

방사선비상 대응을 위한 인공지능 적용 현황 분석과 향후 연구방향 제언

박영희¹ · 박수형² · 김정식³ · 김병직⁴ · 김남훈^{1,2*}

¹울산과학기술원 인공지능대학원 / ²울산과학기술원 기계공학과 / ³한국전자통신연구원 /
⁴한국원자력안전기술원

Applications of Artificial Intelligence and Future Research Directions for Radiation Emergency Response

Younghee Park¹ · Soohyung Park² · Jeongsik Kim³ · Byoung-jik Kim⁴ · Namhun Kim^{1,2}

¹Graduate School of Artificial Intelligence, UNIST

²Department of Mechanical Engineering, UNIST

³Electronics and Telecommunications Research Institute

⁴Korea Institute of Nuclear Safety

Increasing concerns for global environments has emphasized the need for low-carbon energy. Nuclear energy stands out as a promising energy source in many countries and thereupon, has been extensively investigated. However, as possibility of radiation disasters exists, research for radiation emergency response also have been demanded. In recent years, artificial intelligence (AI) is actively applied as an effective approach for the management of radiation emergencies. This paper presents a systematic review on the successful AI applications in radiation emergency response. Specifically, this study provides the integration of AI into different disaster management phases: Mitigation, Preparedness, Response, Recovery. Based on the comprehensive summary, current limitations and future research directions that significantly advance the radiation emergency response system are also discussed.

Keywords: Artificial Intelligence, Radiation Emergency, Disaster Management, Large-scale Evacuation, Public Protective Action

1. 서론

원자력 발전은 온실가스 배출을 최소화하면서도 안정적인 에너지 공급이 가능한 대안으로 인식되어져 왔으며, 국내 에너지 생산에서도 큰 비중을 차지하고 있다. 하지만, 지난 2011년 일본에서 발생한 후쿠시마 원전사고(2011.3.11)와 2017년부터 이어진 경주 · 포항지진(2016.9.12, 2017.11.15)으로 인하여 방사능 재

난에 대한 우려가 확대되면서 원자력 시설의 중대사고 대응능력 강화의 필요성이 대두되고 있으며, 이를 위해 정부차원에서도 다양한 노력을 기울이고 있다(NSSC, 2019a). 특히 국민의 생명과 직접적으로 연관이 높은 주민보호대책은 방사선비상 상황에서 가장 중요하게 대응해야 하는 부분 중 하나로, 국제 원자력 기구(IAEA) 및 유럽 원자력 공동체(EURATOM)와 같은 국제기관 및 방사선비상 대비 계획을 담당하는 각국 중앙정부기관에서 방사

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

2022년 4월 19일 접수; 2022년 6월 10일, 2022년 8월 19일, 수정본 접수; 2022년 8월 29일 게재 확정.

선비상 관리에 대한 일련의 지침을 구축하고 있다(Yang *et al.*, 2020).

재난 및 안전관리 기본법에 따르면 재난 관리를 위해 재난의 범주를 크게 자연재난과 사회재난으로 나누고 있다. 자연재난은 자연현상으로 발생하는 재난을 뜻하며, 사회재난은 화재, 붕괴, 폭발, 교통사고, 환경오염사고 등과 그 밖에 이와 유사한 사고를 뜻한다. 복합재난은 자연재난 및 사회재난과 결합하면서 발생하여 예측이 어렵고 연쇄효과를 발생시켜 신속한 대응이 필요하다. 한편, 방사능 재난의 경우, 일반적으로 스리마일섬 사고(1979.3.28) 및 체르노빌 사고(1986.4.26)와 같이 인간의 판단오류와 실수로 발생하는 사회재난의 특성이 강하지만, 후쿠시마 사고와 같이 자연현상과 인적 실수의 복합적인 원인으로 발생하는 복합재난의 형태를 띠기도 한다. 하지만, 원전사고로 인한 초대형 복합재난 발생 시 대응 능력과 준비가 아직은 미흡한 실정이다(MOIS, 2019). 이미 해외에서는 재난 관리에 새로운 방법론인 인공지능을 적용하는 사례가 증가하고 있으며 다양한 성과를 얻고 있다(Sun *et al.*, 2020; Tan *et al.*, 2020). 따라서 방사선비상 대응에 대해서도 효율적인 관리를 위해 기존의 방법론에서 벗어날 필요가 있다.

원전사고는 발생빈도가 낮아 데이터 확보에 어려움이 있고 상황과 대응을 모사하기 위해서는 기존의 방식으로 다루기 힘든 제약 조건들을 고려해야 한다. 하지만 위험을 줄이기 위한 대규모 기술 리소스가 확보되고 있으며(Gaillard *et al.*, 2013), 다양한 IoT 기기와 소셜미디어의 등장으로 데이터 수집이 용이해 졌다. 그러나 국내에서는 인공지능 기반의 재난 관리 연구는 아직 활성화되어 있지 않으며(Choi, 2020), 특히 방사선비상의 경우는 거의 전무한 상황이다. 하지만, 이미 해외에서는 인공지능 기술을 활용하여 원전 설비 모니터링, 이상진단, 방사선 측정과 같이 다양한 방면에서 기존 방식보다 향상된 결과를 얻고 있다. 따라서 본 연구는 전반적인 재난에서의 인공지능 도입 사례를 살펴보고 방사선비상 대응 분야에서 적용 가능성을 확인하고자 한다.

본 연구의 목표는 방사선비상을 비롯한 다양한 재난 관리 분야에서 인공지능 적용 현황을 파악하고 방사선비상에서의

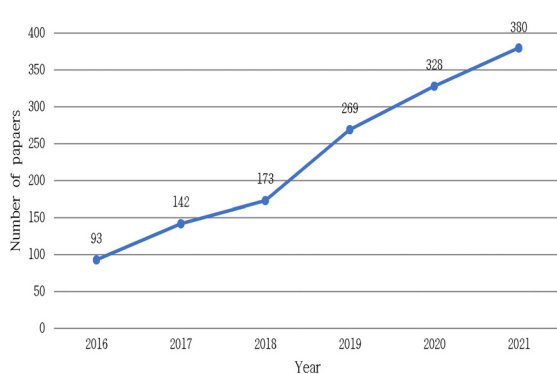
향후 연구 주제를 도출하는 것이다. 방사선비상에 대한 높은 관심과 인식에도 불구하고 관련 동향 연구는 찾아보기 어렵다. 이에 본 연구에서는 방사선비상 대응에서 기초자료로 활용할 수 있도록, 인공지능의 주요 활용사례를 분석하고 향후 연구방향을 제안한다. 본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 본 연구 목적에 부합하는 선행연구 검토를 위한 접근 방법론과 선정된 연구의 분석결과를 정리하였다. 제3장에서는 방사선비상 대응 분야 연구에 대해 검토하고 관련 연구의 필요성을 확인한다. 제4장에서는 방사선비상 대응 분야에서 적용 가능한 향후 연구방향을 제시한다. 결론에서는 연구의의와 기여에 관한 논의로 마무리한다.

