

지질자원 연구개발에 대한 기술개발단계(TRL) 지표 개발

안은영* · 김성용 · 이재욱

한국지질자원연구원 미래정책연구실

Technology Readiness Levels (TRLs) Indicator Development for Geoscience and Mineral Resources R&D

Eun-Young Ahn*, Seong-Yong Kim and Jae-Wook Lee

Policy Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 305-350, Korea

(Received: 20 July 2015 / Revised: 17 September 2015 / Accepted: 13 October 2015)

Base researches in geoscience and mineral resources, such as geological and geo-thematic mapping, geological survey and observation, have long-term, continuity and time-leasing characteristics and they are difficult to present the particular research stages or progressions in the research span. The Technology Readiness Levels (TRLs), developed by the U.S. National Aeronautics and Space Administration (NASA), is effective for presenting research maturity levels and progression in the development of new technologies. This study suggests adjusted definitions for the Technology Readiness Levels to fit Geo-technology (Technology in Geoscience and Mineral Resources). Base geological researches, including mapping, surveys and observation, can be also presented in research levels from TRL 1 (R&D planning, literature survey) to TRL 9 (geological information construction and service in all target areas) in terms of the final product's coverage. Moreover, not only development and construction of commercial products, geological disasters and environmental researches can also be presented in field demonstrations through public pilot applications. The modified commercialization or demonstration TRLs in Geo-technology are TRL 5 (starting pilot field application), TRL 6 (pilot field operation) and TRL 7 (pilot field operation for a larger scale, greater than ten percent of the actual environment).

Key words : Technology Readiness Levels (TRLs), Geo-technology, Quantified indicator

지질자원 분야에서 지질도 및 주제도 제작, 조사 및 관측 사업 등은 실용화상용화 목적의 연구개발사업과 달리 장기적이며 지속적인 연구개발의 성격을 가지고 있다. 이러한 장기적, 지속적인 사업의 경우 연구개발의 종료시점을 제시하기 어려워서 사업 평가 시 해당 연구사업의 현재 진행단계를 제시하기 어려운 면이 있다. 이러한 연구개발 분야의 진행 상태를 나타내는 정량 지표를 제시하기 위해, 기존의 실용화 기술에 적용하였던 NASA 기술개발단계(TRL, Technology Readiness Level)를 지질도 및 주제도 제작, 조사 및 관측 사업 등 지질자원 기반 연구개발 분야에 적용할 수 있게 개발하였다. 지질자원 기반 연구개발 분야에서도 적용범위(coverage) 개념을 적용하여 기본원리이해·기획연구(TRL 1)에서 최종 생산물(product)인 특정지역 및 전세계/전국도 정보 구축, 수요자 맞춤형 보급 연구(TRL 9)로 기술개발단계(TRL)를 제시할 수 있다. 그리고 시범적용 등의 실증연구 절차를 가지는 지질환경 등 분야에서도 실용화 성과를 기반으로 기술개발단계(TRL)를 적용할 수 있게 개발하였다. 시범지구 적용 등 실증연구 시작 단계를 TRL 5, 시범지구의 규모 및 적용 개수 확대를 TRL 6, 실제 규모 1/10 수준 시범지구 적용을 TRL 7로 제시할 수 있다.

주요어 : 기술개발단계, 지질자원 기술, 정량 지표

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.

*Corresponding author: eyahn@kigam.re.kr

1. 서 론

영국 과학기술청(OST, 1993)의 *Realising Our Potential*, OECD(2002)의 *Frascati Manual* 등 기존 일반적인 연구개발 단계 구분은 기초연구, 응용연구, 개발연구의 3단계 구분을 기반으로 기초연구를 순수기초연구와 목적기초연구, 응용연구를 전략(응용)연구, 특정응용연구로 나누고 있다. 이러한 구분은 국내 연구개발에도 적용되고 있으며, 연구개발의 진행에 따라 단계가 올라가는 개념이 아니라 특정 기간에 수행하는 연구개발의 성격 구분을 위한 지표로 활용되고 있다. 또한 연구개발 단계의 설정을 위한 각 단계의 개념이 명확하지 않아 기술개발자가 자의적으로 설정하는 면이 있다. 따라서 기존의 이러한 연구개발 단계 구분은 연구개발의 진행에 따라 현재 도달하고 있는 연구개발 진행 수준을 제시하지 못하고 있으며 전체 단계가 3-5개로 제시되어 단순한 면이 있다.

