

국내 부지 특성을 고려한 오염토양 정화기술매칭기준안

이재영¹ · 이민희^{2*} · 유목련³

¹서울시립대학교 환경공학과

²부경대학교 지구환경과학과

³한국환경산업기술원

Draft Guideline Matching the Treatment Technology to the Soil Contaminated Site Based on the Site Properties in Korea

Jae-young Lee¹ · Minhee Lee^{2*} · Mokryun Yu³

¹Department of Environmental Engineering, The University of Seoul

²Department of Earth Environmental Sciences, Pukyong National University

³Korea Environmental Industry & Technology Institute

ABSTRACT

The programmable logic array to match the treatment technology to the soil contaminated site based on the site properties in Korea was developed. Based on the previous technology screening system of FRTR (Federal Remediation Technology Roundtable) in USA, total 9 evaluation factors indicating the site characteristics were used for the technology matching process and 8 factors among them were quantitatively weighed in the order of importance. The class interval for each evaluation factor was linearly distributed to give the weighed score and 8 scores were summed up to prioritize the treatment technology. The optimal treatment technology for a specific site was determined according to the total score acquired from 8 evaluation factors used in this technology matching process. The reliability test for the developed technology matching system was done by using information of two real cleanup sites in Korea, suggesting that this guideline will be available to determine the most effective treatment technology to cleanup the soil contaminated site and also to assist the government or the company to design a successful and cost-effective site cleanup plan in Korea.

Key words : Evaluation factor, Soil pollution, Soil property, Soil remediation, Technology matching process

1. 서 론

오염토양을 정화하는 기술은 1980년대부터 미국의 Superfund site를 중심으로 한 현장 실증 시험을 시작으로 지속적인 개발이 이루어져왔으며, 2000년 후반부터는 우리나라를 포함하여 미국, 호주 및 유럽 등 선진국을 중심으로 경제적이고 친환경적인 오염 현장에 적합한 정화기술 개발이 진행되고 있다(USEPA, 1993; USEPA, 2008). 각국의 토양·지하수 정화 전문기업들은 체계적으로 구축된 토양 정화기술 관련 데이터를 바탕으로 해외 시장 진출을 시도하고 있으며, 이에 따라 국내 토양 정화업체

역시 국제적인 정화기술 경쟁력 확보가 시급한 상황이다(KEITI, 2014). 현재 우리나라는 토양 정보, 토양 관측망, 지하수 관측망 등 토양 관련 DB 관리가 부처별로 독자적으로 운영되어, 부처간 토양 관련 정보의 공유 및 활용이 제대로 이루어지지 않고 있다. 국내 토양 관련 정보는 국립환경과학원에서 구축한 토양지하수정보시스템(SGIS)과 한국환경산업기술원의 국가환경정보센터(KONETIC)로부터 전국 토양 정보와 개략적인 토양 오염현황을 파악할 수 있으며, 농업진흥청의 '흙토람' 인벤토리 사이트를 통해 토양통계, 토양지도, 토양 관련 학술자료 등을 제공할 수 있다(NIER, 2016; KEITI, 2016; RDA, 2016).

*Corresponding author : heelee@pknu.ac.kr

Received : 2016. 7. 18 Reviewed : 2016. 8. 23 Accepted : 2016. 8. 30

Discussion until : 2017. 2. 28

국의 토양관련 DB 구축 및 온라인 정보 제공 사례로는 미국의 ‘American Geoscience Institute’가 운영하는 GSC (The Groundwater and Soil Contamination Database), 캐나다의 ‘Agriculture and Agri-Food Canada’에서 운영하는 CANSIS(Canadian Soil Information System) 및 독일 ‘The Umweltbundesamt’에서 운영하는 토양 정보 시스템 등이 있다(AGI, 2016; AAFC, 2016; UBA, 2016). 이러한 인벤토리 사이트들은 토양 정화기술보다는 오염원의 특성, 분석, 평가에 대한 인벤토리 정보에 초점이 맞춰져 있으며, 미국 EPA의 ‘Science and Technology Report’에 특정 오염부지에 대한 일부 사례보고서 자료에 토양 오염 현장에 적용한 기술 정보들이 있으나 대부분이 1990~2000년 자료들이다(USEPA, 2004).

우리나라는 1990년도에 토양환경보전법을 제정하고 토양 정화 사업을 비교적 일찍 시작한 나라임에도 불구하고, 현재까지 국내 토양 정화기술 개발이 활성화되지 못한 이유 중 하나는 오염 부지에 적용된 정화기술에 대한 체계적인 검증, 관리 체계 수립되지 못하여 오염원별, 오염부지 특성별 최적의 적용 기술 선택이 어렵기 때문이다(KEI, 2003; MOE, 2007a; MOE, 2012). 현장 오염 부지에 적용된 기술 검증에 대한 자료를 활용할 수 있는 체계화된 자료 취합, 분석, 평가 시스템이 마련되어 있지 않은 점도 향후 토양 정화 분야의 발전을 저해하는 요소이다. 특히 토양 정화기술을 분야별로 분류하고 통합 관리하는 책임기관이 부재하여 토양 정화기술 수요자가 필요시 마다 부처별로 관련 자료를 확보해야 하는 불편이 있으며, 이에 따라 수요자 중심의 전략적인 기술 정보 활용이 불가능하였다. 특정 오염 토양 부지에 적합한 정화기술을 선정함에 있어 가장 중요한 것은 오염부지 특성에 따른 기술의 적합성 문제이나, 2007년에 환경부가 작성한 ‘오염토양 정화방법 가이드라인’은 미국 연방정화기술회의(Federal Remediation Technology Roundtable: FRTR)에서 제시한 정화기술과 선정 방법을 그대로 사용하고 있어서, 국내 오염부지와 국외 적용된 기술사례가 상이하여 국내 현장에서 효과적으로 활용되지 못하고 있다(MOE, 2007b). 특히 기존의 ‘오염토양 정화방법 가이드라인’에서는 정화대상 오염물질을 석유계화합물에 국한하고, 정화기술 또한 생물학적정화법을 비롯한 5가지 기술만 제시하고 있어서 다양한 오염원을 가지는 실제 국내 오염 부지에 적용하는데 한계가 있다.

우리나라의 경우 토양환경기본계획(2010~2019년) 5대 추진과제 중 국가정화우선순위제도(NPL) 도입에 따라 향후 오염원인자 불명 또는 여러 이유로 복원되지 않은 오

염부지에 대한 정화조치가 늘어날 가능성이 있으므로(MOE, 2009), 이에 따른 보다 세밀한 토양오염 정화 기술 매칭 기준이 필요한 실정이다. 특히 2008년 이후 국내·외 토양정화 대상 물질이 다양화되고 환경부의 토양 지하수오염방지기술개발사업(GAIA project) 등을 통해 토양 오염 정화 기술 개발이 진행되어왔기 때문에 이를 반영한 정화기술매칭기준이 필요하다. 본 연구는 국내 오염부지 특성, 오염원 특성, 현장 적용 정화 기술에 대한 자료를 수집하고 분석하여, 국내 오염부지 특성에 따라 최적의 토양 정화기술을 선정할 수 있는 오염토양 정화 기술매칭기준 logic을 개발함으로써, 국내 오염 부지를 정화하려는 수요자에게 현장에 가장 적합한 정화기술 선정이 가능하도록 하는 국내 오염 부지에 적합한 ‘국내 오염토양 정화기술매칭기준안’을 제안하는데 그 목적이 있다.

