



Review

Analysis on Results and Changes in Recent Forecasting of Earthquake and Space Technologies in Korea and Japan

Eun-Young Ahn*

Policy Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), 124, Gwahak-ro Yuseong-gu, Daejeon, 34132, Korea

*Corresponding author : eyahn@kigam.re.kr

ARTICLE INFORMATION

Manuscript received 9 August 2022
Received in revised form 26 August 2022
Manuscript accepted 26 August 2022
Available online 30 August 2022

DOI : <http://dx.doi.org/10.9719/EEG.2022.55.4.421>

ABSTRACT

This study analyzes emerging earthquake and space use technologies from the latest Korean and Japanese scientific and technological foresights in 2022 and 2019, respectively. Unlike the earthquake prediction and early warning technologies presented in the 2017 study, the emerging earthquake technologies in 2022 in Korea was described as an earthquake/complex disaster information technology and public data platform. Many detailed future technologies were presented in Japan's 2019 survey, which includes large-scale earthquake prediction, induced earthquake, national liquefaction risk, wide-scale stress measurement; and monitoring by Internet of Things (IoT) or artificial intelligence (AI) observation & analysis. The latest emerging space use technology in Korea and Japan were presented in more detail as robotic mining technology for water/ice, Helium-3, and rare earth metals, and manned station technology that utilizes local resources on the moon and Mars. The technological realization year forecasting in 2019 was delayed by 4-10 years from the prediction in 2015, which could be greater due to the Corona 19 epidemic, the declaration of carbon neutrality in Korea and Japan in 2020 and the Russo-Ukrainian War in 2022. However, it is required to more active research on earthquake and space technologies linked to information technology.

Keywords : science and technology foresight, emerging technology, earthquake disaster, space use

Citation: Ahn, E.-Y. (2022) Analysis on Results and Changes in Recent Forecasting of Earthquake and Space Technologies in Korea and Japan. *Korea Economic and Environmental Geology*, v.55, p.421-428, doi:10.9719/EEG2022.55.4.421.

✉ Journal homepage: <http://www.kseeg.org/main.html>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided original work is properly cited. pISSN 1225-7281; eISSN 2288-7962/©2022 The KSEEG. Printed by Hanrimwon Publishing Company. All rights reserved.

해설

한국과 일본의 지진재해 및 우주이용 기술예측에 대한 최근의 변화 분석

안은영*

한국지질자원연구원 미래전략연구센터

*책임저자 : eyahn@kigam.re.kr

요 약

본 연구는 2022년 발표한 한국의 제6회 과학기술예측조사와 2019년 발표한 최신의 일본 과학기술예측조사 결과에 주목하여 최근 지질자원 분야에서 국가·사회적으로 높은 기대를 받고 있는 지진재해와 우주이용에 관한 미래기술을 분석하였다. 한국의 2022년 발표한 지진재해 관련 미래기술은 2017년 제시한 지진 예측 및 조기경보 기술 형태와 달리 지진·복합재난 정보기술과 공공데이터 플랫폼으로 제시되었고, 건물·도시의 재난대응 생활밀착 로봇에 적용하는 형태로 제시되었다. 일본 2019년 과학기술예측조사에서는 한국의 3배 수준의 많은 미래기술이 제시되었으며, 지진재해 기술 또한 대규모 지진 예측, 지층 주입에 따른 유발 지진 예측, 전국 액상화 위험 규명, 규모 광역 응력 측정, 사물인터넷(IoT) 혹은 인공지능 관측 영상 분석에 의한 지진 재해 감시·예측 등 상세 기술이 제시되었다. 최신 한국과 일본의 과학기술예측조사의 우주이용 기술은 물/얼음, 헬륨-3, 희토류 금속 등의 자원을 채굴하는 로봇 기술과 달·화성에서 현지자원을 활용한 유인기지 기술 형태로 더욱 구체화되었다. 일본의 기술적 실현시기를 비교해 보면 2019년에 예측한 실현시기가 2015년의 조사결과보다 4~10년 정도 지연되었다. 2019년 이후에도 코로나19 전염병 상황, 2020년 한국과 일본의 탄소중립 선언, 2022년 러시아-우크라이나 전쟁 등 환경변화에 따라 한국과 일본의 미래기술 실현시기의 예측 결과의 불확실성이 더 커질 수 있다. 하지만 앞으로 지질자원 분야에서 정보기술과 연계한 지진재해 및 우주이용 기술에 대한 더욱더 활발한 연구개발이 요구된다.

주요어 : 과학기술 예측, 미래 유망기술, 지진재해, 우주이용

1. 서 론

Ahn (2017)은 지속가능발전과 지능정보사회의 미래트렌드에 주목하여 2040~2050년 한국과 일본의 지질자원 미래기술을 분석하였다. 이후 코로나19 사태로 우리나라 정부는 한국판 뉴딜 정책으로 디지털 뉴딜 및 그린 뉴딜 정책을 제시하였으며, 유럽 또한 European Commission (2022)에서 2050년을 향한 녹색 전환과 디지털 전환의 결합을 제시하고 있다. 기후변화로 촉발된 에너지전환 등 녹색 전환 정책은 최근의 이상기후로 중요성이 더하고 있다. 지질자원 연구 분야에서도 저탄소 광물·에너지자원 확보 기술 뿐 만 아니라 지질재해 감시·예측 기술개발 등으로 안전한 생활환경 조성에 대응하고 있다. 또한 디지털 기술의 지질자원 분야 적용은 기존의 자원개발 분야 뿐 만 아니라 지질·지하정보의 3차원 시각화와 지질환경·재해의 실시간 모니터링 및 정보분석에 활발히 적용되고 있다(Ahn, 2021).

