

사회적 상호작용이 자발적 대피에 미치는 영향 : 다체계 문제의 수리적 해석

김정식¹ · 박수형¹ · 김병직² · 김남훈^{1*}

¹울산과학기술원 기계공학과 / ²한국원자력안전기술원

Effect of Social Interaction on Evacuation Participation : Mathematical Approach to Many-body Problem

Jeongsik Kim¹ · Soohyung Park¹ · Byoung-jik Kim² · Namhun Kim¹

¹Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology

²Korea Institute of Nuclear Safety

This study proposes an agent-based approach on an evacuation problem to examine individual protective responses caused by social interactions. The closest town from Kori nuclear power plant in the Republic of Korea is targeted in the illustrative problem. Its street network and residents are represented in a mathematical model of matrices, binomial functions, and if-then rules. A two-level factorial design of 6 factors related to social interactions on street and social networks has been adopted with 2 responses for the numbers of ever-contacted and evacuated residents. The results indicate that the type of available interactions has a strong impact on the information recognition for evacuation, notwithstanding many domestic studies in the evacuation simulation have not incorporated the social interactions prior to the leaves. Thus, this study is expected to support not only the implementation of the social interaction for individual responses under disasters, but the interpretation of its potentials on evacuation participation of residents.

Keywords: Agent-based Modeling and Simulation, Evacuation, Many-body Problem, Nuclear Safety, Opinion Dynamics, Social Interaction

1. 서론

심층 강화학습을 중심으로 단일 개체의 최적화 문제에 많은 혁신이 이뤄지고 있으나, 재난 상황과 같이 다수의 개체가 상호작용하고 데이터 마이닝에 제약이 있는 문제는 여전히 접근 방법이 명확하지 않다. 특히, 대한민국은 상대적으로 재난 사례가 적은 편이며, 대피 연구 역시 요소별 특수 기법이나 장비 개발에 초점이 맞춰져 있는 실정이다(Seo *et al.*, 2019). 세계적으로 대형 재난에 의한 피해가 증가하는 상황에서 개인별 상황과 통합 체계를 함께 고려한 연구가 불가피하며, 이는 제2차

국가방사능방재계획(2020-2024) 속 ‘실효적 주민보호대책 확립’ 등의 항목에서도 필요성이 강조되고 있다(NSSC, 2019).

본 연구의 목표는 M&S(modeling and simulation) 기반의 AI 기법인 행위자 기반 모델링 및 시뮬레이션(ABMS)을 이용하여 기존에 접근이 제한되었던 물리적/사회적 공간에서의 정보 전파를 구현하고, 해당 요인이 대피에 미치는 영향을 수리적으로 해석하는 것이다. 수리 모델링은 데이터 구조와 유용 수준에 맞게 접근할 수 있도록 발전하고 있으며, AI 응용을 위해 데이터를 가공할 수 있다는 점 덕분에 4차 산업혁명 시대의 핵심으로 주목받고 있다(Kim, 2020). 특히, ABMS는 요소별 도메인 지식을

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 2003020).

* 연락저자 : 김남훈 교수, 44919 울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50 울산과학기술원 기계공학과, Tel : 052-217-2715, Fax : 052-217-2709,

E-mail : nhkim@unist.ac.kr

2021년 2월 19일 접수; 2021년 3월 24일 수정본 접수; 2021년 4월 7일 게재 확정.

기반으로 다수 개체의 문제를 구조화하여 분석하는 데 널리 활용을 인정받고 있으나, 국내에서의 활용은 아직 제한적이다 (Ahn, 2013). 본 논문의 구성은 다음과 같다. 본문의 제 2장에서는 국내의 ABMS 기반 대피 연구를 정리하고, 제 3장에서는 채택한 문제 정의, 모델 개발 및 실험 설계 방법을 명시한다. 제 4장에서는 수리해석을 위해 상용 소프트웨어인 Minitab을 이용한 결과 분석을 제시하고, 기존 원자력 비상대피 연구와의 차이를 조망하였다. 마지막으로, 제 5장에서는 본 연구의 의의와 앞으로 수행될 연구, 그리고 결과의 활용 방향에 관한 논의로 마무리한다.

2. 관련 연구

ABMS는 다체계 문제(many-body problem)를 보다 사실적으로 표현한다는 장점과 함께, 재난 시 대피 연구를 위해 널리 쓰이고 있는 M&S 기법이다(Lindell *et al.*, 2018). ABMS를 이용한 최근의 국내 대피 연구는 점차 다양한 변인을 포함하는 형태로 발전하고 있다. 보편적인 연구 목적은 크게 두 가지로, 체계 이해를 위한 대상 변인의 중요성 파악과 응용을 위한 소개 시간 추정(Evacuation Time Estimation; ETE)이다. 전자는 주로 통제된 비상상황(공간, 관심 외 요인 등을 제한)에서 다른 분야에서 발견된 대피자의 인지적 특성(Joo and Kim, 2011; Joo *et al.*, 2013), 환경적 특성(Nam *et al.*, 2016) 등에 의한 대피행태 변화를 분석한다. 한편, 후자에 더 초점을 맞춘 연구는 실제 공간을 대상으로 문헌(Choi *et al.*, 2018)이나 설문(Yoon *et al.*, 2018)으로 얻은 최선의 자료를 통해 지정한 행동과 상황 시나리오의 시연을 통해 시간에 따른 대피 수준을 파악한다. ABMS의 활용도 관점에서 보면(Macal, 2016), 국내 대피 연구는 다소 개별적 대피 결정 이후의 수동적인 상호작용(속도 조절, 경로 변경 등) 단계에 치우쳐져 있다고 할 수 있으며, 대피 수행 이전의 능동적인 상호작용(정보 전파 및 습득 등)은 상대적으로 저조하게 고려되고 있는 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2021).