2. 토양오염 정화기술매칭 기준안 마련을 위한 국내 토양오염 정화사례 분석

국내 오염토양 정화시장은 신흥시장으로서 역사가 매우 짧고 시장규모 또한 미미하여 미국의 수퍼펀드 프로그램과 같이 오염부지 및 오염토양 정화기술에 대한 체계적인 관리 및 정보수집이 이루어지지 않은 상태이기 때문에, 국내 오염부지 현황 및 오염토양 정화기술 적용사례에 대한 통계자료가 아직 구축되어있지 않은 실정이다(MOE, 2007b). 현재 환경부의 토양지하수오염방지기술개발사업과 산업자원부의 광해방지기술개발사업 등에서 오염 토양 정화에 대한 기술 연구 및 개발이 진행 중이며, 군부대, 주유소 및 저유소, 철도역사, 기타 산업부지 정화 사업 등을 중심으로 현장부지에서 정화효율이 검증된 기술들이 적용되고 있다(MOE, 2010). 본 연구에서는 국내 오염부지 특성에 적합한 정화기술을 선정하는 기술매칭 기준안을 제안하기 위하여, 한국환경산업기술원이 정부 및 산하 기관, 토양정화 기업, 토양관련 학회 등에 요청하여 확보한 국내 오염토양에 적용된 정화기술 사례 총 1313건을 활용하였다(KEITI, 2015). 수집된 1313개 토양정화 사례에 대하여 각 오염부지 별 적용된 정화 기술, 부지 내·외(On·Off) 처리, 지상·지중(Ex·In-situ) 처리, 오염물질, 오염면적 및 토량(m³), 최대 오염농도, 정화기간 및 비용, 정화복원 목표지역 등의 인자에 따라 Table 1과 같이 데이터베이스화하였다.

정화기술 사례 자료로부터 정화부지를 오염원별로 분류한 결과, 국내에서 정화한 오염 현장은 유류오염이 91.6%(1203건)으로 가장 높았으며, 중금속 오염이 3.6%

Table 1. Data base format of the soil contaminated sites in Korea for the guideline to match the treatment technology

Site No.	Contaminant	Treatment location		Contaminated soil volume (m ³)	Maximum concentration (mg/kg)	Cleanup goal (type)	Cleanup time (month)	Cleanup cost (won/m ³)
		On/Off-site	In/Ex-situ					
1	TPH, BTEX	Off	ex	3,782	5,700	3	24	300,000
2	TPH, BTEX,	Off	ex	94,926	2,952	1	19	350,000
3	TPH	On	ex	12,173	2,780	1	19	870,000
4	Ni, Zn, Pb	On	ex	6,418	87	1	14	700,000
.
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
.
1313	TPH, Cd, F	Off	ex	26,794	3,170, 65	1	14	870,000, 600,000

Table 2. The present state of the full scale cleanup project based on the contaminant type applied in Korea (from 1995)

Treatment technology	Applied project number (%)		
	Fuel oil	Heavy metals	Fuel oil + heavy metals
Biodegradation	80(6.7)	0(0)	0(0)
Bioventing	155(12.9)	0(0)	0(0)
Soil landfarming	747(62.1)	0(0)	29(55.8)
Biopile	10(0.8)	0(0)	0(0)
Phytoremediation	0(0)	6(12.5)	2(3.8)
Composting	2(0.2)	0(0)	0(0)
Soil flushing	90(7.5)	3(6.3)	0(0)
Soil vapor extraction	251(20.9)	0(0)	0(0)
Soil washing	72(6.0)	29(60.4)	32(61.5)
Solvent extraction	0(0)	0(0)	0(0)
Chemical oxidation/reduction	236(19.6)	2(4.2)	14(26.9)
Electrokinetic separation	1(0.1)	8(16.7)	5(9.6)
Thermal desorption	37(3.1)	2(4.2)	3(5.8)
Incineration	0(0)	0(0)	0(0)
Vitrification	0(0)	1(2.1)	1(1.9)
Pyrolysis	0(0)	0(0)	0(0)

(47건), 유류와 중금속이 복합오염된 경우가 4%(53건)으로 나타났다. 오염토양 정화기술은 개발 상태에 따라 상용화 되어 현장에서 활용 중(Full-scale)이거나, 파일럿 단계(Pilot-scale), 실험단계(Lab-scale)로 구분하였으며, 환경부에서 현재 국내 정화기술로 환경부에 고시된 16개 정화기술로 1313건 정화사례를 분류한 결과(MOE, 2016a), 소각과 열분해법은 상용화된 기술이지만 국내에 아직 적용되지 않은 기술이었고, 용제추출법과 유리화법 또한 국내 적용 사례가 없었으며, 유리화법은 미국 FRTR 자료에서도 미국 내 적용사례가 없는 것으로 나타났다. 오염원별로 적용된 정화기술을 분류한 결과, 유류오염에는 토양경작법이 62.1%(747건)으로 가장 높았으며, 토양증기추출법 20.9%(251건), 화학적산화환원법 19.6%(236건)순이었

다. 중금속오염토양에 적용한 정화기술은 토양세척법 60.4%(32건), 토양경작법 54.7%(29건)순으로 나타나며, 유류와 중금속이 복합으로 오염된 토양 정화에는 토양세척법 61.5%(32건), 토양경작법 55.8%(29건) 순으로 나타났다. 총 16개 정화기술에 대하여 1313 개 국내 오염원별 적용된 정화기술 분류 결과를 Table 2에 나타내었다.

3. 오염토양 정화기술매칭 기준안 마련을 위한 평가인자 선정 및 가중치 부여

토양오염을 효율적으로 정화하기 위해 국내 정화사례를 바탕으로 오염원별 적용가능 한 정화기술 검토, 사회적 요구, 경제성 그리고 향후 부지활용 목적 등에 따라 정화

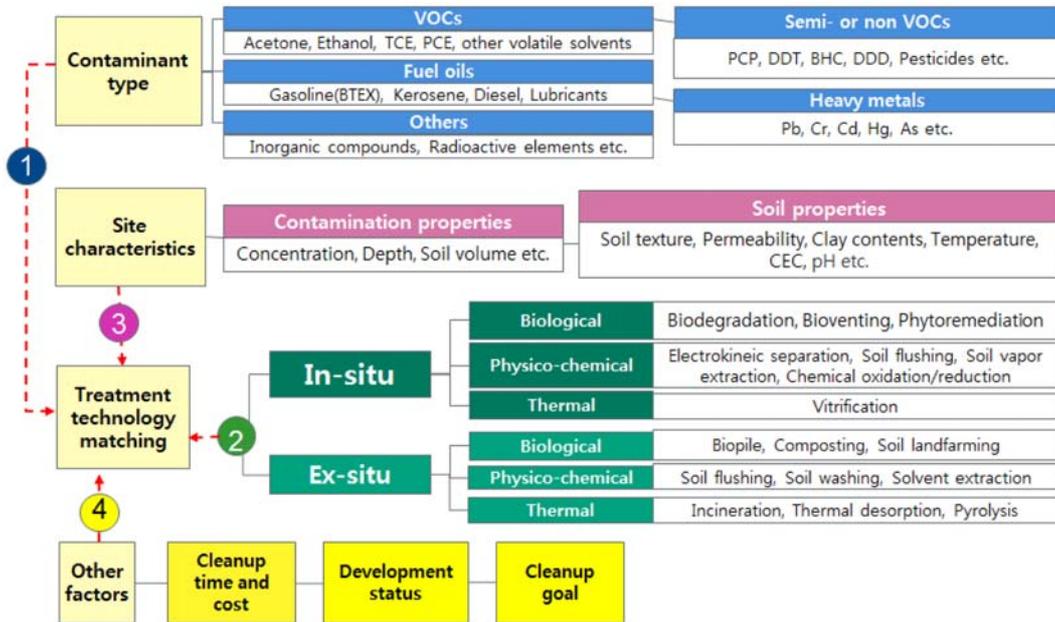


Fig. 1. Process to determine the evaluation factors used in the treatment technology matching.