대한민국 최초의 저궤도 실용 위성 발사용 로켓인 누리호가 2021년 1차, 2022년 2차로 발사되었으며, 2022년 달을 관측하는 무인 탐사선인 달 궤도선이 발사되었다. Ahn (2017)은 2040년경 미래 에너지·자원 기술로 소형성

등 우주자원 개발 및 우주유인기지 구축이 실현될 것으로 보았다. 우리나라 우주탐사 계획에서도 2030년경 한국형 달 착륙선 발사를 목표로 하고 있으며, 한국지질자원연구원 KIGAM (2022)은 한국형 달 궤도선의 감마선 분광기 개발·적용하여 달표면에 있는 주요 원소, 헬륨-3·물·산소 등 원소지도 및 우주방사선 환경지도를 작성할 계획이다. KIGAM (2022)은 타 과학기술 출연연구기관 및 민간 우주기업과 함께 달과 화성의 물·산소·수소·희토류 등의 우주 현지자원을 활용(In-Situ Resource Utilization, ISRU)한 유인기지 구축 등을 위한 행성연구를 실시하고 있다. 현재 기술개발이 활발한 수소 또한 수소연료전지 형태로 우주탐사선 및 우주기지에 전기와 물을 공급할 수 있다.

Ahn (2017)은 2017년 발표된 한국의 제5회 과학기술예측조사와 2015년 일본의 제10회 과학기술예측조사를 기반으로 지질자원 분야 미래기술을 분석하였으나, 최근에는 한국과학기술기획평가원(KISTEP)에서 수행한 과학기술정보통신부 MSIT (2022)의 제6회 과학기술예측조사 결과가 발표되었다. 일본 과학기술·학술정책연구소 NISTEP (2019) 또한 일본 제11회 과학기술예측조사를 발표하였다. 일본의 과학기술예측조사 결과는 한국의 조사 결과

와 비교하여 지질자원 미래기술의 규모 및 세부화 정도, 실현시기에 차이가 보인다. 본 연구는 최근의 한국과 일본의 과학기술예측조사 결과에 주목하여 지진재해 및 우주이용 기술을 중심으로 2017년 제시한 미래 지질자원기술의 변화를 분석하고자 한다. 본 연구에서는 우주 기술의 경우 우주 광물자원개발, 우주 현지자원 이용 무·유인 기지 구축, 인공위성 이용 기술에 주목하여 지질자원기술의 적용 관점에서 우주이용 기술로 칭한다.

2. 기존 연구

한국과 일본은 4~5년 주기로 미래 사회의 변화를 예측하고 미래 사회에서 중요할 것으로 예상되는 과학기술을 도출하고 실현시기를 예상하는 과학기술예측조사를 실시하고 있다(Ahn, 2017). 2017년 발표한 우리나라의 과학기술예측조사에서는 267개 미래기술을 제시하였으며, 일본은 2015년 932개 미래기술을 제시한 바 있다. Ahn (2017)은 해당 조사 결과를 분석하여 지질자원 유망기술 분야로 지질 기반, 지질재해, 기상조정·CO₂저감, 환경재해(방사성 폐기물 처분 포함), 스마트에코시티(자급자족 도시), 소행성 등 우주자원 개발, 신재료·신자원기술 등을 제시하였다.

Lee (2017)의 한국의 제5회 과학기술예측조사 분석을 통해 Ahn (2017)은 지진 관련 미래기술로 통합관측기반 시설물 관리 조건별 지진조기경보 시스템, 단층지질기반 연계 지진피해 예측 시스템, 지진·안보상황 선재대응 초연결 뉴미디어 시스템, 무인항공기 및 드론을 통한 재난 정보 자동수집·전송 기술을 제시하였다. 해당 기술들은 2023~2028년에 기술적 실현될 것으로 예측되었다(Lee, 2017).

NISTEP (2015)의 일본 제10회 과학기술예측조사에서 지구 내부에서 생성된 중성미자를 이용한 지구 내부 탐사 기술, 레이저 지형 측량 및 소립자 뮤온(Muon) 밀도 측정 기법을 통해 활화산의 분화가능성 평가 등 새로운 융합연구에 기반한 미래기술을 제시하였다. 그리고 지진해일의 구조물 파괴와 화재·액상화를 포함한 광역 복합재해의 슈퍼컴퓨터 예측시스템, 고정밀 지표면 분자 이동 관측, 물질과학 연구에 의한 광물·암석 물성의 장기 변화 연구 등 지각 변형 분포와 지진 이력 분석, 규모 7 이상 1년 이내 혹은 규모 8 이상 대규모 지진 발생시기/규모/발생지역/피해 예측기술, 전국 수권·지권 관측시스템으로 1시간 정도의 재해 사전 예측 및 정보·피난·구제 시스템 기술 등을 제시하였다. 해당 제시한 기술들은 일본에서 기술적/사회적으로 2030년 정도에 실현되는 것으로 예상하였다(NISTEP, 2015).

