

Original Article

## 미래형 재난에 대비한 국토방재 지능화 정책대안 고찰 연구

이병재\*

국토연구원 글로벌개발협력센터 연구위원

# A Study on the Policy Alternatives for Intelligent National Territorial Disaster Prevention in Preparation for Future Disaster

Byoung Jae Lee\*

Research Fellow, Global Development Partnership Center, Korea Research Institute for Human Settlements

### 요약

국토·도시 공간 및 사회환경 변화, 기후변화로 인한 극한 기상현황, 자연재난에 따른 국가기반시설 마비 등으로 인해 초대형 재난 발생 가능성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 미래 새로운 환경변화 상에 발생하는 미래형 재난에 대한 국토방재 전략의 체계적 수립을 지원하기 위하여, 미래형 재난에 대비한 국토방재 지능화 정책대안을 고찰하였다. 미래형 재난 관련한 국토환경 변화, 국토방재 관련 국내외 선행연구 및 정책동향, 국토 재난관리 시스템 관련 연구 등을 조사하고 제도적·기술적 정책대안을 도출하였다. 제도적으로 미래형 재난에 대한 자기적응적 국토 조성을 체계화하고, 이를 기술적으로 지능형 의사결정 지원체계를 통해 지속적으로 지원해야 함을 정책적 대안으로 제시하였다.

**핵심용어:** 미래형 재난, 국토방재 정책, 재난관리 플랫폼, 자기적응적 국토

### ABSTRACT

The possibility of a super-large disaster is increasing due to changes in national territory, urban space and social environment, extreme weather conditions due to climate change, and paralysis of national infrastructure due to natural disasters. In this study, in order to support the systematic establishment of national territorial disaster prevention strategies for future disasters, alternatives to intelligent national territorial disaster prevention policies for future disasters were considered. Changes in the national environment related to future disasters, domestic and foreign prior studies and policy trends related to national disaster prevention, and studies related to the national disaster management system were investigated, and institutional and technical policy alternatives were derived. As a policy alternative, it was suggested that the creation of a self-adapting national territory for future disasters should be systematized and continuously supported through a technically intelligent decision-making support system.

**Keywords:** Future disaster, National territorial disaster prevention policy, Disaster management platform, Self-adapting national territory

\*Corresponding author: Byoung Jae Lee, leebj@krihs.re.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1434-8695>

Received: 16 March, 2023, Accepted: 28 March, 2023



© Korean Society of Disaster & Security. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서론

최근 국토·도시 공간 및 사회 환경 변화에 따른 초대형 재난 발생 가능성이 지속적으로 증가하고 있다. UN 경제사회국에서는 전 세계적으로 2050년까지 25억 명의 도시인구가 증가하고 세계 인구의 70%가 도시지역에 거주할 것으로 예상하고 있다. 도시인구의 증가로 인한 도시문제 해결을 위해 빅데이터, 자율주행차, 클라우드, 인공지능, IoT 등 신기술 도입 또한 증가하고 있다. 그러나 국토·도시 효율성을 높이기 위한 목적으로 도입된 신기술로 인해 국토·도시 관리를 위한 시스템 상호의존성 및 복잡성이 급증하는 문제를 가져오고 있다. 초연결화된 도시 시스템에 재해로 인한 충격이 가해질 시 1차적인 재해 피해 뿐만 아니라 2, 3차 연쇄 대형피해가 발생할 우려가 크며, 이로 인해 도시 기능 마비 수준의 재난 발생 위험이 커지고 있다 (Shin and Kim, 2020).

기후변화가 보다 심각해지고 극한 기상현황이 빈번하게 발생함에 따라 연쇄적 재난 촉발 가능성 또한 증가하고 있다. 20세기 중반 이후 기후변화 현상이 전 세계적으로 확산되고 지구촌 전체에서 기상이변으로 문제가 속출하고 있다. 더욱이 우리나라의 기후변화 진행 속도는 전 세계 평균보다 훨씬 빠르며, 이로 인해 향후 기상이변에 따른 재해피해 및 연쇄재난 피해는 더욱 심해질 전망이다.

근래에 지진, 태풍과 같은 대형 자연재난으로 인해 이미 초연결화된 에너지 공급, 통신서비스, 교통 체계의 마비 등이 발생하여 도시기능 및 서비스 중단 우려가 커지고 있다(Yoon, 2017). 대형 재난으로 인해 도시의 기능을 유지하는데 필요한 도시 기반시설과 도시핵심시설이 제대로 된 기능을 하지 못하게 되면 국가전반에 미치는 영향은 막대하다. 기반시설의 노후화 및 지진에 대한 대비 미흡 문제는 대형재난 발생 시 건축물의 파괴 등 1차 피해가 도시기능 마비 등의 연쇄적 피해로 이어질 가능성을 높이게 된다. 이에 노후화된 도시기반시설의 구조물 취약성을 정확히 평가하고, 보강 및 성능개선 등 유지관리에 대한 체계적인 종합관리계획이 시급한 상황이다(Yoon, 2017). 다만, 구조물의 취약성을 평가하는데 있어서 자연재난의 발생 현황 등의 과거 데이터에만 기반하지 말고, 미래형 재난의 양상과 미래 시나리오를 활용한 분석 및 평가가 중요하다.

재난 관리의 주요 분야에서 다양한 재난에 대한 대응 정책들이 마련 중에는 있으나 미래형 재난에 대한 고려는 미흡한 상황이다. 미래형 재난은 미래 새로운 환경변화 상에 발생 가능한 재난으로 그 규모가 대형화되고, 발생양상이 복잡하며, 공간적·시간적 경계가 사라지는 특징이 있다. 자연재해, 원자력, 감염병, 화학물질, 항공 등 재난 관련 주요 분야에서 개별부처, 개별상황 위주의 관리로 인해 미래형 재난 대응을 위한 협력적이고 체계적인 연계체계 마련이 미흡한 실정이다. 더욱이 인공지능, IoT, 자율주행차, 스마트도시 등 신기술의 적용에 따라 도시구조의 다양성 및 복잡성이 급격히 증가하고, 이로 인해 기존 재난패턴과는 판이하게 다른 미래형 재난 발생 가능성이 증가하고 피해 발생 양상도 변화하고 있다. 효율성을 높이기 위해 적용된 기존의 규격화된 도시개발에서 신기술을 활용한 도시문제 해결로 도시구조 다양성 또한 증가하고 있다. 자율주행차 도입으로 주차면적 감소 등의 토지이용 변화, 스마트 도시, 입체도시 조성 및 IoT 적용 등의 변화로 인한 초연결사회 출현 등은 기존 패턴과는 매우 다른 미래형 재난 문제를 야기하고 있다.

