

토양오염 최적정화기술 선정을 위한 성능평가모델 개발

김상태^{1*} · 고우찬¹ · 이승우² · 김흥래¹

¹(주)평화엔지니어링 기술연구원

²지우이앤이(주) 지반환경사업부문

Development of Performance Evaluation Model for Optimal Soil Remediation Technology Selection

Sang-Tae Kim^{1*} · Woo-Chan Koh¹ · Seung-Woo Lee² · Heung-Rae Kim¹

¹R&D Institute, Pyunghwa Engineering Consultants Ltd.

²Geo-environmental Division, JIU Corporation

ABSTRACT

In this study, we have developed the performance evaluation model for the optimal soil remediation technology selection. Performance evaluation model is composed in the evaluation of two steps. In the first stage, the candidate technologies are derived according to the conditions of drilling, type and concentration of pollutants, and the saturated/unsaturated of target site. In the second stage, each individual candidate technology is evaluated by performance evaluation model. The performance evaluation model has 5 groups of evaluation items and 12 evaluation items which have their own evaluation index and their own weights through the AHP approach surveying 40 experts. From the case study of actual design cases, the applicability of the performance evaluation model was confirmed.

Key words : Soil pollution, Soil remediation, Performance evaluation Model, Evaluation Item, Weights of evaluation items

1. 서 론

국내·외에서 개발된 다양한 오염토양 정화기술을 실제 오염부지에 효과적으로 적용하기 위해서는 오염부지의 환경적 특성과 오염물질의 물리·화학적 특성 및 기타 부지의 특이한 상황을 고려하여 대상 부지에 적절한 정화기술을 선택하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 오염의 형태 및 거동은 오염물질의 종류 및 성질에 따라 매우 다른 형상을 나타내고, 같은 오염물질이라도 매체의 특성에 따라 또는 부지의 지질학적 특성에 따라 다르게 나타난다. 따라서 각각의 정화기술은 이러한 특성에 맞게 기술의 적용성을 평가하여야 한다. 정화기술의 선정은 오염물질의 물리/화학/생물학적 특성과 함께 오염부지의 특성 그리고 정화사업 관련 이해당사자들(발주처, 감독기관, 정화업체 및 지역사회)의 요구사항을 함께 고려해야 하는 복합적인

과정이며 이러한 선정작업은 정화기술들에 대한 충분한 데이터베이스와 이를 분석할 수 있는 전문가적 식견을 필요로 하는 어려운 작업이므로 다양한 정화기술들의 처리 성능, 장단점, 기술자료, 검증실적 등을 객관화하여 평가되어야 한다. 정화기술의 선정은 기술적으로는 오염물질의 처리가능성, 처리속도, 가용 부지면적, 소요비용의 경제성 등을 고려하여야 하며 정화 후 대상부지의 활용도, 주변 민원인의 의견수렴, 해당 지자체의 이행관계 등을 종합적으로 판단하여 선정되어야 한다(Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2013a, 2013b; Yang and Lee, 2007; Chang, 2007). 그러나 실제 정화기술의 객관적 평가 기준이 부족한 실정이다.

현재 토양오염 정화기술의 선정은 기본적으로, 타당하고 합리적인 정화공법, 정화목표 달성을 위한 최적공법, 부지특성 및 오염특성을 고려한 경제적인 정화공법을 선

*Corresponding author : stkim99@pec.kr

Received : 2015. 5. 13 Reviewed : 2015. 6. 12 Accepted : 2015. 9. 21

Discussion until : 2016. 2. 29

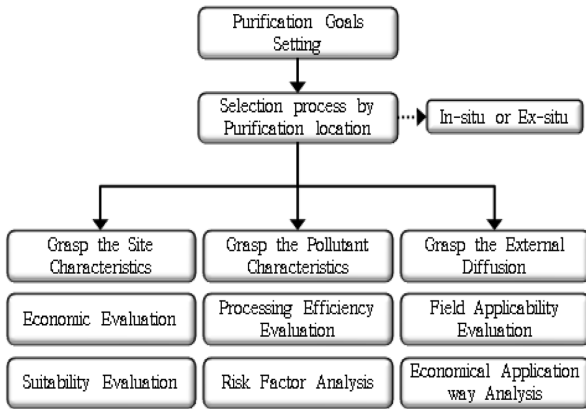


Fig. 1. Selection process of purification technology (Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2013b).

정을 목표로 하여, 환경부(2007)에서 제시한 『오염토양 정화방법 가이드라인』을 준용하고 있으며, 4단계 절차에 따라 정화기술을 선정하고 있다. 1단계에서는 매체별 적용기술그룹의 선정으로 오염조사 및 토지조사를 바탕으로 정화범위를 선정하고 오염지역의 특성에 따라 적용가능한 기술을 분류한다. 2단계에서는 오염물질의 종류에 따라 적용가능한 기술그룹을 나누게 된다. 3단계에서는 적용가능한 기술들의 개발상태, 적용용이성, 정화기간 등의 정화기술의 특성에 따라 기술을 선정하게 된다. 마지막 4단계에서는 부지환경 및 오염물질의 특성과 경제성을 고려하여 최종적으로 정화기술을 선정하게 된다(Ministry of Environment, 2007; Yang et al., 2014).

이러한 기존의 토양오염 정화기술 선정방식은 다양한 정화기술 중에서 선정기준을 만족하는 적용가능여부를 판단해서 정화기술을 선별하는 방식이라 할 수 있으며, 3단계에서 적용가능 기술들의 선정평가를 위한 평가기준을 제시하고 있지만 정량적·객관적인 기준이라 하기에는 부족한 면이 있으며 주관적인 요소가 포함될 여지가 크다고 할 수 있다.