2017년 한국의 과학기술예측조사에서는 우주자원 개발/우주관광/우주관측 등을 목적으로 달 및 화성의 유인기지 구축, 달 및 소행성에서 경제적 가치를 가지는 광물을 채굴하여 지구로 가져오거나 경제적 가치가 있는 소행성을 광물채굴이 용이하게 포획하는 기술이 2040년 이내 국내에 기술적으로 실현되는 것으로 예상하였다(Lee, 2017). 또한 Ahn (2017)에서는 에너지·자원 기술로 분석된 바 있으나, 우주 태양광 및 우주 엘리베이터 기술도 우주 이용 기술로 제시할 수 있다. 지구 궤도 상공에 거대 태양전지판을 갖춘 인공위성 등을 통해 태양광 발전을 하고, 생산된 전력을 지상으로 무선 전송하는 시스템인 우주태양광 발전이 국내 2034년, 국외 2031년에 기술적으로 실현되는 것으로 예상하였다(Lee, 2017). 자원기술과 관련하여 통신 네트워크 기반 생산성 향상 광산개발, 비전통 자원 및 해저 열수광물자원 개발, 대심도 저품위 비철금속 광물자원 개발, 저탄소 에너지 산업 필수 금속 생산·회수, 희유금속 바이오리칭, 초저온/진공/초고압/고열 환경과 같은 수중 및 지하의 극한공간을 극복하는 지능형 오지탐사 로봇 및 자율 합체·분리형 로봇 등을 미래기술로 제시한 바 있다(Lee, 2017).

2015년 일본 또한 과학 관측, 자원 이용 등을 목적으로 지구 밖 천체(달 또는 화성)에서 항구적인 유인 활동 거점이 구축, 우주태양광 기술을 미래기술로 제시하고 있다(NISTEP, 2015). 또한 우주, 해양, 지구, 과학 기반 분야에서 대심도 과학 굴착 기술, 인공위성·해양수중센서 기반 지하자원·해양자원 관측·데이터처리 시스템, 빙해용 자립형 무인 잠수정 및 무인 항공기 활용 해저자원탐사가 2030년 이내 일본에서 실현될 것으로 제시하였다. 그리고 환경·자원·에너지 분야에서 지열 발전·이용, 친환경 세일가스 채굴, 메탄 하이드레이트 채굴·이용, 대심도 희토류 희소금속 탐사·시추, 현재 비용의 50% 이하 티타늄 제련, 구리 광산 비소 처리 기술 등이 일본에서 2030년 이전에 기술 실현될 것으로 보았다. 그리고 심도 15 km 및 온도 400 °C 초심도 굴착, 해수 중에서 경제적으로 우라늄 등 희소 금속 회수, 열수 광상 심해저 금속자원 경제적 채취, 공기에서 효과적으로 헬륨을 회수하는 기술은 2040년 이전에 일본에서 실현되는 것으로 제시하였다(NISTEP, 2015).

3. 한국과 일본의 과학기술예측 분석

3.1. 중점 기술

2022년에 수행된 한국의 제6회 과학기술예측조사에서는 2045년 미래사회를 전망하여 디지털 세상, 사회 구조의 변화(도시의 변화 등), 지구 환경 변화와 자원의 개척

(환경·자원의 변화, 미지의 영역 개척), 세계 질서의 변화 (글로벌 시대, 동북아 정세 변화 등), 위험의 일상화(신종 안보, 극단적 쇼크)로 메가트렌드를 제시하였다(MSIT, 2022). 해당 트렌드에 따라 우리 사회에 큰 영향을 줄 것으로 예상되는 주요 이슈로 가상과 현실공간의 통합, 초연결 스마트시티의 가속, 메가시티/메가리전(Megaregion), 극지 자원 및 항로 개발, 심해 자원 발굴, 우주생활 시대, 달·화성·소행성의 자원 발굴, 대도시 직하 지진, 전력망의 붕괴 등 이슈를 선정하였다. 그리고 주요 이슈의 과학기술적 대응방안으로 미래기술 241개(디지털전환 41개, 제조·소재 34개, 인간·생명 47개, 도시·재난 38개, 안보·개척 37개, 에너지·환경 44개)를 제시하였다. 지질자원 관련한 미래기술은 인간·생명 분야를 제외한 다양한 분야에서 폭넓게 분포하고 있다.

2019년에 수행된 일본의 제11회 과학기술예측조사에서는 건강·의료·생명과학, 농림수산·식품·바이오, 환경·자원·에너지, ICT·분석·서비스, 재료·장치·공정, 도시·건축·토목·교통, 우주·해양·지구·과학기반의 7개 분야 702개 미래기술을 제시하였다(NISTEP, 2019). 그리고 환경·자원·에너지 분야는 에너지변환, 에너지시스템, 자원개발·저감·재사용·재활용, 수자원, 지구온난화, 환경보전, 리스크관리로 구분되고 총 106개 미래기술이 제시되었다. 하지만 우리나라의 제6회 과학기술예측조사에서는 에너지·환경 분야 44개 기술만 제시되었다. 우리나라의 제5회 및 제6회 과학기술예측조사 결과 뿐 만 아니라 미래기술 숫자가 한국 대비 3배 수준으로 많은 미래기술을 제시하고 있는 일본의 예측조사 결과를 비교분석함으로써 지질자원 미래기술 전망 변화를 상세히 살펴볼 수 있다.