이런 변화에 직면하여 개별 시설물 중심의 대비체계로는 미래형 재난으로 인한 초대형 피해 발생을 막기에는 역부족이다. 초대형 피해와 관련성이 높은 국가기반시설은 국가의 안녕질서에 영향을 미칠 수 있는 9개 분야, 19개 유형, 275개 시설을 의미하는데(Jung et al., 2015) 그 지정기준을 살펴보면, 행정기관 공동대응 등 하나의 연결 체계로서의 관리를 강조하고 있다. 그러나 국가기반체계 보호지침은 기본법의 취지와는 다르게 개별 시설물 위주로 안전관리 프로세스 및 범위가 한정되어 있다. 각 시설의 개별법에 있는 규정과 특정 시설 환경변화 관련 신규대책이 충돌함으로 인해 발생할 수 있는 미래형 재난에 대비하여 체계적인 재난 관리 필요성이 증가하고 있다. 더욱이 신기술의 도입을 통한 사이버국토의 발전에 따라 국토공간의 인식범위가 크게 확장되었으며, 국토방재의 관리 범위 또한 급격히 확장되고 있다. 디지털 트윈, 사이버물리 시스템, IoT, 메타버스 등 신기술의 활용을 통해 사이버국토의 영역에 대한 인식범위가 크게 확장되었다. 사이버국토의 시뮬레이션 분석기술의 발전과 활용성이 커짐에 따라 가상공간과 물리적 공간의 연결성이 증가하게 된 것이다. 산업시설(스마트팩토리 등), 국가

기반시설 등을 관리하는 운영기술 환경은 기본적으로 폐쇄망으로 운영되고 있으나, 디지털 전환에 따라 외부와 연결 빈도가 커지고 위협에 노출되고 있다. 이에 자연재난, 테러, 보안상의 문제, 화재 및 폭발 등의 사회적 재난 등으로 사이버국토 인프라에 피해가 발생할 경우 물리적 국토 공간에서도 국토·도시 기능 마비 등과 같은 대형 피해가 발생할 수 있다. 사이버보안은 최근 현재의 해당 취약점을 해결하기 위한 패치가 아직 개발되지 않은 상황에서 가해지는 공격에 대응이 가능한 아이디어의 신속하고 지능적인 적용이 관건이다. 이런 상황에서 재난 관리의 범위를 보다 포괄적으로 확장하고 방어책을 겹겹이 마련하는 것이 매우 중요해 지고 있다.

도시 문제의 효율적 해결을 위해 추진되어온 스마트도시 또한 보안위협이 커짐에 따라 대책 마련이 시급하다. 효율성 극대화를 위해 도시 서비스 연결성이 높아짐에 따라 보안문제 발생 시 피해영향 확산 속도가 매우 빠르며 피해범위 또한 광역적이다. 최근 정보통신망 및 시스템 보호, 물리적 위협으로부터의 보호 이슈보다는 각종 보안이슈를 통제해야 하는 관리적 보안 관리 이슈가 중요해졌다. 분산된 컴퓨터에 정보를 저장해서 활용하는 엣지컴퓨팅 방식의 적용이 많아짐에 따라 물리적 보안 관리 필요성도 증가하는 추세이다. 스마트도시의 모든 서비스가 상호의존성이 매우 크게 개발됨에 따라 한쪽의 체계 교란 시 연쇄적 혼란 발생 가능성도 극히 높은 상황이다.

국토·도시의 제어시스템에 대한 취약성도 심각해짐에 따라 체계적 보호 필요성이 증가하고 있다. 제어시스템이란 공간적으로 원격 분산된 자산을 제어하고 상황변화를 감시하기 위한 시스템으로, 전력 생산 및 분배, 원자력 발전 설비의 운영, 댐 운영, 가스 생산 및 유통, 수자원 관리 등을 제어하고 관리하는 시스템이다. 건물, 설비, 도시나 마을 등의 특정한 대상물을 관리하는 제어 시스템의 역할과 범위가 나날이 확장되고 있다. 반면, 제어의 방법은 더욱 정교하고 복잡해지면서 작은 부분에서 이상이 발생한 경우 전체로 확산되어 그 전체 기능을 마비시키는 우려가 더욱 커지고 있다(Ha, 2012). 정보시스템과 비교하여 제어시스템은 사고 발생시 인명피해, 물리적/경제적 피해가 크게 발생한다. 실시간 제어 필요, 무중단으로 운영 필요, 다양한 다른 종류의 하드웨어 및 소프트웨어 구성, 장기간 운용주기, 유지보수의 어려움을 그 특징으로 한다. 디지털 전환, 상황변화 대응 등의 요구에 맞춰 기존의 폐쇄형 제어시스템의 외부 연결성이 증가하고, 취약성이 높아짐에 따라 체계적 보호 전략이 필요한 상황이다.

앞서 제시된 국토·도시 공간 및 사회환경 변화에 따라 증가하는 미래형 재난 리스크의 체계적 관리를 위해서는 미래형 재난 취약성 분석결과를 바탕으로 다양한 상황변화 시나리오에 대한 연구가 필요하다. 대형 미래형 재난은 발생빈도는 낮으나 엄청난 인적·물적 피해를 유발하기 때문에 사전예측에 기반한 피해 확산 방지가 중요하다. 개별재난이 대형 미래형 재난으로 확산되지 않도록 하기 위해서는 다양한 재난유형에 대한 피해확산 예측용 시뮬레이션 기술과 체계적 전략수립 지원이 시급하다. 따라서 미래형 재난 위험확산 시뮬레이션 결과의 지식DB화를 통해 지역 상황별 계획 및 지원체계 구축이 필요하다. 지역사회의 취약성과 대응능력간의 상호작용을 고려한 재난리스크 관리를 위해 시나리오 분석기술 활용이 핵심이다. 그러나 우리나라는 국토·도시 관리 인프라 수준에 비해 상황기반 정보와 분석기술이 연계된 미래형 재난 다중리스크 시뮬레이션 기술체계가 매우 미흡한 실정이다.

지속적으로 상황별 미래형 재난 취약성 분석 및 활용 시나리오 개발 연구가 필요한데, 시나리오별 예측을 위해 상황별로 요구되는 공간 스케일에 따라 위협을 분석하는 연구가 중요하다. 지금까지 분석 지능화 방법 개발을 위한 연구들이 다양하게 시도되어 왔으며, 시계열적인 접근과 미래형 재난 범위에 따른 분석 대상 선정에 대한 융합적 연구가 더욱 필요하다.

이에 본 연구에서는 대형 미래형 재난에 대한 국토 위험 관리전략의 체계적 수립을 지원하기 위하여, 국내외 관련 연구 및 정책 동향을 살펴보고, 효과적인 미래형 재난 국토방재체계 구축을 위한 정책적 대안을 고찰하고자 한다.

## 2. 국토방재 관련 국내외 연구 및 정책 동향

미래형 재난에 대비하기 위해서는 특성과 발생 양상 이해를 바탕으로 차별화된 대응이 요구된다. 미래형 재난은 미래 새로운 환경변화 상에 발생하는 재난이기 때문에 미래 상황변화를 고려한 시나리오 기반의 대응전략이 매우 중요하다. Marzocchi et al.(2012)은 미래형 재난 관련하여 동시다발적, 순차적 발생과 그로 인해 발생 범위와 강도가 증가되는 연쇄재난 개념을 소개하였다. 미래형 재난이 나타내는 특징으로 사회 각 영역 및 시스템의 상호의존성(interdependency)으로 인한 재난의 연쇄적(cascading) 확산에 의미를 두고 있다(Jung et al., 2015). Oh(2013)는 미래형 재난 관련하여 자연재난(natural disaster) 및 다양한 자연적 위해요소로 인해 발생하는 화학 및 산업사고와 같은 기술재난(technological disaster)으로 발생하거나 악화되는 재난유형인 ‘natech’ 재난(Natural disaster triggered technological disaster) 개념을 소개하였다. 재난의 전개과정 및 영향을 고려할 때 미래형 재난은 상호의존성을 기반으로 하는 재난유형으로 볼 수 있다. 이에 미래형 재난은 다음의 세 가지 유형으로 구분하여 볼 수 있다(Nam, 2014). 첫째, 하나의 재난요인에 의해 2차 재난들이 동시에 발생하는 동시다발적 유형이 있다. 둘째, 하나의 요인에 의해 2차, 3차 재난이 순차적으로 유발되는 시계열적 속성을 가진 연속적 유형이 있다. 마지막으로 하나의 요인에 의해 동시다발적 혹은 연속적 유형이 복잡하게 결합되는 복합적 유형이 있다.