또한 Fig. 1에서와 같이 정화공법을 선정하기에는 많은 절차를 따라야 하며 이에 따른 시간적·경제적 자원손실이 발생한다. 또한 전문가의 판단에 의한 경우가 매우 많기 때문에 일반 사용자가 접근하기에 어려운 현실이다. 따라서 본 연구에서는 오염토양의 최적 정화기술 선정에 있어서 보다 객관적이고 합리적이며 편의성을 고려한 성능평가모델을 개발하고자 한다.

2. 연구방법 및 범위

본 연구에서는 토양오염 최적정화기술 선정을 위한 성

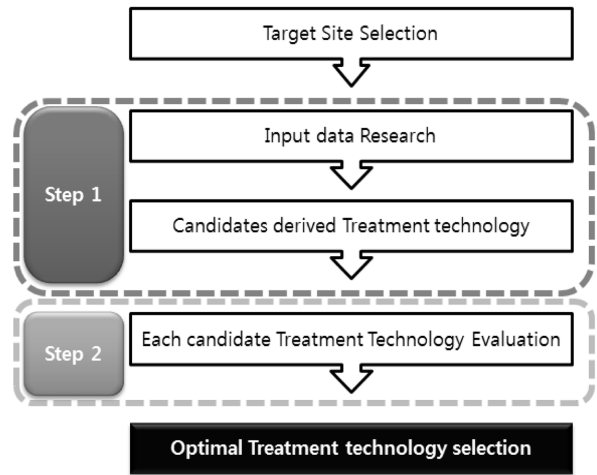


Fig. 2. Procedures of performance evaluation.

능평가모델로, I단계에서 도출한 적용가능 토양정화기술의 후보리스트에 대해, II단계에서 각 후보기술에 대한 성능평가를 통하여 최적의 정화기술을 선정하는데 활용하고자 한다(Fig. 2).

이러한 성능평가모델을 개발하기 위하여, I단계 및 II단계의 성능평가항목 및 평가지표를 선정하고, 평가항목별 평가등급기준을 설정하고 이를 토양정화관련 전문가 워크숍을 통해 보완하였다. 또한 평가항목의 가중치는 토양정화관련 전문가를 대상으로 AHP 설문조사를 통하여 산출하여 정량적 평가 체계를 구축하였다. 또한 개발된 성능평가모델을 이용한 사례연구를 통하여 성능평가모델의 적용가능성을 검토하였다.

본 연구에서는 성능과 비용까지 고려한 가치(Value) 기반의 종합적인 최적정화기술 선정 모델까지는 포함하지 않고 성능평가모델 개발까지를 연구범위로 제한하기로 한다.

3. 성능평가모델 개발

3.1. I단계 성능평가항목 선정

성능평가모델을 개발함에 있어서 오염원의 종류 및 농도, 부지특성 및 목표정화기준에 적합한 최적의 정화공법을 선정하기 위하여 기술별 성능평가지표를 선정하였다. 성능평가는 총 II단계로 구성되었다. I단계에서의 적용가능 정화기술 선별 Matrix는 『오염토양 정화방법 가이드라인(환경부, 2007)』의 내용에 근거하여 작성하였으며 대상지역의 대수층 유무 여부(포화/불포화), 오염토양 굴착 여부(In-situ/Ex-situ)와 오염물질의 종류에 따라 적용가능 정화기술의 후보리스트를 도출하고 이어서 II단계에서 후보기술별 성능평가를 실시하도록 구성하였다.

Table 1. Stage I evaluation items

Remediation technology		Biological treatment					Physical & Chemical treatment					Thermal treatment							
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV	XV	XVI	XVII	XVIII
Applicable area	Saturation	●		●	●		●	●	●		●	●	●	●	●	●		●	
	Unsaturation	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	
Trench or trenchless	In-situ	●	●			●	●		●	●			●	●				●	
	Ex-situ			●	●			●			●	●			●	●		●	
Kind of Pollutants	Oil	Light TPH : Lamp Oil / Diesel >25,000 mg/kg	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○	
		Heavy TPH : lubricant / Bunker C Oil >25,000 mg/kg	●	●	○	○	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○
		Light TPH : Lamp Oil / Diesel <25,000 mg/kg	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○
		Heavy TPH : lubricant / Bunker C Oil <25,000 mg/kg	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○
		BTEX : Gasoline	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	○	○
	Heavy metal	Heavy Metal > 2,500 mg/kg	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		Heavy Metal < 2,500 mg/kg	○	○	○	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Non-biodegradable materials	VOCs (TCE, PCE)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		SVOCs (PCB, PAHs)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		Pesticides, Organophosphorus compounds	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

● : High Adaptability, ◐ : Normal Adaptability, ○ : Low Adaptability
 I : Biodegradation, II : Bioventing, III : Landfarming, IV : Biopile, V : Phytoremediation, VI : Natural Attenuation, VII : Composting, VIII : Soil Flushing, IX : Soil Vapor Extraction, X : Soil Washing, XI : Solvent Extraction, XII : Chemical Oxidation/Reduction, XIII : Solidification/Stabilization, XIV : Electrokinetic Separation, XV : Thermal Desorption, XVI : Incineration, XVII : Vitrification, XVIII : Pyrolysis