2. 재난 관리에서의 인공지능 활용사례 분석

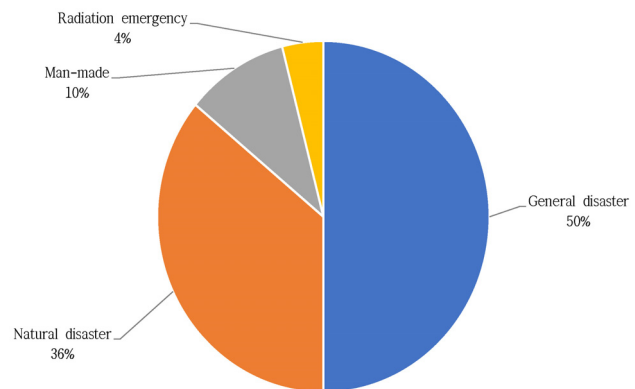
2.1 접근 방법론

체계적인 문헌 검토와 분석을 위해 주요 인용색인 데이터베이스에 대한 검색을 제공하는 Web of Science에서 관련 자료를 수집하였다. 본 연구의 목적에 부합하도록 “인공지능(artificial intelligence)”과 “재난 관리(disaster management)”를 주요 검색어로 설정하였으며, 인공지능에 대한 상세한 기법에서부터 보다 넓은 범위까지 반영하기 위해 “big data”, “data science”, “machine learning”, “deep learning”으로 검색어를 세부적으로 나누었다. 비교적 최근 연구 동향을 확인하고자 2016년부터 2022년 1월 31일까지로 범위를 제한하였으며, 검색 결과 총 1,407건의 연구를 확인하였다. <Figure 1 (a)>에서 확인할 수 있듯이 재난 관리에서 인공지능을 활용하는 사례가 급속도로 증가하였다.

재난 분야별 연구의 대략적인 비중을 살펴보고자 추가적인 키워드 검색을 시행하여 <Figure 1 (b)>와 같은 결과를 얻었다. 대부분의 인공지능 연구는 보편적인 재난이 50%로 가장 많았으며, 자연재난 36%, 산업재난 10%, 방사선비상 4% 순으로 나타났다. 이처럼 정량적 분석을 통해서 방사선비상 분야가 타



(a) Year of Publications



(b) Distribution Fields

Figure 1. Distribution of Reviewed Articles

재난 분야에 비해 상대적으로 저조하게 연구가 수행되고 있음을 확인할 수 있다.

효율적인 분석을 위해 총 1,407건의 연구 중 분석 목적과 가장 부합하면서도 인용수가 높은 연구로 범위를 축소하였으며, 최종적으로 재난 관리 분야 20건, 방사선비상 대응 분야 19건을 선정하여 집중 분석하였다. 다음 절에서는 일반적인 재난 분야의 단계별 연구 현황 분석을 통해 인공지능 활용의 이점과 효과를 알아본다.

2.2 재난 관리 단계별 관련 연구

재난 관리 단계는 예방(Mitigation), 대비(Preparedness), 대응(Response) 및 복구(Recovery)의 네 단계로 나눌 수 있다(Petak, 1985). 앞서 선정한 연구 사례를 체계적으로 요약하고자 재난 관리 단계에 따라 크게 분류하고 각 연구 사례에서 인공지능을 활용한 목적, 사용 데이터, 주요 알고리즘, 성과 및 한계를 <Table 1>과 같이 정리하였다. 인공지능을 활용한 목적을 살펴본 결과 각 재난 단계의 주요 목표와 부합하였으며, 센서 및 IoT 기기 데이터뿐만 아니라 소셜미디어 데이터 등 다양한 데이터를 적극 활용하여 재난 관리에 활용하고 있었다. <Table 1>에서 소개되는 알고리즘에 대한 보다 자세한 내용은 Sun *et al.*(2020)을 참고하길 바란다.

(a) **예방단계**는 위험 요인을 사전에 제거하거나 감소시켜 재난 발생을 방지하는 것을 목표로 한다. 최근 재난의 원인이 복잡해지고 피해가 대형화되고 있어 재난예측이 어려워지고 있으며 위험평가도 갈수록 중요해지고 있다. 한편 인공지능 기술은 대량의 데이터를 신속하게 분석하여 위험을 적시에 평가할 수 있어 재난예측과 위험평가에 많이 활용되고 있다(Yilmaz, 2010). 재난예측의 주요 사례로, 장기간 기상 데이터 및 센서 데이터를 활용하여 개발한 모델로 미개척지의 가뭄을 예측하거나(Rhee *et al.*, 2017), 지진 관련 공개 데이터를 활용한 딥러닝 모델로 여진 위치를 예측하였다(DeVries *et al.*, 2018). 이렇게 얻어진 재난예측 결과는 관리자원 비축과 관련 장비, 시설 및 인력 운용을 위한 기초자료로 활용될 수 있으며, 기존 방법으로 예측이 어려웠던 재난 상황을 확인할 수 있다(DeVries *et al.*, 2018). 위험평가에서는 대용량 데이터 통신에 많이 사용되고 있는 무선 센서 네트워크(WSN)의 보안 취약성을 극복하기 위해 인공지능 기술 중 하나인 강화학습을 적용하였다(Otoum *et al.*, 2019). 하지만 최근 급격한 기후변화에 따라 기존 데이터의 신뢰성이 낮아져 추가적인 데이터 수집과(Rhee *et al.*, 2017) 정확하고 빠른 예측을 위한 노력이 필요하다(Cortez *et al.*, 2018).

(b) **대비단계**에서는 실시간으로 재난을 파악하고 이를 바탕으로 조기에 재난을 알려야 한다. 기존에는 현장의 센서 측정값에 대한 전문가의 분석과 판단에 의존했다면, 인공지능 기술은 관련 비용을 최소화하는 대안으로 제시되고 있다. 특히, 높은 정확도뿐만 아니라 오작동을 최소화할 수 있어 다양한 재난을 대

비할 수 있다. 예를 들면, CCTV 데이터를 활용하여 조기에 화재를 감지해 재난의 영향을 최소화하거나(Muhammad *et al.*, 2019), 다양한 매개변수를 사용하여 고속도로 램프 구간의 충돌 발생을 실시간 분석할 수 있다(Wang *et al.*, 2019). 이처럼 실시간 재난 모니터링과 조기 경보를 통해 재난을 효과적으로 대비할 수 있어 많은 유틸리티 기업과 국가에서 신속하고 정확한 재난 상황 정보 공유를 위해 인공지능을 적극 도입하고 있다(Sun *et al.*, 2020). 하지만, 이미지 데이터와 같은 대용량 데이터의 처리 및 분석은 많은 계산량과 리소스를 요구하여 이를 줄일 수 있는 연구가 필요하며(Li *et al.*, 2018) 정확한 재난 감지를 위해 충분한 데이터를 바탕으로 알고리즘의 확장성 및 신뢰성을 확보해야 한다(Perol *et al.*, 2018).

(c) **대응단계**는 재난이 발생했을 때, 재난 상황을 파악하고 계획에 따라 자원을 배치하여 비상절차를 시행하는 단계이다. 대비단계와 달리 대응단계는 재난이 발생한 시점으로 효과적인 의사결정을 지원하기 위해서는 재난 상황을 정확하게 파악해야 한다. 사람이 접근하기 어려운 재난 상황을 정확히 파악하기 위해 인공지능은 강력한 도구로 사용될 수 있다. 인공지능은 재난 관련 정보뿐만 아니라 시간과 위치 정보를 함께 가지고 있는 소셜미디어 데이터를 분석하는 데에도 효과적으로(Kumar *et al.*, 2020; Ruz *et al.*, 2020), 이는 정확한 상황 인지와 구조 활동에 활용되고 있다. 그리고 건축물과 구조물의 손상 정도를 다양한 인공지능 모델을 통해 분석하여 구조대가 재난 상황에 맞게 대응하도록 지원하는 등 다양한 대응활동에서 활발히 활용되고 있다(Mangalathu *et al.*, 2019). 하지만 대표적인 소셜미디어 데이터인 트위터 데이터는 샘플링 방법에 대한 정보가 없어 데이터 신뢰성 관련 추가적인 검토가 필요하다(Ruz *et al.*, 2020). 또한 비상 상황을 대처하기 위해 강화학습을 적용한 무인 항공기 관련 연구가 많이 이뤄지고 있으나, 시뮬레이션 분석 결과를 실제 상황에서 확인하지 않거나(Liu *et al.*, 2019), 다수의 무인 항공기의 상호작용보다는 하나의 무인 항공기만을 고려하고 있어 실제 상황에서의 활용을 위해서는 향후 다양한 접근법을 연구해야 한다(Rodriguez-Ramos *et al.*, 2019).