Di Mauro et al.(2006)은 재난관리의 다중위험적 접근(multi-risk approach)에 기초하여 “복수의 위해요소(multiple hazardous sources)와 복수의 취약요소(multiple vulnerable elements)들이 시공간이 일치하는 상황에서 결합된 위험(risk)”(Di Mauro et al., 2006)이라 정의하였다(Oh, 2018). 복수의 위해요소에 대해 “①서로 다른 위해요소들이 같은 지역적 범위 내에 퍼져 있는 것, ② 하나의 위해요소로 인한 사건이 다른 사건을 발생 시키는 도미노 또는 연쇄효과, ③ 두 개 이상의 위해 사건들이 인과관계 없이 동시다발적으로 발생하는 것”(Di Mauro et al., 2006)으로 설명하고 있으며, ‘복수의 취약요소’는 “다양한 피해대상물이 노출되어 있는 것”(Di Mauro et al., 2006)이라 제시하였다(Oh, 2018).

국토방재 관련한 국제기구와 해외 선진국 동향을 살펴보면, 우선 재해저감 및 복구 국제본부(Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, GFDRR)는 세계은행에 속해 있는 기관으로 지역·국가간 재난안전 업무협력 증진을 위해 5개 분야를 중점적으로 추진하고 있다. 5개 분야는 ① 위험도 확인(Risk Identification), ② 위험도 저감(Risk Reduction), ③ 대비(Preparedness), ④ 재정보호(Financial Protection), ⑤ 복원력 회복(Resilient Recovery)이다. 최근 개발사업 수행상의 재난 안전 강화, 재해복구사업의 지속가능성 확보 등이 주요 주제로 추진되고 있다.

UNDRR 기후변화와 재해에 강한 도시 만들기 캠페인은 재해에 대한 복원력이 높고 지속가능한 도시 만들기를 목적으로 하며, 유엔 재난위험경감기구(UNDRR)은 전 세계 지방자치단체를 대상으로 재해 복원력이 높은 도시 만들기 캠페인(Making Cities Resilient Campaign)을 전개하고 있다(<https://mcr2030.undrr.org/>). 캠페인에 참여하면 UN으로부터 재해경감 기법 및 매뉴얼을 제공받게 되며, 지자체에서는 UNDRR이 제시하는 10가지 필수이행사항을 실천해야 한다. 매년 이행사항 및 활동을 평가받게 되는데, 3년 연속 우수기관 선정 시 ‘방재안전도시(Resilient City)’로 인증받게 된다.

록펠러재단 100대 방재도시 챌린지(100 Resilient Cities Challenge)는 방재도시로 선정된 100대 도시들을 “공공자금을 활용하여 재해를 예방하고 재해 발생 시 피해를 최소화 할 수 있는 우수한 회복 및 탄력성을 지닌 도시로 조성”하는 게 목표이다(<https://www.rockefellerfoundation.org/100-resilient-cities/>). 해당 도시의 방재활동 조정 및 관리 감독을 담당할 방재총 책임자 고용 비용을 지원하고, 방재전략의 개발 및 발전을 위한 기술적 지원을 한다. 록펠러 재단이 1억 달러를 투자해 만든 지원시스템을 활용하여 도시회복 기본전략 수립을 지원하고 있는데, 이를 통해 100대 방재도시들간의 네트워크를 구축하여 지식과 경험을 공유하고 있다. 미래 도시에서 발생할 재난을 “급성 충격(acute shock)과 만성적 스트레스(chronic stress)”로 인한 것으로 구분하여 접근하고 있다. 급성 충격은 홍수, 지진, 폭발 등과 같이 급작스럽게 발생하는 재난(sudden disaster)에 관련되고, 만성적 스트레스는 감염병 확산, 폭염 등과 같이 서서히 전개되는 느린 재난(slow disaster)으로 이어진다. 이러한 접근은 국내 지능적 방재체계 구축을 위해 지속적이고 체계적인 정책대안 도출이 필요함을 의미한다.



세계경제포럼(World Economic Forum)의 The Global Risks Report 2022에서 글로벌 리스크는 여러 국가나 산업에 중대한 부정적 영향을 미칠 수 있는 사건이나 조건이 발생할 가능성을 의미하며, 이는 전 세계 천여 명의 전문가 인식조사를 통해 분석된다. 환경적 위험 중 ‘극한 기상현상(Extreme weather)’, ‘기후 조치 실패(Climate action failure)’는 가장 위협적인 단기 위험요인인 동시에 장기 위험요인으로 나타났다. 기술적 위험 중 ‘사이버 보안 실패(Cybersecurity failure)’는 코로나19의 영향으로 디지털 시스템에 의존성이 높아지며 중요한 단기 및 중기 위험이 될 것으로 제시되었다(NDMI, 2022).