I단계 성능평가지 적용가능 오염지역은 대상부지의 지질특성정보에 의거하여 사용자가 선택할 수 있고, 토양굴착 제한사항은 정화사업의 목표 및 계획에 부합하고 대상부지의 굴착가능 여부를 토대로 선택하여야 한다. 포화 및 불포화지역 구분과 굴착여부에 따른 구분이 되어 지고 나면, 오염지역의 오염물질 종류에 따라 처리가능한 공법을 구분 할 수 있다. 본 연구에서는 유류, 중금속, 난분해성 물질로 구분하였다. 또한 유류의 경우 국내 대부분의 유류오염토양 현황에 의거하여 주로 오염되어 있는 TPH와 BTEX를 대상으로 하였으며 이 중 TPH의 경우 경질 TPH(등유 및 경유)와 중질 TPH(벙커C유 및 윤활유)로 구분하며 농도는 25,000 mg/kg 이상 및 미만으로 나누어 기준을 정하였다. 중금속의 경우 종류에 상관없이 최고 오염농도가 2,500 mg/kg 이상 및 미만으로 나누어 기준하였고, 난분해성 물질은 휘발성 및 비휘발성 유기오염물질과 유기인화합물(살충제)로 나누어 기준을 정하였다. I단계 평가항목은 Table 1에 나타내었다.

3.2. II단계 성능평가항목 선정

II단계 평가항목의 대분류 항목은 부지특성, 토양특성, 오염물질특성, 적용성 및 신뢰성으로 분류하였다. 각각의

처리기술간 세부적인 영향인자는 다를 수 있으나 최대한 공통된 인자로 평가하고자 크게 생물학적 처리기술, 물리·화학적 처리기술, 열적 처리기술로 구분하고 그에 따른 세분류 항목으로 구분하여 각각의 처리공법별로 평가할 수 있게 하였다. 이와 같은 성능평가 항목 및 평가지표를 Table 2에 나타내었다.

3.2.1. 생물학적 처리기술의 세부평가항목 및 평가지표 선정

생물학적 처리기술의 세분류 항목을 살펴보면, 부지특성의 세분류 항목으로 부지면적과 부지설치 제약조건으로 나뉜다. 여기서의 부지면적은 정화처리공법 설계시 필요한 시설 및 구조물 설치 요구면적을 충족할 수 있는 사업부지내 여유부지면적을 말하며, 부지설치 제약조건은 부지내 구조물 및 향후 개발계획 등으로 인한 굴토에 따른 제한사항으로 정의하고 있다.

생물학적 처리기술의 토양특성은 오염정화원의 이동성과 종속영양미생물 및 C/N/P ratio로 구분된다. 오염정화원의 이동성이란 오염정화원이 오염매체로의 접근의 용이성을 말한다. 예를 들어 토양경작법의 경우 오염정화원은 미생물이고 오염매체는 유류오염토양이라고 할 때, 오염

Table 2. Evaluation Items

Evaluation item group	Evaluation item	Application of evaluation items		
		Biological	Physical & Chemical	Thermal
Site characteristics	Free area for facility installation	○	○	○
	Installation constraints in site	○	○	○
Soil characteristics	Mobility of purified factor	a, b, c	a, b, c, d	d
	Heterotrophic microorganisms	○	×	×
	C/N/P ratio	○	×	×
Pollutant characteristics	Pollutant concentrations	○	○	○
	Ease of treatment pollutants	e, f	e, f, g, h	e, i
	Chemical structure & Molecular weight	×	○	×
Applicability (Feasibility)	Ease of maintenance	○	○	○
	Ease of by-product treatment	○	○	○
Reliability	Commercialization of technology	○	○	○
	Pollutant removal efficiency	○	○	○

※ Detailed evaluation items

a : Soil Permeability

b : Soil Texture (Fine Soil Particle Content)

c : Temperature

d : Moisture Content

e : Vapor Pressure

f : Lipophilic

g : Solubility

h : Ionization

i : Activation Energy (Ea)

정화원인 유류오염토양을 정화하기 위해 접근하고자 하면 토성에 따른 유기물 함유량의 변화가 큰 영향을 미치므로 예를 들어 토양경작법의 오염정화원의 이동성은 토성으로 평가하게 된다.

이처럼 생물학적 처리기술에서는 오염정화원의 이동성을 평가하는 평가지표로 토양투수성, 토성(미세토함유량), 토양온도 수분함량등이 있으며, 토양투수성을 오염정화원의 이동성으로 평가하는 처리기술에는 생물학적 통풍법, 자연저감법이 해당되며 이러한 토양투수성 평가지표는 수리전도도를 이용하였다.

토양경작법, 바이오파일법 및 퇴비화법은 토성으로써 오염정화원의 이동성을 평가하며 토성은 미세토 함유량으로 평가한다. 본 연구에서의 미세토함유량은 점토와 silt 함유량의 합을 의미한다. 식물재배정화법의 경우에는 토양온도로 오염정화원의 이동성을 평가한다.

생물학적 처리에서 중속영양미생물 개체수는 공법의 오염정화율을 결정짓는 데에 큰 비중을 차지하는 요소이므로 토양특성의 세부평가항목에 포함하였다. C/N/P ratio 또한 생물학적 처리기술의 적용에 있어서 설계요소에 포함되는 중요한 인자이다. 가령 유류오염토양을 정화 할 경우 유류로 인한 C(탄소)의 비율은 높아지나 상대적으로 N(질소)와 P(인)의 비율은 작아지게 되므로 미생물이 생장하기 최적의 비율인 100 : 10 : 1에 미치지 못 할 수가 있으므로 이러한 경우 설계시에는 N과 P를 추가로 주입하는 부분이 들어가야 한다. 또한, 토양내 중속영양미생물

의 개체수가 초기 토양오염조사시 높게 나왔다 할지라도 C/N/P ratio가 맞지 않는다면 추후 유류오염토양을 정화할 수 있는 미생물의 개체수가 줄어들 가능성이 높다고 할 수 있다.