2010년 산업기술연구회(현. 국가과학기술연구회)에서 제시한 성과목표기술서(현. 경영성과계획서) 작성 가이드라인에서는 미항공우주국(NASA)에서 개발한 기술개발단계(Technology Readiness Level, TRL)의 적용을 한국지질자원연구원을 포함한 전체 소관 연구기관에 권고한 바 있다. Mankins(1995)에서 제시한 NASA 기술개발단계(TRL)는 기존의 기초연구, 응용연구, 개발연구에 기반한 3-5단계의 구분보다 상세하게 9단계로 구분되어 있으며 연구개발의 진행을 위해 필수적으로 거쳐야 하는 단계로 제시하고 있다. NASA 기술개발단계(TRL)는 항공우주 분야에 적용하기 위해 개발되었으나, DoD(2011), Engel(2012)과 같이 항공우주 분야 뿐만 아니라 미국에서 국방 분야, 에너지 분야의 국가 연구개발에도 쓰이고 있다. NASA 기술개발단계(TRL)를 지질자원 연구개발 분야에 적용한 국외 사례를 찾을 수 없었다. 선진국에서는 연구개발에 대해 동료평가에 많이 의존하는 편으로, 우리나라의 경우 정량화된 평가 자료 개발을 위해 선진국보다 계량화된 연구개발 지표 개발에 대한 관심과 연구가 더 많다고 볼 수 있다.

2010년 성과목표 설정 논의에서 지질자원 분야에서도 NASA 기술개발단계(TRL) 적용을 검토하였으나 지질자원 연구개발 특성을 고려한 각 단계별의 개념 설정이 어려워 실제로 연도별 성과목표 및 지표로 활용하지 못했다. 2013년 국가과학기술위원회의 국가연구개발사업 성과목표·지표 설정 가이드라인에서는 사업수명주기를 고려하여 최종목표를 결정하고 최종목표 달

성을 위한 단계별 목표를 시기와 수준을 고려하여 성과목표를 설정하도록 제시하였다. 연구개발의 진행단계를 고려한 정량지표 제시를 위해 지질자원 분야에서도 NASA 기술개발단계(TRL)를 도입할 필요성이 있다. 하지만 시제품(Prototype) 제작 등을 기준으로 제시하는 기존의 실용화 단계 지표는 전체 지질자원 분야에 적용하기에 까다롭다. 또한 지질도 및 주제도 제작, 조사 및 관측 사업 등의 지질자원 기반 연구분야는 상용화·실용화 목적의 연구개발과 달리 장기적이며 지속적인 연구개발의 성격을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 지질자원 기반 연구개발 분야를 포함하여 지질자원 전분야에서 연구개발의 진행단계를 제시할 수 있는 정량지표로 기술개발단계(TRL) 지표를 개발하고자 한다.

2. NASA 기술개발단계(TRL) 정의

Mankins(1995)에서 제시한 NASA 기술개발단계(TRL)는 TRL 1에서 TRL 9까지의 9단계로 우주항공 분야의 연구개발 진행단계 파악을 위해 제시되었다. 미 의회 예산회계국(GAO, 1999)에서 미의회는 국방부 무기개발사업의 예산초과와 일정지연 원인을 기술개발단계(TRL)를 제대로 검증하지 않은 것으로 지적하고 NASA 기술개발단계(TRL)의 사용을 권고한 바 있다. 미 의회 예산회계국(GAO, 1999) 뿐만 아니라, Hwang *et al.*(2012), Lee *et al.*(2014) 등의 국내 연구에서도 기술개발단계(TRL)에 대한 정확한 인식이 사업지연이나 예산 증가 방지, 사업 평가 점수 등에 유의미한 긍정적 영향을 주는 것으로 보고하고 있다. 미국에서 DoD(2011), Engel(2012)과 같이 국방 및 에너지 분야의 국가 연구개발에도 쓰이고 있으며, 국내에서도 Kim *et al.*(2012), KEIT(2009)와 같이 항공우주 기술 외에 건설교통 기술, 산업원천전략 기술에 적용한 사례가 있다. 기술개발단계(TRL)는 국내에서 기술성숙도, 기술준비도 등으로도 번역되어 사용하고 있다.

TEC-SHS(2008)의 기술개발단계(TRL) 편람에서는 기술개발단계(TRL)의 개발 원칙으로 특정한 기술 분야에 대한 것이 아니라 새로운 시스템 및 새로운 기술 집합체에 대한 연구개발 프로그램 행정 관리자와 연구개발 관리자, 연구개발자 사이에서 연구개발 단계에 대한 면밀한 의사소통을 위한 것으로 보고 있다. Ahn(2012)은 전문 연구사업 관리기관의 사업담당자 및 주관연구기관의 연구책임자를 대상으로 한 설문조사에서 연구개발 단계에 따라 현황 및 목표 수준을 평가하기 위해 기술개발단계(TRL)를 사용한 바 있다.