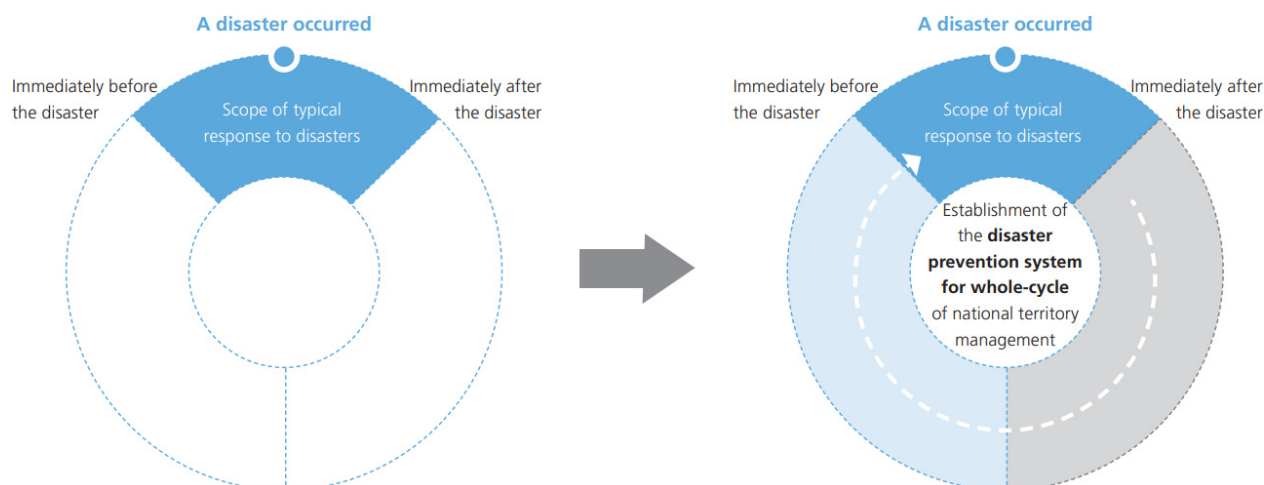
영국 국가위험목록 2020(National Risk Register 2020 edition)은 영국 국무조정실이 향후 2년 내의 ‘발생 가능성(Likelihood)’과 ‘영향력(Impact)’의 관점에서 특정 위험성을 평가하고, 합리적인 최악의 시나리오를 작성한 것이다. 인프라시설 및 교통수단에 대한 악의적 공격, 중형 화생방 공격, 폭풍우 및 한파·폭염, 화산폭발의 경우, 발생 가능성과 영향력 측면 모두 상대적으로 높게 측정되었다. 과거 위험요인과 비교한 결과, 악의적 공격에 대한 상대적 발생 가능성이 전반적으로 높아졌으며, 일부 환경적 위험과 건강, 중대사고의 상대적 영향력이 다소 높아졌다. 지진, 대규모 정전, 노동 쟁의행위에 대한 발생 가능성 또한 과거에 비해 증가할 것으로 평가되었으며, 폭풍우, 가뭄, 화산폭발, 가축질병, 대중시위 등의 경우 국가 비상사태로 이어질 시 그 심각성이 더욱 커질 것으로 평가되었다(NDMI, 2021).

국내 재난관리체계 관련 동향을 살펴보면, 우리나라 재난관리체계는 위해요인을 중심으로 구축되어온 것이 미래형 재난을 대비하는데 가장 큰 제한요소로 파악되었다. 재난을 정의하는 일반적인 방법으로, “①외부요인(위해: Hazard) 중심 정의, ②피해 중심 정의, ③사회적 취약성 중심 정의, ④기타(심리적 상태, 불확실성 등) 등”이 있으며, 이 중 가장 일반적인 것이 위해(발생 원) 중심의 정의이다(Jung et al., 2015). 이는 재난 원인에 따라 자연, 사회적 재난 등으로 나누는 「재난 및 안전관리 기본법」이 취하고 있는 접근이며 미국의 「스태포드 법(Stafford Act)」 역시 여기에 속한다. Jung et al.(2015)은 “이러한 방식의 재난 정의는 재난의 원인을 나열하고 각각의 재난 특성에 따라 대응하는 업무 분장을 명확하게 할 수 있다는 점에서 현대 관료제적 정부 구조에 가장 적합한 재난 정의 방식이다”라고 말하고 있다. 「재난 및 안전관리 기본법」에서도 이와 같이 위해요인에 따라 ‘자연현상’을 기준으로 자연재난을 정의하고 있으며, 사회재난의 정의에서는 위해(발생원)에 따라 화재, 붕괴, 폭발, 교통사고, 화생방사고, 환경오염사고 등을 명시함과 동시에, 이러한 원인에 의해 발생한 재난의 피해 규모에 따라, ‘대통령령으로 정하는 규모 이상의 피해’, ‘국가기반체계의 마비’, ‘감염병, 가축전염병으로 인한 피해’ 등의 정의를 포함하고 있다(MOIS, 2018).

제4차 국가안전관리 기본계획(2020~2024)은 기존의 계획이 재난피해 저감을 위한 현장 재난대응 역량 강화에 중점을 두었던 것에 더해 최근 재난 불확실성이 커지는 경향을 반영하여 회복력 강화를 주요 주제로 수립하였다(MOIS, 2020). 그러나 미래 상황변화에 능동적으로 적응하고자 하는 노력보다는 상황관리를 위한 체계 구축 및 제도 개선 위주의 한계를 보인다.

제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2023~2027)은 미래형 재난 관련한 전략으로 ‘첨단과학을 활용한 미래사회 위기 극복’을 목표로 내세우고 있다(MOIS, 2022). 기후변화, 신종감염병 등 불확실성이 큰 미래 위험에 첨단과학을 통해 대비하고자 하고 있으나 재난 위험의 상황변화에 따른 불확실성에 포괄적이고 통합적으로 대응하는 체계 운영계획은 미흡한 것으로 분석되었다.

제5차 국토종합계획(2020~2040)에서는 국토방재 관련해서 재난발생 직전·직후에 국한되던 통상적 재난대응 범위에서 벗어나 재난대응의 범위를 시간적·공간적으로 확장하여 국토관리 전주기 방재체계(Fig. 1) 구축 및 운영 방안을 제시하였다.



**Fig. 1.** Disaster prevention system for whole-cycle of national territory management: temporal and spatial expansion (Source: Korean Government, 2020)

### 3. 국토 재난관리 플랫폼 관련 국내외 동향

미래형 재난 대비 국토방재 관련하여 해외 재난관리 플랫폼들은 재난 시 신속한 협력체계를 만들어내기 위한 시스템을 구축하고 이를 기반으로 위험을 관리하고자 하는 경향을 보이고 있다.

유엔 재난위험경감기구(UNDRR)는 전 지구적 재해위험경감을 위한 효고행동계획 합의 후 재해위험에 대한 데이터, 분석 자료, 경험, 지식, 기술 등의 정보를 제공하기 위해 2007년 PreventionWeb 구축하였다. PreventionWeb은 재해경감 관련 주제별, 지역별, 재해유형별 전략체계, 기술, 지식 정보를 제공하여 최근 경향 파악이 가능하다. 재난 전문가, 연구자 등의 활용을 위해 상세한 재해 통계자료, 공간 데이터 등을 통합된 채널을 통해 지원하고 있다.

미국 국토안보부에서는 SUMMIT(Standard Unified Modeling, Mapping and Integration Toolkit) 플랫폼을 개발하여 여러 가지 재해 모델과 연계 및 미래형 재난 관리에 활용하고 있다. SUMMIT은 관련 정보, 분석 기능, 시뮬레이션 도구들을 통합적으로 활용하기 위하여, 사용자간 협력을 지원하고 필요한 정보 및 자원의 효율적인 연계를 가능케 하고 있다.

유럽은 2001년 유럽공간정보인프라(Infrastructure for SPatial InfoRmation in the European Union, INSPIRE)를 통해 본격적인 공간정보인프라 구축계획을 수립하였다. 그 동안 다양한 국토지리정보화 사업의 추진으로 인해 광범위하게 국가 및 도시차원의 지리공간정보가 수집되고 있으며, 정책 수립 및 집행을 하는 당국자가 필요한 정보에 쉽고 빠르게 접근할 수 있도록 지원하기 위해 수립된 공동체 성격의 위원회가 구성되었다. INSPIRE에서 제공하는 정보는 각국의 지역별 상세한 지리정보를 통합적으로 운영하여 서비스를 하는 것이 아니라 필요로 하는 공간정보 제공을 위한 연계체계를 운영하는 데에 초점을 두고 있다. INSPIRE는 하나의 통합된 지리정보의 시작점임을 알 수 있으며, 자세한 사항은 각 국가별 지자체에서 제공하는 분야별 공간정보시스템에 접속할 수 있도록 유도하고 있음을 알 수 있다. 이는 국내 국토방재 지능화 체계 구축 시 시사하는 바가 크다. 이는 각 부처별에서 관리 시설별로 운영되고 있는 시스템을 일괄적으로 통합하기 보다는 느슨한 연대를 기반으로 지능형 관리체계를 마련하는 것이 효과적임을 의미한다.