해외에서는 이미 ABMS를 이용하여 기존 접근 방법으로는 접근이 제한적인 지역적, 사회연결망에서의 능동적 상호작용을 구현하고, 재난 시 개인이 어떻게 정보를 얻는지 접근하고 있다(Widener *et al.*, 2013). 특히, 대형 재난 시 개인행동에 대한 실증 자료는 내재한 다양성에 비해 데이터 마이닝이 제한적이며, 설문 자료와의 괴리 역시 보고된 적 있다(Mas *et al.*, 2012). 이러한 상황에서, 사회적 상호작용의 ABMS와 수리적 해석은 대상 체계의 심층적인 이해와 정책적 시사점 도출을 위해 불가피하다고 사료된다.

3. 연구 방법

3.1 문제 정의

본 연구의 범위는 연구 대상인 주민들의 자발적 대피 결정에

사회적 상호작용이 어떻게 영향을 미치는지 ABMS를 통해 연역적으로 해석하는 것이다. 본 문제에서 사회적 상호작용은 주민 간의 정보 교환으로 정의하고, 해당 교환은 물리적 공간인 가로망(street network)이나 사회적 공간인 사회 연결망(social network)에서 일어난다고 가정한다. 실제 실험이 제한된 상황에서 모의 실험 수행을 위해 다음과 같이 문제 시나리오를 정의하였다.

- i) 시뮬레이션이 시작하면 무작위로 선정된 n_T 명의 행위자(최초 대피자; triggering agent)가 즉시 대피의 필요성을 인지한다(결정 소요시간; $T_s = 0$).
- ii) 대피의 필요성을 인지한 행위자는 규칙 A에 따라 자신이 결정한 대피처로 이동한다.
- iii) 대피를 결정한 행위자는 규칙 B에 따라 사회적으로 연결된 행위자들에게 무선 통신으로 자신의 결정을 전파한다.
- iv) 주변의 대피 행동을 감지한 주민들은 규칙 C에 따라 자발적으로 대피 여부를 결정한다.
- v) 행위자는 건물 외부에 있을 경우, 물리적 공간에서 같은 가로 구간의 가시거리 내 행위자들의 상태와 행동 정보를 획득한다.

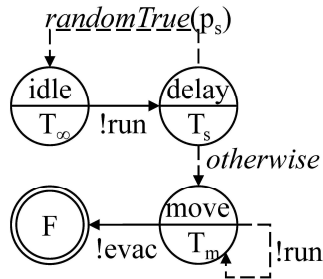
위 시나리오는 재난 연구에서 누적된 대피 행동에 기반하여 단순화한 것이다(Lindell *et al.*, 2012). 당연하게도, 모든 사람이 위와 같은 가정을 따르는 것이 아니며, 본 연구의 목표 역시 사람들의 대응을 정확하게 재현하는 것이 아니라 해당 다체계 구조에서 미시적 상호작용의 작동원리를 수리적으로 해석하기 위함임을 고지한다. 특히, 위에서 임의로 표현된 3가지 규칙은 상황에 따라 다양하게 설정될 수 있는 부분으로, 본 연구에서는 보편적인 상황에서 실증되어있는 각 분야의 대표 이론들을 선정하여 모의실험을 수행하였다.

3.2 개발 모형

행위자 기반 모형은 행위자와 환경, 그리고 행위자의 행동으로 구성된다. 먼저, 유일한 행위자는 주민이며, 상태변수는 위치(가로 구간 및 구간 내 좌표), 이동 속도, 가시거리(10 m; Moussaïd *et al.*, 2009), 사회적 연결, 인지 상태 및 목적지이다. 한편, 행위자가 물리적으로 존재하는 환경은 대한민국 울산시 고리에 있는 원전과 가장 가까운 마을의 도로망에서 추출하였다. 주민들은 <Figure 1(a)>와 같이 99개(N)의 가로 구간 위에서 움직인다. 각 가로 구간은 양 끝에 2개의 출입구만을 가지는 직선으로 가정하였으며, 도로 간 연결 여부는 N행과 N열을 가지는 2개의 이진 행렬(Boolean matrix)을 통해 정의하였다. 예를 들어, 첫 번째 행렬의 i 행 j 열의 항이 참인 경우, i 번째 가로 구간의 출입구가 j 번째 가로 구간의 첫 번째($i > j$) 또는 두 번째 출입구($i < j$)와 연결된 것이다. 각 가로의 길이는 위성 지도를 통해 추출하였으며, 행위자의 구간 내 좌표는 0과 같거나 크고, 각 구간 길이보다 작은 값을 갖는다.



(a) physical space(street network)



(b) cognitive space(stochastic)

Figure 1. State Space of Developed Agents

행위자의 행동은 이동, 결정 전파, 그리고 대피 결정으로 나눌 수 있다. 먼저, 행위자의 이동(물리적 상태 변화)은 차량 이동과 보행 이동으로 구분할 수 있으며, 개발 모형에서는 미리 설정한 값에 따라 등속 운동을 한다고 가정한다. 속도는 각각 13.9m/s (2차로 규정 속도)와 1.3m/s(Moussaïd *et al.*, 2009)라고 설정하고, 0.5초(T_m)마다 갱신한다. 대피 시 차량과 보행자의 비율은 방사선 비상시 주민소개 경보방송에 따른 대응에 대한 설문 조사(Lee, 2016)에서 추출하였으며, 65.9%는 자가 차량을 이용하고 그 외인 34.1%는 전부 보행자로 적용하였다.

행위자는 확률 p_{EO} 에 따라 마을 외부 혹은 지정 대피처인 초등학교를 목적지로 지정하고, 최단 경로로 이동한다. 최단 거리는 Dijkstra 알고리즘(Sniedovich *et al.*, 2006)을 이용하여 추출하였으며, 도로망 외부로 이동하는 지점은 총 4곳 중에서 무작위로 선택한다. 여기서 기술한 이동 경로와 속도에 대한 일련의 가정을 규칙 A라고 명명한다.