(d) **복구단계**에서는 재난이 발생한 이후, 지역사회를 안정시키고 정상성을 회복하기 위해 장기적인 목표를 두고 재난 피해를 복구한다. 일반적으로 재난 복구에는 오랜 시간이 소요되지만, 인공지능 기술은 빠른 시간 내에 복구를 지원할 수 있다. 피해현황과 복구 현황을 확인하기 위해 시행하는 기존의 육안검사 방식은 노동력이 많이 소모되지만, 고해상도 위성사진 또는 GPS 데이터, LiDAR 데이터 등 다양한 데이터를 기반으로 한 분석으로 이러한 노력을 상당히 줄일 수 있다. 기존에는 피해현황 파악 시 사건 전후의 데이터를 비교 분석하는 방식으로 연구가 진행되었다면, 향후에는 사고 후의 데이터만으로도 식별할 수 있도록 추가 연구가 필요하다(Moya *et al.*, 2018). Cha *et al.*(2017)은 기존에 인간이 직접 수행한 구조 현장 검사를 부분적으로나마 대체하기 위해 딥러닝을 활용하여 콘크리트 균열

을 감지하는 방법을 제안하였다. 이처럼 다양한 인공지능 기술들은 재난에 의한 영향을 정밀하게 평가하여 복구계획을 효과적으로 수행하는 데에 사용되고 있으나, 모델 구현을 위해서는 여전히 식별된 정보가 포함된 충분한 레이블 데이터를 확보해

야 한다(Liang, 2019; Zhang *et al.*, 2018). 또한, 효과적으로 재난 현황을 파악하기 위해서는 해당 분야의 도메인 지식과 상당한 계산 시간이 소요되므로 향후 이를 해소하기 위한 관련 연구를 추진해야 한다(Padil *et al.*, 2017).

Table 1. Application Study by Disaster Management Phases

Phases	Purposes	Data Sources	Main Algorithms	Accomplishments and Limitations	Reference
Mitigation	Drought forecast	Long-term climate forecasts and remote sensing data	RF	- Compensate existing methods - Limit on data use due to sudden climate change	Rhee <i>et al.</i> (2017)
	Aftershock locations forecast	Stress variations and aftershock locations	ANN	- Improve predictions of aftershock locations - Scarcity of research on temporal distribution	DeVries <i>et al.</i> (2018)
	Earthquake magnitude prediction	Seismic indicators	RNN, RF	- Demonstrate on the possibility of utilizing ML for random phenomena - Show less sensitivity to simultaneous earthquakes	Asim <i>et al.</i> (2017)
	Emergency event prediction	Emergency events data	RNN	- Predict effectively by reflecting long-term memory - Need additional data to evaluate different emergency events	Cortez <i>et al.</i> (2018)
	Intrusion detection system development	Wireless Sensor Networks data	RL	- More accurate than previous methods - Less effective in case of the binary classification problem	Otoum <i>et al.</i> (2019)
Preparedness	Real-time safety analysis for expressway ramps	Traffic, geometric, socio-demographic, trip generation predictors	SVM	- Explore the impact of diverse parameters on real-time crash risk - Concern about overfitting issue	Wang <i>et al.</i> (2019)
	Earthquake early warning(EEW)	Local p and noise waveforms	RF	- Achieve the state-of-the-art performance in EEW - Not perform well in image processing	Li <i>et al.</i> (2018)
	Early fire detection	CCTV cameras	CNN	- Provide reliable communication by minimum false alarm and high accuracy - Comparatively heavy model size	Muhammad <i>et al.</i> (2018)
	Traffic condition prediction	Spatial-temporal traffic information	CNN, RNN	- Overcome the effect attenuation problem - Lack of comparison with the state-of-the-art models	Cheng <i>et al.</i> (2018)
	Earthquake detection and risk analysis	Continuous seismic records	CNN	- Create algorithms to reliably detect and locate earthquakes - Require enough train data from the target area	Perol <i>et al.</i> (2018)
Response	Sentiment analysis	Twitter data	SVM	- Offer interesting qualitative information - Need to improve data reliability	Ruz <i>et al.</i> (2020)
	Rapid damage assessment of bridges	Structure-specific data	RF, DT	- Assess rapid earthquake-induced damage - Require additional validation in other bridge configurations	Mangalathu <i>et al.</i> (2019)
	Identification of disaster-related informative social media contents	Twitter data	RNN, CNN	- Provide multi-modal system with high performance - Consider only english tweets, not regional languages	Kumar <i>et al.</i> (2020)
	Dynamic movement detection of UAV	Simulation data	RL	- Detect 3D dynamic movement of multiple UAVs - No use real IoT device data	Liu <i>et al.</i> (2019)
	UAV autonomous landing on a moving platform	Position and velocity data of the UAV	RL(PG)	- Train continuous tasks in simulation and test in real - No consider altitude data	Rodriguez-Ramos <i>et al.</i> (2019)
Recovery	Collapsed buildings detection	LiDAR data	SVM	- Identify multiple collapsed buildings - Need more study using only post-event lidar data	Moya <i>et al.</i> (2018)
	Structural safety assessment of damaged buildings after earthquake	Structural response and damage patterns	RF	- Provide reliable statistical support - Require more robust datasets to train	Zhang <i>et al.</i> (2018)
	Reliable identification of structural damage	Modal data	ANN	- Detect damage more accurately - Take a lot of time and require expert knowledge	Padil <i>et al.</i> (2017)
	Crack damage detection	Concrete surface images	CNN	- Lower levels of noise - Limit on damage classification	Cha <i>et al.</i> (2017)
	Post-disaster inspection of reinforced concrete bridge systems	Bridge images	CNN	- Fast and efficient condition screening of damaged structures - Need a lot of labeled data	Liang(2019)

3. 방사선비상 대응 관련 연구

원자력 기술 전 분야에 걸쳐서 재난 안전과 연관이 되지 않는 분야는 없지만 본 연구에서는 주민들의 안전과 연관성이 높은 방사선 누출에 따른 비상 대응을 집중적으로 검토하여 이에 대한 우려를 해소하고자 한다. 본 장에서는 앞서 언급한 재난 관리 단계이자 방사선비상 대응의 위기관리 활동 기준인 (NSSC, 2019b) 예방, 대비, 대응 및 복구의 네 단계를 활용하여 총 19건의 연구 사례를 분류하여 검토하였다. 선정된 연구 사례는 <Table 2>와 같이 목적과 데이터, 알고리즘, 성과 및 한계를 분석하여 요약하였다. 활용한 데이터를 분석한 결과 타 재난 연구와 달리 설문조사(4건)와 시뮬레이션 데이터(9건)의 비중이 높았는데, 이는 방사선비상 상황 특성상 재난이 발생하는 경우가 극히 드물어 실제 데이터 수집에 어려움이 있기 때문으로 여겨진다. 알고리즘 측면으로는 타 재난 관리 사례에 비해 기본적인 인공지능 기법이나 통계적 방법론을 활용하는 사례가 더 많았다. 선정된 연구에서 다루고 있는 주요 목적을 분석한 결과 원전 설비에 대한 안전 강화를 위한 모니터링, 경보 시스템 구축 등이 다수 확인되었으나, 방사선비상 상황을 대처하기 위한 연구는 상대적으로 부족하였다. 특히, 기존의 방사선비상 대응 연구도 방사선 측정이나 방사선 영향 평가에 그치고 있어 방사선비상 상황 중 중요한 임무 중 하나인 주민들의 안전한 대피에 대한 연구는 저조하였다.