목표, 비용과 기간 등을 고려하여 정화기술매칭 기준 마련에 필요한 정량화된 평가인자를 도출하고자 하였다. 미국 FRTR(2016)에서는 정화기술별 평가인자를 총 5개로 구분하였으며, 각 평가항목은 정성적으로 표기하도록 되어있다(평균 이상, 평균, 평균 이하로 표시). 국내에서는 2007년 환경부가 제정한 ‘토양오염정화 가이드라인’에서 정화기술 선정에 필요한 정성적인 평가인자들을 일부 제시하였는데, 이 중에서 국내 토양정화 사례에서 공통적으로 제시된 정량화가 가능한 토양 특성들을 포함시켜 평가인자를 선정하였다. 수집된 국내 오염 부지 현황 자료로부터 크게 4가지로 평가인자를 구분하였는데, 정화기술을 적용하는 기술매칭 기여도와 순서에 따라 오염물질, 오염 부지 특성, 정화방법, 기타 영향인자군 등으로 구분하였다. 오염물질(오염원)은 휘발성유기화합물, 준/반휘발성유기화합물, 유류, 중금속, 기타 등 총 5가지로 세분하였으며, 오염부지 특성은 오염원 특성과 토양 및 지반특성 등으로 구분하였고, 정화방법은 부지의·내(지중/지상처리)처리로 구분하였다. 정화기술매칭 기준 마련을 위한 평가인자 선정과정을 요약하여 Fig. 1에 나타내었다. 총 1313건의 국내 오염 부지 정화 사례 분석을 통해 정화기술매칭 기준에 적용하기 위한 9개 평가인자를 선정하였으며 이를 미국 FRTR의 정화기술매칭에 사용한 5개의 평가인자와 비교하여 Table 3에 나타내었다.

미국 FRTR에서 정화기술매칭에 사용된 영향인자들은

모두 정성적으로 표시되어 특정 오염 부지에 대하여 가장 적합한 정화기술을 선별하기 위해 정화기술들을 상호 비교하는 것이 불가능하였다(FRTR, 2016). 따라서 본 연구에서는 선정된 평가인자별 정량화를 통해 산출된 최종 점수의 합산으로 정화기술 선정을 위해, 정화 사례 DB 자료를 평가인자별로 모두 분류하여 가중치를 부여하였다. 국내 정화 사례 자료 분석 결과 국내의 경우 토지이용 효율 및 경제성을 중요한 인자로 판단함에 따라 정화 비용 및 정화 기간을 중요한 평가인자로 선정하여 높은 가중치를 부여하였다. 평가인자별 가중치 점수(Weight score)는 Table 3에 나타내었으며, 정화비용 및 정화기간은 각 25점, 부지 특성 항목인 토양 및 지반특성은 10점, 부지 정화방법에 따른 가능 기술별 인자에 10점, 오염 특성 항목인 오염원 농도 및 오염 토양 인자에 10점, 기타 환경인자를 기술 상용화 정도와 부지 정화 목표로 구분하여 각 10점을 부여하여 총 100점으로 점수화 하였다.

선정된 정화기술에 대하여 평가인자별 가중치 부여 방법은 기존의 토양오염 부지 우선 순위 선정이나 정화 우선순위 선정을 위해 국내외에서 사용하였던 선형 가중치를 이용하여 내삽하는 과정(Linear Interpolation process)을 이용하여 등급화하는 방법을 적용하였다(USEPA, 1992; MOE, 2006; CCME, 2008; Jeong et al., 2011). 즉 수집한 국내 오염토양 정화 사례 자료를 평가인자별, 정화기술별로 정리한 후, 각 평가인자에 대한 정화 사례

Table 3. Evaluation factors and their weight score used in the treatment technology matching

Treatment technology matching stage	Evaluation category	Evaluation factor	FRTR factor (Yes or No)	Weight score (total 100 point)
1 st step	Contaminant	① Five contaminant type 'Yes' or 'No'	Yes	0
2 nd step	Treatment location	② On (In/ex-situ) or Off site	Yes	10
3 rd step	Pollution characteristic	③ Contaminated soil volume	No	5
4 th step	Soil property	④ Maximum concentration	No	5
5 th step	Treatment operation process	⑤ Soil texture, pH, Water contents etc.	No	10
6 th step	Other environmental parameter	⑥ Cleanup cost	Yes	25
		⑦ Cleanup time	Yes	25
		⑧ Applicability	Yes	10
		⑨ Cleanup goal	No	10

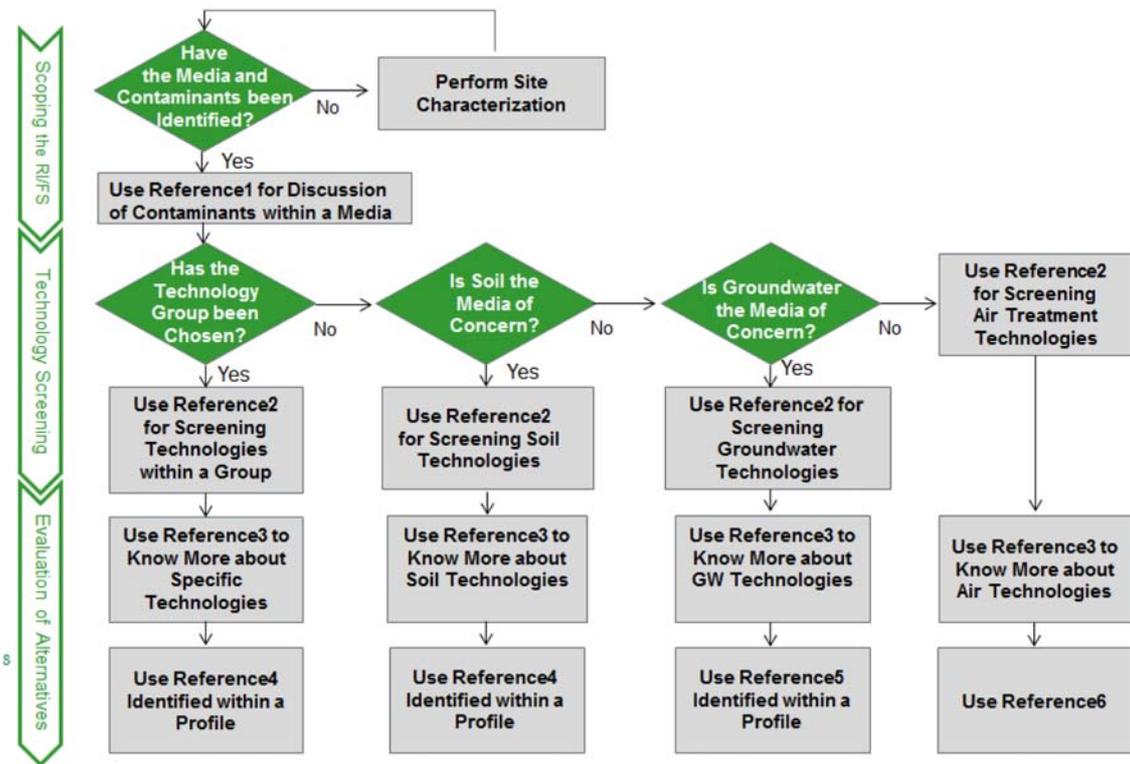


Fig. 2. Guideline logic for the FRTR treatment technology matching system (modified from FRTR, 2016).