위험을 인지한 행위자는 대피를 시작할 때 확률 p_c 에 따라 연결된 행위자들에게 무선 통신으로 자신의 결정을 전파한다(규칙 B). 여기서 전파 대상은 시뮬레이션 시작 전에 작은 세상 네트워크(small-world network) 생성 규칙(Watts and Strogatz, 1998)에 따라 사회적으로 연결된 행위자들이다. 이 연결은 다음의 두 가지 단계를 통해 구현한다.

가. 행위자를 원 위에 일렬로 나열하고 양옆의 행위자와 연결한다.

나. 확률 β 에 따라 기존 연결을 무작위로 고른 다른 노드로의 연결로 교체한다. 단, 중복 연결이나 자기 자신과의 연결은 허용하지 않는다.

주변의 대피 행동을 감지한 행위자는 규칙 C에 따라 대피 여부를 결정한다. 본 연구에서는 실제 재난에서처럼 정말 위험이 존재하는지 판단하는 데 시간이 소요된다고 가정한다. 즉, 개발 모형의 행위자는 국내 설문 조사(Lee, 2016)의 응답에 따라 다음 분포(T_s)의 소요시간을 갖는다: 23.0%(10~20분), 29.8%(20~30분), 20.8%(30~40분), 4.5%(40~50분), 8.2%(50~60분), 13.5%(60~120분). 해당 시간을 소요한 뒤, 행위자는 자신의 방침에 따라 대피 여부를 결정한다. 위와 같은 조사(Lee, 2016)에서 ‘국가 정부의 공식적인 발표가 없을 때 대피 하겠습니까?’라는 질문에 57.2%(p_s)의 사람들이 대피하지 않는다고 응답하였으며, 본 모형에서도 주변의 대피 결정에 영향을 받지 않는 집단은 위 확률의 이항 함수에 따라 결정하도록 설정하였다(<Figure 1(b)> 참조). 한편, 비율 p_l 의 행위자는 주변 행위자의 대피 여부를 고려한다고 가정한다. 해당 유형의 행위자는 사회적 연결이 이용 가능한 경우, 연결된 행위자 중 대피한 사람이 없으면 대피 연기, 모두 대피했다면 대피 수행을 결정한다. 그 외의 경우엔 기존 행위자들과 동일한 확률(상기 이항 함수)로 대피함으로써, 대피 여부의 결정 규칙을 단순화하였다.

위에 서술한 행위자의 인지 상태와 행동은 이산사건 시스템 명세(Discrete Event System Specification; DEVS) 형식론에 따라 <Figure 1(b)>와 같이 압축할 수 있다(Kim, 2020). 3.1절의 시나리오에서 정의했듯이, 대기 상태(idle)에서 시작하여 대피 행동(!run) 감지 시 대피 결정 상태(delay)로 변경한다. T_s 의 시간 뒤, p_s 의 확률로 대기 상태로 돌아가며, 그렇지 않다면 대피 상태(move)로 전환되고 주변에 지속적으로 대피 정보(!run)를 전파한다. 대피 중인 행위자가 특정 지역에 도달하면 시스템에 의해 탈출(!evac)하여 도로망에서 사라지게 된다.

3.3 실험 설계

본 절에서는 사회적 상호작용이 개인의 자발적 대피 결정에 미치는 영향을 통계적으로 추출하기 위해서 설계한 실험을 명시한다. 먼저, 실험의 인자(factor)는 6개의 양적 인자로 구성된다. 각 양적 인자와 값의 범위(level)는 <Table 1>에 나열해 두었다. 위 값들은 시뮬레이션 시작 시 고정되어, 실험 중간에 변하지 않도록 설정하였다. 실험의 반응(response)은 시뮬레이션 종료 시 대피 유발자를 제외한 실질 위험 가능성 전파율(r_{con})과 실질 대피 수행율(r_{eva})이며, 개인별로 출력한 상황 발생 후 위험 가능성 인지까지 걸리는 시간과 대피 시작 후 지정 장소까지 이동하는 데 소요되는 시간에서 변환하였다. 반응의 측정값에 영향을 줄 수 있는 불필요한 분산을 최소화하기 위해 입력값들은 모두 이산화하였으며, 도로 및 사회연결망 상 최초 대피자 구성 등 지정되지 않은 변수들(noise)의 영향을 보정하기 위해 조합(design point)별로 30회의 반복 시행(replication)을 수행하였다. 참고로, 사회적 상호작용이 없는 경우($p_c = p_l = 0$) 연결망 갱신율(β)의 영향이 없으므로 유효한 조합의 수는 $7 \cdot 2^3$ 개이다.

Table 1. Discretized Factors for Designed Experiment

Factors	Values
Triggering agents(n_T)	1, 10
Proportion of people being indoor(p_{IN})	0, 1
Proportion of people who evacuate outside(p_{EO})	0, 1
Proportion of giving a call when evacuating(p_C)	0, 1
Proportion of people who imitate other people(p_I)	0, 1

시뮬레이션은 다음과 같이 진행된다. 먼저, 시뮬레이션 시작 시 각 도로 구간의 중간 지점에 한 명의 행위자가 배치하고, 사회연결망을 구축한다. 이후, 3.1절에서 설정한 시나리오대로 대피 상황이 발전하고, 6시간(t_F)이 지나면 시뮬레이션을 종료한다. 이 시간은 후쿠시마 사태에서 동일본 대지진 발생(14:46 JST) 후, 일본 정부가 최초로 원자력 비상에 의한 소개를 지시(20:50 JST)하는 데까지 걸린 시간을 참고하여 설정하였다.

4. 시뮬레이션 결과

모델링과 시뮬레이션은 Intel(R) Core™ i7-7700의 CPU와 윈도우 10(x64) OS를 탑재한 일반적인 데스크톱에서 Anylogic™을 이용하여 수행하였다. 모든 관측(30·2⁶개)을 8개의 프로세서로 처리하는 데 총 592.39초가 소요되었다.

4.1 검증

먼저, 구현한 기능이 기대한 대로 작동하는지 확인하기 위해, 거시적인 관점에서 정보 전파 유형(p_{IN} , p_C)만 고려하여 아래 3가지 항목을 검증하였다.