(a) 방사선비상 상황은 타 재난 상황과는 달리, 방사능 누출 시 비가역적이고 심각한 인체영향이 있을 수 있기 때문에 방사능 누출 사고 방지를 위한 예방활동에 많은 연구가 확인되었다. 특히, 방사능 위해요인을 사전에 분석 및 평가하기 위해 원전과 관련시설에 대한 이상 유무를 지속적으로 모니터링하거나 사고원인을 분석하는 사례가 많았다. 이와 같이 인공지능 기술을 활용함으로써 기존의 시스템 및 방법론보다 좀 더 정확하고 경제적으로 원자력 설비를 모니터링 할 수 있었다 (Radaideh *et al.*, 2020). 또한, 사고 발생 시 정확한 고장 진단을 위해 머신러닝 모델을 구축하여 비교 분석함으로써 더 나은 의사결정을 지원하였다(Choi *et al.*, 2020). 이처럼 인공지능은 다양한 분석 목적뿐만 아니라 다양한 형태의 데이터 분석에도 효과적이었는데 여러 상황을 재현한 시뮬레이션 데이터를 활용하여 원자로의 정상/이상 상태를 식별하거나(Mena *et al.*, 2022; Pinheiro *et al.*, 2020), 라벨링 되지 않은 현장 모니터링 데이터를 활용하여 원자로 상태를 인식하는 등의(Li *et al.*, 2020) 예시를 통해 다양한 형태 데이터에 대한 활용 가능성을 확인하였다.

(b) 대비단계에서는 방사선비상을 대비하여 신속하고 체계적인 대응 시스템을 구축하고 운영하여야 한다. 그리고 위기징후를 감시하고 위기징후 발생 시 이를 평가해야 한다. 이를 위해서는 인간의 실수를 없애거나 최소화하여야 하는데 매우 긴급한 상황에서 인간이 대처하는 것은 거의 불가능에 가깝다. 이런 상황에서 인공지능은 복잡한 시스템에서 인적오류를 제거하는 대

안으로 제시되고 있다. 예를 들어, 지진 경보 시스템 및 관련 제어 알고리즘에 신경망 네트워크 기반 모델을 적용하여 운영하거나(Woo, 2019), 자동으로 원전사고를 분류하고 이상상태를 탐지함으로써 비정상 상황에서 의사결정 과정을 지원하고 있다 (Santos *et al.*, 2021). 또한 방사성 물질이 방출되는 상황에서도 작동할 수 있는 머신러닝 알고리즘 기반 방사선 감지 무선 센서 네트워크를 개발하는 등 극한의 상황에서도 대비할 수 있는 체계 구축을 지원하고 있다(Hashima *et al.*, 2021). 데이터 측면에서도 접근이 어려운 원자력 발전소 내 데이터가 아니라 기상 데이터를 활용하여 사고 시나리오를 구현하고 사고유형을 파악하는데 활용하고 있다(Desterro *et al.*, 2020). 이처럼 인공지능 적용을 통해 의사결정권자가 방사선비상 시 사람과 환경을 보호하기 위해 적절한 보호조치와 조기에 결정을 내리는 데 도움을 줄 수 있다(El-Hameed *et al.*, 2021).

(c) 다음 단계인 대응단계에서는 신속하고 정확한 의사결정을 통해 인명피해 및 방사능 피폭을 최소화하여야 한다. 또한 투명하고 일관된 정보공개를 통해 주민들의 심리안정을 도모해야 한다. Cho *et al.*(2018)은 방사선비상 상황에서 환자에게 필요한 정보를 정확하게 전달하기 위해 실시간으로 정확한 정보 교환이 가능하도록 모바일 애플리케이션을 제작하여 수집된 정보를 시각화하고 통계분석을 시행하였다. 한편, 대응단계에서는 상황을 전파하고 적절한 주민보호조치를 시행해야 하는데 이를 위해 주민들의 자발적 소개와 같은 예상하지 못한 인간 행동에 대한 연구도 필요하다. 소개(疏開)는 방사선비상이 발생할 경우 결정적 영향을 회피하기 위해 취해지는 대표적인 주민보호조치 중 하나로 일시적이 아닌 7일 이내의 대피를 뜻한다(NSSC, 2021). Kim *et al.*(2021)은 기존과 달리 시뮬레이션을 통해 개인의 인식을 바탕으로 한 대피 행동의 시간적, 공간적 역학을 분석한 새로운 방법을 제안하였다. Yang *et al.*(2020)은 머신러닝 기법을 출구 선택 모델링에 적용하여 대규모 원전 비상 소개 시나리오를 설계하고 인간 행동 특성을 추출함으로써 주민 소개 상황 시에 대응체계 구축을 지원하였다.

(d) 신속한 복구를 위해서는 재난 영향을 빠르고 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 방사선비상의 경우 방사능 영향 평가와 이를 바탕으로 한 종합적인 검토를 토대로 방사능 재난 지역의 소개주민의 복귀도 검토하여야 한다. 하지만 방사선비상 특성상 현장실사는 어렵기 때문에 다양한 데이터를 활용하여 원격으로 모니터링 할 필요가 있다. 원격 모니터링의 예로, Matsala *et al.*(2021)은 체르노빌 사고 이후 버려진 농지의 위성 영상 데이터를 활용하여 방사능 퇴적을 추정하였다. 또한, 방사선비상 상황은 신체적 피해뿐만 아니라 심리적 고통과 경제적 동요를 야기하는 데 이를 분석하는 경우에도 인공지능을 적용할 수 있다. Orui *et al.*(2020)은 설문자료 분석을 통해 후쿠시마 원전사고 이후 소개한 사람들의 외상 후 스트레스와 방사선으로 인한 건강 불안이 높음을 보여주었다. Itagaki *et al.*(2018)은 후쿠시마 사고 이후 아동을 대상으로 한 설문조사

를 통해 수면시간과 정신건강 간의 높은 상관관계를 확인하기도 하였다. 다만, 타 단계에서 확인할 수 있는 서로 다른 유형의 데이터 활용이나 새로운 모델을 적용하는 시도와 달리 복

구 단계에서는 위성 데이터와 설문조사 데이터를 활용하여 기본적인 알고리즘 적용이나 통계분석을 통해서 재난 피해를 확인하는 수준에 그치고 있었다.