한국의 제6회 과학기술예측조사에서는 미래 주류시장으로 확산 가능한 제품·서비스 수준으로 미래기술을 묶

어서, 사회·경제적 영향력이 높고 파급효과가 클 것으로 예상되는 미래혁신기술 15개를 제시하였으며, 이전 조사에서 제시하지 않았던 재난재해예측과 복합재난대응시스템이 포함되었다(MSIT, 2022). 재난재해예측의 미래 모습으로 백두산 화산폭발가능성 탐구, 대형 싱크홀 탐색, 원자력 발전소의 정상운영 감시 등 다양한 분야에서 비파괴 투시 검사 장비와 기술 발전 등을 포함하여 제시하였다. 그리고 자동으로 재난 정보를 취합하고 활용하여 재난을 예방하고 그 영향을 최소화하여 스마트시티 모델로 성장한 복합재난대응시스템의 미래 사회에 적용되는 모습을 제시하였다.

미래혁신기술에 대해 MSIT (2022)는 기술실현시기와 기술확산점(tipping points)을 구분하여, 실험실 수준에서 완성이나 최초 시작품이 개발되는 기술실현시기를 지나서 시장 진입 후 초기시장을 넘어서는 시기인 기술확산점을 예측하였다. 해당 연구에서 15개 미래혁신기술 모두 미국이 기술확산점에 가장 빨리 진입하는 것으로 나타났다(Table 1). 복합재난대응시스템과 재난재해예측에 대해 기술이 완성되어 제품·서비스 형태로 시장에 진입한 후 시장이 확대되는 시점에는 미국이 2029년, 한국이 2032~2033년에 도달하는 것으로 예상하였다(MSIT, 2022). 복합재난대응시스템은 인구 100만명 이상의 도시에 구축되는 시점을 기술확산점으로 정의하였다. 재난재해예측 기술에 대해서는 개별 재난요소별 예측 정확도의 평균이 70% 이상 도달 시점을 기술확산점으로 보아, 백두산 화산폭발 및 대형 싱크홀 예측 등에 대해 기술개발 이후 공공·민간 시장에 적용되고 확대하는 시기의 제품·서비스 형태로 보기에는 한계가 있다.

일본 NISTEP (2019)의 일본 제11회 과학기술예측조사에서는 702개의 과학기술 주제에 대해 데이터기술을 적

Table 1. Key Emerging technology groups in Korea and Japan. Minor modifications to classification and highlighting from MSIT (2022) and NISTEP (2019)

	MSIT (2022), 6th Science and Technology Foresight	NISTEP(2019), 11th Science and Technology Foresight	
		Convergence area	Base Area
Information/ Material Technology	Fully autonomous plane Fully autonomous car Autonomous working robot Super-personalized artificial intelligence Intelligence semiconductor Quantum cryptography technology	Social problem solving that adapts to social and economic growth and change (included Digital Twin) ICT Innovation Electronics and Quantum Devices Atomic and molecular level analysis technology using advanced measurement and information technologies Development of new structural/functional materials and manufacturing system	Human error prevention vehicle technology New data distribution and utilization system Robot technology that supports and expands all human activities Next-generation communication and encryption technology
Bio-technology	Customized vaccine Biological chips Cell reprogramming	Next-generation bio-monitoring and bio-engineering	Disease prevention and treatment for life-cycle health care
Disaster/ Environment Technology	Complex disaster response system Disaster Prediction Carbon cycle observation Hydrogen energy Small nuclear battery Carbon neutral fuel	Advances observation and prediction technology for natural disasters Monitoring, evaluation, and prediction technology of the global environment and resources by using space Science and Technology to Promote the Resource Circular Economy	Socially promoting sustainable energy technology Sustainable agriculture, forestry and fisheries Basic science to unravel the origins of the universe and mankind

용하여 군집화한 뒤, 전문가 심사위원의 검토로 16개 중심 과학기술 영역을 도출하였다(Table 1). 8개의 중심 과학기술 융합 영역에는 1) 자연재해에 관한 첨단 관측·예측과 2) 우주 이용을 통한 지구환경·자원의 모니터링·평가·예측 기술이 포함되었으며 8개 기반 영역에는 우주와 인류의 기원을 푸는 기초과학으로 우주과학이 포함되었다. 자연재해에 관한 첨단 관측·예측에 대해서 1) 일본 내 전체 활화산에 대한 분화가능성 등의 절박도 평가, 2) 활단층 이력과 화산 분화사 규명을 위해 5~10만 년 전 연대측정 정밀도 향상 기술, 3) 규모 7 이상 내륙 지진의 발생 장소·규모·발생시기(30년 이내)·피해에 대한 예측 기술, 4) 국지적 단시간 호우의 고정밀도 예측에 기초한 사면붕괴·토양구조물의 실시간 피해 예측, 5) 원자력 발전소 건물·배관·원자로의 디지털 트윈을 이용한 지진피해 실시간 진단기술 등으로 해당 세부기술을 찾아볼 수 있다.