Hwang(2014)의 연구개발부문 사업의 예비타당성조사 표준지침에서 기술추세분석의 도구로 NASA 기술개발 단계(TRL)를 제시하고 있으며, 기술개발단계(TRL)을 기술개발에 대한 시작과 종료시점에서의 기술적 목표 달성 정도를 효과적으로 표현하고 평가하기 위한 도구 라고 하였다.

NASA 기술개발단계(TRL)는 기존의 영국 OST(1993), OECD(2002) 등의 순수기초와 목적기초의 기초연구, 전략(응용)과 특정응용의 응용연구, 개발연구의 구분과 달리 기초기술연구, 유용성 증명연구, 기술개발, 기술 실증, 시스템/하부시스템 개발, 시스템테스트·보급·운영의 흐름으로 제시되었다(Fig. 1, Table 1). 기술개발 단계(TRL)를 적용한 기존의 연구를 통해, 하부 기술 개발 단계가 실험실 환경실험, 현장모의실험, 세미파일럿 규모 기술, 파일럿 규모 실증시설 설치 및 시험, 상용화로 나누어짐을 알 수 있다(Table 2).

3. 지질자원 실용화 연구의 기술개발단계(TRL) 지표 적용

한국지질자원연구원의 2012년 연구성과보고서를 살펴보면 기존의 실용화 성과를 기대할 수 있는 자원활용 분야 뿐 만 아니라 지질환경 및 지질재해 분야에도

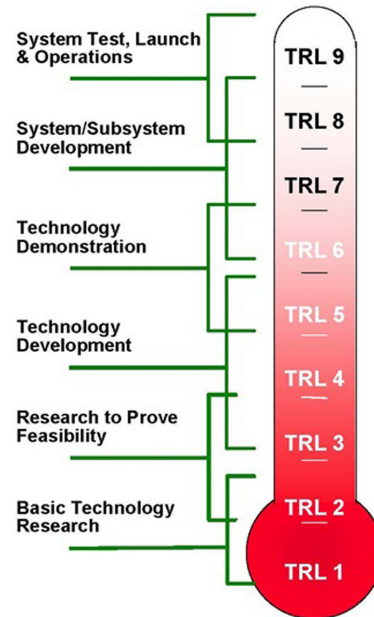


Fig. 1. Technology Readiness Levels ? Thermometer Diagram (TEC-SHS, 2008).

지질환경재해 기술 적용 시범지구 운영 개수 등으로 실용화를 나타내는 성과지표를 제시하고 있다. 지질환

Table 1. Technology Readiness Levels and Common Engineering Terms (TEC-SHS, 2008)

Readiness Level	TRL Definition	Commonly Used Engineering or R&D Terms
TRL 1	Basic principles observed and reported	Scientific research
TRL 2	Technology concept and/or application formulated	Systems analysis, Pre-phase a studies
TRL 3	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept	Laboratory experiments
TRL 4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment	Component, Breadboard
TRL 5	Component and/or breadboard validation in relevant environment	High-fidelity breadboard, Brassboard, Engineering breadboard, Function-oriented model
TRL 6	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)	High-fidelity laboratory prototype, Engineering qualification model, Subsystem model, Development model, System model
TRL 7	System prototype demonstration in a space environment	System demonstration
TRL 8	Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space)	Theoretical first unit, Flight unit, Flight spare
TRL 9	Actual system completed and “flight proven” through successful mission operations	Mission operations, Flight Qualified hardware

Table 2. Application Studies of Definition or Description on Technology Readiness Levels

Level	Defense Technology		Industrial Strategic Technology		Construction and Transportation Technology	
	DoD(2011)		KEIT(2009)		Kim et al.(2012)	
TRL 1	Basic principles observed and reported		Basic principles/ experiments		Basic principles observed and reported	
TRL 2	Technology concept and/or application formulated		Basic Research	Technology concept formulated for application purpose	Technology Planning	Technology concept and/or application formulated
TRL 3	Analytical and experimental critical function and/or proof of concept		Proof of basic concept in Laboratory		Analytical and experimental critical function and/or proof of concept	
TRL 4	Component and/or breadboard validation in laboratory environment		Laboratory Experiments	System validation in Laboratory	Laboratory Experiments	Bench scale model validation in laboratory environment
TRL 5	Component and/or breadboard validation in relevant environment		Prototype development and validation (scale: one to several number)		Bench scale model validation in relevant environment	
TRL 6	Sub-system prototype demonstration in a relevant environment		Prototype Development	Prototype development and validation (scale: beyond ten percent of mass-production)	Validation for Field Application	Prototype demonstration in relevant environment
TRL 7	System prototype demonstration in an operational environment		Reliability evaluation		Prototype demonstration in an operational environment	
TRL 8	Actual system completed and qualified through test and demonstration		Practical Application	Certification and standardization	Field Application	Actual system completed and qualified through test and demonstration
TRL 9	Actual system proven through successful mission operations		Commercialization	Commercialization	Actual system proven through successful mission operations	