유럽은 영국을 필두로 하여 공간정보서비스 관련하여 데이터 구축에서 정보제공으로의 전환을 꾀하고 있다. 영국은 전 국토에 대하여 ‘국가공간 정보화’를 추진하고 있으며, GIS와 공공서비스를 연계하여 공간정보를 소비자 요구에 부응할 수 있는 맞춤형 서비스로 제공하도록 유도하고 있다. 특히 ‘통합위험관리계획(Integrated Risk Management Plan)’과 연계해서 응급조치 및 재난 등의 미래 재난 상황을 가정하고 위험요인을 진단하고 처방하고 있다.

미국 연방재난관리청(FEMA) GeoPlatform은 재해위험정보의 공유를 위한 채널 마련을 위해 추진되었다. 쌍방향 체계 구

축의 일환으로 사용자들의 재해나 사건/사고에 대한 의견을 반영할 수 있는 기능이 있다.

해외 재난관리 플랫폼들의 경향을 살펴본 결과, 재난 상황에서 다수의 주체가 신속한 협력체계를 만들어내기 위해서는 사회적으로 상호의존성을 고려한 시스템을 구축하고 이를 기반으로 위험을 관리하고자 함을 알 수 있다.

미래형 재난 관리는 ‘복잡하지만 적응 가능한(Complex adaptive)’ 상태의 사회 시스템을 관리하는 것이다. 이는 과학기술적 측면의 복잡성을 고려하면서 재해에 영향을 받게 될 사회 시스템의 복잡성도 함께 고려하여 위험을 관리하는 것을 의미한다. Comfort(1994)는 ‘복잡하지만 적응 가능한’ 시스템(Complex Adaptive System, CAS)의 개념을 통해, “재난의 상황에서 각 조직은 환경에 맞춰 자신을 변화하고 진화해가는 ‘자기조직화(self-organization)’을 통해 질서(order)와 무질서(chaos)의 경계(edge of chaos), 즉 빠른 환경변화에 충분히 유연한 한편 예측 불가능한 상황에 대처할 수 있을 만큼의 구조를 갖춘 상태가 될 수 있다”고 설명하였다(Oh, 2013).

위의 체계가 작동하기 위해 가장 중요한 것은 효과적인 정보의 교류이며, 이를 위해서는 지속적인 협력체계에 기반한 교류가 중요하다. 이러한 논의를 바탕으로, Comfort(2005)는 위험 및 재난관리를 위한 시스템적 접근의 모델로, ‘보타이 모델(Bow Tie Model)’을 소개하였다(Oh, 2013). 이 모델은 복잡한 상황에 대응하기 위해 서로 다른 시나리오 정보를 통합 해석하여 상황변화에 대응하도록 하고 있다(Fig. 2). 시스템 차원에서 각 분야 간 ‘교류’의 효과에 따라 미래형 재난 대응 능력 향상이 가능하다. 서로 다른 분야들은 상호작용을 통해 상황 이해력, 적응력, 미래 재난상황에 대한 협력체계 강화가 가능할 것으로 보인다.

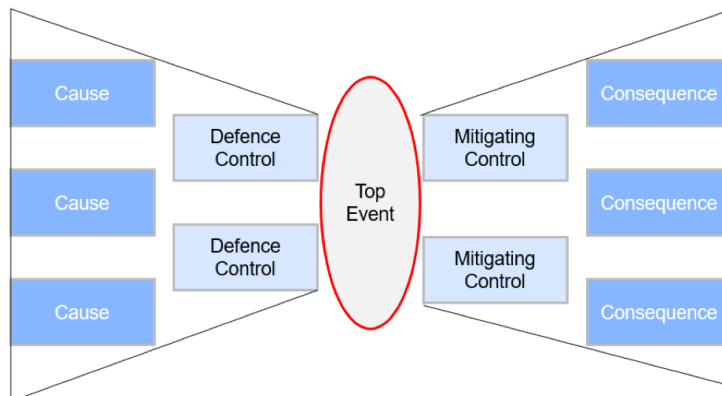


Fig. 2. Bowtie risk analysis model (Source: <https://intesafety.co.nz/bowtie-risk-analysis-model/>)

#### 4. 지속적·체계적 국토위기 관리를 위한 국토방재 지능화 정책대안

앞서 미래형 재난 관련한 국토환경 변화, 국토방재 관련 국내외 선행연구 및 정책동향, 국토 재난관리 시스템 관련 연구 등을 다각도로 살펴본 결과, 제도적·기술적 정책대안을 도출하였다. 제도적으로 미래형 재난에 대한 자기적응적 국토 조성을 체계화하고, 이를 기술적으로 지능형 의사결정 지원체계를 통해 지속적으로 지원하여야 한다.

##### 4.1 미래형 재난에 대한 자기적응적 국토 조성

복잡하고 대형화되는 미래형 재난에 대하여 새로운 접근이 필요하며, 미래형 재난의 불가항력 영향과 취약한 국토·도시 구조 문제의 복합적 작용으로 인해 야기되는 위험에 대비하기 위하여 자기적응적 국토 조성이 추진되어야 한다. 재난 발생 가능성 억제보다는 국토 차원의 포괄적 방재체계 구축에 대한 인식 제고가 요구된다. 미래형 재난 취약성을 체계적으로 분석하고, 그에 따른 국토차원의 적응방안 마련과 지역사회 주도의 실천 또한 제도적으로 지원되어야 한다.

미래형 재난에 대한 자기적응적 국토를 조성하기 위해서는, 장기적 관점에서 미래형 재난 영향 네트워크와 시나리오에 기반한 적응체계 수립이 중요하다. 자기적응적 국토 조성을 지원하기 위한 정보공유 채널 및 분석된 정보의 지속적 생산, 축적, 활용이 필수적으로 요구된다. 광역적인 기반시설 관리 대책, 토지이용계획 등을 통해 지속적·순환적 적응을 위한 대응체계 구축이 필요하며, 초대형화 미래형 재난 위험 연구 정보를 체계적으로 적시에 제공하는 제도적 프로세스가 요구된다. 미래 잠재위험지역을 파악할 수 있도록 미래형 재난 시나리오별 국토 공간구조 변화분석 시스템 개발이 중요하며, 사회기반시설의 재난피해로 인한 공공, 민간에 미치는 2차적인 피해 영향 정보화가 필요하다. 미래형 재난에 대비하여 광역적·중장기적 대응전략 수립을 통해 미래형 재난에 대한 자기적응적 국토 구현을 추진하여야 할 것이다. 이러한 전략은 지속적인 재난관리 위험 관리를 위한 국토방재 지능화 플랫폼 개발을 통해 체계적으로 실행될 수 있다.