또한 우주 이용을 통한 지구환경·자원의 모니터링·평가·예측 기술의 세부기술로 1) 정보기술/인공위성 활용 효율적인 광산 탐사 기술, 2) 위성 관측과 지상 관측의 융합·일반화를 통한 전국 지하수 지도, 3) 고해상도 대기·해양/물질·에너지순환을 고려한 지구환경 예측 모델로 100년의 장기 지구환경 변화 예측, 4) 휴대정보단말기와 원격탐사를 통한 식생 분포와 생태계 기능 모니터링 시스템, 5) 인공위성/해양·해저센서/자율무인탐사기구를 이용한 지하자원·해양자원 탐사·관측 및 데이터처리 시스템, 6) 동아시아·동남아시아·호주의 식량자원·수자원·재해 리스크 관리를 위해 정지 위성의 육지·연안 지역 공간분해능 30 m 상시 관측 기술 등을 제시하였다(NISTEP, 2019).

일본의 조사에서는 중심 과학기술 영역을 제품·서비스 형태로 제시하지 않아 자연재해, 우주 활용한 지구환경·자원 모니터링 기술에 대한 기술완성시기나 기술확산시기를 제시하지 않았다. 세부 기술에 대해서도 일본 과학기술예측조사에서는 일본의 기술적 실현시기와 사회적 실현시기로 제시하여, 우리나라 과학기술예측조사에서 세계 기술선도국과 우리나라의 기술실현시기를 제시한 연구와 차이가 있다. 이후 각 세부 기술에 대해 우리나라와 일본의 기술실현시기 및 세계선도국가의 실현시기와 비교한다.

3.2. 지진재해 관련 기술

한국의 제6회 과학기술예측조사에서 지진 연구개발 분야와 직접 관련된 미래기술은 시설물 관련 지진 유발 복합재난에 대해 신속대응하게 하는 사물인터넷(IoT) 기반 시스템 기술로 볼 수 있다(MSIT, 2022). 이 기술은 정밀 내진성능평가 기법과 함께 사물인터넷(IoT)/스마트 센싱, 다양한 현장 조건의 빅데이터 처리 및 핵심 지진거동 영

향인자 평가 등의 기술을 기반으로 한다. 그리고 시설물이 위치한 지반특성에 따른 지진 취약도 정보를 복합재난 정보와 함께 공공에 제공한다. 조기경보기술과 자동 위기 대응시스템 연계를 통해 신속 대응 및 복구 방안을 제공한다. 세부기술에 대한 설명인 Park (2021)에 따르면 이 기술은 국외 선도국인 미국이 2021년 실현되었고 국내는 2024년 실현으로 예측되었다. 해당 기술은 2017년 한국 과학기술예측조사에서 제시한 지진 예측 및 조기경보기술과 달리 복합재난 및 지진 취약도 정보기술 형태로 제시되었다.

기존 연구에서 제시한 바와 같이 2017년 조사에서는 지진·안보상황 뉴미디어 시스템을 미래기술로 제시하였으나, 2022년 과학기술예측조사에서는 지구 자연재해 예측·경보·대응 스마트 공공데이터 플랫폼(선도국 미국 실현 2022년, 국내 2025년; Park (2021)) 기술에 지진이 포함된 것으로 볼 수 있다. 해당 기술은 사물인터넷(IoT), 인공지능(AI) 등 연계를 통해 데이터 기반으로 자연재해 피해를 효과적으로 저감하는 플랫폼 기술로 제시하고 있다. 또한 MSIT (2022)에서 자연·인공재난에 대한 극한대응 건물·도시 시설 기술과 함께, 건물·도시 시설에 일체화한 동작형 로봇 기반 재난대응 및 가사보조 시스템 기술이 제시된 것도 특징이다. 해당 기술의 실현은 국외 2028~2029년, 국내 2032~2033년으로 예상하였다. 2017년 제시한 무인항공기 및 드론을 통한 재난정보 자동수집·전송 미래기술은 2022년 조사에는 제시되지 않았다. MSIT (2022)의 위성 및 고고도 무인비행체 기반 실시간·자동 지구환경 모니터링 및 재해 경보 시스템(국외 2029년, 국내 2035년)에서 지진, 기상재해 등을 명시하여 해당 재해를 실시간 모니터링하고 재해 상황을 예측·통보하는 시스템 기술로 설명하였다.

일본의 제11회 과학기술예측조사에서는 지진 연구개발 분야와 직접 관련된 미래기술로 1) 지구상 어디에서나 연대측정되어 지각·지하수 변동이나 마그마 이동 계측(지오이드 계측)이 가능한 광섬유 광격자 네트워크, 2) 일본 활화산 분화가능성 예측기술, 3) 활단층 이력과 화산 분화사 규명을 위해 5~10만 년 전 연대 측정 정밀도 향상, 4) 지각 변형 분포와 과거 지진 이력 분석에 의한 리히터 규모 8 이상의 대규모 지진 발생 예측, 5) 규모 7 이상 30년 이내 내륙 지진의 발생 장소/규모/시기/피해 예측 기술 등을 제시하였다(NISTEP, 2019). 해당 기술들은 2030~2037년에 기술적으로 실현되며, 기술적 실현이 그보다 빠른 기술로 1) 사물인터넷(IoT)을 이용한 대규모 지진 재해의 실시간 피해 파악·예측 시스템(일본 기술 실현 2026년), 2) 지진·해일 데이터와 영상을 활용한 재해의 징조나 발생을 인공지능에 의하여 감시하는 기술(일

본 기술 실현 2029년)을 제시하였다. 또한 2030년 기술 실현이 되는 미래기술로 1) 다양한 유형의 액상화 발생 메커니즘과 전국 액상화 위험 규명 및 단기간/저비용 대책 기술, 2) 지진 발생 지역 규모로 지각 내 광역 응력 측정 기술을 제시하였다. 그리고 지층 주입이 필요한 CO₂ 저장, 세일가스 추출, 고온 지열발전 등에 따른 유발 지진의 예측(일본 실현 2030년)이 새롭게 제시되었다.