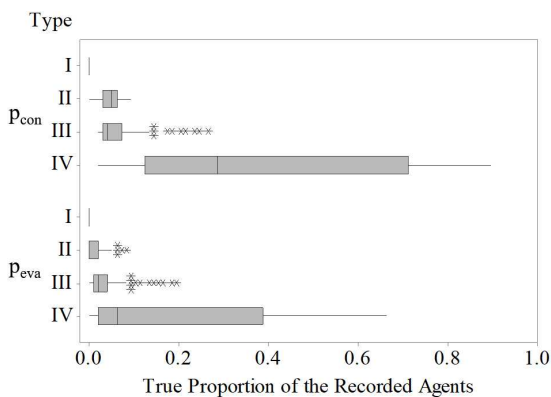
- 1) 대피 정보 전파가 없는 경우(Type I : $p_{IN} = 1, p_C = 0$), 다른 요인과 관계없이 초기 설정한 대피자 n_T 명만 대피한다. 그 외의 경우에는 초기설정 이상의 값을 가진다.
- 2) 물리적 정보 전파만 있는 경우(Type II : $p_{IN} = 0, p_C = 0$), 초기 전파자가 최단 거리로 이동하는 경로와 완전히 동일하게 이동

하기 때문에, 다른 경로에 있는 행위자들은 대피하지 않는다.
3) 물리적/사회적 정보 전파가 동시에 있는 경우(Type IV : $p_{IN} = 0, p_C = 1$), 물리적 정보 전파만 있거나 사회적 정보 전파(Type III : $p_{IN} = 1, p_C = 0$)만 경우보다 평균적인 정보 전파율이 높다.

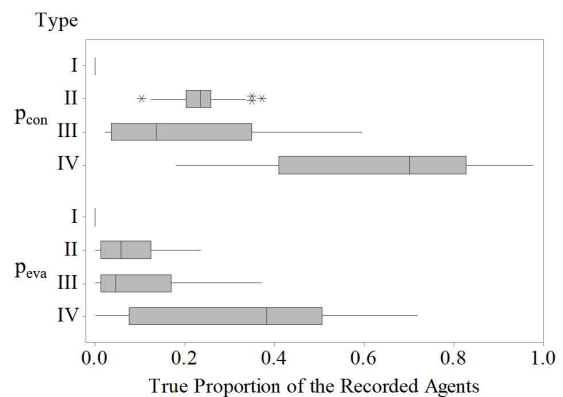
실험 결과의 모든 값에서 위 사항을 만족함을 확인하였다. <Figure 2>는 초기 대피 수에 따라 실질 대피 정보 전파율과 대피 수행률이 측정된 범위를 4분위로 보여주고, 특이치는 *로 표시하였다. 이 특이치는 다음 절에서 다른 변인과 서술될 예정이다. <Figure 2>에서 알 수 있듯, Type I에선 예상대로 초기 설정한 행위자 수에 고정되었고, 실질 기록률이 0인 것을 확인할 수 있다. 상호작용이 없을 시에 초기 대피자만 대피하며, 물리적 전파만 있다면 최초 대피자의 도로망 상 위치와 목적지에 따라 초기에 위험 인지자 수가 결정되고, 대피자 수는 그 값에 근사함을 시연을 통해 확인하였다. 마지막으로, 어느 한 쪽의 정보 전파만 있을 때보다 양 정보 전파가 동시에 있을 때(Type IV), 평균적인 정보 전파율이 매우 큰 것으로 드러났다(p -값 = 0.00).

4.2 통계 분석

본 절에서는 전통적인 통계 분석 프로그램인 Minitab을 이용하여 유의한 결과를 추출하고, 해당 결과를 기반으로 개발된 체계를 설명한다. 먼저, 일반 다중 분산분석 결과, 양 반응에 p_{EO} 를 제외한 모든 인자가 유의한 것으로 나타났다. 모든 유의한 인자들은 .00으로 명확하게 연관이 있다고 할 수 있다. 실험 설계에 따라 인자 간 Pearson 상관계수는 전부 .00이며, 양 반응인 r_{con} 과 r_{eva} 사이의 계수는 .94로 높은 양의 상관도를 가진다. 유의 인자와 반응 간 상관관계에서, β 와의 계수 크기는 각각 .20, .19으로 약한 상관 관계, 나머지는 .24~.36로 중약 수준의 상관성을 가진 것으로 확인되었다. 여기서, 사회연결망의 구조를 대변하는 β 는 두 가지 극단적인 값(0 : 최소 거리 네트워크, 1 : 무작위 네트워크)만 실험한 것으로 소세상 네트워크의 연관성을 평가하기 위해서는 연결망의 크기와 복잡도를 높인 시행이 필요해 보인다.



(a) $n_T = 1$



(b) $n_T = 10$

Figure 2. True Proportion of the Ever-Contacted and Evacuated Residents

Table 2. Main Effects for the Ever-Contacted and Evacuated Residents

Index	n_T	p_{IN}	p_C	β	p_I	Adj. R^2
r_{con}	.14	-.27	.25	.08	-.10	68.7%
r_{eva}	.07	-.12	.14	.05	-.09	49.8%

