유류오염부지의 발암 및 비발암 위험도 저감에 소요되는 정화비용 예측 연구

Estimation of Remediation Cost for Reducing Cancer and Non-cancer Risk of a Fuel-contaminated Site

정승우[†]

Seung-Woo Jeong[†]

군산대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Kunsan National University, Kunsan, Korea

(Received March 18, 2019; Revised April 23, 2019; Accepted April 26, 2019)

Abstract : Cancer and non-cancer risks of a virtual fuel-contaminated site were estimated by using the Korean risk assessment guidelines for soil contamination. Five exposure pathways of benzene present in the fuel site to the human were addressed; soil ingestion, skin contact with soil, groundwater drinking, outdoor inhalation of dust particulates, and outdoor inhalation of vapours derived from soil. The lifetime cancer risk and non-cancer risk (hazard quotient, HQ) of the virtual site were calculated as 1.18E-3 and 5.36, respectively. Remediation costs were also estimated when three remediation technologies were applied to reduce health risks. Remediation costs of soil vapor extraction (SVE), thermal desorption and ex-situ bioremediation were estimated to be \$750,000, \$710,000 and \$420,000, respectively, to reduce the initial cancer risk to 10^{-5} . For non-cancer risk, SVE, thermal desorption and ex-situ bioremediation needed \$600,000, \$280,000 and \$160,000, respectively, to reduce the initial HQ to 1.00. This study made many assumptions in risk and cost calculations and also used the USEPA collected cost data. Further research on the relationship between risks and remediation costs should be followed by accumulating domestic data about soil investigation, risk assessment and remediation.

Key Words : Soil contamination, Risk assessment, Remediation cost, Soil vapor extraction, Bioremediation, Thermal desorption

요약 : 본 연구에서는 유류오염 시범부지 시나리오를 설정하여 토양환경보전법 『토양오염물질 위해성평가지침』에 따라 발암 위험도와 비발암 위험도를 산정하였다. 오염부지 내 토양섭취, 토양접촉, 지하수섭취, 비산먼지 흡입, 실외공기 휘발물질 흡입 등 5개 노출경로에 대해 발암 위험도와 비발암 위험도를 산정하였다. 설정된 시나리오의 위해성평가 결과 발암 위험도 지수는 1.18E-3, 비발암 위험도 지수 5.36으로 위해성이 높게 나타났다. 본 연구는 시범부지에 Soil vapor extraction (SVE), Bioremediation, Thermal desorption 등 세 가지 정화기술을 적용하여 발암 위험도 및 비발암 위험도를 저감시킬 경우 소요되는 정화비용을 각각 예측해 보았다. 정화비용 자료는 우리나라 자료가 유효하지 않아 USEPA에서 구축한 미국 정화비용 자료를 활용하였다. 시범부지 내 발암 위험도 저감에 따른 정화비용 예측 결과 초기 발암 위험도 1.18E-3를 1.0E-5까지 낮추는데 소요되는 정화비용은 SVE 75만불, 열탈착은 71만불, 생물학적공법은 42만불로 예측되었다. 비발암 위험도 저감에 따른 정화비용 예측 결과 초기 비발암 위험도 5.36을 1.00까지 낮추는데 소요되는 정화비용은 SVE 60만불, 열탈착 28만불, 생물학적공법 16만불로 예측되었다. 본 연구는 많은 가정이 포함되어 있으므로 차후 위험도와 정화비용 간 상세 연구가 요구된다. 우리나라는 축적된 오염토양 현장조사 및 위해성평가 자료가 희박하고 정화비용관련 자료 및 연구는 거의 존재하지 않는다. 앞으로 정화 기술 발전만큼이나 오염토양 조사, 평가, 정화 관련 데이터 축적 또한 시급한 과제이다.