경제해 제어 및 처리 기술 상용화의 장기목표로 2011년 산사태 피해저감 공법 적용 시범지구 1개 운용 목표를 제시하는 것은 기술개발단계(TRL)에서 실험실 환경 성능 입증의 다음 단계인 5단계 현장모의실험으로 볼 수 있다. 지질환경 및 지질재해 분야의 연구개발은 산업적 상업화보다는 국민 삶의 질에 기여하기 위한 연구개발 분야이다. 하지만 지하수 확보, 재난방지의 국민 삶의 질 향상을 실현하기 위해서는 정부, 지방자치단체, 공기업 등이 수행하는 공공사업으로의 연구개

발 결과의 실용화 및 상용화가 요구된다. 기존에 2003년 한국지질자원연구원의 연구개발 특성화 지표에서도 기술 우수성 지표로 지방자치단체 · 정부 · 산업체 기여 실적을 제시한 사례가 있다. 2010년에도 지하수자원 확보 및 지질환경 재해 분야 포함한 대과제의 결과/효과지표로 해당 기술의 상용화로 인한 이윤 창출, 산업/기업 기술적 문제해소, 산업기술력 향상 등의 산업적 파급효과와 기술거래 등을 제시하였다. 하지만 이는 연구개발 진행 단계에 따른 실용화, 상용화 성과보

다는 연관 과제로 인한 성과로 병렬적으로 제시되기도 하였다.

NASA 기술개발단계(TRL)를 사용하여 지질자원 분야에서 현재 수행하는 연구개발의 단계 및 완성도를 나타내는 지표를 제시할 수 있다. 기존의 실용화 기술을 기준으로 한 기술개발단계(TRL)에서 지질자원 분야 특성을 고려하여 시범지구 적용 등 실증연구 시작 단계를 TRL 5로 제시할 수 있다. 그리고 실제 규모 1/10 수준 등 시범지구의 규모 및 적용 개수에 따라 TRL 6과 TRL 7로 구분 가능하다. 하지만 국가기본 지질도 및 지질주제도 작성, 지질조사, 지질재해·지질환경 관측 등 실증연구를 제시하기 어려운 지질자원 분야의 경우 실용화 기술을 대상으로 한 기술개발단계(TRL)의 개념 적용이 어렵다. 이러한 분야에 대해 기술개발단계(TRL)의 적용은 추가적인 연구가 필요함을 알 수 있다.

4. 지질자원 기반 연구의 기술개발단계(TRL) 지표 적용

연구개발사업 범위에 대한 OECD 권고 기준(OECD, 2002)과 우리나라 연구개발사업 분류 및 통계 처리 기준(Um, 2012)을 살펴본 결과 지도제작, 지질학적 조사 및 관측 분야의 경우 다른 연구개발 분야와 다른 특성을 가진 것으로 이해되고 있음을 확인할 수 있다(Table 3). OECD 및 우리나라의 연구개발에 대한

분류에서 시험분석, 표준화, 품질인증, 과학기술 정보 서비스, 특허·권리 등의 분야를 과학서비스로 구분하고 있으나, 일반적 목적 외에 특정 연구 프로젝트를 위해 수행되는 데이터 수집 및 조사, 관측은 연구개발로 보고 있다. 하지만 연구개발 활동인 국가기본지질도 및 지질주제도 작성, 지질조사, 지질재해·지질환경 관측 등을 수행 중에는 연구개발 진행 단계를 제시하는 데 어려움이 있다. 실증연구를 제시하기 어려운 지질자원 기반 분야의 기술개발단계(TRL) 적용과 관련하여, Kim(2010)은 한국지질자원연구원의 전체 분야에 기술개발단계(TRL)를 적용하기 위해 각 분야별로 적용기준을 제시한 바 있다. 기반 분야로 제시할 수 있는 국토지질 분야에 대해 Kim(2010)은 첫 번째 단계인 TRL 1을 기술기획연구로 정의하고 마지막 단계인 TRL 9을 전세계 지질정보 구축, 지진예측/예방시스템 완성으로 제시한 바 있었다. 하지만 중간 단계의 정의에 대해서는 기존의 NASA 기술개발단계(TRL) 개념을 적용하여 지질자원 연구개발 특성을 고려한 단계별의 개념 설정되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 미국 지질조사소(USGS) 성과목표 및 기술기여도에서 착안한 적용범위(coverage) 개념을 NASA 기술개발단계(TRL)에 적용하여 연구개발 진행단계를 제시하는 정량 지표의 이론적 근거를 제시하고자 한다.