지능형 플랫폼을 통해 현재 연계되지 않는 시스템들의 시나리오를 연동하고 미래형 재난 위험가능성에 대한 자료를 지속적으로 수집하여야 한다. 국토의 방재능력을 높이고 주민이 능동적 주체가 되어 미래형 재난 적응력을 꾸준히 개선하여 증가시키는 선순환적 체계 구축도 제도적으로 추진되어야 한다. 사용자의 관점에서 필요로 하는 정보를 효과적으로 구성하고 정보의 질을 높일 수 있는 공공 주도형 위험정보 공유도 제도적으로 의무화 되어야 한다. 국토 전체가 재난위험을 분담하고, 재난 대응 능력을 꾸준히 능동적으로 향상시킬 수 있는 국토가 미래형 재난에 안전한 국토의 모습이 될 것이다.

장기적으로 미래형 재난에 대비한 자기적응적 대응체계 정착 및 활성화가 추진될 필요가 있다. 중앙정부는 재난안전에 대하여 장기적인 정책방향을 제시하고, 관련 지침 및 규정 등에 대한 교육·훈련을 담당하고, 지방 정부는 해당 중앙 부처와 업무 네트워크를 구축하여 미래형 재난 상황별 대응분담 체계를 마련한다. 대학, 시민단체 등 지자체내의 다양한 이해 그룹들이 협력 체계를 구축하고 안전국토 관련 위원회를 활성화한다. 미래형 재난으로 인해 국토·도시 기능의 마비와 같은 복구불능의 사태가 발생하지 않도록 하기 위해 이러한 민관 협력에 기반한 자기적응적 대응체계를 지속적으로 개선하고 운영하여야 한다.

## 4.2 미래형 재난 위험 관리를 위한 지능형 의사결정 자원체계 구축

미래형 재난 입체적 분석 및 지식 체계에 기반한 대응전략 마련을 위해서는 미래형 재난에 대한 세분화된 특성파악과 발생 양상 이해가 중요하다. 첨단 디지털 트랜스포메이션 기술을 활용한 국토·도시공간 미래형 재난 위험의 입체적 분석 및 지식 체계 구축이 필요하며, 주요 미래형 재난에 대한 상황기반 재난분석 기술을 통해 최적화된 재난대응체계 기반이 마련되어야 한다.

최종적으로 전략적 미래형 재난 관리 지능화 기술 개발이 필요하다. 미래형 재난 위험 관리를 위해, 네트워크 기반 재난관리 지능화 플랫폼 기술 개발이 반드시 추진되어야 한다. 세계경제포럼의 전략 지능(Strategic Intelligence)<sup>1)</sup> 사례(Fig. 3)와 같이 포괄적 시야에서 관련 징후들을 연결하여 관리할 수 있는 국토방재 지능화 플랫폼이 구축되어야 한다.

방재플랫폼 구축 관련하여 기존에는 인벤토리 구축, 시스템 기능 개발 등 플랫폼 구축을 위한 기반 시스템 관련 연구가 수행되었다. 플랫폼 개발 연구과제들의 결과물들은 주로 자연재해 취약성 평가를 위한 지표 선정 및 취약성 분석, 데이터를 공유하는 웹 플랫폼 기능 등이었다. 분석과 관련된 정보, 결과뿐만이 아니라 미래형 재난과 관련된 타 분야에 관한 정보를 모으기 위한 플랫폼 개발은 전무하였다. 즉, 연계적 활용성에 대한 고려가 매우 미흡하였다. 세부적인 위험관리 뿐만 아니라 포괄적으로 지역에 대한 취약성을 통합 관리할 수 있는 체계와 미래형 재난 대응 시나리오 개발이 요구된다. 정보의 제공뿐만 아니라 체계적인 지식자산화 및 활용을 위하여 지속적으로 성장할 수 있는 구조를 지원하는 플랫폼이 선행 조건이다. 기존에 개발된 시스템들의 현행화와 활용성에 문제가 빈번히 발생하고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위하여 상시 관리 조직 등의

1) 인간지능과 기계지능의 결합을 기반으로 270개의 글로벌 이슈, 산업 및 경제 주제에 대하여 250개 이상의 신뢰할 수 있는 출처에서 매일 1,000개 이상의 출판물 분석. 세계 유수의 독립 연구 기관 및 대학과 함께 큐레이팅하여 전략지능 결과물 생성



노력도 필요하며, 관련분야 협업체계를 통한 분석과 함께 자동적으로 필요한 기관으로 관련 정보를 시의적절하게 제공하는 능동형 수요처 지원 기능도 함께 개발하여 양방향 체계 구축이 중요하다.

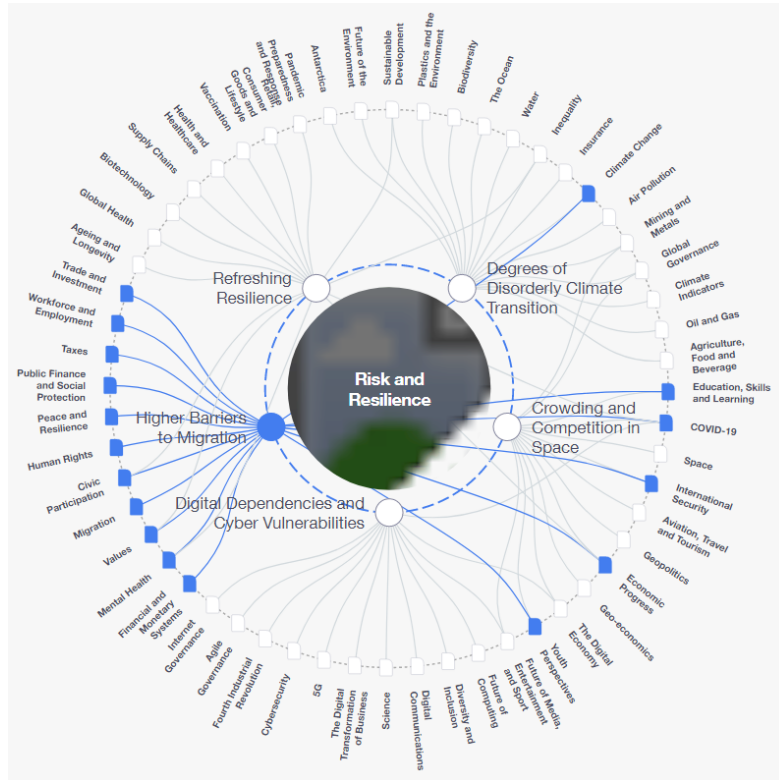


Fig. 3. Examples of risk and resilience-related strategic intelligence (Source: <https://intelligence.weforum.org/>)

실질적으로 하인리히 법칙을 시스템화하여 국토방재 지능화 플랫폼 구축할 수 있다. 하인리히의 법칙(Heinrich's law) 또는 1:29:300의 법칙은 대형 사고가 발생하기 전에 수십 차례의 경미한 사고와 수백 번의 징후가 나타난다는 법칙이다(Kim, 2014).

인공지능 기술을 활용하여 시스템이 스스로 학습하여 이상징후를 탐지해내는 알고리즘 개발을 통해 재난관리 분야별로 다양한 인공지능 기술들의 조합으로 응용이 가능하다. 수백 번의 징후를 사전에 포착하여 대비할 수 있도록 지속적으로 탐색하고 정보를 공유하는 인공지능 기반의 플랫폼이 그 대안이 될 수 있다.

