다. 가령 대피소에서 가장 먼 곳에 거주하면서 가장 늦게 출발하고, 도로로 이동하는 행위자의 도착시간이 기록되기 때문이다.

한편, 행위자 비율별 대피를 완료하기까지 소요된 시간은 시나리오별로 차이가 나타났다. 특히, 시나리오II와 시나리오III는 대피율이 약 40%가 되는 시점을 기준으로 대피 소요시간에 큰 차이를 보였다. 시나리오III의 경우 대피 소요시간이 대피율에 따라 단계적으로 증가한데 비해, 시나리오II는 대피율이 20%인 시점부터 대피완료 비율이 빠르게 증가하여 대피율이 약 40%가 되는 41분 이후에는 시나리오III보다 대피 소요시간이 적게 걸리는 것으로 나타났다.

대피율에 따른 시나리오별 대피 소요시간의 차이는 98%의 행위자가 대피를 완료한 시점까지 점점 벌어지는 것으로

분석되었다. 대피율 98% 시점에서의 소요시간은 시나리오 I이 약 161분, 시나리오II가 약 102분, 시나리오III가 약 140분, 시나리오IV에서 약 82분으로 나타났다. 즉, 현재(시나리오 I)와 비교했을 때 모두가 대피소를 알고 있는 경우(시나리오II)에서 약 1.57배, 대다수가 빠르게 대피를 시작하는 경우(시나리오III)에서는 약 1.15배 신속한 대피가 이루어지는 것으로 분석되었다. 이는 시나리오II와 시나리오III의 결과를 살펴봤을 때 빠르게 대피를 시작하더라도 대피소의 위치를 모르고 이동하는 경우 대피시간이 지연될 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 재난 발생 시 시민들에게 빠른 대피를 권고하는 것뿐만 아니라 대피 목적지를 분명하게 인지시키는 것이 중요하다는 것을 나타낸다.

4.2 집/도로에 남아있는 행위자 비율

Table 6은 시간별로 집 또는 도로에 위치한 행위자의 비율을 나타낸 것이다. 모든 행위자들이 최종적으로 대피소까지 이동하도록 설정되었으나, 집이나 도로에서 머무는 행위자들의 비율은 시간이 지남에 따라 서로 차이가 있었다. 시나리오 I에서는 대피가 시작된 뒤 한 시간이 지나고 나서도 약 56%의 행위자들이 집이나 도로에 머물고 있었으나, 동일한 시각에 시나리오IV에서는 약 13%의 행위자만이 집 또는 도로에 남아있는 것으로 나타났다. 반면, 시나리오II와 시나리오III의 경우 집이나 도로에 머물고 있는 행위자는 초기 30분까지 시나리오III에서 68.25%로 시나리오II보다 더 많은 인원들이 대피를 완료했으나, 60분에서는 시나리오II에서 36.74%, 시나리오III에서 43.17%로 시나리오II에서 더 많은 인원들이 대피를 완료한 것으로 나타났다. 그러나

Fig. 3. Agent Travel time to Shelters (Min)

Table 6. Percentages of Incomplete Agents in the House or on the Road by Elapsed Time

Scenario	10 min	30 min	60 min	90 min	120 min	150 min	180 min	210 min
S1	94.31%	87.61%	56.06%	33.63%	16.04%	3.74%	0.20%	0.00%
S2	89.91%	81.79%	36.74%	6.52%	1.36%	0.93%	0.15%	0.00%
S3	85.89%	68.25%	43.17%	24.14%	7.71%	0.88%	0.04%	0.00%
S4	76.87%	58.50%	13.17%	0.81%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Fig. 4. Changes in the Numbers of Evacuation Complete Agents and Incomplete Agents

150분이 지난 이후에는 다시 시나리오III에서 0.88%로 시나리오II 보다 대피한 인원의 수가 많아지는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 시나리오별로 대피를 완료한 행위자와 집 또는

도로에 남아있는 행위자 수를 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 결과적으로 시나리오IV에서는 재난 발생시점부터 행위자들의 대피가 가장 급격하게 진행되고, 시나리오 I 에서는

가장 천천히 진행되었다는 것을 알 수 있다. 또한, 시나리오II에서 행위자들의 대피율은 약 31분 이후로 급격하게 증가하며, 41분을 기점으로 시나리오III의 대피 완료 인원을 증가하는 것을 알 수 있다.

5. 논 의

21세기 산업과 도시의 성장으로 사회구조가 복잡화되고, 기후변화로 인한 이상기후의 발생 빈도가 증가하면서 재난의 범위와 규모를 예측하는 일이 점점 더 어려워지고 있다. 재난 발생의 불확실성으로 인해 많은 국가들에서 재난의 발생 자체를 막기보다는 어떻게 대처할 것인가에 대해 초점을 맞추고, 피해를 저감하기 위해 노력하고 있다. 특히, 재난 대응과 관련해서 인명피해를 최소화하기 위한 효율적인 대피의 중요성이 강조되고 있다.