생물학적 처리기술의 오염물질 특성에 대한 세분류 항목으로는 오염물질 농도와 오염물질의 처리 용이성으로 구분된다. 오염물질 농도는 모든 생물학적 처리공법에서 유류와 중금속농도를 일정 수치기준으로 하여 평가하게 된다. 오염물질의 처리용이성은 오염물질을 정화하는데 있어서 오염물질 분해가 용이한 정도를 평가하는 항목으로 생물학적 처리기술에서는 지용성을 평가지표로 선정하였으며, 생물학적통풍법의 경우에는 증기압도 함께 고려하였다.

생물학적 처리기술의 적용성(타당성)에 대한 세분류 항목으로는 유지보수의 용이성과 부산물처리의 용이성으로 구분하였다. 유지보수의 용이성은 정화공법 운영시 발생하는 유지 및 보수에 있어서의 용이함을 평가하는 항목으로 경험적 자료 및 판단에 의한 정성적 평가를 할 수 있도록 구성하였다. 부산물 처리의 용이성은 정화처리시 발생하는 2차 부산물 유무 및 처리에 대한 시설설치와 운영 여부로 정의되며, 2차 부산물이 많을수록, 2차 부산물 처리시설설치가 더 많이 필요할수록, 이러한 시설을 운영하는 시간 및 인력투입이 많을수록 낮은 평가(예를 들어, 3 등급)를 할 수 있는 정성평가로 구성하였다. 예를 들어, 토양경작장에서 발생하는 2차 부산물(2차 오염물질)처리

Table 3. Evaluation index of the performance evaluation items

	Remediation technology	Mobility of purified factor	Evaluation index	Ease of treatment pollutants factor	Evaluation index
Biological treatment	Bioventing	Soil permeability	Hydraulic conductivity, K	Vapor Pressure, Lipophilic	K_H, K_{OW}
	Landfarming	Soil texture	Fine soil particle content		
	Biopile				
	Phytoremediation	Temperature	Temperature	Lipophilic	K_{OW}
	Composting	Soil texture	Fine soil particle content		
	Natural attenuation	Soil permeability	Hydraulic conductivity, K		
Physical & Chemical treatment	Soil flushing	Soil texture	Fine soil particle content		
	Soil vapor extraction	Soil permeability	Hydraulic conductivity, K	Vapor pressure	K_H
	Soil washing	Soil texture	Fine soil particle content		
	Solvent extraction		Lipophilic		K_{OW}
	Chemical oxidation / Reduction	Soil permeability	Hydraulic conductivity, K		
	Solidification / Stabilization		Solubility		K_d
	Electrokinetic separation	Moisture content	Moisture content		
Thermal treatment	Thermal desorption			Vapor pressure	Distribution coefficient K_H
	Incineration	Moisture content	Moisture content		
	Vitrification		Activation energy (Ea)		Boiling point
	Pyrolysis				

와 열탈착 이후 발생하는 분진 등을 처리할 때를 비교하면 토양경작법의 경우 부산물 처리의 용이성에서 높은 등급의 평가를 받을 수 있게 된다.

생물학적 처리기술의 신뢰성에 대한 세분류 항목으로는 기술의 상용화와 오염물질 처리효율로 구분된다. 기술의 상용화는 평가대상 처리기술의 국내 실적사례건수를 말하며 실적사례건수가 많다는 것은 그만큼 널리 알려져 있고 오염물질을 정화하는데 있어서 안정적임을 증명해 주므로 사례건수가 많을수록 높은 평가가 이루어지도록 하였다. 오염물질의 처리효율은 대상부지내 전체 오염물질농도에 대한 제거된 오염물질농도의 비를 말하며 쉽게 말해 제거 효율을 뜻한다. 어떠한 부지환경 하에서 동일 조건으로 평가할 때 해당 오염물질에 대한 처리기술별 제거효율이 다르므로 이에 대한 평가를 할 수 있도록 구성하였다. 이와 같은 평가지표를 Table 3에 나타내었다.

3.2.2. 물리·화학적 처리기술의 세부평가항목 및 평가 지표 선정

물리·화학적 처리기술의 대분류 항목인 부지특성과 적용성 및 신뢰성에 대한 세분류 항목은 생물학적 처리기술의 항목 및 구성과 동일하다(Table 2 참조). 물리·화학적 처리기술의 경우 생물학적 처리기술과 달리 토양특성의 종속영양미생물과 C/N/P ratio는 큰 영향을 미치지 않으므로 세분류항목에서 제외하여 물리·화학적 특성에 영

향을 미치는 항목으로만 평가하도록 하였다. 물리·화학적 처리기술의 토양특성에 대한 세분류 항목은 오염정화원의 이동성으로 구성되어 있으며 오염정화원의 이동성은 다시 정화기술별로 토양투수성(수리전도도), 토성(미세토 함유량), 수분함량으로 구분되어 평가하도록 하였다. 토양투수성은 토양증기추출법, 화학적산화법 및 고형화안정화 공법 선택시 오염정화원의 이동성 평가항목으로 사용되고, 토성은 토양세정법, 토양세척법 및 용제추출법에 적용된다. 수분함량은 동전기법의 경우 선택되어 평가되도록 하였다.