국가기본지질도 및 지질주제도 작성, 조사·관측 사업 등의 실증연구를 제시하기 어려운 분야는 적용범위(coverage)를 기준으로 기술개발단계(TRL) 9단계를 나

Table 3. Definitions and Conventions of Research and Development (R&D)

	OECD (OECD, 2002; Um, 2012)	Korea (Um, 2012)	Implication
Certification, standardization, S&T information Service	Exclude	Exclude	Geological or geophysical (Earthquake) data collection, processing and analysis for real-time or customized information service
Data collection, processing and analysis for general purpose	Include mapping, geological and oceanographical survey and observation, market research and census in R&D	Exclude	Geological/thematic mapping, geological survey and observation/monitoring,
Feasibility studies	Include feasibility studies on engineering projects in R&D	Exclude	-
Patent and licence works	Exclude	Exclude	-
Medical institutions	Include new disease treatment and clinical research in R&D	Include New disease treatment and clinical research in R&D	-
Support Loans	Include exempted loans in R&D	Exclude	-

눌 수 있다. 적용범위(coverage) 개념은 국내에서 이미 국토기본도 및 지질주제도의 진척도를 설명하기 위해 사용하고 있으며, 미국지질조사소(USGS)의 성과지표에도 쓰이고 있다. DOI-USGS(2011)의 미국지질조사소(USGS) 2011-2016년 전략계획에서는 의사결정을 위한 과학지식 제공이라는 미션 달성을 측정하기 위해 다음과 같은 측정지표를 제시하고 있다(Table 4). 환경모니터링 및 평가 자료 생산 정도(2016년 목표 95%), 지하수 수질/이용가능성 정보 제공 정도(2016년 목표 40%, 33%), 온라인 지질도의 작성범위(2016년 목표 56%) 등의 적용범위(coverage)를 기준으로 한 성과지표를 제시한 것을 확인 할 수 있다.

Ahn(2011)의 지질자원 경제 산업효과 분석 모형에서 연구개발 결과물인 기술 및 정보에 대해 적용범위(coverage) 개념을 제시한 바 있다. 이는 기술가치평가에서 기업의 창출 수익에 기술기여도를 적용하는 기술요소법(technology factor)에 기반한 연구개발 효과 측정방법으로, 기술기여도 적용 시 연구개발 결과의 적용범위(coverage)를 고려하게 하였다. 이후 연구인 Ahn and Yu(2012)의 지질자원 경제 산업효과 추정 방법에서도 기술완성도의 의미로 적용범위(coverage)를 적용하였다. 해당 연구개발 사업으로 인한 자원개발(공급)량 및 오염물질·CO₂ 방출 저감량을 산정하기 어려운 경우에 대해 다음과 같은 방법론을 제시하였다.

Table 4. U.S. Department of the Interior (DOI) - U.S. Geological Survey (USGS) FY 2011-2016 DOI Strategic Plan and Performance Measures

Mission: Provide a Scientific Foundation for Decision Making			
Goal	Strategy	Supporting Performance Measures	2016 Target
1. Ensure the Quality and Relevance of Science Products to Partners and Customers	1.Ensure overall customer satisfaction	Percent of partners or customers satisfied with scientific, technical and data products	≥90%
	2. Identify and model causes and impacts of changes to the Earth and ocean system	Percent of U.S. surface area with contemporary land cover data needed for major environmental monitoring and assessment programs	95%
2. Provide Science for Sustainable Resource Use, Protection, and Adaptive Management		4. Monitor and assess water availability and quality	Percent of regional area topical ocean and coastal studies that cite USGS products within three years of study completion
	Percent of U.S. with current groundwater quality status and trends information		40%
	5. Assess national and international energy and mineral resources	Percent of U.S. with groundwater availability status and trends information	33%
		Number of water monitoring sites supported jointly with state, local or Tribal cooperators	22,000
		Percent of U.S. with completed, consistent water availability products	50%
3. Provide Scientific Data to Protect and Inform Communities	1. Monitor and assess natural hazards risk and resilience	Percent of targeted non-fuel mineral commodities for which up-to-date deposit models are available to support decision making	100%
		Number of USGS energy products accessed online	6 million
4. Develop a Comprehensive Science Framework for Understanding the Earth	2. Generate geological maps and models for sustaining resources and protecting communities	Percent completion of earthquake and volcano hazard assessments for moderate to high hazard areas	39%
		Percent implementation of optimal earthquake and volcano monitoring for moderate to high hazard areas	31%
		Percent of U.S. that is covered by at least one geological map available to the public through the National Geological Map Database	56%

국가 전체 자원개발(공급량) 및 오염물질·CO₂ 방출량의 통계자료에 대하여 해당 기술의 자원개발(공급) 및 오염물질·CO₂ 저감 비율을 추정하여 적용한다. 그리고 적용범위(coverage)로 정의되는 기술완성도(기술기여도)를 적용하여 개발기술의 성과를 화폐화한다. 이는 연구개발 단계에 따라 해당 기술의 가치를 차등화한 것으로 볼 수 있다.