Table 2. Application Study by Disaster Management Phases in Nuclear Disaster

Phases	Purposes	Data Sources	Main Algorithms	Accomplishments and Limitations	Reference
Mitigation	Human performance trend analysis	Cause code data from a Nuclear Power Plants(NPP)'s management system	Statistical analysis	- Improve human performance in NPP - Require complex trend analysis based on prior recognition of power plant activities	Park(2021)
	Nuclear accident prediction	Simulation data	Deep Neural Network, LSTM	- High accuracy and significant computational cost savings - Difficult to obtain sufficient data due to restrictions	Radaideh <i>et al.</i> (2020)
	Minimization of sensors' fault	Simulation data	MISSforest, GRUD	- Develop sensor fault-tolerant diagnosis system - Need to build a larger database for comprehensive model training and testing before applications	Choi <i>et al.</i> (2020)
	Identification of transient events	Simulation data	AutoML(Logistic regression, DT)	- Propose an effective model for identifying and responding more quickly to reactor transients - Train more models by adding initial conditions	Mena <i>et al.</i> (2022)
	Identification of the automatic reactor operation	Condition monitoring data from a NPP's management system	Deep Learning	- Identify automatic transient with little prior expertise using an end-to-end framework - Require sufficient data and domain knowledge	Li <i>et al.</i> (2020)
	Identification of working conditions in NPP	Simulation data	PCA	- Detect NPP defects using data-based methods - Require knowledge for NPP simulator implementation	Zhang <i>et al.</i> (2020)
	Identification of abnormal(transient and accident) events	Simulation data	Deep Neural Network	- Provide a novel deep learning system with "don't know" response capability and noise tolerance - Lack of research on predictions for the proposed model	Pinheiro <i>et al.</i> (2020)
Preparedness	Risk assessment	Simulation data	Neural Network	- Analyze earthquake warning system to reduce the human error using AI based algorithm - Study more about applications of systems	Woo(2019)
	Prediction of dose in nuclear emergencies	Meteorological conditions	Deep Rectifier Neural Network	- Predict radioactive plume dispersion accurately - Require further studies on the use of more variables and longer prediction times	Desterro <i>et al.</i> (2020)
	Radiation detection	Worker's mobile devices	Multi-Armed Bandit	- Efficient wireless sensor networks for radiation detection - Risky to workers due to using worker's mobile devices located near NPP	Hashima <i>et al.</i> (2021)
	Estimation of the concentrations of the released radioactive materials	Simulation data	CART	- Help decision makers determine appropriate measures - Room for performance improvement with the state-of-the-art algorithms	El-Hameed <i>et al.</i> (2021)
	Classification including anomaly detection	Simulation data	ANN, Deep Rectifier Neural Network	- Provide anomaly detection and "don't know" response - Evaluate the feasibility of the proposed system in realistic scenarios	Santos <i>et al.</i> (2021)
Response	Sustainable medical preparedness system for radiation emergencies	General information about radiation exposure	Statistical analysis	- Summarize the medical response system for radiation emergencies in Korea - Need to apply AI algorithms to radiation emergency medicine to enhance integrity and quality of the network	Cho <i>et al.</i> (2018)
	Evacuation	Simulation data	Agent Based Modeling	- Propose a generic framework of perception-based behavior simulation under radiation emergency - Lack of many aspects of the actual nuclear emergencies	Kim <i>et al.</i> (2021)
	Evacuation	Survey	RF, ANN, Agent Based Modeling	- Design a large-scale evacuation with agent-based modeling and simulation(ABMS) and ML - Consider agents psychological factors and behavior rules	Yang <i>et al.</i> (2020)
Recovery	Clarification of the psychological distress among evacuees	Survey	Statistical analysis	- Present the need for research on the psychological and mental health of evacuees after disaster - Unbalanced group distribution and limitations of surveys	Orui <i>et al.</i> (2020)
	Monitoring after disaster	Biometrical parameter	KNN, RF	- Predict and diagnose natural forest regeneration on abandoned farmlands - Study other algorithms to reduce bias and get information	Matsala <i>et al.</i> (2021)
	Health management survey after accident	Survey	Statistical analysis	- Find the effects of children's sleep behavior after disaster - Need to ensure the quality of survey data	Itagaki <i>et al.</i> (2018)
-	Human-Machine Interaction	Sensor data	-	- Improve the efficiency and accuracy of HMI - Insufficient interaction means and imperfect evaluation	Wang <i>et al.</i> (2020)

4. 방사전비상 대응을 위한 연구 방향성 제언

지금까지 살펴본 관련 연구들을 통해 재난 관리에서 인공지능의 적용이 실제 재난을 대처하는 데 시간적, 경제적으로 도움이 되는 것을 확인할 수 있다. 본 장에서는 선정된 선행연구와 특허 등록 현황을 바탕으로 방사전비상 대응에서 연구가 필요한 분야를 확인하고 해당 분야에서 인공지능 적용 방향을 제시하고자 한다. 먼저 3장의 선행연구 분석 결과, 다른 재난 관리 단계에 비해 대응 단계의 연구가 3건으로 저조함을 확인하였다. 특허 분석의 경우, 2.1장의 접근 방법론을 토대로 검색하여 총 2,627건이 확인되었으며 방사전비상 대응과 관련 있는 특허는 143건이었다. 그 중 대응 단계는 10건으로 타 단계에 비해 기술 발전이 턱없이 부족하였다. 이와 같은 정량적 분석을 바탕으로 대응 단계를 향후 연구가 필요한 단계로 선정하고, 세분화를 위해 대응 단계에서의 주요 임무들을 검토한 결과 주민 대피 분야가 향후 연구가 필요한 분야로 판단하였다. 주민 대피 연구는 주민들의 안전과 직접적인 연관이 있음에도 불구하고 상대적으로 연구가 저조하였는데, 이는 후쿠시마 원전사고 이후 많은 예산이 구호소와 구호물품 등의 인프라 확충에 활용되었기 때문으로 사료된다(The National Diet of Japan, 2012). 또한, 주민 대피 관련 대다수의 연구가 개정된 국제기준을 적용하거나 해외사례를 벤치마킹한 것으로 연구결과가 국가 또는 지자체 매뉴얼 등에 반영되는 하지만 실질적인 현장에서의 활용을 위한 특허 기술은 아니었다. <Table 3>에서 주민 대피 분야의 세부 활동별 인공지능 적용에 대한 장점과 약점을 살펴보고 이를 바탕으로 각 활동별 연구방향을 제안하였다.

주민 대피 분야의 첫 번째 주요 활동은 정확한 상황 파악으로 이를 위한 충분한 데이터 확보 및 재난 특성을 고려한 알고리즘 연구가 필요하다. 이미 다양한 재난 분야에서 인공지능을 적용하여 재난 상황을 인지하고 있으며 상대적으로 데이터가 부족한 방사전비상 대응 분야에서도 IoT 데이터와 시뮬레이션 데이터를 수집하여 활용하고 있다(Hashima *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2020; Radaideh *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2019). 하지만, 여전히 주민 소개를 위한 데이터 확보 연구는 활발히 이뤄지지 않

고 있어 이와 관련된 추가적인 연구가 필요하다. 최근 많이 활용되고 있는 데이터 증강(Data augmentation) 알고리즘이나 행위자 기반 모델링 및 시뮬레이션 연구(Agent-based modeling and simulation, ABMS) 등을 통해 충분한 데이터 확보가 가능하다. 데이터 증강 알고리즘은 새로운 데이터를 수집하지 않고도 데이터 다양성을 증가시킬 수 있으며, ABMS은 기존의 모델링 및 시뮬레이션(Modeling and simulation)과 달리 다수의 자율적 행위자들의 상호작용을 고려할 수 있어 방사전비상 상황과 같은 복잡한 재난 상황을 반영할 수 있다(Karbovskii *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2019). 또한, 재난 특성과 분석 목적에 맞는 알고리즘 연구도 중요한 부분으로, 데이터 특성에 따라 알고리즘 결과가 급변하기 때문에 기존 알고리즘 연구를 바탕으로 방사전비상 상황 데이터에 특화된 인공지능 기술을 개발해야 한다. 그 예로, 비상 상황에서 정확한 방사전량을 측정하기 위해, 방사전 특성을 고려한 특징 추출 연구(Feature extraction)와 상대적으로 긴 시간 이후에도 충분한 예측정확도를 확보하기 위한 알고리즘 연구를 들 수 있다(Desterro *et al.*, 2020). 또한 예방 단계에서 대표적으로 연구되는 발전소 상태 모니터링을 통해 실시간으로 발전소 현황을 파악한다면 대피에 필요한 시간을 사전에 예측할 수도 있다(Li *et al.*, 2020; Mena *et al.*, 2022).