오염물질특성에 있어서의 세부평가 항목인 오염물질농도, 오염물질의 처리용이성은 생물학적 처리기술에서의 오염물질특성과 동일하며, 화학적구조/분자량 항목을 추가 선정 하였다. 화학적구조/분자량은 유종을 평가지표로 하여 평가하며 오염물질의 처리용이성은 물리·화학적 처리기술의 종류에 따라 용해도, 증기압, 지용성, 이온화경향 등으로 구분된다. 용해도는 토양세정법 및 토양세척법의 경우 사용되고 분배계수 K_d 를 평가지표로 사용하였다. 증기압은 토양증기추출법의 오염물질 처리용이성 평가시 사용된다. 물리·화학적 처리기술에서 또한 생물학적 처리기술에서와 마찬가지로 증기압은 헨리상수(K_H)를 통해 알 수 있으므로 이를 평가지표로 이용하였다. 지용성을 처리용이성의 평가지표로 하는 처리기술에는 용제추출법이 해당되며 이러한 지용성을 평가할 수 있는 지표로써 K_{ow} 를 사용하였다. 오염물질의 처리용이성을 평가하는 지표

중 이온화경향은 동전기법 및 고형화·안정화법을 평가할 때 사용된다. 이온화경향은 표준산화환원전위(ORP)를 평가지표로써 사용하였다.

3.2.3. 열적 처리기술의 세부평가항목 및 평가지표 선정

열적 처리기술의 부지특성, 적용성 및 신뢰성에 대한 세분류 항목은 생물학적 처리기술과 물리·화학적 처리기술에서의 세분류 항목 및 평가지표가 동일하다. 토양특성에 대한 세분류 항목으로는 오염정화원의 이동성이 있으며 열적 처리기술은 토양내의 수분함량에 따라 가장 크게 영향을 받게 되므로 평가지표로는 수분함량을 선정하였다.

오염물질특성의 세분류 항목은 오염물질 농도와 오염물질의 처리용이성으로 구분되며, 오염물질 농도는 생물학적 및 물리·화학적 처리공법에서와 같이 유류와 중금속 농도를 일정 수치기준으로 하여 평가하게 된다. 열적 처리기술에 있어서의 오염물질의 처리용이성에 대한 평가지표로는 증기압과 활성화에너지를 선정하였고, 저온열탈착법의 경우 증기압으로 평가하고 그 외 소각법, 유리화법 및 열분해법의 경우 활성화에너지를 오염물질 처리용이성의 평가지표로써 평가하였다. 이러한 활성화에너지는 직접적으로 구할수는 없으므로, 오염물질의 비등점(끓는점)을 이용하여 평가하였다.

3.4. 평가등급 및 평가기준

세부평가항목의 평가는 3등급 체계로 구성하였으며 항목별 평가기준은 Table 4에서 나타낸 바와 같다. 대분류 항목 중 부지특성, 적용성(타당성) 및 신뢰성 부분은 정량적 평가를 하기 힘든 항목으로써 정성적 평가기준을 마련하였다. 한편, 토양특성과 오염물질특성에 대한 평가기준과 등급을 살펴보면, 토양특성 중 토성(미세토함유량) 항목은 실트와 점토함유량의 합으로 평가하며 그 기준은 30% 미만, 30~40%, 그리고 40% 이상이다. 투수성(수리전도도 K)의 경우 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ cm/sec의 범위를 기준으로 이상과 미만으로 구분하였다. 온도의 평가기준과 등급은 20~45°C이면 1등급, 10~25°C이면 2등급, 그리고 10°C 미만이나 45°C 이상이면 3등급에 해당하도록 편성하였다. 수분함량의 경우 40% 미만은 1등급, 40%~50% 미만은 2등급이고 50% 이상일 경우 3등급에 위치하게 된다. 미생물군수의 경우 위에서 언급한 바와 같이 1000 CFU/g-soil을 기준으로 그 이상과 미만, 그리고 없음으로 각각 1, 2, 3등급이 부여된다. 오염물질특성 중 농도에 대한 평가기준은 우려기준과 대책기준에 근거하여 우려기준~대책기준 사이의 농도는 1등급, 대책기준~대책기준의 두배 농도

는 2등급, 대책기준 두배 농도 이상은 3등급으로 나누어 평가하도록 하였다. 오염물질 농도는 오염물질의 종류에 따라 농도기준이 다르므로 일정 수치를 결정하여 평가하기에는 어려움이 따르기 때문에 각각의 오염물질 마다의 기준을 적용하고자 위와 같은 방식의 평가방법을 적용하였다.