이러한 개념으로 국가기본지질도 및 지질주제도 작성, 지질조사, 지질재해·지질환경 관측 등에 대해서 적용범위(coverage) 개념을 적용하되, 실제 조사·관측이 시작되기 전 단계의 연구를 포함하여 기술개발단계(TRL)를 정의한다. Kim(2010)와 같이 기술기획연구를 TRL 1, 연구지역의 기존 정보 수집을 TRL 2로 정의하여 실제 특정지역의 조사관측이 시작되는 단계는 TRL 3으로 나타낼 수 있다. Kim(2010)에서는 마지막 단계인 TRL 9을 전세계 지질정보 구축, 지진예측/예방 시스템 완성으로 제시하였으나, 해당 조사·관측 사업의 최종 생산물(product)의 개념에 따라 최종 단계를 정의할 수 있다. 지질도폭의 경우 특정지역의 지질도폭이 최종 생산물(product)로 여겨지고 있으며, 다른 지역의 지질도폭을 발간하는 경우 해당 지역의 기존자료 수집부터 새롭게 해야 한다. 따라서 지질도 및 지질주제도 제작, 조사 및 관측 사업에서 해당 지역의 최종 생산물(product) 산출 단계를 TRL 9로 제시하며, 다른 지역에 대한 앞 단계의 독립적 연구가 필요한 경우에는 그 사업을 구분하여 기술개발단계(TRL)를 적용해야 할 것이다.

기존 연구 및 국내 타 분야의 적용사례를 통해 제시한 지질자원기술 특성화 기술개발단계(TRL) 기준은 다음과 같다(Table 5). 앞서 제시한 바와 같이 기존의 실용화 기술에 대한 기술개발단계(TRL)에서 시범지구 적용 등의 내용을 추가하여 지질환경 및 지질재해 분야에서도 실용화 성과를 기반으로 기술개발단계(TRL)를 제시할 수 있다. 한국지질자원연구원의 2013-2016년 경영성과계획서에서 제시한 수리생태학적 다중기법 개발 및 상호작용 규명에 대해 기술개발단계(TRL)를 적용해 보면 다음과 같다. 일단 해당 경영성과계획서에서는 수리 생태학적 다중기법 적용 기반 구축을 TRL 2-4로 보고 있으나 본 연구자가 해당 연구계획서 분석을 통해 지금까지와 향후의 연구개발 내용을 세부 기술개발단계(TRL)로 제시하면 다음과 같다. 지하수-지표수 수리경계면에서 생태학적 물순환 추적기법 개발을 위해 선진 기술에 대한 연구(TRL 1)를 실시하여 안정 동위원소 및 방사성 동위원소, 지하수 연령 추적

자, 수리지구화학 인자, 미생물 생태 특성, 온도, 유량 측정 등의 다중기법 연구를 통해 응용기술 개발 방향을 설정(TRL 2)한다. 그리고 물의 유출입량 평가 기법 및 동위원소, 온도추적자 기법 연구, 지하수내 미생물 유전자 추출 및 미생물 동정 및 분류 연구(TRL 3)를 수행한다. 이전 연구를 발전시켜 동위원소 이용 경계면에서의 물질교환량 평가 연구, 온도추적자 유출량 평가 연구, 영양염류(탄소, 질소) 및 미생물 거동 평가 분석 연구(TRL 4)를 실시한다. 이후 단계는 현장 시범 적용(TRL 5)으로, 앞서 개발한 동위원소 이용 물질교환량 평가, 온도추적자 유출량 평가, 지하수/미생물의 거동 현장적용 및 검증을 실시하여 기술개발의 결과를 확인(TRL 5)한다. 자연방사능 물질, 온도 등 다중 환경추적자 이용 유출량 조사 기법 확립, 지하수/미생물의 시공간적 변동분석, 영양염류 순환 평가, 수리경계면을 통한 미생물 오염원 추적, 지하수-지표수 연계 오염취약성 평가를 실시하고 국내외의 다른 특성을 가진 현장을 대상으로 검증(TRL 6)한다. 이후 연구단계는 실제 활용하는 환경을 대상으로 복수 및 대형 현장을 대상으로 지하수-지표수 혼합대 수리생태적 특성평가 기법의 발전 및 성능향상 연구(TRL 7)을 실시한다. 이후 해당 기법의 실시를 위해 지방자치단체 및 기업을 대상으로 기술이전을 위한 신뢰성 평가 및 표준화를 위한 추가 연구(TRL 8)를 진행하며 복수 및 대형 현장에서 실제 적용을 위한 일부 보완 개발(TRL 9)을 실시한다.