2015년 일본에서 제시한 소립자 뮤온(Muon)이나 중성 미자를 이용한 화산 및 지구 내부 탐사, 지표면 분자 이동 등 물질과학 연구를 적용한 지진 예측 등의 융합연구를 2019년 일본 미래기술에는 직접적으로 제시하지 않았다.

3.3. 우주 이용 관련 기술

달·행성 자원 개발 관련해서 MSIT (2022)는 이전 연구와 달리 직접적인 광물자원 개발 기술을 제시하지 않고 채굴 로봇 기술 및 유인기지 구축 기술의 형태로 제시하였다. 먼저 달, 화성 등의 유인 우주기지의 건설·운영과 지구 운송이 가능한 얼음·물, 헬륨-3, 희토류 금속 등의 자원을 채굴하는 로봇 기술을 제시하고 해당 기술의 실현은 국외 2026년, 국내 2034년으로 예상하였다. 달, 화성에서 현지자원을 활용한 유인기지 구축·운영 기술의 실현은 국외 2030년, 국내 2042년으로 예상하였다. 지구-달-화성 우주 인터넷 통신 기술의 실현은 국외 2028년, 국내 2033년으로 예상하였다. 또한 MSIT (2022)는 자립형 해저 기지구축 기술(장기 체류 및 탐사활동용, 국외 실현 2032년/국내 2037년)에 대해서 우주탐사 기술과 연계 가능한 기술로 제시하였다. 해당 연구에서 스마트 로봇 활용 디지털 트윈 기반 지표·심해저·빙하 원격 자율 시추/안전진단 기술과 극지 탐사용 전천후 맞춤형 무인 자율 탐사정 기술 모두 국외 2030년, 국내 2034년 실현될 것으로 제시하였다. 해당 자원개발 기술 또한 향후 우주 이용 기술에도 적용가능할 것이다. 앞서 제시된 기술 모두 Park (2021)에서 세계 기술선도국은 미국으로 제시되었다.

2019년의 일본 과학기술예측조사 결과에서는 과학 관측 및 자원 이용 목적의 외계 천체(달 또는 화성)에서 항구적 유인 활동 거점 구축(일본 실현 2035년), 달 표면에서 물을 생성·보급하는 로봇을 활용한 물 생산 플랜트 구축 기술(일본 실현 2034년)과 함께, 인공위성 직접 탐사 등 태양계 천체의 생명 탐사나 행성의 형성 규명을 위한 탐사 기술(일본 실현 2034년)을 제시하였다(NISTEP, 2019).

2017년 한국 과학기술예측조사에서 제시한 우주 태양광 발전, 우주엘리베이터 기술에 대해서는 2022년 한국의 미래기술에서 직접적으로 제시하지 않았다. 하지만 MSIT (2022)는 우주엘리베이터 소재기술(국내 실현 2039년)과 태양광 광원의 국지적인 지역의 오염물질 상층분

포 관측 시스템(국내 실현 2030년)을 제시하였다. 일본의 경우는 2019년 과학기술예측조사에서 우주 공간에서 태양광 이용·발전하고 지상에 전력 전송하는 우주 태양 발전 시스템이 2040년에 기술실현될 것으로 보았다(NISTEP, 2019).

2019년의 일본 과학기술예측조사 결과에서는 우주 태양광, 해양도시·우주도시 건설이 2040년대에 기술적으로 실현되며 해수·우주에서 유용광물 회수, 심도 5 km 지열 발전, 가스하이드레이트 개발 등이 2035~2040년 사이에 기술적 실현될 것으로 보았다(NISTEP, 2019). 2015년과 2019년의 일본 과학기술예측조사 결과를 비교해 보면, 자원개발의 지층 해석/매장량 평가/개발 계획 수립에서 디지털 이용 기술(일본 실현 2031년), 자원 개발에 따른 유발 지진의 원인·실태 규명(일본 실현 2033년), 바이오·나노 기술을 이용한 새로운 석유·천연가스 회수증진 기술(일본 실현 2034년) 등의 자원 기술이 새로이 제시되었다. 2015년 제시된 심도 15 km 및 온도 400 °C 초심도 굴착 기술(일본 실현 2030년)은 삭제되고 온도 250 °C 및 압력 500 기압 이상에서 자원 개발 기술(일본 실현 2035년)이 새롭게 제시되었다. 또한 우주 태양광 발전의 기술적 실현년도가 2040년으로 늦춰졌으며(2015년 조사결과 2030년), 가스하이드레이트 채굴·이용의 기술적 실현은 이전 조사 결과 2025년에서 2019년 조사 결과 2036년으로, 기술의 실현년도가 2015년 조사 결과보다 10년 정도 늦춰졌다(NISTEP, 2019). 다른 자원 기술 및 타 기술분야에서도 기술실현년도가 4~5년 혹은 그 이상 늦춰진 기술들은 많이 확인할 수 있었다.