본 연구에서 사용하는 세부평가항목에 대한 평가지표는 일반 사용자가 직접 측정하거나 파악하기에는 다소 어려움이 있으므로 이를 오염물질의 종류별로 나누어 등급 및 평가기준에 적용하였다. 유류의 종류(유종)로 평가하는 화학적구조 및 분자량 항목은 오염물질의 분해성에 초점을 두어 오염물질 중 휘발유 조성이 높으면 1등급, 등유 및 경유의 조성이 높으면 2등급, 벙커C유 및 윤활유의 조성이 높으면 3등급을 부여하도록 하였다. 오염물질 정화의 용이성항목은 처리공법에 따라 적용되는 평가지표는 다르며 평가의 편의성을 고려하여 증기압, 용해도, 지용성, 이온화경향에 해당하는 평가지표를 대신하여 오염물질의 종류에 따라 평가할수록 있도록 설정하였다. 증기압의 경우 오염물질이 휘발유나 VOCs로 구성되어 있다면 1등급이 부여되고, 등유 및 경유로 구성되었을 경우 2등급, 벙커C유나 윤활유로 구성되었을 경우 3등급이 부여된다. 지용성의 경우 휘발유, 등유, 경유로 조성된 오염물질은 1등급, 벙커C유, 윤활유 및 SVOCs로 조성된 오염물질은 2등급으로 구분되며 중금속 및 VOCs일 경우는 3등급으로 구분되어 진다. 용해도는 오염물질이 휘발유 및 VOCs로 조성되어 있을 시 1등급, 등유 및 경유와 SVOCs로 조성되어 있으면 2등급, 중금속으로 조성된 경우 3등급으로 구분된다. 이온화경향(ORP) 항목의 경우 불소와 니켈일 경우 1등급, 카드뮴, 비소, 납, 6가크롬, 아연일 경우 2등급에 포함되며 구리 및 수은은 3등급으로 평가된다. 활성화에너지(Ea)는 VOCs와 살충제일 경우 1등급, 유류 및 SVOCs일 경우 2등급으로 구분되며 중금속일 경우 3등급으로 평가된다.

3.5. 세부평가항목 가중치 선정

3.5.1. 가중치 산정방법

성능평가모델을 구성에 있어서 평가항목의 선정과 더불어 중요한 부분이 각 세부평가항목의 가중치를 부여하는 것이다. 본 연구에서는 정화처리기술의 평가항목에 대한 가중치를 산정함에 있어서 AHP기법을 이용한 전문가 설문조사를 실시하였다. 토양정화관련 전문가 40명의 유효 설문조사 결과를 토대로 평가항목의 가중치를 도출하였으며, 생물학적 처리방법, 물리·화학적 처리방법, 열적 처리방법으로 구분하여 AHP기법을 이용하여 설문을 실시

Table 4. Class & Standard of Evaluation according to the Evaluation Index

Group	Evaluation Item	Evaluation Index	Evaluation Grade			Qualitative / Quantitative
			1st	2nd	3rd	
Site characteristics	Free area for facility installation	Area	Satisfaction	Usually satisfaction	None-satisfaction	Qualitative
	Installation constraints in site	Constraint condition for facility installation	None	Average	Many	Qualitative
Soil characteristics		Soil texture	Under 30%	30% to 40%	More 40%	Quantitative
	Mobility of purified factor	Soil permeability	$10^{-4}\text{cm/sec} < K$	$10^{-7} < K < 10^{-4}\text{cm/sec}$	$K < 10^{-7}\text{cm/sec}$	Quantitative
		Temperature	$25^\circ\text{C} < T < 45^\circ\text{C}$	$10^\circ\text{C} < T < 25^\circ\text{C}$	$10^\circ\text{C} > T > 45^\circ\text{C}$	Quantitative
		Moisture content	Under 40%	40% ~ 50%	More 50%	Quantitative
	Heterotrophic microorganisms	Colony forming unit	More 1000 CFU/g	Under 1000 CFU/g	None	Quantitative
	C/N/P ratio	100:10:1~100:10:5	Satisfaction	Usually satisfaction	None-satisfaction	Quantitative
Mobility of purified factor	Moisture content	Under 30%	30~50%	More 50%	Quantitative	
Pollutant characteristics	Pollutant concentrations	Kind of pollutants ^{**}	A	B	C	Quantitative
	Chemical structure & Molecular weight	Kind of oil	Almost gasoline	Almost lamp oil or diesel	Almost bunker C oil or lubricating oil	Quantitative
		Vapor pressure (K_H)	Gasoline, VOCs	Lamp Oil, Diesel	Bunker-C oil, Lubricating oil	Quantitative
		Lipophilic (K_{OW})	Gasoline, Lamp oil, Diesel	Bunker-C oil, Lubricating oil, SVOCs	Heavy metal, VOCs	Quantitative
	Ease of treatment pollutants	Solubility (K_d)	Gasoline, VOCs	Lamp oil, Diesel, SVOCs	Heavy metal	Quantitative
		Ionization (ORP)	Fluorine, Nickel	Cadmium, Arsenic, Lead, hexavalent chrome, Zinc	Copper, Mercury	Quantitative
		Activation energy (Ea)	VOCs, Pesticide	Gasoline, Lamp oil, Diesel, Bunker-C oil, Lubricating oil, SVOCs	Heavy Metal	Quantitative
Applicability (Feasibility)	Ease of maintenance	Qualitative standard	Easy	Normal	Difficult	Qualitative
	Ease of by-product treatment	Qualitative standard	Easy	Normal	Difficult	Qualitative
Reliability	Commercialization of technology	Commercialization of technology	Many	Average	Few	Qualitative
	Pollutant removal efficiency	Pollutant removal efficiency	High (More 90%)	Middle (60~90%)	Law (Under 60%)	Qualitative

A : Precaution Values ~ Caution Values

B : Caution Values ~ Caution Values × 200%

C : More Caution Values × 200%

※ : Light TPH, Heavy TPH, BTEX, Heavy Metal, Pesticides : Organophosphorus Compounds, SVOCs (PCB, PHAs), VOCs (TCE, PCE)

하였다. 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

3.5.2. 가중치 산정결과

설문을 통한 가중치 산정결과, 대분류 평가항목은 오염물질특성과 토양특성이 높게 나타났으며, 그 다음으로 신

뢰성이 우세하게 나타났다. 세분류 평가항목별로는 생물학적 처리에서는 오염물질 농도와 오염물질 처리 용이성이 높게 나타났으며, 물리·화학적 처리에서는 오염정화원의 이동성, 오염물질 처리효율이 높게 나타났으며, 열적 처리에서는 오염정화원의 이동성, 오염물질 농도가 높게