이러한 시점에서 본 연구는 행위자들의 대피 행동특성과 상호작용을 고려하는 행위자 기반 모델(ABM)을 이용하여 도시 내 실제 재해영향권에서의 홍수 발생상황을 가정한 재난 대피모형을 구축하였다. 이를 위해 본 연구에서는 대피소 위치 인지여부, 대피시점, 이동수단의 선택에 관한 설문조사를 실시하였고, 이를 바탕으로 시나리오별 대피 소요시간을 비교해 보았다. 그 결과, 모의설계지역 인구 311,791명이 모두 대피소까지 대피하는데 걸리는 시간은 일반적으로 약 200분 정도 소요되는 것으로 나타났으며, 이상적인 상황을 가정한 시나리오IV에서는 약 116분이 소요되었다. 이는 재난 발생에 대비하여 주민들이 대피소의 위치를 사전에 인지하도록 하고, 재난발생 후에 빠르게 대처하도록 하는 것이 대피계획의 효과를 높이는데 중요하다는 것을 의미한다.

한편, 98%가 행위자들이 대피를 완료하는 시점을 비교한 결과, 시나리오 I 이 약 161분, 시나리오II가 약 102분, 시나리오III가 약 140분, 시나리오IV에서 약 82분으로 분석되었다. 현재 상황을 변화시켜 모두가 대피소 위치를 알고 대피를 시작하게 된다면 약 59분, 현재 상황에서 대부분(90%)이 빠르게 대피를 시작한다면 약 21분의 대피시간을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 시나리오III와 시나리오IV를 설계할 때 대피시점과 관련하여 재난을 인지하더라도 즉각 대피할 수 없는 행위자들(노약자, 거동 장애인 등)을 고려하여 10%의 행위자들은 재난 인지 30분 후에 출발하는 것으로 가정하였다. 그러나 만약 모든 행위자들이 바로 출발할 수 있는 상황이 된다면, 시나리오III와 시나리오IV에서의 대피시간은 더 줄어들 수 있을 것이다.

반면, 시나리오II와 시나리오III의 결과를 비교했을 때 재난 발생 후 약 41분까지는 시나리오III에서 대피소에 도착한 행위자의 비율이 높았으나, 41분 이후부터는 시나리오II에서의 행위자의 비율이 높게 나타났다. 또한, 행위자 도착비율의 차이는 98%의 행위자들이 대피를 완료하는 시점까지 점점 더 커지는 것으로 나타났다. 이는 재난인지 후 신속하게

대피를 시작하는 것이 재난 발생 초기 대피율을 높이는데 더 중요하게 작용하지만, 시간이 경과할수록 사람들의 대피소 위치 인지여부가 성공적인 대피율을 높이는데 더 중요하게 작용한다는 것을 의미한다. 또한 이 결과는 재난대비 훈련의 내용이 지역 특성을 반영해야함을 암시한다. 재난 대피소가 고르게 분포하고 대피소의 접근성이 좋은 지역은 재난대비 훈련을 함에 있어서 신속한 대피를 강조해야 할 것이며, 재난 대피소의 위치가 접근성이 떨어지는 곳에 있는 지역이라면 재난대비 훈련과정에서 대피소의 위치를 정확하게 인지시키는데 중점을 두어야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구는 홍수의 재난 상황을 가정하고 행위자 기반 대피 시뮬레이션을 통해 대피소 위치 인지여부, 대피시점, 이동수단에 따른 시민들의 대피 소요시간을 분석하였다. 실제에 가까운 대피 상황을 구성하기 위하여 대상지의 공간 구조 및 대피소수 인구를 반영하였으며, 설문조사를 수행하여 대피과정에서의 시민들의 행동패턴을 분석하고 모델에 적용하였다. 대피 시뮬레이션 결과 발견한 점은 다음과 같다. 첫째, 대피소의 위치를 정확하게 알고 있거나 재난 발생 후 신속하게 대피하는 행위자의 비율이 높아진다면 대피 소요시간을 15%~57% 단축시킬 수 있다. 둘째, 재난 발생 후 즉시 대피를 시작하는 것이 재난 발생 초기의 대피율을 높이는데 더 중요하게 작용하지만, 시간이 경과할수록 사람들의 대피소 위치 인지여부가 성공적인 대피율을 높이는데 더 효과적으로 작용한다. 셋째, 모든 시나리오에서 행위자의 대피는 빠르게 이루어지지만 약 2%의 행위자가 남은 시점에서 대피 시간이 많이 소요된다. 이는 대피소 주변의 병목현상으로 인해 도착이 지연되는 것으로 대피소로부터 먼 거리에 거주하는 주민들의 대피시간을 고려하여 신규 대피소 지정을 통해 대피 효율성을 높일 필요가 있다.