들의 '최대값(또는 평균값)'과 '최소값'을 평가인자 항목 당 부여하는 가중치의 '최대값'과 '최소값'으로 설정하여 그 사이 구간 값에 대하여 선형 가중치(Linear weight)를 부여함으로써, 특정 오염 부지에 대하여 선별된 정화기술의 각 평가인자별 점수를 합산하여 최적의 정화기술을 선정하기 위한 최종 평가값(FS: Final score)으로 사용하였다(Lee, 2010; Jung et al., 2015). 평가인자별 점수 부여 방법은 다음 절(4 절)에서 서술하였다.

4. 정화기술매칭 기준 logic 개발

미국 FRTR에서 제공하는 기존의 오염토양 정화기술매칭기준 logic은 Fig. 2와 같이 진행 과정에 따라 크게 3 단계로 구분하여, 각 단계별로 결정이 필요한 항목별로 정보를 나열하여 기술 수요자가 관심 있는 정화기술에 대하여 검토·분석하는 체계로 이루어져 있다. 즉, 오염부지 조사 결과 오염원에 따라, 오염매체가 토양인지 지하수인지에 따라 기본 정화기술을 1차 선별하고(Yes or No 방

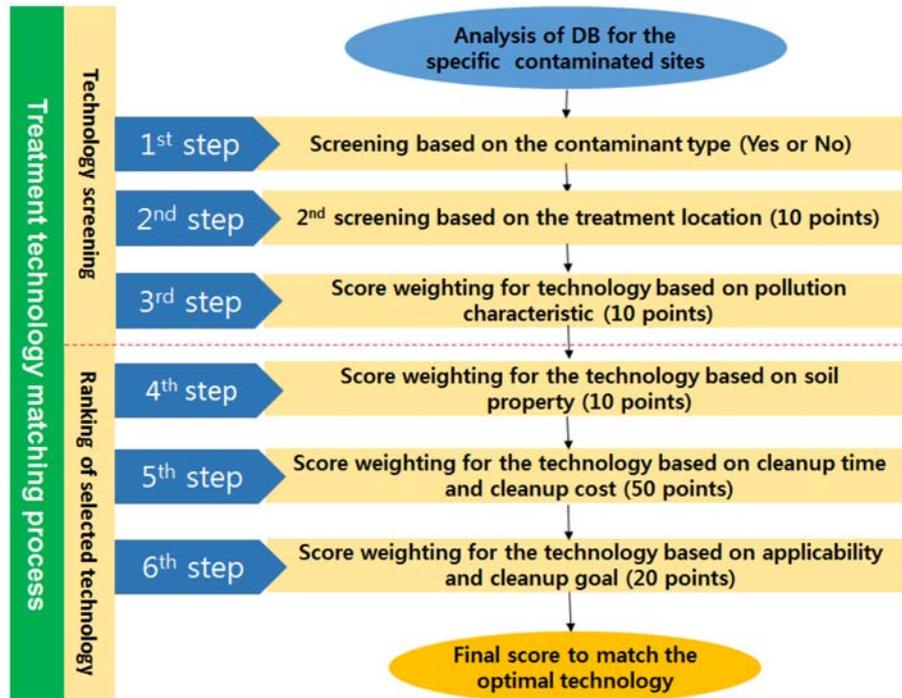


Fig. 3. Guideline logic for the treatment technology matching system developed in this study.

식), FRTR(2016)에서 미리 선정된 5가지 평가인자(Table 3 참조)를 참조하여 정화기술을 평가하는 방법이다. 이러한 기술평가 방법은 엄밀한 의미에서 오염 부지에 적합한 정화기술을 매칭하는 방법이라고 볼 수 없으며, 다만 오염 부지에 적용 가능한 정화기술들을 순위 없이 병렬적으로 선택하는 기능만으로 이루어져 있다. 또한 오염 정화 방법과 부지 특성에 따라 선정되는 정화기술은 단순한 ‘Yes’ 또는 ‘No’ 방식, 정화기술 별 각 평가인자들은 정성적으로 표기되어(평균 이상, 평균, 평균 이하), 정화기술 별로 전반적인 특성은 한눈에 파악되나 정화기술을 선정하기 위한 분석은 전적으로 기술 수요자의 주관적인 판단에 맡겨지게 되는 단점이 있다.

이에 반해, 본 연구에서 제시한 정화기술매칭 기준 logic은 국내 정화사례를 수집·분석한 결과를 기존 FRTR 기준과 환경부 ‘오염토양 정화방법 가이드라인’의 기준에 추가하여 정화기술 선정에 필요한 총 9개 평가인자를 선정하고(이 중 8개는 정량화된 인자), 각 평가인자의 가중치 점수를 합산한 최종 점수에 의하여 적합한 정화기술이 선정되는 체계로 이루어져있다. 본 연구에서 개발한 정화기술매칭 기준 logic을 Fig. 3에 나타내었다. FRTR 기준에서 1단계로 제한된 적용가능 기술선별 단계(Fig. 2)를 세단계로 세분화하여, 오염원에 따른 정화기술을 단순히 ‘Yes or No’ 방식으로 선택하는 과정에 오염부지와 오염

원 특성에 따라 정화기술을 선별하는 단계를 추가하였다. 즉 오염원의 존재 위치에 따라 정화방법을 선정하여 점수화하고, 오염원 특성(오염원 최대농도, 오염 토양)에 따라 점수화한 정화기술을 1차적으로 선별하도록 구체화하였다(Fig. 3의 1-3단계). 2차 정화기술 순위선정 단계에서는 1차 기술선별 단계에서 선별된 정화기술들을 토양/지반 특성 관련 4단계, 정화비용과 정화기간 평가인자를 적용하는 5단계, 마지막으로 기타 외부환경 인자를 고려하는 6단계로 평가하며, 총 5가지 평가인자값이 추가로 부여된다(Fig. 3의 4-6단계). 위와 같이 순차적으로 8가지 평가인자 점수를 합산하여, 총 평가점(Final Score: FS)이 가장 높은 점수를 얻은 정화기술이 오염부지에 가장 적합한 정화기술로 제시되도록 개발되었다. 특정 국내 오염부지에 대하여 정화기술을 선정하는 기술매칭하는 과정을 위 logic에서 제시한 총 6단계별로 정리하여 아래에 서술하였다.