Table 5. Weights of evaluation item

		Biological	Physical & Chemical	Thermal
Site characteristics	Free area for facility installation	0.1630	0.0769	0.1318
	Installation constraints in site		0.0861	0.0497
Soil characteristics	Mobility of purified factor		0.1070	0.2379
	Heterotrophic microorganisms	0.2450	0.0751	0.2379
	C/N/P ratio		0.0629	–
Pollutant characteristics	Pollutant concentrations		0.1417	0.1252
	Ease of treatment pollutants	0.2734	0.1317	0.2451
	Chemical structure & Molecular weight		–	0.0802
Applicability (Feasibility)	Ease of maintenance	0.1548	0.0803	0.1875
	Ease of by-product treatment		0.0745	0.0837
Reliability	Commercialization of technology	0.1638	0.0730	0.1976
	Pollutant removal efficiency		0.0908	0.1067
		1.0000	1.0000	1.0000

Table 6. Input data of case studies

Input data			Case study 1	Case study 2
1	Site area	m ²	40,963	207,644
2	Amount of pollutant	m ³	3,065	97,367
3	On-site / Off-site classification		On-site	On-site
4	Applicable area		Unsaturation	Unsaturation
5	In-situ/Ex-situ		Ex-Situ	Ex-Situ
6	Kind of pollutants		TPH	TPH
7	Soil permeability	cm/sec	1.23 × 10 ⁻³	4.60 × 10 ⁻⁴
8	Soil texture	%	41.0	19.0
9	Temperature	°C	–	–
10	Heterotrophic microorganisms	CFU	68.8	2,900,000
11	C/N/P ratio		100 : 5.86 : 0.58	100 : 0.65 : 0.05
12	Moisture content	%	31.2	25.9
13	Pollutant concentrations	mg/kg	10,902	32,713
14	Kind of oil		Diesel	Diesel

나타났다. 한편, 해당 가중치가 없는 항목은 각 공법 특성 상 제외된 세부평가항목이며 가중치 설문양식 자체에서 평가하지 않도록 한 값이다.

3.6. 성능평가모델 적용

3.6.1. 사례 1

성능평가모델의 적용성을 판단하기 위하여 기존에 실시되었던 정화완료사업에 대상으로 사례평가를 수행하였다. 사례평가에 사용된 정화사례는 OO지역 오염토양정화사업을 인용하였으며, 대상사업의 내용을 요약하면 다음과 같다.

부지면적은 40,963 m²이며 오염토양은 총 3,065 m³으로 조사되었다. 대상부지의 오염물질은 TPH로써 최고 오염농도는 TPH 10,902 mg/kg이며, 오염토양의 평균 수리전도도(K)는 1.23 × 10⁻³ cm/sec로 나타났다. 또한 입도 분석

결과 미세토사는 평균 41%로 나타났다.

Table 6에 정리된 입력값을 본 연구에서 개발한 성능평가모델에 적용한 결과 Table 8에서 보여주는 바와 같이 1 단계 선별 후보군으로써 토양경작법, 바이오파일법, 퇴비화법, 토양세척법, 열탈착 및 소각법이 선정되었다. 이와 같이 선정된 정화처리공법 후보군에 대한 개별 성능평가 결과는 토양경작법이 2.22, 바이오파일법 1.89, 퇴비화법 1.97, 토양세척법 1.91, 열탈착법 1.84, 소각법이 1.83점으로 산출되었다. Table 7은 토양경작법에 대한 평가결과의 예이다. Table 7에서 보는 바와 같이 입력자료에 따라 각 항목별 평가등급이 결정되고 3점 평가방식과 가중치 적용을 통하여 성능점수가 산출된다. 한편 시설물설치 여유면적, 부지내 시설물설치 제약조건, 유지보수의 용이성, 부산물처리의 용이성, 기술의 상용화 및 오염물질 제거효율

Table 7. Example of performance evaluation for Landfarming

Group	Evaluation item	Evaluation index	Evaluation grade			Input data	Result of evaluation			
			1st	2nd	3rd		Grade	Score	Weight	Score
Site Characteristics	Site area	Free area for facility installation	Satisfaction	Usually satisfaction	None-satisfaction	Usually satisfaction	2	2	0.0769	0.1538
	Installation constraints in site	Constraint condition for facility installation	None	Average	Many	None	1	3	0.0861	0.2584
Soil Characteristics	Mobility of purified factor	Soil texture (Fine soil particle content)	Under 30%	30% ~ 40%	More 40%	41%	3	1	0.1070	0.1070
	Heterotrophic microorganisms	Colony forming unit	More 1000 CFU/g	Under 1000 CFU/g	None	68.8	2	2	0.0751	0.1501
	C/N/P ratio	100:10:1~100:10:5	Satisfaction	Usually satisfaction	None-satisfaction	100:5.86:0.58	3	1	0.0629	0.0629
Pollutant Characteristics	Pollutant concentrations	Light TPH	A	B	C	10,902	3	1	0.1417	0.1417
	Ease of treatment pollutants	Distribution coefficient K _{ow}	Gasoline, lamp oil, Diesel	Bunker-C oil, Lubricating oil, SVOCs	Heavy metal, VOCs	Diesel	1	3	0.1317	0.3951
Applicability (Feasibility)	Ease of maintenance	Qualitative standard	Easy	Normal	Difficult	Easy	1	3	0.0803	0.2409
	Ease of by-product treatment	Qualitative standard	Easy	Normal	Difficult	Easy	1	3	0.0745	0.2234
Reliability	Commercialization of technology	Commercialization of technology	Many	Average	Few	Many	1	3	0.0730	0.2190
	Pollutant removal efficiency	Pollutant removal efficiency	High (More 90%)	Middle (60~90%)	Low (Under 60%)	High (More 90%)	1	3	0.0908	0.2724
							Total	1.0000	2.2248	