국토방재 지능화 플랫폼(Fig. 4)은 보타이 모델 프레임과 세계경제 전략지능 프로세스 사례를 참고하여 분야횡단형 재난관리 시스템으로 구축하고 국토방재정보 지식의 구조화를 도모한다. 시맨틱 웹<sup>2)</sup> 기술을 활용하여 각 분야의 미래 재난상황 변화 시나리오 정보를 통합하고 연계하여 상황별 대응 시나리오 지식을 축적하고, 확장성을 높인 범용적 장치와 체계의 구축을 추진한다. 2,3차 피해 우려 재난 대상시설 관련해서는 미래형 재난 분석정보체계 구축을 통해 미래형 재난 취약성분석 기술의 고도화 및 국토방재 통합전략시스템 구축을 장기 전략과제로 선정할 필요가 있다. 미래 재난상황 변화 시나리오 정보 제공 기관과 미래형 재난 관리 시나리오 수요처의 동반성장형 커뮤니티로 활성화하는 것을 지속적 과제로 추진하여야 할 것이다.

2) 컴퓨터가 이해할 수 있는 잘 정의된 의미를 기반으로 의미적 상호운용성(semantic interoperability)을 실현하여, 다양한 정보자원의 처리 자동화, 데이터의 통합 및 재사용등을 컴퓨터가 스스로 수행하여, 인간과 컴퓨터 모두 잘 이해할 수 있는 웹([https://ko.wikipedia.org/wiki/시맨틱\\_웹](https://ko.wikipedia.org/wiki/시맨틱_웹), 방문일: 2022.11.7.)

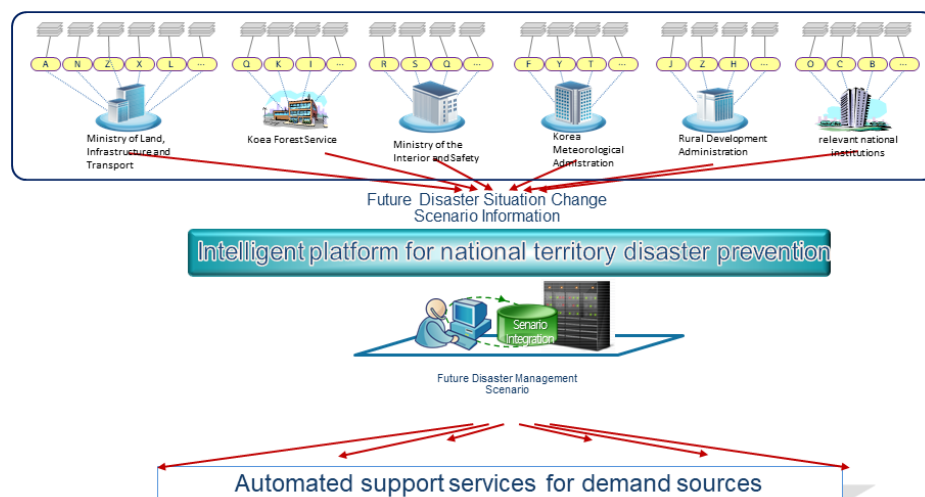


Fig. 4. Conceptual diagram of intelligent platform for national territory disaster prevention

## 5. 결론 및 시사점

본 연구에서는 미래 새로운 환경변화 상에 발생하는 미래형 재난에 대한 이해를 바탕으로 차별화된 대응과 국토방재 전략이 중요한 것으로 분석되었다. 국토·도시 공간 및 사회 환경 변화, 기후변화로 인한 극한 기상현황, 자연재난에 따른 에너지 공급, 통신서비스, 교통체계 마비 등으로 인해 초대형 재난 발생 가능성이 증가하고 있다. 재난 관리의 주요 분야에서 다양한 재난에 대한 대응 정책들이 마련 중에 있으나 미래 새로운 환경변화로 인해 공간적·시간적 경계가 사라지는 미래형 재난에 대한 고려는 미흡하다. 이런 변화에 직면하여 기존의 개별 관리대상 중심의 대비체계로는 미래형 재난으로 인한 초대형 피해 발생을 막기에 역부족이다. 더욱이 신기술의 도입을 통하여 초연결화된 인프라체계의 연쇄재난, 스마트도시의 보안위협, 국토·도시의 제어시스템 취약성 증가 등 국토방재의 관리 범위 또한 급격히 확장되고 있다. 미래형 재난 리스크의 체계적 관리를 위해서는 미래형재난 취약성 분석결과를 바탕으로 다양한 상황변화 시나리오에 대한 연구가 필요하며, 상황별 미래형 재난 취약성 분석 및 활용 시나리오 개발 연구 또한 중요하다. 미래형 재난에 대한 자기적응적 국토를 조성하기 위해서는, 장기적 관점에서 미래형 재난 영향 네트워크와 시나리오에 기반한 적응체계 수립이 필요하다. 실질적 전략 적용을 위해 미래형 재난 취약성분석의 자동화 기술 및 지속적이고 장기적 위험관리 시스템 개발이 필요하다. 미래형 재난 예방을 위한 시나리오에 기반한 대응 시스템 구축이 중요한데, 지속적인 재난관리 위험 관리를 위한 국토방재 지능화 플랫폼 개발이 시급하다.

미래형 재난위험 관리를 위한 전략을 수립하기 위하여 국제기구, 선진국, 관련 연구기관 등은 기존의 재난발생 패턴에 근거한 관리체계의 한계를 극복하고 포괄적이고 유연한 협력체계 구축 노력을 지속하고 있다. 세계은행 GFDRR의 재해저감 및 복구활동, UNDRR 기후변화와 재해에 강한 도시 만들기 캠페인, 록펠러재단 100대 방재도시 챌린지 등의 활동들을 살펴보면, 국토·도시의 미래형 재난 위험 관리 능력 향상을 위한 통합적 연계체계 구축이 주요 이슈이다. 세계경제포럼 The Global Risks Report 2022, 영국 국가위험목록 2020과 같이 미래 현실성 있는 위험 시나리오에 대한 탐색을 지속적으로 수행하고 있다. 이에 반해 국내 재난관리체계는 아직 위해요인을 중심으로 구축된 한계를 보이며, 제4차 국가안전관리 기본계획(2020~2024)은 회복력 강화를 주요 주제로 하고 있으나 미래 상황변화에 능동적으로 적응하고자 하는 노력은 부족하다. 제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획(2023~2027)은 첨단기술을 활용하여 미래위험에 대비하고자 하고 있으나 재난 위험의 상황변화에 따른 불확실성에 포괄적이고 통합적으로 대응하는 체계 운영계획은 미흡하다. 제5차 국토종합계획(2020~2040)에서는 미래형 재난을 고려하여 국토관리 전주기 방재체계 구축 및 운영 방안을 제시하였다. 대형 미래형 재난에 대응하기 위해서는 피해규모와 취약성을 고려한 포괄적 접근이 중요할 것으로 보인다.