4.1. 오염원별 적용가능 정화기술 선별(1단계)

1단계 오염원별 정화기술 선정방법은 수요자가 정화하려는 대상 부지 오염원을 선택하면 오염원에 대하여 적용 가능한 정화기술이 선별되어 표시되는 ‘Yes’ 또는 ‘No’ 방식이며, 이 단계는 FRTR의 적용가능 기술 선별 단계와 동일하다. 국내 오염부지에 적용하는 정화기술은 현재 국내 토양환경보전법에서 고시한 총 16개 정화기술로 제한

하였다(Table 2 참조). 최근까지 국내에서 정화가 완료된 정화사례의 토양오염원은 유류와 중금속이 95% 비율을 차지한다(KEITI, 2015). 따라서 정화기술 선별 1단계 과정은 주로 유류 및 중금속 오염원을 정화할 경우 적용 가능한 정화기술을 선정하기 위한 단계이며, 이를 위해 선행 연구 자료를 이용하여 오염원에 대한 정화기술 적용 여부를 판단하였다(KEITI, 2015; FRTR, 2016). 즉 특정 오염원에 대하여 각 정화기술의 정화효율이 기존 정화 사례 자료 값의 평균 이상을 나타내는 경우 그 정화기술은 적용 가능한 기술로 표기하고(Yes), 정화효율이 평균 이하였거나 부지특성에 따라 적용이 불가능한 정화기술들은 적용 불가능한 기술(No)로 분류하였다. 예를 들어 유류로 오염된 부지에 적용 가능한 정화기술은 지중처리가 가능한 기술로 생물학적분해법, 생물학적토풍법, 식물정화법, 토양세정법, 토양증기추출법 등이 있으며, 지상처리가 가능한 기술로는 토양경작법, 바이오파일법, 퇴비화법, 토양 세척법, 열탈착법, 소각법 등이 제시되는데, 이후 2단계에서 기술 수요자가 부지내 또는 부지의 처리방법을 선택하고, 부지내 처리의 경우 지상처리 혹은 지중처리를 선택할 경우 이에 따른 선별과정을 통해 위에 선정된 기술들 중 적용 가능한 정화기술이 2차로 선별되게 된다.

4.2. 정화 위치별 적용에 따른 정화기술 선별(2단계)

토양환경보전법 제15조3(오염토양의 정화)의 3항에 의하면 오염토양을 정화할 때에는 오염이 발생한 해당 부지에서 정화하는 것(On site process)을 원칙으로 하게 되어 있으며, 다만, 도시지역안의 건설공사 현장으로 부지가 협소하거나 오염토양이 5 m³ 미만으로서 현장에서 정화 시 정화효율이 현저하게 저하되는 경우 등의 사유(동법 시행규칙 제19조, 반출정화 대상)가 발생하여 그 부지에서 오염토양의 정화가 곤란한 경우에는 토양정화업자가 보유한 시설로 오염토양을 반출하여 정화하는 부지의(Off site) 정화를 허용하고 있다(MOE, 2016b). 따라서 현장 내 오염토양 처리시설 설치 및 오염토 굴착 기능여부에 대한 수요자 선택에 따라 적용 가능한 기술을 선별할 수 있도록, ‘Yes’ 또는 ‘No’ 선택과 선택된 기술에 대한 점수화 방식을 활용하였다. 기술 수요자가 정화대상부지 상황에 따라 정화위치를 부지내외로 선택할 경우, 가능한 정화기술을 선별함과 동시에 기존의 오염부지 정화에 적용한 빈도수에 따라 우선순위 정화기술 점수(10점 만점)로 제시하여 기술 수요자가 원하는 최적정화기술 도출이 가능하도록 하였으며, 이것을 국내 정화사례의 주 오염원인 유류와 중금속 사례에 적용하였다. 국내 유류오염 정화사례 665건

(부지내 273건, 부지외 392건) 및 중금속 정화사례 26건(부지내 14건, 부지외 12건) 분석 결과를 토대로 적용 정화기술 11가지를 도출하였으며, 이를 부지내외로 선별하여 최대 적용건수에서 최소 적용건수를 뺀 값을 10으로 나누고 이 값을 급간(class interval)으로 설정한 후, 10개의 급간별로 선형가중치 부여방법으로 1(최소)-10점(최대)의 점수를 부여하였다(Table 4). 이러한 가중치 부여 점수에 따라 기술 수요자가 유류로 오염된 국내 부지 내에서 정화기술을 선택할 경우 2단계 과정에서는 토양경작법(10점), 화학적산화환원법(7점), 토양증기추출법(6점) 순으로 적합한 기술이 제시되게 된다. 국내 정화사례에 아직 적용되지 않았거나, 사례 건수가 매우 적어 DB 분석이 되지 않은 5가지 정화기술(퇴비화법, 용제추출법, 유리화법, 소각법, 열분해법)의 경우, 급간의 최저점수(1점)를 적용하였고, 추후 정화사례 자료가 추가로 확보되면 적용건수에 따라 급간(class interval)을 다시 조정하여 정화기술매칭에 사용할 계획이다.

4.3. 오염원 특성에 따른 적용가능 정화기술 선별(3단계)

정화기술매칭 3단계에서는 국내 정화사례 1313건 중 단일기술이 적용되고 오염토양이 기재된 705건에 대하여, 유류 및 중금속 오염부지에 대하여 오염원 특성에 따른 적용가능 정화기술 선별 및 점수화를 실시하여, 수요자가 정화하고자 하는 대상 부지의 오염토양, 오염농도에 따라 선택 가능한 정화기술을 점수화하였으며 총 2가지 평가인자를 적용하였다.

4.3.1. 오염토양에 따른 정화기술 선별(5점)

오염토양 구간별로 적합한 정화기술을 선정하기 위해 부지별 오염토양을 500 m³ 미만, 500 m³~5,000 m³, 5000~25,000 m³, 25,000 m³~100,000 m³, 100,000 m³ 이상의 5가지 범위로 분류하고, 해당 범위에 적용된 정화기술 건수를 점수화하였다(총 5점). 점수화 방법은 각 오염토양 구간에 적용된 정화기술 최대건수에서 최소건수를 뺀 값을 5로 나누어 5개의 급간을 설정한 후, 급간별로 1(최소)-5점(최대)의 점수를 선형적으로 부여하였다. 특정 오염 부지에 대하여 기술 수요자의 오염토양 구간 선택에 따라 정화기술별 가중치 점수가 정해지고, 가장 높은 점수를 받은 정화기술이 본 오염 부지에 적용가능성이 높은 정화기술로 제시하도록 하였다. 예를 들면 중금속오염 부지이며, 오염토양이 500 m³ 미만인 경우 토양세척법(5점), 식물정화법(2점) 순으로 제시되어 토양세척법이 가장 적합한 것으로 나타났다. 국내 정화사례에 적용되지 않았거나, 사례

Table 4. The selected treatment technology based on the treatment location and contaminant type and the criteria to weigh score for each class interval (1st and 2nd step)