두 번째 주요 활동은 정확한 상황파악을 토대로 최적의 소개 계획을 정하는 것으로 이와 관련하여 시나리오별 상황예측과 시간에 따른 군중 행동 분석 연구를 제안한다. 기존의 시나리오별 상황예측은 스리마일섬 사고 및 후쿠시마 사고 사례를 통해 확인한 바와 같이 주민 사회행동 측면을 반영하는 데 한계가 있다(NSSC, 2019a). 후쿠시마의 경우 부적절한 소개 명령으로 혼란을 야기하여 주민들이 대규모 소개에 나서면서 과도한 인명피해가 발생하기도 하였다(Park *et al.*, 2020). 이처럼 불확실성이 높은 광역 소개 상황을 예측하기 위해서 인간 행동 특성을 추출하고 모델에 반영하여 시뮬레이션함으로써 소개 계획을 평가해야 한다(Yang *et al.*, 2020). 기존의 연구(Yang *et al.*, 2020)는 대화형 설문 데이터를 인간 행동 데이터로 활용하여 방사전비상 상황과 같은 긴박한 상황에서의 실제 행동과 차이가 존재한다. 이를 극복하기 위해서는 가상현실 등의 ICT

Table 3. Strengths, Weaknesses, and Future Research Opportunities in Residents Evacuation

Activity	Strength	Weakness	Future research opportunity
Investigation	- Many use cases for applying AI technology - Development various methods to collect data	- Need for in-depth integration of emerging AI technologies and disaster characteristics	- Data acquisition study - Development of algorithms for disaster characteristics
Planning	- Abundant collected data such as CCTV, network, and traffic data - New research methodology in other fields	- Uncertainty in human behavior	- Scenario prediction based on human behavior - Crowd movement analysis by collected data, and new approaches
Evacuation	- Reliable communication network - Sufficient unstructured data	- Lack of study on Korean language processing	- Natural language processing analysis for Korean - Application service study based on network

기술을 활용하여 방사선비상 상황을 모사함으로써 현실감과 몰입감을 피험자에게 제공한다면 좀 더 실효적인 행동 데이터를 추출할 수 있다(Shendarkar *et al.*, 2008). 최근 이와 같은 방법론을 활용하여 인간의 행동이나 결정을 정량적으로 수집하고 이를 모델로 구현하여 거시적 차원에서의 광역 비상 소개 상황을 예측하려는 연구가 진행되고 있다(Park *et al.*, 2020). 현재는 원자력 발전소 내·외부의 문제점을 파악하고 이를 해결하기 위한 연구 사례가 주를 이뤘다면, 향후 연구에서는 주민 등 인간에 초점을 맞춰 분석하고 활용함으로써 기존 방식으로 야기되는 문제들을 해결할 수 있을 것이다. 군중 행동 예측의 경우 기존에 수집된 데이터 및 새롭게 제안되는 방법론 등을 활용하여 연구한다면 좀 더 효율적으로 접근할 수 있다. 예를 들면, 충분히 수집되고 있는 CCTV 영상, 통신, 교통 데이터를 활용한 시계열 분석 연구나, 최근 다른 분야에서 좋은 성과를 보이고 있는 ABMS와 인공지능 모델을 결합하는 방법론 등을 활용한다면 최적의 소개 계획 수립을 효과적으로 지원할 것이다(Karbovskii *et al.*, 2021).

마지막 주요 활동은 최적의 소개계획에 따라 주민보호조치를 이행하는 것으로 실제로 이행되고 있는 지 확인하기 위한 비정형 데이터 분석과 최근 개발된 LTE 기반 재난안전통신망을 이용한 응용서비스 연구를 제안한다. 방사선비상 상황에서 실제로 주민들이 지침에 따르고 있는지 직접 확인하기 어렵기 때문에, 최근에는 IoT 기기 및 시뮬레이션뿐만 아니라 소셜미디어를 통해서 주민들의 상호작용, 행동, 교통 흐름 등 다양한 데이터를 획득 및 분석하고 있다(Kumar *et al.*, 2020; Ruz *et al.*, 2020). 소셜미디어 데이터는 수치와 같은 정형화된 데이터가 아니라 문자, 이미지와 같은 비정형 데이터 특성을 가지고 있어 이를 분석할 수 있는 자연어처리 알고리즘 연구가 필요하다. 이미 다른 재난 상황에서는 소셜미디어 데이터를 활용한 감정분석으로 주민들의 위험인지 정도와 혼란을 검출하고 있다(Ruz *et al.*, 2020). 하지만, 기존 연구는 영어에 특화되어 있어 한국어 데이터에 적용하기 어려워 한국어에 특화된 연구가 요구된다. 이와 더불어 최근 개발된 LTE 기반 재난안전통신망을 활용한 다양한 응용서비스도 개발할 필요가 있다(MOIS, 2021). 단순한 데이터 공유에서 벗어나 필요한 기관에 적절한 정보를 제공하는 데에도 인공지능 기술이 활용되고 있어, 관련 연구를 통한 시너지를 기대할 수 있다. 인공지능 기술 기반 응용서비스를 바탕으로 관계기관들 간의 교류가 이뤄진다면 더욱 효과적인 의사결정지원도구로서 활용이 가능하다.

5. 결론

복합재난의 증가와 폭발적인 정보의 증가는 증거기반 의사결정을 위한 풍부한 저장소를 제공하는 동시에 의사결정을 더욱 어렵게 만든다. 동시에 다른 유형의 재난을 유도할 수 있어 그 대응이 더욱 복잡하고 어려워지고 있다(Chen *et al.*, 2019). 따

라서 재난 간의 연관성과 대응을 위해 통합하여 관리할 필요가 있으며, 인공지능 기술이 그 역할을 지원할 수 있다. 최근 몇 년간 다양한 재난 관리 분야에서 인공지능 기술을 활용한 사례가 증가하고 있으며, 알고리즘 및 객관적인 사실과 데이터에 근거한 정책결정도 시도되고 있다(Choi, 2020). 하지만 방사선비상 대응과 같은 특수 재난 상황에서의 연구는 저조한 실정이다. 인공지능 기술을 효과적으로 활용하기 위해서는 기존 기술과의 심층적인 통합연구가 필요하다. 본 연구에서는 선행연구를 검토하여 향후 연구방향을 구체적으로 제시하였다. 본 연구의 의의는 다음과 같이 3가지로 요약할 수 있다. 첫째, 방사선비상 대응을 비롯한 다양한 재난 관리 분야에서 인공지능 적용사례를 체계적으로 분석하였다. 둘째, 선행연구 분석을 토대로 재난안전 연구자 및 의사결정권자들에게 인공지능 적용의 필요성을 확인하였다. 셋째, 기존 연구를 바탕으로 인공지능 기술 적용에 대한 예상되는 강점과 약점을 파악하여 향후 연구방향을 제안하였다.