UNDRR PreventionWeb, 미국 국토안보부 SUMMIT 플랫폼, 유럽의 방재 플랫폼, 유럽 공간정보인프라(INSPIRE), 미국 연방재난관리청(FEMA) GeoPlatform 등과 같은 해외 재난관리 플랫폼들은 재난 시 신속한 협력체계를 만들어내기 위해서 상호의존성을 고려한 시스템을 구축하고 이를 기반으로 위험을 관리하고자 하는 경향을 보이고 있다. 시스템 차원에서 각 분야 간 ‘교류’의 효과에 따른 미래형 재난 대응 능력 향상과 상호작용을 통해 상황 이해력, 적응력, 미래 재난상황에 대한 협력체계 강화가 중요하다.

지속적이고 체계적으로 미래 국토위기를 관리하기 위해서는 제도적으로 미래형 재난에 대한 자기적응적 국토 조성을 체계화하고, 이를 기술적으로 지능형 의사결정 지원체계를 통해 지속적으로 지원하여야 한다. 사전징후 포착을 강조하는 하인리히 법칙을 시스템화하여 국토방재 지능화 플랫폼을 구축하고, 수백 번의 징후를 사전에 포착하여 대비할 수 있도록 지속적으로 탐색하고 정보를 공유하는 인공지능 기반의 플랫폼이 필요하다. 미래형 재난 취약지역에 대한 리스크 관리전략 수립을 지원하기 위해 미래형 재난 예방정책 마련 지원, 도시 기능연속성 계획 수립 지원 등의 기능 개발이 되어야 한다. 미래형 재난의 불가항력 영향과 취약한 국토·도시구조 문제의 복합적 작용으로 인해 야기되는 위험에 대비하기 위하여 미래형 재난 대비 법제개선, 미래형 재난을 고려한 국토·도시계획, 장기적 미래형 재난 위험관리 체계 구축 등 자기적응적 국토 조성 노력이 지속되어야 한다. 미래형 재난 취약지역 관리를 위하여 미래형 재난 입체적 분석 및 지식 체계 구축, 전략적 미래형 재난 관리 지능화 기술 개발 등을 통해 과학적인 의사결정 지원체계 구축이 필요하다.

향후 첨단 ICT 융복합형 기술을 활용한 국토공간 미래형 재난리스크 분석 정보 입체화 및 활용이 가능할 것으로 보인다. 최신 네트워크 분석 기술을 활용하여 재난위험을 공간적으로 모니터링 및 분석하고, 미래형 재난위험의 구조적 원인 저감 기술을 개발하는 것이 가능하다. 미래형 재난 위험 평가 및 취약특성을 고려한 안전국토 조성이 기대되며, 향후 국내 미래형 재난 평가 및 관리기술을 국제적으로 제공하여 국제사회 재난관리에 기여 및 국가 위상 제고에도 효과가 있을 것으로 보인다.

## References

- Comfort, K. L. (1994). Self-Organization in Complex Systems. *Journal of Public Administration Research and Theory*. 4(3): 393-410.
- Comfort, L. K. (2005). Risk, Security, and Disaster Management. *Annual Review of Political Science*. 8: 335-356.
- Di Mauro, C., S. Bouchon, A. Carpignana, E. Golia, and S. Peressin. (2006). Definition of Multi-Risk Maps at Regional Level as Management Tool: Experience Gained by Civil Protection Authorities of Piemonte Region. *Proceedings of the 5th Conference on Risk Assessment and Management in the Civil and Industrial Settlements*. 17-19 October 2006. University of Pisa, Italy.
- Ha, Gakchun. (2012). A Study on the Evaluation of the Vulnerability of Complex Disasters. Master's Degree Thesis. Graduate School of Urban Science at Seoul National University.
- Jung, Jibum, Yunkyung Oh, and Junyoung Heo. (2015). A Study on the Establishment of Legal Foundation for Large Complex Disasters. Seoul: Korea Institute of Public Administration.
- Kim, Minju. (2014). The 300:29:1 Heinrich Law. Seoul: Miraebooks.
- Korean Government. (2020). The 5th Comprehensive National Territorial Plan. Seoul: Korean Government.
- Marzocchi, W., A. Garcia-Aristizabal, P. Gasparini, M. L. Mastellone, and A. D. Ruocco. (2012). Basic Principles of Multi-Risk Assessment: A Case Study in Italy, *Natural Hazards*. 62: 551-573.
- Ministry of the Interior and Safety. (2018). Compound Disaster Education Materials. Seoul: MOIS.
- Ministry of the Interior and Safety. (2020). 4th Basic Plan for National Safety Management. Sejong: MOIS.
- Ministry of the Interior and Safety. (2022). 4th Comprehensive Plan for Development of Disaster and Safety Management Technology. Sejong: MOIS.
- Nam, Kihoon. (2014). A Study on the Risk Assessment of Complex Disaster using Bayesian Network. Ph.D. Thesis. Human

Resources University.

National Disaster Management Institute. (2021). Future Safety Issue: Future Disaster Prospects in Korea Based on Scenario. Ulsan: NDMI.

National Disaster Management Institute. (2022). Risk List Report for 2022. Ulsan: NDMI.

Oh, Yunkyung. (2013). A Study on the Disaster Management Plan of Natech. Seoul: Korea Institute of Public Administration.

Oh, Yunkyung. (2018). Issues of Multi-risk Approach in Disaster Management. Review of Architecture and Building Science. 62(2): 11-16.

Shin, Sangyoung, and Sangkyun Kim. (2020). New Urban Disaster Outlook and Policy Direction. Seoul: Seoul Institute.

Yoon, Donggeun. (2017). KRIHS Monthly Magazine August 2017 Issue. Sejong: Korea Research Institute for Human Settlements.

### Korean References Translated from the English

국립재난안전연구원 (2021). Future Safety Issue: 시나리오로 본 우리나라 미래 재난 전망. 울산: 국립재난안전연구원.

국립재난안전연구원 (2022). 2022년 위험목록 보고서. 울산: 국립재난안전연구원.

김민주 (2014). 300:29:1 하인리히 법칙. 서울: 미래의창.

남기훈 (2014). 베이지안 네트워크를 이용한 복합재난 위험성 평가에 관한 연구. 인재대학교 박사학위논문.

대한민국 정부 (2020). 제5차 국토종합계획. 서울: 대한민국 정부.

신상영, 김상균 (2020). 신종 대형 도시재난 전망과 정책방향. 서울: 서울연구원.

오윤경 (2013). Natech 재난관리방안 연구. 서울: 한국행정연구원.

오윤경 (2018). 복합재난관리의 주요 이슈. 대한건축학회지. 62(2): 11-16.

윤동근 (2017). 도시 핵심시설의 복합재난 유형 및 대비방안. 월간국토 2017년 8월호. 세종: 국토연구원.

정지범, 오윤경, 허준영 (2015). 대형복합재난 법적기반 구축 연구. 서울: 한국행정연구원.

하각천 (2012). 복합재난의 취약성 평가에 관한 연구. 서울시립대학교 도시과학대학원 석사학위 논문.

행정안전부 (2018). 복합재난 교육자료. 서울: 행정안전부.

행정안전부 (2020). 제4차 국가안전관리 기본계획. 세종: 행정안전부.

행정안전부 (2022). 제4차 재난 및 안전관리 기술개발 종합계획. 세종: 행정안전부.