Contaminant	Treatment location	Treatment technology	Applied site number	Score	Criteria to weigh score for each class interval			
Fuel oil	On site	Biodegradation	21	2	Class interval= $\left[\frac{\text{maximun}(101)-\text{minimum}(1)}{10}\right]=10$			
		Bioventing	4	1				
		Soil landfarming	101	10	Class interval	Score	Class interval	Score
		Biopile	2	1	1~11	1	51~61	6
		Soil flushing	16	2	11~21	2	61~71	7
		Soil vapor extraction	52	6	21~31	3	71~81	8
		Soil washing	14	2	31~41	4	81~91	9
		Chemical oxidation/reduction	62	7	41~51	5	91~101	10
		Thermal desorption	1	1	Class interval= $\left[\frac{\text{maximun}(376)-\text{minimum}(1)}{10}\right]=37.5$			
		Biodegradation	3	1				
Fuel oil	Off site	Soil landfarming	376	10	Class interval	Score	Class interval	Score
		Soil vapor extraction	1	1	1~38.5	1	188.5~226	6
		Chemical oxidation/reduction	4	1	38.5~76	2	226~263.5	7
		Thermal desorption	4	1	76~113.5	3	263.5~301	8
			8	1	113.5~151	4	301~338.5	9
151~188.5	5	338.5~376	10					
Heavy metal	On site	Phytoremediation	4	5	$\left[\frac{\text{maximun}(8)-\text{minimum}(1)}{10}\right]$			
		Soil washing	8	10	Class interval	Score	Class interval	Score
		Chemical oxidation/reduction	1	1	1~1.7	1	4.5~5.2	6
			1	1	1.7~2.4	2	5.2~5.9	7
		Electrokinetic separation	1	1	2.4~3.1	3	5.9~6.6	8
			1	1	3.1~3.8	4	6.6~7.3	9
3.8~4.5	5	7.3~8	10					
Heavy metal	Off site	Soil flushing	1	1	Class interval= $\left[\frac{\text{maximun}(8)-\text{minimum}(1)}{10}\right]=0.7$			
		Soil washing	8	10	Class interval	Score	Class interval	Score
			8	10	1~1.7	1	4.5~5.2	6
			8	10	1.7~2.4	2	5.2~5.9	7
			8	10	2.4~3.1	3	5.9~6.6	8
Electrokinetic separation	3	3	3.1~3.8	4	6.6~7.3	9		
3.8~4.5	5	7.3~8	10					

건수가 매우 적어 DB 분석이 되지 않은 5가지 정화기술 (퇴비화법, 용제추출법, 유리화법, 소각법, 열분해법)의 경우, 급간의 최저점수(1점)를 적용하여 추후 DB가 확보되면 적용건수에 따른 재점수화를 통해 기술매칭에 사용가능하도록 하였다.

4.3.2. 오염농도에 따른 정화기술 선별(5점)

오염농도별 정화기술을 선별하기 위해 최대오염농도 구간을 중금속의 경우 4구간, 유류의 경우 5구간으로 나누

었으며, 구간 설정은 정화 사례 DB분석 및 환경부 오염토양 정화방법 가이드라인을 참조하였다. 일반적으로 생물학적처리 적용 조건으로 토양 내 미생물군이 활동할 수 있는 오염농도는 TPH 25,000 mg/kg, 중금속 2,500 mg/kg 이하이므로(KOSSGE, 2014), 이를 중간값으로 하여 유류는 5,000 mg/kg 미만, 5,000~25,000 mg/kg, 25,000~50,000 mg/kg, 50,000 mg/kg 이상, 중금속은 500 mg/kg, 500~2,500 mg/kg, 2,500~5,000 mg/kg, 5,000 mg/kg 이상으로 분류하였으며, 수집한 DB 자료로부터 해당 범위에

적용된 정화기술 사례 건수를 점수화하였다. 최대오염농도에 따른 정화기술 점수화는 각각의 농도범위별로 최대 적용건수에서 최소 적용건수를 뺀 값을 5로 나누어 5개의 급간을 설정한 후, 급간별로 1(최소)~5점(최대)의 점수를 부여하였다.

4.4. 정화기술매칭에 토양 및 지반특성 평가인자 적용(4단계)

국내 1313건 정화사례 분석 결과, 국내에 적용된 정화기술은 토양경작법, 토양세척법, 화학적산화환원법에 집중되어 국내에 고시된 16개 정화기술별로 토양 및 지반특성의 인자값 정량화가 불가능한 것으로 나타나, 토양 및 지반특성 인자는 FRTR과 환경부 ‘오염토양 정화방법 가이드라인’에 제시된 인자값을 인용하였다. FRTR 분류에 따라 정화기술별(생물학적처리, 물리·화학적처리, 열처리)로 분류하여 해당 정화기술 적용 시 고려해야 하는 토양 특성인자 및 인자의 적정범위를 세분화하였다. 생물학적 처리방법의 경우, 미생물 거동조건과 관련 있는 토양함수율(%), 토양온도, 영양염류 농도, 미생물군집농도 등을 토양특성인자로 설정하였으며, 점수화에 필요한 인자의 적정범위 역시 미생물 활동조건에 따라 점수를 부여하되, 3급간으로 단순화하여 1(최소), 5(중간), 10점(최대)으로 점수화하였다. 물리·화학적처리방법은 생물학적처리방법과는 달리 온도, 영양분과 같은 생분해 인자보다는 pH, 미세토함유량, 완충능력, 양이온교환능력(CEC)과 같은 토양의 화학적 특성에 초점을 맞춰 토양특성인자의 점수를 결정하게 하였으며, 열처리방법은 열처리 장비 투입 시 토양 가소성, 입도분포, 수분함량 등이 효율을 좌우하는 주요 인자로 작용하므로 이를 토양특성인자로 결정하고 적정범위를 균등하게 3 등급화하여 1, 5, 10점으로 점수화하였다(KEITI, 2015). 위 과정으로부터 특정 정화대상 부지가 가지는 토양 및 부지특성에 따라 정화기술 적용성에 대한 평가점수를 산정할 수 있는데, 예를 들어 기술 수요자의 정화 대상부지가 유류로 오염되어 있으며 1, 2단계에서 선별된 정화기술이 생물학적통풍법, 토양세정법일 때, 부지 토양특성인자로 고유투수계수($k > 10^{-8}$), 토양온도(7°C)가 제시되었을 경우, 정화기술 평가점수는 생물학적통풍법은 7.5점, 토양세정법은 10점으로 부여된다. 위와 같이 오염 부지에 적합한 정화기술을 선정하기 위한 4단계에서 토양 및 부지특성 인자값이 필요하지만, 국내 정화가 완료된 설계 및 검증보고서에서는 해당 부지의 토양 및 부지특성이 제대로 기재되지 않아, 향후 부지 정화 시 통일된 토양 및 부지특성 인자값에 대한 정보를 의무

적으로 표기하여 향후 활용할 수 있도록 하는 과정이 필요한 것으로 나타났다.