2019년의 일본 과학기술예측조사에서는 앞서 중점 기술에서 제시한 것과 같이 인공위성/해양·해저센서/자율무인탐사기구를 이용한 지하자원·해양자원 탐사·관측 및 데이터처리 시스템(일본 실현 2028년), 정보기술/인공위성을 효과적으로 활용한 효율적인 광산 탐사 기술(일본 실현 2029년) 등 위성을 이용한 자원기술도 제시하였다(NISTEP, 2019). 2022년 발표한 한국 과학기술예측조사에서는 위성을 활용한 탄소순환, 재해 등 지구환경 모니터링 기술은 제시하였으나 위성을 활용한 자원 기술을 제시하지는 않았다.

4. 결 론

일본의 2019년 과학기술예측조사의 중점 기술영역에서 지질자원 관련 분야로 자연재해, 우주 활용한 지구환경·자원 모니터링 분야가 제시되었으며 2022년 한국의 과학기술예측조사 중점 기술영역으로도 복합재난대응시스템, 재난재해예측이 제시되었다. 한국의 과학기술예측조사에

서는 세계선도국인 미국이 2029년, 한국이 2032~2033년에는 복합재난대응시스템과 재난재해예측 기술이 제품·서비스 형태로 사회에 적용 및 확대되는 것으로 예상하였다. 일본의 조사에서는 자연재해, 우주 활용한 지구환경·자원 모니터링 기술이 사회에 적용되는 시점을 종합적으로 제시하지 않았으나, 지진에 대한 세부기술로 보면 2026~2037년에 기술적 실현되어 이후 일본 사회에 적용될 것으로 보인다. 한국과 일본의 중점 기술영역으로 제시된 재난예측·모니터링 시스템에 대해서 미국이 2029년 기술적 실현이 예상되며 한국과 일본은 전체 시스템을 갖추려면 2030년 중반이 될 것으로 보인다.

한국의 2022년 발표한 지진재해 관련 미래기술은 2017년 연구에서 제시한 지진 예측 및 조기경보 기술 형태와 달리 지진·복합재난 정보기술, 공공데이터 플랫폼으로 제시되었고, 건물·도시의 가정용 등 생활밀착 로봇에 적용하는 형태로 제시되었다. 일본 과학기술예측조사에서는 한국의 3배 수준의 많은 미래기술이 제시되어, 1) 지각 변형 분포와 과거 지진 이력 분석에 의한 규모 7 또는 8 이상의 대규모 지진 예측, 2) 지층 주입에 따른 유발 지진 예측, 3) 전국 액상화 위험 규명, 4) 지진 발생 지역 규모 광역 응력 측정 등의 2019년 일본의 지진 관련 미래기술은 상세하게 제시된 특징이 있다. 일본 2015년 과학기술예측조사에서는 지진재해 관련 기술로 우주 및 기초과학 관련 융합기술을 제시한 특징이 있었으나, 일본 2019년 조사에는 해당 융합연구보다 사물인터넷(IoT), 인공지능 등 정보기술을 활용한 지진 기술에 좀 더 집중한 모습으로 해당 기술의 일본 실현은 2026~2029년으로 보았다. 2022년 한국에서 발표된 정보기술을 활용한 지진 기술은 미국에서 2021~2022년 기술이 실현되고 한국에서는 2024~2025년 기술 실현될 것으로 보았다. 앞서 한국과 일본의 중점 기술영역인 재난예측·모니터링 시스템에 대해서 미국이 2030년 이전에 가장 빨리 달성하며 한국과 일본은 2030년 중반에 실현할 것으로 제시한 바 있다. 지진재해 미래기술 또한 정보기술 기반으로 제시되어 미국이 2022년 실현되며 한국과 일본은 2020년 중반에 달성할 것으로 보인다. 향후 미국 공공 및 민간에서 시행하고 있는 사물인터넷(IoT), 인공지능 등 정보기술을 활용한 지진 기술개발에 대한 모니터링과 함께 해당 기술의 시범적용을 넘어 미국 사회에 정착되는 과정을 분석할 필요가 있다.

2017년 한국의 과학기술예측조사에서는 지질자원 분야와 관련 있는 우주 이용 기술로 달·화성의 유인기지 구축 뿐 만 아니라 달·소행성에서 경제적 가치를 가지는 광물을 채굴하는 기술을 제시하였다. 또한 2017년 제시한 초저온/진공/초고압/고열 등 극한상황을 극복하는 지능형