지질자원 기반 분야는 최종 생산물(product)을 고려하여 특정지역의 지질정보 구축 및 서비스를 목적으로 조사, 관측 등을 통해 일부 지역의 정보 구축을 하는 경우 실용화 기술의 세미 플랜트, 일정 규모의 실증사업의 단계인 TRL 6단계로 정의한다. 앞서 제시한 실용화 성과를 기반으로 한 기술개발단계(TRL)와 같이 지질도 및 주제도 제작, 조사 및 관측 사업의 경우에도 선진 기술의 기본 원리이해 및 조사·관측을 위한 기획연구(TRL 1)를 실시한다. 그리고 지질/관측 정보 수집 및 1차 가공, 조사/관측현장 확보, 현장의 일반적 정보를 조사(TRL 2)를 진행한다. 소규모 지역의 조사·관측 실시 혹은 광역조사(TRL 3)를 실시하고 소규모 지역 혹은 광역 조사·관측 정보를 분석(TRL 4)한다. 그 다음 단계로 지역을 확대하여 조사·관측을 실시하거나 시추 등의 정밀조사(TRL 5)를 통해 결과를 종합적으로 분석하여 일부 지역에 대한 지질 및 자원정보를 구축(TRL 6)한다. 이후의 연구단계는 기존의 개발한 조사/관측의 연구방법을 이용하여 지질정보 구축 지

Table 5. Technology Readiness Level (TRL) Indicator on base technology of Geoscience and Mineral Resources

Level	Area	Commercialization/ Demonstration	Coverage
Research	Basic Research	TRL 1	- R&D Planning - Literature survey
		TRL 2	- Technology concept formulated for application purpose - Secure laboratories
Development	Laboratory Experiments	TRL 3	- Proof of basic concept in Laboratory - Conceptual design
		TRL 4	- System validation in Laboratory - System design
	Prototype Development (Pilot application)	TRL 5	- Prototype development and validation - Pilot field application (scale: one to several number)
		TRL 6	- Semi-Pilot Plant development and validation - Pilot field operation (scale: beyond ten percent of mass-production/actual environment)
Business	Field Application	TRL 7	- Pilot Plant development and validation - Pilot field operation (scale: over ten percent of mass-production/actual environment)
		TRL 8	- Test and certification in actual environment
		TRL 9	- Commercialization

역을 확대(TRL 7)하고 어려운 일부 지역을 제외한 연구 대상 목표 지역의 지질정보를 구축(TRL 8)한다. 마지막으로 최종 생산물(product)인 특정지역 및 전세계/전국토 정보 구축, 수요자 맞춤형 보급을 위한 보완 연구(TRL 9)로 연구개발의 진행단계를 제시할 수 있다.

5. 결 론

한국지질자원연구원의 경우 2010년 성과목표 설정 논의에서 NASA 기술개발단계(TRL)를 지질자원 분야에 적용을 처음 시도하였으나, 실제로 연도별 성과목표 및

지표로 활용하지 않았다. 당시 지질자원 분야의 연구 개발에 대한 기술개발단계(TRL)의 세부 설정과 관련하여 Kim(2010)은 첫 번째 단계인 TRL 1을 기술기획연구로 정의하고 마지막 단계인 TRL 9을 전세계 지질정보 구축, 지진예측/예방시스템 완성으로 제시한 바 있었다. 본 연구에서는 지질도 및 주제도 제작, 조사 및 관측 사업 등 지질자원 분야 기반 연구개발사업의 특성을 분석하고, 미국지질조사소(USGS) 성과목표 및 기술기여도에서 착안한 적용범위(coverage) 개념을 NASA 기술개발단계(TRL)에 적용하여 연구개발 진행 단계를 제시하는 정량지표의 이론적 근거를 제시하였

다. 그리고 기존의 실용화 기술에 대한 기술개발단계(TRL)에서 시범지구 적용 등의 내용을 추가하여 지질 환경 및 지질재해 분야에서도 실용화 성과를 기반으로 기술개발단계(TRL)를 제시할 수 있게 하였다.