4.5. 정화기술매칭에 정화비용과 정화기간 평가인자 적용(5단계)

4.5.1. 정화기술매칭에 정화비용 평가인자 적용(25점)

총 1313건의 정화사례 중 정화비용이 기재되고 단일기술이 적용된 743건에 대하여 정화기술별로 비용을 분석하였으며, 오염토양 정화비용은 정화설계부터 폐기물 처리까지 사용된 총 정화 부대비용이 포함된 비용이다. 국내 정화사례로부터 평균 오염토양 정화비용의 분포를 분석한 결과, 1 m^3 당 100~100,000원이 305건으로 전체 41.05%를 차지하였으며, 1 m^3 당 100,000~500,000원이 310건(41.72%)으로 국내 토양오염 정화 시 1 m^3 당 500,000원 이내의 정화비용이 지출된 오염 부지가 82.77%를 차지하였다. 국내 정화사례 중 정화비용이 표기되지 않거나 사례가 충분하지 않은 정화기술 4가지(바이오과일, 퇴비화, 소각, 열분해)는 FRTR에 표기된 DB를 활용하였으며, FRTR에서의 기술별 평균정화비용은 2006년에 개발된 정화비용 엔지니어링 프로그램(RACER, Remedial Action Cost Engineering and Requirements)을 통해 산출하였으며, (달러/ m^3) 단위를 국내 통화로 환산하기 위해 1달러=1,100원으로 계산하였다(FRTR, 2016). 기술 수요자가 요구하는 정화비용에 따라 정화기술을 선정할 수 있도록, 정화기술별로 정화비용을 점수화하였는데, 점수화 방법은 앞서 산출된 정화기술별 평균 비용값에서 최소 비용값을 뺀 후 10으로 급간을 나누어 구간별로 2.5점씩 점수를 부여하여 총점 25점이 되도록 하였다. 단, 정화기술별 최소 비용값보다 적은 비용을 기술 수요자가 제시할 경우 0점이 되며, 평균 비용값을 초과하는 비용을 기술 수요자가 제시할 경우 최대점인 25점이 되도록 하였다. 위와 같은 방법으로 정화기술별 정화비용에 따른 가중치를 부여하는 경우, 기술 수요자는 해당 오염 부지를 정화하기 위해 예상했던 정화비용에 적합한 정화기술을 선정할 수 있다.

4.5.2. 정화기술매칭에 정화기간 평가인자 적용(25점)

1313건 정화사례 중 정화기간이 기재되고 단일기술이 적용된 692건에 대해 정화기술별로 비용을 분석한 결과, 1~6개월 내 정화가 완료된 사례가 305건(44.08%), 6~12개월이 160건(23.12%), 12~24개월이 167건(24.13%)으로 국내 오염토양 정화 시 1년 이내 정화를 완료하는 사례가 전체의 67.2%로 나타났다. 이것은 국내 오염토양 정화는

개발 행위 과정 중에 발견되는 경우가 많고, 토양오염이 도심 속 주거밀집 지역에서 많이 발생함에 따라 경제성과 토지 효율성 및 민원발생 분쟁 등을 줄이기 위해 단기간 정화를 선호하기 때문으로 판단된다. 기술 수요자가 요구하는 정화기간에 따라 정화기술을 선정할 수 있도록 정화기술별 정화기간을 25점 만점으로 점수화하였으며, 점수화 방법은 앞서 산출된 정화기술별 평균 정화기간에서 최소 정화기간을 뺀 후 10으로 급간을 나누어 구간별로 2.5점씩 점수를 부여하여 총점 25점이 되도록 하였다. 단, 정화기술별 최소 정화기간보다 적은 정화기간을 기술 수요자가 제시할 경우 0점이 되고, 평균 정화기간보다 긴 정화기간을 제시할 경우 25점(최대점수)을 부여하게 하였다. 국내 정화사례에 적용되지 않은 기술(용제추출, 유리화)는 자료 부재로 정량화가 되지 않아 낮은 점수(2.5점)를 부여하였고, 추후 DB가 확보되면 적용건수에 따른 재점수화를 통해 기술매칭에 사용 가능하도록 하였다.

4.6. 정화기술매칭에 외부 환경 평가인자 적용(6단계)

4.6.1. 정화기술매칭에 기술 상용화 평가인자 적용(10점)

국내 정화사례 1313건에 적용된 단일·복합기술의 적용건수를 분석하여 적용 건수가 높은 정화기술을 10점 만점으로 점수화하였다. 국내 정화사례의 경우 토양경작법, 토양증기추출법, 화학적산화환원법, 생물학적통풍법과 토양세척법이 정화기술이 전체 정화사례 적용건수의 87.74%를 차지하였다. 각 정화기술별 기술 상용화 점수화 과정은 기술별 부지 적용 건수를 비율(%)로 나타낸 후, 최대 적용 기술인 토양경작법의 비율(43.43%)에서 최소 적용 기술인 퇴비화법의 비율(0.11%)을 뺀 값을 10으로 나눈 급간(4.332)에 따라 최대 10점에서 최소 1점을 부여하였다. 위 방법에 의하면 가장 높은 기술 상용화 점수를 받은 정화기술(10점)은 토양경작법(797건, 43.43%)이며, 토양증기추출법과 화학적산화환원법이 약 13%로 4점, 생물학적통풍법과 토양세척법이 약 8%로 2점이 부여되었으며, 그 외 기술들은 국내 적용 건수가 토양경작법에 비해 매우 미비하여 모두 1점으로 점수화 하였다.

4.6.2. 정화기술매칭에 정화목표별 평가인자 적용(10점)

국내 오염토양 정화 시 토양오염우려기준의 적용은 「토양환경보전법」 시행규칙 제1조의5 「측량·수조조사 및 지적에 관한 법률」에 따라 1, 2, 3지역별 정화목표기준이 적용된다(MOE, 2016b). 정화 사례 중 정화목표가 제시된 정밀, 검증 및 설계보고서 98건을 분석하여 정화목표지역에 따라 적용된 정화기술건수를 점수화하였다(총 10

점). 정화목표가 1지역인 오염 부지에서 가장 많이 적용된 정화기술은 토양경작법(26건, 76.4%)이며, 토양세척법(13건, 38.2%), 열탈착법(7건, 20.5%)순으로 나타났으며, 2지역인 오염 부지의 경우, 토양경작법(19건, 82.6%), 화학적산화환원법(8건, 34.7%), 토양세척법(5건, 21.3%)순으로 나타났다. 정화목표가 3지역인 오염 부지에서 가장 많이 적용된 정화기술은 토양경작법(34건, 82.9%)으로 나타났으며, 화학적산화환원법(10건, 24.4%), 토양증기추출법(5건, 12.2%)순 이었다. 각 목표 지역별로 최대 적용건수에서 최소 적용건수를 뺀 값을 10으로 나누어 그 값을 급간으로 10개의 급간을 설정하여 각 급간별로 1(최소)~10점(최대)을 부여함으로써, 특정 오염부지에 대하여 기술 수요자의 정화목표 선택에 따라 정화기술 평가점수를 결정하였다.

5. 실제 오염 부지 자료를 적용한 정화기술매칭 기준안의 검증 결과

실제 정화가 이루어진 국내 토양오염 정화부지의 자료를 사용하여 본 연구에서 개발된 정화기술매칭 기준안의 평가인자들(오염원별, 부지내외, 오염원특성, 토양 및 지반특성, 정화비용 및 기간, 정화목표지역)의 점수 값을 부여한 후, 최종 선정된 정화기술과 실제 부지에 적용된 정화기술을 비교함으로써, 본 연구에서 개발된 정화기술매칭 logic의 신뢰성을 검증하고자 하였다. 실제 정화가 완료된 국내 대표 오염부지 2곳(이하 “A 부지”와 “B 부지”로 명명)을 선정하였으며, 이들의 오염 부지 특성과 평가인자 값들은 Table 5에 나타내었다. A 부지는 경기북부에 위치한 미군OO부대이고 B 부지는 경남에 위치한 OO유류저장소 부지이다.