1차 일반회귀 분석 결과(<Table 2> 참조), 실질 위험 가능성 인지율(r_{con})에 대한 주 효과 계수는 각각 .14, -.27, .25, .08, -.10이고 보정 설명력은 68.7%로 나타났다. 실질 대피 수행률(r_{eva})에 대한 주 효과 계수는 각각 .07, -.12, .14, .05, -.09이고 보정 설명력은 49.8%로 나타났다. 높은 상관계수에서 알 수 있듯이 양 반응에 대한 회귀 계수는 비슷한 양상을 띠고 있으며, 계수 크기에는 다소 차이는 있으나 항별로 같은 부호를 가지는 것을 확인할 수 있다. 양 반응의 가용 범위가 0에서 1까지라는 점에서 가로 및 사회연결망에서의 정보 전파 유무에 따른 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 2차 교호작용(<Figure 3> 참조)을 보면, 다양한 교호 작용이 존재하지만 요인별 주 효과의 방향이 역전되는 경우는 발생하지 않는다. 특히, 양 연결망에서의 상호작용이 교차될 때 아주 큰 교호작용을 가진다는 것을 확인할 수 있다. 그 외에도 뚜렷한 교호작용이 p_C 를 중심으로 나타나며, 이는 시스템 출력에 교호작용의 영향을 반드시 고려해야 함을 의미한다. 실제로, 양 반응에 대해 회귀식 추출 시 교차항을 포함하는 11개의 항이 유의하게 추출되어 대상 체계의 직관적인 해석이 어려워진다. 주 효과에서 영향이 큰 두 가지 요인은 정보 전파 유형을 결정하는 요인과 같다. 여기서, 물리적 전파(Type II)와 사회적 전파(Type III)만 있는 체계는 각각 이항 함수(binomial func-

tion)의 확장으로 볼 수 있으며, Type I과 Type IV는 각 기능의 부재와 결합이다. 즉, 전파 유형은 모형의 구조적 재귀성을 결정하는 요소이며, 이에 따라 대상 체계를 분류하여 보는 것이 편리하다. 정보 전파 유형 별로, 각 반응의 회귀함수를 추출한 결과는 <Table 3>에 정리하였다. 각 회귀식의 항은 모든 교차항에 대하여 유의수준 0.1과 다중선형성 계수 10을 기준으로 후진 제거한 것이다. Index 열의 앞에 항목은 전파 유형이고, 뒤의 항목은 반응의 약자이다. 참고로, Type I은 4.1절에서 설명하였듯이 분산을 가지지 않으므로 따로 포함하지 않았다. 먼저, II-con은 초기 대피자 수에만 영향을 받는 것을 알 수 있다. 즉, 개발 시스템은 Type II일 때, 가로 연결망 상에서의 대피 위험성 전파를 허용하며, 대피자의 가로 연결망 상 이동 경로에 따라 만난 사람들을 이항 분포(binomial distribution)에 따라 또 다른 대피 정보 유발자로 만드는 구조를 가진다. Type II에서 인지율에 비해 대피 수행률이 크게 하락하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 특히 모방과 관련이 깊다. 즉, 시연 초기에 가로망에서 정보를 얻는 경우, 사회 연결망 상 행위자들을 따라 모방을 지연할 확률이 매우 높아지기 때문이다. 같은 이유로, Type III에서는 모방의 유효하지 않고, 상대적으로 대피율이 덜 하락하는 것을 확인할 수 있다. 한편, Type III은 사회

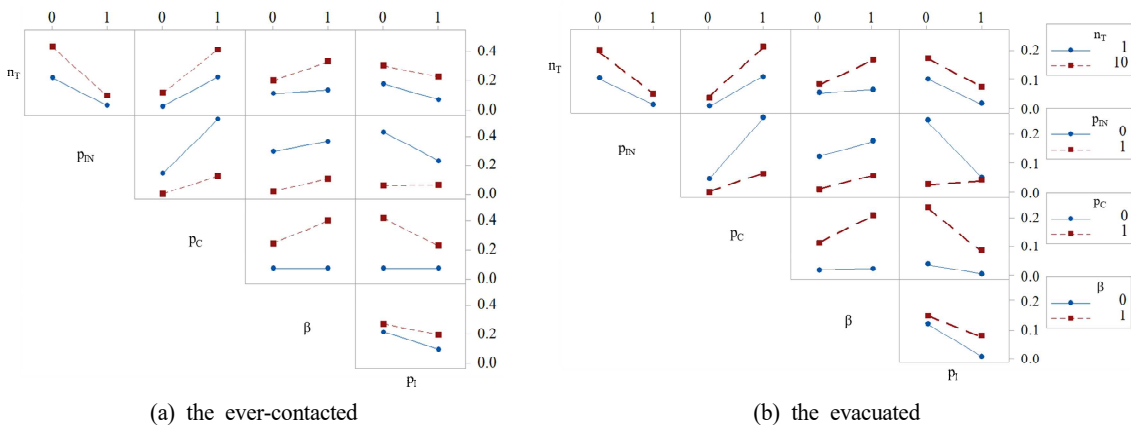


Figure 3. Two-way Interaction Plots to the True Proportions after 6 hours

Table 3. Coefficients of Regression Model by Information Propagation Type(C : constant)

Index	C	n_T	β	p_I	$n_T\beta$	n_Tp_I	βp_I	$n_T\beta p_I$	Adj. R^2
II-con	.048	.187	.000	.000	.000	.000	.000	.000	86.2%
II-eva	.025	.099	.000	-.024	.000	-.098	.000	.029	80.1%
III-con	.039	.000	.026	.000	.277	.000	.018	.000	85.8%
III-eva	.019	.000	.000	.000	.123	.000	.031	.044	72.4%
IV-con	.590	.175	.072	-.460	.000	.000	.000	.273	75.2%
IV-eva	.331	.141	.037	-.320	.000	-.133	.000	.235	75.3%

연결망에서의 대피 위험성 전파를 허용하고, 개별로 연결된 행위자에게 위험을 전염시킨다. 고정되어있는 가로망의 구조와 달리, 사회연결망과 관련이 깊은 연결망 갱신률(β)와 모방 여부(p_i)가 포함되는 것을 알 수 있다. 특히, β 와 n_T 의 교차항은 다른 항보다 큰 계수를 가지며, 이는 한 명으로 정보 전파를 시작하거나($n_T = 1$) 바로 양 옆 사람에게만 전달할 때($\beta = 0$) 시스템에 다른 대피 정보 유발자를 만들 확률이 줄어들기 때문이다. 예를 들어, Type III에서 $n_T = 1$ 일 때 최초 대피자에게 정보를 습득한 행위자들이 모두 정보 전파를 거부할 확률이 32.6%에 육박한다.