2013년 국가과학기술위원회 성과목표/지표 설정 가이드라인에서는 연구개발의 시기와 수준을 고려하여 성과목표를 설정하게 하였다. 기존 지질도 및 주제도 제작, 조사 및 관측 사업 등 지질자원 분야 기반 연구개발사업의 경우 연구개발의 목표기한을 제시가 어려워 연구개발의 진행단계를 알 수 없는 한계가 있었다. 기술개발단계(TRL)를 적용 시 특정지역 및 전세계/전국 토 정보 구축, 수요자 맞춤형 보급 연구를 마지막 단계(TRL 9)로 제시한다면 연구개발의 현재 진행시점 및 종료연도를 확인할 수 있다. 이는 NSTC-KISTEP(2012)과 같이 구체적인 기술실현단계를 제시함으로써 미래 사회에서 과학기술의 역할 및 중요성에 대한 인식 제고에 기여할 수 있다. 정부에서는 논문, 특허 등의 양적 지표를 지양하고 연구개발 특성에 맞는 성과목표 및 성과지표 설정을 요구하고 있다. 기술개발자 및 경제·정책전문가의 기술개발로드맵에 기반한 기술개발 실용화 시점, 연구개발 단계, 연구개발 적용범위 등에 대한 심도있는 연구가 요구된다.

사 사

이 논문은 한국지질자원연구원 주요연구사업 ‘기술 선도를 위한 통합적 관점의 미래사회 및 기술정책 연구(GP2015-039)’에 의해 지원되었습니다.

References

- Ahn, E.Y (2011) Economic Impact Analysis on the Groundwater R&D Project. *Journal of Water Policy and Economy*, v.18, p.23-40.
- Ahn, E.Y and Yu, S.Y. (2012) A Social Costs Quantification for Impact Assessment Indicators Development on Technologies Related Groundwater and Soil Contamination. *Econ. Environ. Geol.*, v.45, p.447-454.
- Ahn, S.J (2012) Experimental Studies on Applicability and Effect of the Total Project Cost Management System on R&D Program. KISTEP, 137p.
- Department of Defense (DoD) (2011) Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance. Assistant Secretary of Defense for Research and Engineering (ASD(R&E)), 20p.
- Engel, D.W, 2012, Development of Technology Readiness Level(TRL) Metrics and Risk Measures. Pacific Northwest National Laboratory, US Department of Energy, 16p.
- General Accounting Office (GAO) (1999) BEST PRACTICES. Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes. United States General Accounting Office-National Security and International Affairs Division, GAO/NSIAD-99-162, 80p.
- Hwang, H.W, Kim, H.R. and Chang Y.K. (2012) TRL Impact on Development Schedule and Cost in the Aerospace Project. *Journal of Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, v.40, p.264-272.
- Hwang, J.H (2014) Standard Guidance for Preliminary Feasibility Study on R&D Program. KISTEP, 217p.
- Kim, N.G., An, B.H., Lee, H.S., Choi, J.H. Park, S.H. and Kim, Y.S. (2012) Implementation of TRL and TRA tools to Korean Construction and Transportation R&D Evaluation for Improving Practical Use. *Korean journal of construction engineering and management*, v.13, p.110-119.
- Kim, S.Y. (2010) Definition of KIGAM TRLs (KIGAM internal document). 3p.
- Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) (2009) TRL evaluation indicator for industrial strategic technology. 85p.
- Lee, H.G., Jeon, E.Y., Yu, S.J. and Park, H.J. (2014) Project outcome differences according to recognition of project goals in health care R&D. 2014 Autumn proceedings of Korean association for policy studies, p.95-113.
- Mankins, J.C. (1995) Technology Readiness Levels: A White Paper, Advanced Concepts Office. Office of Space Access and Technology, NASA, 5p.
- National S&T Commission (NSTC)-Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (KISTEP) (2012) 4th Technology Foresight. 265p.
- Office for Science and Technology (OST) (1993) Realising Our Potential: A Strategy for Science, Engineering and Technology. 74p.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2002) Frascati Manual: Proposed Standard Practice for Surveys on Research and Experimental Development. 255p.
- TEC-SHS (2008) Technology readiness levels handbook for space applications, https://artes.esa.int/sites/default/files/TRL_Handbook.pdf, European Space Agency (esa). 66p.
- Um, I.C. (2012) Government Research and Development budget analysis in the FY 2011, KISTEP. 173p.
- U.S. Department of the Interior (DOI) - U.S. Geological Survey (USGS) (2011) FY 2011 - 2016 DOI Strategic Plan. http://www.doi.gov/pmb/ppp/upload/DOI_StrategicPlan_fy2011_2016.pdf