Table 5의 부지 특성 자료에 의하면 두 부지 모두 유류오염 부지이므로 1단계 오염원별 적용기술 선별 과정에서 유류에 효과적인 정화기술을 선별하여 16개 정화기술 중 적용 가능한 11개의 정화기술이 선정되었다. 2단계 부지내외에 따른 적용기술 선별과정에서 A 부지는 부지 특성상 부지외(Off-site) 정화방법을 선택하였으므로 선별된 11개 정화기술 중 부지외 적용이 가능한 6개 정화기술(토양경작법, 바이오파일법, 퇴비화법, 토양세척법, 열탈착법, 소각법)이 선정되었으며, B 부지는 부지내 원위치(In-situ) 정화방법을 선택하여 11개 정화기술 중 총 5개 정화기술(생물학적분해법, 생물학적 통풍법, 식물재배정화법, 토양세척법, 토양증기추출법)이 선정되었다(Table 6). 두 부지에 대하여 선정된 각 정화기술에 대한 적용성에 대한 가

Table 5. Information of contaminated sites for the reliability test of the treatment technology matching system

Contaminant	Treatment location		Contaminated soil volume (m ³)	Maximum concentration (mg/kg)	Soil property	Cleanup goal (type)	Cleanup time (month)	Cleanup cost (won/m ³)	
	On/Off-site	In/Ex-situ							
A site	TPH	Off	Ex-situ	3,782	20,767	Intrinsic permeability of 2.37×10^{-4} pH of 6.1; GWT of 1.3 m; Hydraulic conductivity of 4.56×10^{-4}	1	27	150,000
B site	TPH, BTEX,	On	In-situ	18,376	23,595 of TPH; 144 of BTEX		3	8	300,000

Table 6. Scores of the evaluation factors for selected treatment technologies from the treatment technology matching for the two contaminated sites

	Treatment technology	Treatment location	Contaminated soil volume (m ³)	Maximum concentration (mg/kg)	Soil property	Cleanup cost (won/m ³)	Cleanup time (month)	Applicability	Cleanup goal (type)	Final Score
A site	Soil landfarming	10	5	5	10	25	10	10	10	85
	Biopile	1	1	1	10	25	2.5	1	1	42.5
	Composting	1	1	1	10	25	2.5	1	1	42.5
	Soil washing	1	1	1	10	25	7.5	2	5	52.5
	Thermal desorption	1	1	1	1	25	2.5	1	3	35.5
	Incineration	1	1	1	1	25	2.5	1	1	33.5
B site	Biodegradation	2	1	1	10	20	22.5	1	1	58.5
	Bioventing	1	1	1	10	2.5	5	2	1	23.5
	Phytoremediation	1	1	1	10	2.5	7.5	1	1	25
	Soil flushing	2	1	1	10	25	7.5	1	1	48.5
	Soil vapor extraction	6	1	1	5	7.5	25	4	2	51.5

중치 점수(2단계 총 10점)가 산정되었으며, 점수는 Table 6에 나타내었다. 3단계 오염원 특성에 따른 적용기술 점수화 과정에서는 A 부지와 B 부지의 경우 오염토양의 최대 TPH 농도는 각각 20,767 mg/kg, 23,595 mg/kg이며, 오염토량은 각각 12,173 m³, 18,376 m³으로, 평가인자별 등급 구간에 따른 가중치 점수가 산정되었다(오염농도와 오염토양 인자 각각 최대 5점)(Table 6).

4단계 토양 및 지반특성에 따른 적용기술 점수화 과정에서 오염 부지 특성 자료로부터 기술 수요자가 선택할 수 있는 평가인자는 A 부지의 경우 토성(모래 섞인 자갈), 고유투수계수(2.37×10^{-4}), B 부지의 경우 토양의 pH(6.1), 고유투수계수(4.56×10^{-4}), 지하수위(1.3 m) 등이므로 이들을 포함한 평가인자별로 점수가 산정되었다(총 10점). 정화비용 및 정화기간 인자값에 따른 적용기술 점수화 5단계는 A 부지의 경우 설계보고서에 기술 수요자가 대상 부지 정화기간을 27개월로 기획한 것으로 나타나, 이에 따라 평가인자 점수를 산정하였으며, B 부지의 경우 기술 수요자가 초기에 8개월로 제안했던 내용을 바탕으로 평가인자 점수를 산정하였다(총 25점). 정화비용 인자값의 경

우 A 부지와 B 부지에 대하여 정화 설계보고서에 1 m³ 당 각각 150,000원과 300,000원으로 제시한 비용을 적용하였다(총 25점). 마지막 6단계 기술 상용화 및 정화목표 지역에 따른 점수화 단계에서는 기술 상용화 정도에 따라 선별된 정화기술의 점수를 산정하였으며(총 10점), A 부지와 B 부지의 정화목표는 1지역과 3지역으로 나타나 이에 근거하여 정화기술 점수를 산정하였다(총 10점). A 부지와 B 부지 정화를 위해 선정된 정화기술들에 대한 평가인자별 점수와 최종 평가 점수는 Table 6에 나타내었다. 본 정화기술매칭 logic을 이용하여 A 부지에 대한 정화기술을 선정한 결과, 토양경작법이 최종 평가값(FS) 85점으로 최적의 정화기술로 선정되었으며, 토양세척법(52.5점), 바이오파일법(42.5점) 순으로 나타났다. A 부지는 실제 현장에서 토양경작법으로 정화한 것으로 나타나 본 정화기술매칭 결과와 일치하였다. B 부지의 경우 정화기술매칭 결과 선정된 정화기술 중에서 생물학적분해법이 최종평가값 58.5점으로 가장 높은 점수를 획득하여 적정 기술로 선정되었으며, 토양증기추출법(51.5점), 토양세정법(48.5점) 순으로 나타났다. A 부지와는 다르게 세 가지 정화기술의

conservation in Korea, Final Report. Ministry of Environment, Korea.

MOE (Ministry of Environment), 2010, The standardization of the soil cleanup industry and the plan to obtain its international competitiveness, Final Report, Ministry of Environment, Korea.

MOE (Ministry of Environment), 2012, Assessment of soil and groundwater pollution for industrial complex in Korea, Annual Report. Ministry of Environment, Korea.

MOE (Ministry of Environment), 2016a, Notification 2016-18, The soil environmental conservation law, Korea.

MOE (Ministry of Environment), 2016b, Regulation 19, The soil environmental conservation law, Korea.

NIER (National Institute of Environmental Research), 2016, The soil and groundwater information system, <http://sgis.nier.go.kr/>.

RDA (Rural Development Administration), 2016, Korean soil information system, <http://soil.rda.go.kr/>.

UBA (The Umweltbundesamt), 2016, Topics; soil/agriculture, <http://www.umweltbundesamt.de/en/topics/soil-agriculture>, Germany.

USEPA, 1992, Guidance for performing site inspections under CERCLA, EPA/540/R-92/021, Final Report, USA.

USEPA, 1993, Innovative treatment technologies: semi-annual status report, EPA/542/R-93/003, Final Report, USA.

USEPA, 2004, Treatment technologies for site cleanup, Annual Status Report (11th edition), USA.

USEPA, 2008, A systematic approach for evaluation of capture zone at pump and treat systems, EPA 600/R-08/003, Final Report, USA.