Type IV는 Type II와 III의 상황이 동시에 일어나는 구조를 가지고, 출력값의 범위 역시 다른 유형의 값과 그 이상의 값(<Figure 2> 참조)을 모두 포함한다. IV-con은 모방의 유무가 아주 큰 계수를 갖는데, 이는 대피 정보 전파 수준에 따라 모방이 해당 대피 경향을 강화하기 때문이라고 추정할 수 있다. 이로 인해 모방이 없다면 IV-con 기준 24.7%(.590~.837)의 추정 범위를 가지지만, 모방이 있을 때는 52.0%(.130~.650)의 넓은 범위와 뚜렷한 3차 교호 효과를 가지게 된다. 이는 대피 수행률에도 유사하게 적용되나, Type II에서처럼 모방과 초기 인구의 교호작용이 더 뚜렷해지게 된다. 즉, 본 실험의 제한된 결과에 따르면, 대피 연구에서 사회적 상호작용은 단순히 정보 습득뿐만 아니라 대피 결정에도 큰 영향을 주며, 특히 대피 결정 시의 사회적 상호작용은 모방 행동과 함께 재고할 필요가 있다. 또한, Type IV에서의 대피율은 아주 큰 편차를 가지고 있으며, 다양한 현실적 요소(물리적 제약, 문화 및 심리적 특성, 사회적 선호, 가구 유형 등)를 실증 자료와 함께 특정함으로써 선명하게 추정할 수 있을 것이다.

4.3 논의 및 고찰

제한된 요인과 수준으로 구성된 실험이지만, 본 연구가 시사하는 바는 일관적이다. 광역 대피 상황에서 주민의 위험 정보 전파율은 가로 및 사회 공간에서의 사회적 상호작용과 연관이 크고, 국가는 정보 전파 전략을 상황에 맞게 준비해야 한

다는 것이다. 본 실험에서 대상으로 삼은 6시간 동안 공식적인 대피 명령이 없는 상황에서는, 10%의 주민들이 동시에 위험을 인지하고 가로망 및 사회연결망에서 적극적으로 대피를 전파할 때에만 평균 자발적 대피율이 40%($\approx 0.92 \cdot (1-p_s)$) 수준에 도달한다(<Figure 4(a)> 참조). 그 외에는 대피 필요성의 인지 전파가 제대로 이루어지지 않으며, 이는 설문 조사로 측정한 자발적 대피율이 한계가 있을 수밖에 없음을 보여준다. 또한, 자발적 대피 인구는 소개 명령이 내려진 곳의 인구가 대피할 때 추가적인 정체를 생성하며, 전체적인 계획의 변경을 유발할 수 있다. 불명확한 정보에 의한 혼잡을 방지하기 위해, 빠르게 옥내 대기 권고를 내서 가로망 상 정보 전파를 줄이는 게 도움이 되겠지만, 추후 해당 지역에 소개 명령을 내릴 시 정보 전파가 지연될 수 있으므로 개별 정보 습득 환경에 맞는 행동 지침 권고와 정보 전파가 필요하다.

연구결과가 정책에 활용되는 것을 돕기 위해, 대상 지역에 대피 명령이 내려졌을 때의 대피 수행률에 대한 설문 조사 응답(Lee, 2016)을 적용하여 시간에 따른 대피 거동 추이를 <Figure 4(b)>에 나타내 보았다. 최초 10명의 행위자($\approx 10\%$)가 국가의 대피 명령을 받고, 주민들은 본 실험과 같은 시나리오대로 행동하는 상황을 가정하였다. 시연 결과, 대피 명령이 없을 때와 마찬가지로 모든 유형의 출력값들이 점차 수렴하는 형태를 가졌으며, 이는 본 연구에서 공식 명령 전파를 최초 1회로 제한했기 때문으로 판단할 수 있다. 실제상황에서 담당자들은 등록된 모든 주민에게 정보를 전파하기 위해 끊임없이 움직일 것이며, 본 그래프와는 다른 형태를 가질 것을 미리 고지한다. 수렴하는 값들은 사회적 공간에서의 정보 전파가 허용된 경우 큰 폭으로 대피율이 증가하지만, 물리적 전파에 의존하는 경우에는 여전히 대피율이 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 무선 통신이 끊겼을 때나 무선 통신에 익숙하지 않은 환경의 주민에 대한 대피 전략을 개선하기 위해, 개인의 사회적 취약성을 고려한 심도 있는 논의가 필요해 보인다. 이러한 수리적인 방식의 자료 비교해석은 정책 결정 또는 변경에 정당성을 부여해 줄 수 있을 것으로 기대된다.

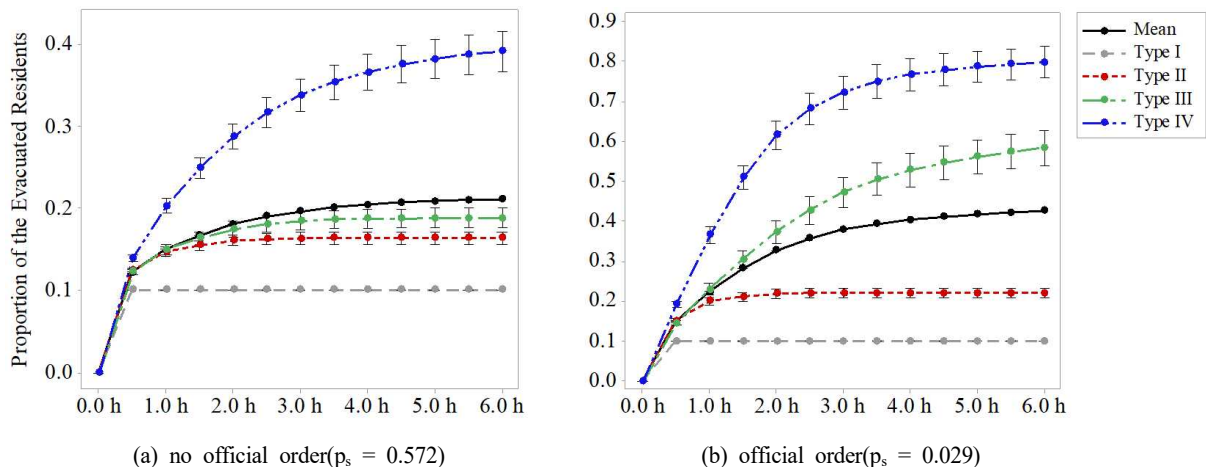


Figure 4. Temporal Dynamics of Evacuation with .95 Confidential Interval($n_T = 10$)