본 연구는 도시 규모의 실제 재해영향권에서의 시민들이 행동 패턴과 이에 따른 대피 소요시간을 분석함으로써 대규모 재난 상황에 대비한 지역 단위의 대피계획 수립에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구는 대피 소요시간에 영향을 줄 수 있는 행위자들의 구체적인 신체적 특성(나이, 장애유무 등)과 이에 따른 보행속도, 행위자 간의 상호작용(도움 또는 잘못된 정보 전달로 인한 동요 등), 행위자의 대피 패턴에 영향을 미칠 수 있는 대피로의 특성(계단, 지하도, 고층빌딩 등)은 고려하지 않았다. 이는 중규모 또는 거시적 규모의 재난 대피 모델의 경우 행위자 수가 많고, 공간이 넓기 때문에 다양한 매개변수를 포함하여 모델링하는데 컴퓨터 연산능력의 한계와 시간적 한계가 있기 때문이다. 향후 다양한 행위자들의 대피행동 정보가 수집되고 시뮬레이션 계산 과정의 효율성을 높이는 연구가 진행된다면, 보다 구체적인 모델 개선이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2015R1D1A1A01059239)입니다.

References

- Ariuntsetseg, E., and Yom, J.H. (2013). Foot-and-mouth disease spread simulation using agent-based spatial model. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 3, pp. 209-219.
- Boufous, S., Hatfield, J., and Grazebieta, R. (2018). The impact of environmental factors on cycling speed on shared paths. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 110, pp. 171-176.
- Choi, M.J., Park, M.S., Lee, H.S., and Hwang, S.J. (2013). Analysis of building emergency evacuation process with interactions in human behaviors. *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 14, No. 6, pp. 49-60.
- Choi, S.H., Jung, H.Y., and Do, M.S. (2018). Analysis of pedestrian evacuation behaviors by the evacuation information scenarios using social force model: Focusing on Sejong city. *The Journal of The Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 31-41.
- Joo., J., and Kim, N. (2011). Modeling and simulation of emergency evacuation using affordance-based FSA models. *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 96-104.
- Karpov, Y.G., Ivanovski, R.I., Voropai, N.I., and Popov, D.B. (2005). Hierarchical modeling of electric power system expansion by anylogic simulation software. *2005 IEEE Russia Power Tech*, pp. 1-5. doi:10.1109/PTC.2005.4524731
- Laplante, J.N., and Kaeser, T.P. (2004). The continuing evolution of pedestrian walking speed assumptions. *ITE Journal*, Vol. 74, No. 9, pp. 32-40.
- Lee, J.H. (2008). Research trend of micro-pedestrian simulation model. *Transportation Technology and Policy*, Vol. 5, No. 4, pp. 23-33.
- Murakami, Y., Minami, K., Kawasoe, T., and Ishida, T. (2002). Multiagent simulation for crisis management. *Proceedings of the IEEE Workshop on Knowledge Media Networking*, pp. 135-139.
- Na, Y., Lee, S., and Joh, C.H. (2013). A study on relationships between travel time and provision of road inundation information in heavy rain and snow using and agent-based simulation model. *Journal of the Economic Geographical Society of Korea*, Vol. 16, No. 2, pp. 262-274.
- National Assembly Research Service. (2016). *Simulated reality forum program book*.
- Narzisi, G., Mysore, V., and Mishra, B. (2006). Multi-objective evolutionary optimization of agent based models: An application to emergency response planning. *Proceedings of the 2nd IASTED International Conference on Computational Intelligence*, San Francisco, California, USA, pp. 224-230.
- National Disaster Management Research Institute. (2008). *Application of evacuation model for coastal inundation*.
- National Water Resources Management Comprehensive Information System. Retrieved from <http://www.wamis.go.kr/>
- Park, S.H., and Yoon, C.J. (2017). A study on the characteristics of the pedestrian evacuation simulation techniques for applicability of urban-scale evacuation. *Proceeding of 2017 Spring Annual Conference*, Architectural Institute of Korea, Vol. 37, No. 1, pp. 367-370.
- Shi, J., Ren, A., and Chen, C. (2009). Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 3, pp. 338-347.
- Sin, H.G., and Joo, Y.J. (2013). A study on prototype model for mesoscopic evacuation using Cube Avenue simulation model. *Journal of Korea Spatial Information Society*, Vol. 21, No. 5, pp. 33-41.
- The Seoul Institute. (2014). *Statistics by Seoul*.
- Yu, S.Y. (2012). GIS and agent-based modeling of emergency evacuation. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 1, pp. 127-132.

Received	October 11, 2018
Revised	October 15, 2018
Accepted	October 23, 2018