본 논문에서는 향후 연구방향을 크게 데이터와 알고리즘 측면으로 나누어 설명하였다. 먼저, 데이터 측면에서는 방사선비상 상황 특성 상 충분한 데이터 확보가 어렵기 때문에 이를 극복하기 위해서 데이터 증강 알고리즘이나 ABMS와 같은 다양한 방법론을 활용하는 연구를 제안하였다. 기존에 확보된 통신망과 데이터, 인공지능 활용사례를 바탕으로 추가적인 연구가 진행된다면 효율적으로 방사선비상 대응 분야에 적용할 수 있을 것이다. 알고리즘 측면에서 선행연구를 검토한 결과, 타 재난 관리 사례에서 최신 인공지능 모델 구현을 통해 확인된 성과에도 불구하고, 방사선비상 대응 분야에서는 기초적인 통계분석이나 기본 알고리즘을 활용한 연구에 그치고 있었다. 이에 효과적으로 인공지능을 활용하기 위해 데이터 특성에 맞는 알고리즘 적용 연구와 최신 알고리즘에 대한 이해를 바탕으로 심도 있는 연구를 제안하였다. 예를 들어, 본문에서 제안한 바와 같이 주민보호조치 의사결정과 이행을 위해 소셜미디어와 같은 다양한 비정형 데이터 분석과 불확실성 해소를 위한 인간 중심의 인공지능 적용연구를 들 수 있다. 또한, 미시적인 관점에서의 구현과 적용을 위한 데이터 구축, 학습 모델에 대한 구체적인 연구도 이뤄져야 할 것이다. 본 연구를 통해서 방사선비상 대응과 재난 관리를 위한 인공지능 적용 연구의 필요성을 확인하고, 제안한 향후 과제를 추진해 나간다면 안전하고 깨끗한 원자력 기술 개발에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Asim, K. M., Martínez-Álvarez, F., Basit, A., and Iqbal, T. (2017), Earthquake magnitude prediction in Hindukush region using machine learning techniques, *Natural Hazards*, **85**(1), 471-486.
- Cha, Y.-J., Choi, W.-R., and Büyüköztürk, O. (2017), Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engi-*

- neering, **32**(5), 361-378.
- Chen, N., Liu, W., Bai, R., and Chen, A. (2019), Application of computational intelligence technologies in emergency management: A literature review, *Artificial Intelligence Review*, **52**(3), 2131-2168.
- Cheng, X., Zhang, R., Zhou, J., and Xu, W. (2018), DeepTransport: Learning Spatial-Temporal Dependency for Traffic Condition Forecasting, *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 1-8.
- Cho, M.-S., Seong, K.-M., Park, C.-Y., Bae, G.-R., Kim, S.-H., and Jin, Y.-W. (2018), Sustainable Medical Preparedness and Response System FOR Radiation Emergencies in the Republic of Korea, *Radiation Protection Dosimetry*, **182**(1), 20-24.
- Choi, J.-H., and Lee, S.-J. (2020), A Sensor Fault-Tolerant Accident Diagnosis System, *Sensors*, **20**(20), 5839.
- Choi, W.-S. (2020), A Study on the Intelligent Disaster Management System Based on Artificial Intelligence, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, **20**(1), 127-140.
- Cortez, B., Carrera, B., Kim, Y.-J., and Jung, J.-Y. (2018), An architecture for emergency event prediction using LSTM recurrent neural networks, *Expert Systems with Applications*, **97**, 315-324.
- Desterro, F. S. M., Santos, M. C., Gomes, K. J., Heimlich, A., Schirru, R., and Pereira, C. M. (2020), Development of a Deep Rectifier Neural Network for dose prediction in nuclear emergencies with radioactive material releases, *Progress in Nuclear Energy*, **118**, 103110.
- DeVries, P. M. R., Viégas, F., Wattenberg, M., and Meade, B. J. (2018), Deep learning of aftershock patterns following large earthquakes, *Nature*, **560**(7720), 632-634.
- El-Hameed, A. A. and Kim, J. (2021), Machine Learning-Based Classification and Regression Approach for Sustainable Disaster Management: The Case Study of APR1400 in Korea, *Sustainability*, **13**(17), 9712.
- Gaillard, J. C. and Mercer, J. (2013), From knowledge to action, *Progress in Human Geography*, **37**(1), 93-114.
- Hashima, S. and Mahmoud, I. (2021), Efficient wireless sensor network for radiation detection in nuclear sites, *International Journal of Electronics and Telecommunications*, **67**(2), 175-180.
- Itagaki, S., Ohira, T., Nagai, M., Yasumura, S., Maeda, M., Suzuki, Y., Mashiko, H., Shiga, T., Miura, I., and Yabe, H. (2018), The Relationship between Sleep Time and Mental Health Problems According to the Strengths and Difficulties Questionnaire in Children after an Earthquake Disaster: The Fukushima Health Management Survey, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**(4), 633.
- Karbovskii, V., Lees, M., Presbitero, A., Kurilkin, A., Voloshin, D., Derevitskii, I., Karsakov, A., and Sloat, P. M. (2021), Ensemble learning for large-scale crowd flow prediction, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **106**, 104469.
- Kim, J., Kim, B., and Kim, N. (2021), Perception-based analytical technique of evacuation behavior under radiological emergency: An illustration of the Kori area: Evacuation simulation for nuclear emergency, *Nuclear Engineering and Technology*, **53**(3), 825-832.
- Kumar, A., Singh, J. P., Dwivedi, Y. K., and Rana, N. P. (2020), A deep multi-modal neural network for informative Twitter content classification during emergencies, *Annals of Operations Research*, 1-32.
- Li, X., Fu, X. M., Xiong, F. R., and Bai, X. M. (2020), Deep learning-based unsupervised representation clustering methodology for automatic nuclear reactor operating transient identification, *Knowledge-Based Systems*, **204**, 106178.
- Li, Z., Meier, M.-A., Hauksson, E., Zhan, Z., and Andrews, J. (2018), Machine Learning Seismic Wave Discrimination: Application to Earthquake Early Warning, *Geophysical Research Letters*, **45**(10), 4773-4779.
- Liang, X. (2019), Image-based post-disaster inspection of reinforced concrete bridge systems using deep learning with Bayesian optimization, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **34**(5), 415-430.
- Liu, X., Liu, Y., and Chen, Y. (2019), Reinforcement Learning in Multiple-UAV Networks: Deployment and Movement Design, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **68**(8), 8036-8049.
- Mangalathu, S., Hwang, S.-H., Choi, E., and Jeon, J.-S. (2019), Rapid seismic damage evaluation of bridge portfolios using machine learning techniques, *Engineering Structures*, **201**, 109785.
- Matsala, M., Bilous, A., Myroniuk, V., Diachuk, P., Burianchuk, M., and Zadorozhniuk, R. (2021), Natural forest regeneration in Chernobyl Exclusion Zone: predictive mapping and model diagnostics, *Scandinavian Journal of Forest Research*, **36**(2-3), 164-176.
- Mena, P., Borrelli, R. A., and Kerby, L. (2022), Nuclear Reactor Transient Diagnostics Using Classification and AutoML, *Nuclear Technology*, **208**(2), 232-245.
- Ministry of the Interior and Safety(MOIS) (2019), National Basic Safety Management Plan 2020-2024.
- Ministry of the Interior and Safety(MOIS) (2021), World's first LTE-based nationwide disaster safety communication network opened, Korea Open Government License, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148887433>.
- Moya, L., Yamazaki, F., Liu, W., and Yamada, M. (2018), Detection of collapsed buildings from lidar data due to the 2016 Kumamoto earthquake in Japan, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **18**(1), 65-78.
- Muhammad, K., Ahmad, J., and Baik, S. W. (2018), Early fire detection using convolutional neural networks during surveillance for effective disaster management, *Neurocomputing*, **288**, 30-42.
- Nuclear Safety and Security Commission(NSSC) (2019a), National Radiological Anti-Disaster Plan 2020-2024.
- Nuclear Safety and Security Commission(NSSC) (2019b), Standard Manual for Risk Management in Nuclear Safety(Radioactive Leakage).
- Nuclear Safety and Security Commission(NSSC) (2021), Enforcement Rule of The Act On Physical Protection And Radiological Emergency, Attached Table 4.
- Orui, M., Nakayama, C., Moriyama, N., Tsubokura, M., Watanabe, K., Nakayama, T., Sugita, M., and Yasumura, S. (2020), Current Psychological Distress, Post-traumatic Stress, and Radiation Health Anxiety Remain High for Those Who Have Rebuilt Permanent Homes Following the Fukushima Nuclear Disaster, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **17**(24), 9532.
- Otoum, S., Kantarci, B., and Mouftah, H. (2019), Empowering Reinforcement Learning on Big Sensed Data for Intrusion Detection, *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 1-7.
- Padil, K. H., Bakhary, N., and Hao, H. (2017), The use of a non-probabilistic artificial neural network to consider uncertainties in vibration-based-damage detection, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **83**, 194-209.
- Park, J. (2021), A Study on the Trend of Human Performance Related Events at Nuclear Power Plant in 2019, *Journal of the Korean Institute of Industrial Engineers*, **47**(3), 315-320.
- Park, S.-H., Kim, J.-S., Min, B.-J., and Kim, N.-H. (2020), Preliminary Study for Development on Large-Scale Evacuation Simulation under Radiological Emergencies, *Korea Foundation of Nuclear Safety*,