정확한 대피 정보 미습득에 의한 대피 지연과 실패는 체르노빌과 후쿠시마 사태의 민간 사망자 수 차이와 함께 중요성이 강조된 바 있다(Ritchie, 2017). 하지만, 국내 원자력 비상사태 대피 연구에서는 기상에 의한 방사성 물질 전파와 시간별 교통 상황에 따른 소개 시간 추정에 초점을 맞춰왔으며, 정보 전파 수준에 따른 대피 지연 및 실패는 아직까진 저조하게 고려하고 있다(Jeon, 2002; Lee, 2007; Lee, 2016; Lee, 2020). 특히, 후쿠시마 사태의 사후 설문 조사(The National Diet of Japan, 2012)에 따르면, 사고와 대피 명령의 인지는 기존 연구의 전체처럼 즉각적으로 이루어지지 않는다고 보고하고 있으며, 보이지 않는 방사성 물질의 특성상 정부의 2차 피난 지시(1차 지시 후 8시간 뒤) 이후에야 사고 및 대피 필요성이 50% 이상의 지역 주민에게 전파되기 시작했다고 조사된다. 본 연구는 후쿠시마 사태와 같이 즉각적으로 대피해야 할 뚜렷한 단서가 제한된 상황에서 자발적 대피 행위를 평가하였으며, 이후 비상 대피와 관련한 정책개발 연구와 정책 결정에 있어 사회적 상호작용 고려의 필요성을 밝힌 데 의의가 있다. 한편, 본 연구의 결과는 재난 발생 시 불, 연기, 굉음 등의 뚜렷한 단서를 포함하는 재난에 바로 적용하는 데는 무리가 있으며, 해당 재난 사례에 대해 평가할 때는 적절한 대피 유발자 생성을 포함한 산정이 필요할 것이다.

5. 결론

본 연구는 사회적 상호작용이 개인의 자발적 대피에 어떻게 영향을 미치는지 탐색하기 위해 ABMS를 이용한 수리적인 해석을 수행하였다. 국내 최다인 7기의 원자로를 가동하고 있는 고리 원전에서 가장 가까운 마을을 물리적 환경으로 채택하고, 가로망과 사회적 연결망에서 주민들의 사회적 상호작용과 관련된 인자를 선정하여 대피 정보 인지와 대피 수행 여부를 추적하였다. 2-수준 요인 설계에 따른 결과를 통계 분석한 결과, 정보 전파 유형별로 각 반응에 주요한 인자와 교호 효과를 확인할 수 있었다. 사회적 상호작용과 직접 연관된 인자들은 모두 유의성이 드러났으나, 주로 이송 차량 지원이나 정체 수준 추정을 위해 조사되어 온 피난처 유형의 영향은 유의성을 밝히지 못하였다. 특히, 물리 공간에서의 상호작용이 허용될 때, 사회적 모방 행동과의 연관성이 뚜렷하게 드러났으며, 이는 향후 대피 연구에 인지적 요인의 영향이 포함되어야 함을 의미한다. 마지막에는 기존의 관련 설문 조사 및 시뮬레이션 연구의 제약과 함께 본 결과의 정책적 활용 방향을 논의하였다. 국내 다수의 대피 시뮬레이션 연구에서 사회적 상호작용을 저조하게 포함하고 있는 상황에서, 본 연구에서 제시한 대피 모형 구조와 대피 양상에 유효한 변인은 향후 연구의 방향성을 구체화하는 데 기여할 수 있을 것이다.

2021년 현재에도 코로나-19 사태와 같이, 데이터 마이닝에 제약이 있는 다체계 문제들이 즐비하다. 이러한 경우, 생산 시

스템에 주로 쓰이던 산업공학 기법들을 사회 체계에 응용하는 개념(스마트 시티, 재난을 위한 CPS 등)이 대두되고 있다(Kim, 2020). 이와 같은 수리적 접근은 정책적 시사 도출을 위한 토대가 될 수 있으나, 피상적인 데이터 해석이나 소개 시간 추정을 하지 않도록 주의를 기울여야 한다. 본 연구에서도 알 수 있듯이, 다체계 문제의 수리 모델은 각 요소에 대한 단순화의 중첩이므로 하나의 오류에도 전체 결과가 왜곡될 수 있기 때문이다. 이를 보완하기 위해, 실제 재난의 설문 조사 및 유사 상황에서의 가상 실험을 통해 다양한 행동 데이터를 다각도에서 추출하고 여러 수준에서 실증할 필요가 있다. 하지만, 이는 큰 비용을 요구하는 일이며, 본 연구와 같이 각 분야에서 널리 검증된 기법들을 적용하고 대상 체계의 이해도를 높이는 선행 연구를 통해 시행착오를 줄이는 것이 장려된다. 나아가, 본 사례의 3가지 규칙들을 자연 정체, 무척도 네트워크, 프로스펙트 이론으로 구체화하고, 시뮬레이션 기반 강화학습 도구를 연동해 최적 재난 대응 전략 및 핵심 변인을 선별하는 데 이용할 수 있을 것이다. 궁극적으로, 본 논문이 각 분야에서 누적된 지식과 산업혁명의 핵심 기술들을 연계하여 사회 문제를 해결할 수 있는 디지털 트윈(digital twin) 연구의 밑거름이 되기를 기대한다.

참고문헌

Ahn, C. (2013), Large-scale Agent-based Modeling and Simulation, *Industrial Engineering Magazine*, **20**(3), 26-31.