오지탐사 로봇 등의 자원기술 또한 우주 이용 기술에 적용될 수 있다. 일본의 경우도 2015년 초심도 굴착 및 대심도 희토류 희소금속 탐사·시추, 2019년 극한환경 자원 개발 및 위성 활용 자원탐사기술을 제시하였다. 최신의 한국과 일본의 과학기술예측조사의 우주 이용 기술은 열음·물과 광물자원 채굴 로봇 기술과 달·화성에서 현지자원을 활용한 유인기지 기술 형태로 더욱 구체화되었다. 2022년 우리나라의 연구에서 세계선도국인 미국의 기술적 실현은 2026~2030년, 한국은 2034~2042년으로 예상하였다. 2019년 일본의 연구에서 일본은 2034~2035년 달 현지 자원을 이용한 물 생산 플랜트 구축, 달 또는 화성에서 항구적 유인 활동 거점 구축 기술이 실현될 것으로 예상하였다. 2022년 발표한 한국의 미래기술에서 우주이용 기술에 기여하는 무인 자원탐사·시추의 기술적 실현은 미국 2030년, 국내 2034년으로 예상되나, 국내에서 좀 더 앞당겨 실현할 필요가 있다. 우리나라 우주탐사 계획에서는 2030년경 한국형 달 착륙선 발사를 목표로 하고 있다. 2021~2022년 한국형 발사체인 누리호 발사, 2022년 한국형 달 궤도선 다누리 발사로 우주개발에 대한 국민적 관심이 증가하였으며, 2022년에도 세계적인 코로나 19 전염병 상황으로 비대면 정보 기술의 연구개발 또한 활발하다. 지질자원 분야에서도 디지털 트윈 및 스마트 로봇 기술과 활발히 연계하여 우주 이용 기술실현에 큰 역할을 해야 할 것이다.

2015년과 2019년의 일본 과학기술예측조사 결과를 비교해 보면 2019년에 예측한 많은 기술의 실현년도가 2015년의 조사결과보다 4~10년 정도 지연되었다. 그리고 2019년 이후에도 코로나19 전염병 상황, 2020년 한국과 일본의 탄소중립 선언, 2022년 러시아-우크라이나 전쟁 등 현재 발생된 환경변화에 따라 한국과 일본의 기술 실현시기의 변동이 더 커질 수 있다. 2022년은 지속된 코로나 19 상황 및 러시아-우크라이나 전쟁 장기화, 국제정세 변화, 이상폭염 등에 따른 국제적인 상품 공급망 혼란, 글로벌 경기침체 우려 등으로 석유가스 국제가격이 급등락하고 있다. 국내외에도 인플레이션 발생, 에너지·식량 확보 문제가 대두되어 국가별 자립 경제의 중요성이 나타나고 있다. 2050 탄소중립 실현을 위한 저탄소 광물·에너지자원 확보 역할이 지질자원 분야에서도 요구되고 있으며 이상기후의 심화에 따라 지질재해 연구의 중요성도 커지고 있다. 달, 화성 탐사에도 지질자원 기술이 많은 기여를 하고 있다. 2022년 과학기술예측조사에서 제시한 가상과 현실공간의 통합, 초연결 스마트시티의 가속, 우주생활 시대, 달·화성·소행성의 자원 발굴, 대도시 직하 지진, 전력망의 붕괴 등 여러 미래 주요 이슈에 지질자원 기술이 대응할 수 있다. 2022년 시사점이 있는 분야

로 본 본 연구에서는 지진재해 및 우주이용 기술 미래기술에 대해 분석하였지만, 앞으로도 지진재해 및 우주이용 기술을 포함하여 지질자원 미래기술의 상세한 모습에 대해 세부기술별로 연구할 필요가 있다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 기본사업 ‘지질자원 표본·기초학술연구와 선도형 R&D 정책/성과확산 연구(GP2020-020)’에 의해 지원되었습니다.

References

- Ahn, E.Y. (2017) Analysis of the Development of Future Geoscience and Mineral Resources Technologies in Korea and Japan over the Next 30 Years. *Econ. Environ. Geol.*, v.50(5), p.415-422. doi: 10.9719/EEG2017.50.5.415
- Ahn, E.Y. (2021) Analysis of Digital Twin Technology Trends Related to Geoscience and Mineral Resources after the Korean New Deal Policy in 2020, *Econ. Environ. Geol.*, v.54(6), p.659-670. doi: 10.9719/EEG2021.54.6.659
- European Commission (2022) 2022 Strategic Foresight Report, https://ec.europa.eu/info/strategy/strategic-planning/strategic-foresight/2022-strategic-foresight-report_en.
- KIGAM (2022) KIGAM start developing ISRU (In-Situ Resource Utilization) technologies, https://www.kigam.re.kr/board.es?mid=a10703040000&bid=0025&list_no=51742&act=view.
- Lee, S.L. (2017) The 5th Science and Technology Foresight (2016-2040), KISTEP, 453p.
- Ministry of Science and ICT (MSIT) (2022) Results of 6th Science and Technology Forecasting survey, results of 40th committee of Presidential Advisory Council on Science & Technology (PRCST), https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilPostView.jsp?post_id=2291&etc_cd1=COUN01&board_id=11.
- NISTEP (National Institute of Science and Technology Policy, Japan) (2015) The 10th Science and Technology Foresight: Future Perspectives on Science and Technology by Field, RESEARCH MATERIAL No.240, Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan (MEXT), 60p.
- NISTEP (National Institute of Science and Technology Policy, Japan) (2019), The 11th Science and Technology Foresight: S&T Foresight 2019 Comprehensive and Sector Reports, <http://hdl.handle.net/11035/00006607>.
- Park, C.H. (2021) A Study on the 6th S&T Foresight-Future Technology Brief, KISTEP, 443p.