(KoFONS Publication No. NSTAR-20RS41-147).

Perol, T., Gharbi, M., and Denolle, M. (2018), Convolutional neural network for earthquake detection and location, *Science Advances*, **4**(2), e1700578.

Petak, W. J. (1985), Emergency Management: A Challenge for Public Administration, *Public Administration Review*, **45**, 3-7.

Pinheiro, V. H. C., Santos, M. C. dos, Desterro, F. S. M. do, Schirru, R., and Pereira, C. M. do N. A. (2020), Nuclear Power Plant accident identification system with “don’t know” response capability: Novel deep learning-based approaches, *Annals of Nuclear Energy*, **137**, 107111.

Radaideh, M. I., Pigg, C., Kozlowski, T., Deng, Y., and Qu, A. (2020), Neural-based time series forecasting of loss of coolant accidents in nuclear power plants, *Expert Systems with Applications*, **160**, 113699.

Rhee, J., and Im, J. (2017), Meteorological drought forecasting for ungauged areas based on machine learning: Using long-range climate forecast and remote sensing data, *Agricultural and Forest Meteorology*, **237**, 105-122.

Rodriguez-Ramos, A., Sampedro, C., Bavlé, H., de la Puente, P., and Campoy, P. (2019), A Deep Reinforcement Learning Strategy for UAV Autonomous Landing on a Moving Platform, *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, **93**(1-2), 351-366.

Ruz, G. A., Henriquez, P. A., and Mascareño, A. (2020), Sentiment analysis of Twitter data during critical events through Bayesian networks classifiers, *Future Generation Computer Systems*, **106**, 92-104.

Santos, Marcelo Carvalho dos, Pinheiro, V. H. C., Desterro, F. S. M. do, Avellar, R. K. de, Schirru, R., Santos Nicolau, A. dos, and Lima, A. M. M. de. (2019), Deep rectifier neural network applied to the accident identification problem in a PWR nuclear power plant, *Annals of Nuclear Energy*, **133**, 400-408.

Santos, Marcelo C., Pereira, C. M. N. A., and Schirru, R. (2021), A multiple-architecture deep learning approach for nuclear power plants accidents classification including anomaly detection and “don’t know” response, *Annals of Nuclear Energy*, **162**, 108521.

Shendarkar, A., Vasudevan, K., Lee, S., and Son, Y. J. (2008), Crowd simulation for emergency response using BDI agents based on immersive virtual reality, *Simulation Modelling Practice and Theory*, **16**(9), 1415-1429.

Sun, W., Bocchini, P., and Davison, B. D. (2020), Applications of artificial intelligence for disaster management, *Natural Hazards*, **103**(3), 2631-2689.

Tan, L., Guo, J., Mohanarajah, S., and Zhou, K. (2020), Can we detect trends in natural disaster management with artificial intelligence? A review of modeling practices, *Natural Hazards*, **107**(3), 2389-2417.

The national diet of Japan. (2012), *Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission*, The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission.

Wang, C., Huang, T., Gong, A., Lu, C., Yang, R., and Li, X. (2020), Human-Machine Interaction in Future Nuclear Power Plant Control Rooms - A Review, *IFAC-PapersOnLine*, **53**(5), 851-856.

Wang, L., Abdel-Aty, M., Lee, J., and Shi, Q. (2019), Analysis of real-time crash risk for expressway ramps using traffic, geometric, trip generation, and socio-demographic predictors, *Accident Analysis and Prevention*, **122**, 378-384.

Woo, T. H. (2019), Analysis of earthquake management design for nuclear power plants (NPPs) incorporated with artificial intelligence (AI) method. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, **41**(17), 2104-2113.

Yang, L., Yang, L., Wang, X., Wang, X., Zhang, J. J., Zhang, J. J., Zhou,

M., and Wang, F. Y. (2020), Pedestrian Choice Modeling and Simulation of Staged Evacuation Strategies in Daya Bay Nuclear Power Plant, *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, **7**(3), 686-695.

Yilmaz, I. (2010), Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: Conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine, *Environmental Earth Sciences*, **61**(4), 821-836.

Zhang, Yu, Burton, H. V., Sun, H., and Shokrabadi, M. (2018), A machine learning framework for assessing post-earthquake structural safety, *Structural Safety*, **72**, 1-16.

Zhang, Yunfeng, Li, X., and Cai, L. (2020), Identification of Working Conditions in Secondary Loop of Nuclear Power Plant Based on Improved Multiple PCA Modeling, *Nuclear Science and Engineering*, **194**(7), 541-553.

저자소개

박영희 : 부산대학교 전기전자통신공학에서 2007년 학사, 울산과학기술원 비즈니스 분석 과정에서 2021년 석사학위를 취득하였다. 2012년부터 2020년까지 한국동서발전에서 근무하였고, 현재는 울산과학기술원에서 HITL 실험 시스템 기반 AI 응용 연구를 수행하고 있다. 대표 연구 분야는 제조 공정을 위한 AI 응용 연구이다.

박수형 : 울산과학기술원 기계항공 및 원자력공학부에서 2020년 학사를 취득하고, 기계공학과에서 2022년 석사학위를 취득하였다. 현재는 물류 시스템의 모델링 및 시뮬레이션 기반 최적화 연구를 수행하고 있다. 대표 연구 분야는 생산 공정의 디지털 트윈 구축을 위한 인간 행동 분석 및 시뮬레이션 연구이다.

김정식 : 울산과학기술원 제어설계공학과에서 2014년 학사를 취득하고, 기계공학과에서 2021년 박사학위를 취득하였다. 현재는 한국전자통신연구원에서 다체계 시스템의 모델링 및 시뮬레이션 연구를 수행하고 있다. 대표 연구 분야는 스마트 시스템 (팩토리, 항만, 시티 등) 내 에이전트 간 상호작용 분석 및 최적화이다.

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 교수로 재직하고 있다. 주요 연구 분야는 3D 프린팅, 모델링 및 시뮬레이션, 제조 시스템 분석을 위한 AI 응용 등이다.