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, *Journal of the Korea Institute of Intelligent Transportation Systems*, **17**(1), 31-41.

Jeon, I.-Y. and Lee, J.-K. (2002), Prediction of Evacuation Time for Emergency Planning Zone of Uljin Nuclear Site, *Journal of the Korean Association for Radiation Protection*, **27**(3), 189-198.

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*, **37**(2), 96-104.

Joo, J., Kim, N., Wysk, R. A., Rothrock, L., Son, Y. J., Oh, Y. G., and Lee, S. (2013), Agent-based Simulation of Affordance-based Human Behaviors in Emergency Evacuation, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **32**, 99-115.

Kim, J., Kim, B., and Kim, N. (2021), Perception-based Analytical Technique of Evacuation behavior under Radiological Emergency : An illustration of the Kori area, *Nuclear Engineering Technology*, **53**(3), pp. 825-832.

Kim, T. G. (2020), *System Modeling and Simulation*, Hantee Media, Seoul, Korea.

Lee, G.-B., Bang, S.-Y., and Chung, Y.-G. (2007), A Study on the Public Evacuation Time Estimates for Radiological Emergency Plan and Preparedness of Wolsong Nuclear Power Plant Site, *Journal of the Korean Association for Radiation Protection*, **32**(2), 79-88.

Lee, J. (2016), Analysis on Estimated Evacuation Time for the Emergency Planning Zone of the Kori Nuclear Site-with a Focus on the Precautionary Action Zone-, Pusan National University, Busan, Korea.

- Lee, S., Hwang, H., Park, E., and Im, W. (2020), Construction of Evacuation Simulation for Ulsan Citizens in Response to Nuclear Accidents, *Proc. of the 82th Conference of Korean Society of Transportation*.
- Lindell, M. K. and Perry, R. W. (2012), The Protective Action Decision Model : Theoretical Modifications and Additional Evidence, *Risk Analysis*, **32**(4), 616-632.
- Lindell, M. K., Murray-Tuite, P., Wolshon, B., and Baker, E. J. (2018), Large-Scale Evacuation, CRC Press, New York, US.
- Macal, C. (2016), Everything you Need to know about Agent-Based Modelling and Simulation, *Journal of Simulation*, **10**(2), 144-156.
- Mas, E., Suppasri, A., Imamura, F., and Koshimura, S. (2012), Agent-based Simulation of the 2011 Great East Japan Earthquake/Tsunami Evacuation : An Integrated Model of Tsunami Inundation and Evacuation, *Journal of Natural Disaster Science*, **34**(1), 41-57.
- Moussaid, M., Helbing, D., Garnier, S., Johansson, A., Combe, M., and Theraulaz, G. (2009), Experimental Study of the Behavioural Mechanisms Underlying Self-organization in Human Crowds, *Proc. of the Royal Society B: Biological Sciences*, **276**(1668), 2755-2762.
- Nam, H., Kwak, S., and Jun, C. (2016), A Study on Comparison of Improved Floor Field Model and Other Evacuation Models, *Journal of the Korea Society for Simulation*, **25**(3), 41-51.
- Nuclear Safety and Security Commission(NSSC) (2019), National Radiological Anti-Disaster Plan 2020-2024.
- Ritchie, H. (2017), What was the Death toll from Chernobyl and Fukushima? Our World in Data, <https://ourworldindata.org/>.
- Seo, Y.-S., Kim, T., Lee, J. H., Park, S. H., Kim, Y. J., and Jung, J.-W. (2019), Development of Disaster Safety Technologies Through Analysis of Safety Service Trends in Disaster Prevention, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **19**(6), 171-179.
- Sniedovich, M. (2006), Dijkstra's Algorithm Revisited : The Dynamic Programming Connexion, *Control and Cybernetics*, **35**(3), 599-620.
- The National Diet of Japan (2012), The Official Report of The National Diet of Japan Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission.
- Watts, D. J. and Strogatz, S. H. (1998), Collective Dynamics of 'small-world' networks, *Nature*, **393**(6684), 440-442.
- Widener, M. J., Horner, M. W., and Metcalf, S. S. (2013), Simulating the

- Effects of Social Networks on a Population's Hurricane Evacuation Participation, *Journal of Geographical Systems*, **15**(2), 193-209.
- Yoon, S., Kim, Y., Lee, D., and Yoon, D. K. (2018), Examining Flood Evacuation Behaviors Using an Agent-based Model, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **18**(7), 163-171.

저자소개

김정식 : 울산과학기술원 제어설계공학과에서 2014년 학사를 취득하고, 기계공학과에서 2021년 박사학위를 취득하였다. 현재는 울산과학기술원에서 다체계 시스템의 행위자 기반 모델링 및 시뮬레이션 연구를 수행하고 있다. 대표 연구 분야는 스마트 시티, 인구 변화, 비상 대피 등을 대상으로 포함하는 복잡계 분석이다.

박수형 : 울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부에서 2020년 학사를 취득하였다. 현재는 울산과학기술원에서 HITL 실험 시스템 개발 및 행동 분석 연구를 수행하고 있다. 대표 연구 분야는 원자력 비상시 대피와 생산 공정에서의 인간 행동 연구이다.

김병직 : KAIST 재료공학과에서 1999년 학사, 2001년 석사학위를 취득하고, 원자력양자공학과에서 2007년 박사학위를 취득하였다. 2007년부터 한국원자력안전기술원(KINS)에서 재직하고 있다. 주요 연구 분야는 원자력시설의 비상대책에 관한 기준개발과 방사능오염분포조사를 비롯한 비상대응기술 개발이다.

김남훈 : KAIST 기계공학과에서 1998년 학사, 2000년 석사학위를 취득하고, 2010년 Penn State University에서 박사학위를 취득하였다. 2010년부터 UNIST 기계공학과 교수로 재직하고 있다. 주요 연구 분야는 3D 프린팅, 모델링 및 시뮬레이션, 제조 시스템 분석을 위한 AI 응용 등이다.