주제어 : 토양오염, 위해성평가, 정화비용, 토양공기추출법, 생물학적정화, 열탈착

1. 서론

2017년 『토양오염실태조사』 결과 46개 지점이 토양오염 우려기준을 초과하였다.¹⁾ 『토양오염실태조사』의 특징은 중금속항목 초과 지점이 많다는 점이다. 실태조사는 오염원 주변을 조사하는 비점오염 성격을 가지고 있기 때문이다. 반면 토양오염에서 점오염원 조사의 성격을 띠는 특정토양 오염관리대상시설의 정기조사에서는 토양오염우려기준을 초과하는 항목은 주로 유류오염물질이다. 2016년도 특정 토양오염관리대상시설의 검사결과 기준치 초과 업소는 188개소이며 초과항목으로 BTEX가 17건, TPH 10건, BTEX 및 TPH 동시 40건이다.²⁾ 토양오염 기준치를 초과하는 부

지는 토양환경보전법에 의해 정화명령이 내려지고 정밀조사를 거쳐 정화하게 된다. 이외 정확한 통계가 알려져 있지 않지만 국유지 및 반환미군기지 등의 정화까지 포함한다면 매년 300여개의 토양오염부지가 발견되고 정화가 이루어지는 것으로 예상된다.

오염토양 정화는 타 매체와 달리 오염의 농도와 오염의 량에 따라 정화비용이 단순히 산정되지 않는 특징이 있다. 일단 지중 내 오염토양이 보이지 않고 토양이 자연매체로서 지역적 특이성이 있으며 오염이 주변 환경 매체와 연계되어 있어 정화비용 산정이 매우 까다롭다.³⁾ 또한 토성에 따라, 그리고 오염이 지속된 풍화 년 수 등 자연환경에 따라 정화비용은 당초 예상과 큰 차이를 나타낼 수 있다.

[†] Corresponding author E-mail: swjeong@kunsan.ac.kr Tel: 063-469-4767 Fax: 063-469-4964

토양오염 정화를 앞서 시작한 선진국들은 “위해성에 근거한 정화(Risk-based remediation)” 개념을 일찍이 적용하고 있다.⁴⁾ 이는 위해성평가 결과와 결부한 경제적 정화전략이다. 위해성의 수용체인 인체 및 주변 환경에 영향을 미치는 노출경로 차단에 중점을 둔 정화계획이다.⁵⁻⁷⁾ 위해성에 근거한 경제적 정화 전략을 추진하기 위해 철저한 현장 조사와 자료 축적이 필요하며 이와 관련한 외국 연구와 적용사례는 많이 보고되고 있다.⁸⁻¹¹⁾

우리나라 『토양오염물질 위해성평가』는 2006년 도입 이후 많은 시간이 경과하였으나 행정권자 및 공공기관 만이 적용할 수 있어 적용 사례는 많지 않다.¹²⁻¹⁵⁾ 더구나 정화비용 관련 연구는 찾아보기 힘들다. 최근 정화곤란 부지도 위해성평가를 적용하여 정화 시기 및 정도를 조절할 수 있게 되어 앞으로 위해성평가 및 위해도 근거 정화에 대한 요구가 늘어날 전망이다.

본 연구의 목적은 유류오염 토양부지의 발암 위해도 및 비발암 위해도를 산정하고 각 위해도를 저감하기 위해 필요한 정화기술 별 정화비용을 산정할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 연구목적 달성을 위해 가상 유류오염 시범부지를 설정하여 우리나라 『토양오염물질 위해성평가 지침』에 따라 초기 발암 및 비발암 위해도를 산정하였고, 각 위해도를 순차적으로 낮추기 위해 토양증기추출법, 열탈착법, 생물학적 정화 등 3가지 정화공법을 적용할 경우 각각 소요되는 정화비용을 예측해 보았다. 본 연구는 우리나라 토양오염 위해성평가와 정화기술 간 또는 정화비용 간 연구 자료가 전무하여 외국자료에 근거하여 연구를 진행하였다.(본 연구는 동해종합기술공사에 제출한 용역보고서(출처는 공개치 않음) 일부를 바탕으로 전면 재구성 하였음을 밝힘)

2. 위해성평가 및 정화비용 예측 방법

2.1. 유류오염 시범부지

본 연구는 정형화된 유류오염 가상부지를 설정하였다. Total petroleum hydrocarbon (TPH) 5,000 mg/kg으로 오염된 2,000 m³ 불포화 토양을 대상으로 하였다. 이 중 대표적 오염물질 벤젠(Benzene)은 풍화유류 내 Benzene fraction¹⁶⁾을 고려하여 10.5 mg/kg 존재하는 것으로 가정하였다. 현재 우리나라 TPH 및 Benzene의 토양오염 우려기준은 각각 3지역에서 2,000 mg/kg, 3 mg/kg이고 1지역은 500 mg/kg, 1 mg/kg이다. 자세한 오염 가상부지 조건은 Table 1과 Fig. 1에 제시하였다.