Table 8. Results of case studies

Classification		Remediation technology	Case study 1		Case study 2	
			Candidates	Score	Candidates	Score
Biological treatment	1	Biodegradation				
	2	Bioventing				
	3	Landfarming	C	2.22		
	4	Biopile	C	1.89		
	5	Phytoremediation				
	6	Natural attenuation				
	7	Composting	C	1.97	C	2.26
Physical & chemical treatment	8	Soil flushing				
	9	Soil vapor extraction				
	10	Soil washing	C	1.91	C	2.35
	11	Solvent extraction				
	12	Chemical oxidation/Reduction				
	13	Solidification/Stabilization				
	14	Electrokinetic separation				
Thermal treatment	15	Thermal desorption	C	1.84	C	2.07
	16	Incineration	C	1.83	C	2.06
	17	Vitrification				
	18	Pyrolysis				

의 평가등급은 후보정화기술에 따라 성능평가모델에서 제시하는 기본값으로 평가된다.

사례1의 경우, 대상사업의 설계상 제시된 공법은 토양 경작법 및 토양세척법이며, 토양세척법의 경우 중금속 오염토양을 정화하는 목적으로 선정되었으며, 유류오염토양에 대한 정화공법으로는 토양경작법이 선정되었다. 사례 연구 결과, 본 연구에서 개발한 성능평가모델의 결과는 토양경작법을 성능면에서 우수한 정화기술로 평가하였다.

3.6.2. 사례2

두 번째 적용사례의 입력값은 다음과 같다. 부지면적은 207,644 m²이며 오염토양은 총 97,367 m³으로 조사되었다. 대상부지의 오염물질은 TPH로써 최고 오염농도는 TPH 32,713 mg/kg이며, 오염토양의 평균 수리전도도(K)는 4.360×10^{-4} cm/sec로 나타났다. 또한 입도 분석 결과 미세토사는 평균 19%로 나타났다.

I단계 선별 결과 퇴비화법, 토양세척법, 열탈착법 및 소각법이 선정되었다. 선정된 정화처리공법 후보군에 대한 II단계 개별 성능평가 결과는 퇴비화법 2.26, 토양세척법 2.35, 열탈착법 2.07, 소각법이 2.06점으로 산출되었다 (Table 8). 대상사례의 정화사업 설계보고서에서는 토양경작법과 토양세척법이 선정되었으며, 본 성능평가모델에서는 토양세척법이 선정되었고 이는 I단계 선별과정에서 오염물질의 농도에 따른 후보기술 선별결과가 반영된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 오염토양 정화처리에 있어서 최적의 정화처리공법을 선정하기 위한 성능평가모델을 구축하였다. 각 처리공법에 대한 평가항목 선정 및 평가기준은 기존에 제시되어 왔었던 항목을 기초로 하여 작성하였으며, 형평성 있는 평가를 위하여 본 연구에서는 18개의 처리공법에 대한 영향인자가 각기 다르고 그것을 형평성 있게 평가하기 위해서는 공통적인 영향인자를 고려하기 위해 오염정화원의 이동성 및 오염물질의 처리용이성이라는 평가항목

을 새롭게 선정하여 생물학적 처리기술에 11개, 물리·화학적 처리기술에 10개, 열적 처리기술에 9개의 세부평가항목평가에 적용하였다.

성능평가모델의 사례연구 결과에 의하면, 대상사업의 설계상 제시된 공법과 동일한 공법이 적용된 것을 확인할 수 있었다. 하지만, 본 연구의 결과는 향후 토양정화사업의 선정과 관련된 성능평가모델의 기본모델을 제시하는 것으로 대상 정화사업의 특성에 따라 보완 활용이 가능하리라 기대된다. 또한 비용모델까지 포함한 가치기반의 최적정화기술 선정모델까지 확장을 하게 되면 정화사업의 기획단계에서 최적기술의 선정에 보다 객관적이고 체계적인 정화기술 선정이 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 한국환경산업기술원 토양·지하수오염방지 기술개발사업(GAIA project) (RE201402087)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Chang, Y.Y., 2007, Special feature - The remediation trend of contaminated soil, Lotte technological journal, No. 54, pp. 3-17.
- Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2013a, Soil & Ground water Purification Technology(II), pp. 3-5.
- Korea Environmental Industry & Technology Institute, 2013b, Soil & Ground water Purification Working(III), pp. 125-130.
- Ministry of Environment, 2007, Guideline of Contaminated Soil Remediation methods
- Yang, H.S., Kim, I.S., Kang, S.H., Chang, Y.Y., Park, S.K., Ko, J.W., Kim, Y.J., and Park, C.H., 2014, A study on remediation methods of contaminated soils at former military bases, *Korean Chem. Eng. Res.*, **52**(5), 647-651.
- Yang, J.W. and Lee, Y.J., 2007, Status of soil remediation and technology development in Korea, *Korean Chem. Eng. Res.*, **45**(4), 311-318.