2.2. 토양오염물질 위해성평가

본 연구는 유류오염 시범부지 시나리오를 설정하여 토양환경보전법 『토양오염물질 위해성평가지침』(환경부고시 제2018-184호)¹⁷⁾에 따라 발암 위해도와 비발암 위해도를 산정하였다. Table 1의 유류오염 시나리오에서 토양섭취, 토양접촉, 지하

Table 1. Information of the virtual contaminated site used in this study

Conditions	Values	Units
TPH Concentration in Soil	5,000	mg/kg
TPH target concentration	500	mg/kg
Contaminated soil volume	2,000	m ³
Area	200	m ²
Depth	10	m
Porosity	0.4	unitless
Soil bulk density	1.6	kg/L
Contaminated soil mass	3,200,000	kg
Total TPH to be removed	14,400	kg
Benzene fraction	0.0021 ¹⁶⁾	unitless
Benzene concentration	10.5	mg/kg

Fig. 1. Schematic diagram of a fuel contaminated virtual site.

수섭취, 비산먼지 흡입, 실외공기 휘발물질 흡입 등 5개 노출경로에 대해 지침에서 제시하고 있는 노출평가 및 독성평가 기본값(default)들을 사용하여 발암 위해도와 비발암 위해도를 산정하였다. 본 위해성평가의 대표 평가물질은 위해성평가 지침 내 발암 및 비발암 독성 및 물리·화학적 특성자료가 모두 완비되어 있는 Benzene으로 설정하였다. Table 2는 본 연구에서 사용한 노출평가 및 독성평가 인자값들을 제시하였다. Fig. 2는 위해성평가과정을 도시하였다.

2.3. 정화기법 및 정화비용 산정

본 연구는 유류오염 시범부지를 토양증기추출법(soil vapor extraction, SVE), 열탈착법(Thermal desorption), 굴착 후 생물학적 정화공법(Bioremediation (ex-situ)) 등 세 가지 정화기술을 각각 적용할 경우 정화비용을 산정하였다. 각 정화기술의 대표적 설계 및 운영인자의 값들을 이용하여 정화 목표치까지 정화시간을 산정하였다(Table 3 참조). 정화비용은 미국환경청(USEPA)¹¹⁾에서 집계한 각 기술의 평균 총정화비용(total cost = capital and operation and maintenance [O&M])값을 활용하였다. 참고로 USEPA 정화비용 달러 \$ 데이터는 모두 1999년 기준으로 작성되었는데, 이때와 최근 환율이 유사하다.

SVE는 유류오염물질에서 휘발한 가스상 오염물질을 추출하여 정화하는 공정이다. 풍화된 유류와 평형관계에 있

Table 2. Exposure and toxic parameters used in risk assessment¹⁷⁾

Stages	Conditions	Values
Exposure assessment factors	Organic carbon partition coefficient of benzene (K_{oc} , L/kg)	58.9
	Organic carbon fraction of soil (f_{oc})	0.002
	Partition coefficient of benzene (K_d , L/kg)	0.1178
	Henry's constant of benzene	0.228
	Dilution attenuation factor to groundwater	20
	Inverse of the mean concentration at center of square source (Q/C , $g/m^2 \cdot s / (kg/m^3)$)	68.18
	Exposure intervals (T , sec)	7.9E+08
	Diffusivity in air, benzene (D_i , cm^2/sec)	0.088
	Diffusivity in water, benzene (D_w , cm^2/sec)	9.8E-06
	Benzene concentration in soil (C_s , mg/kg)	10.5
Dose-response assessment factors	Benzene concentration in groundwater (C_w , mg/L)	8.33E-01
	Benzene concentration in air (C_a , mg/m^3)	2.07E-03
	Oral reference dose of benzene (RfD_o , mg/kg-day)	4.0E-03
	Dermal absorption reference dose of benzene (RfD_{abs} , mg/kg-day)	4.0E-03
	Inhalation Reference concentration of benzene (RfC , mg/m^3)	3.0E-02
	Oral slope factor (SF_o , $mg/kg \cdot day^{-1}$)	5.5E-02
	Dermal absorption slope factor (SF_{abs} , $mg/kg \cdot day^{-1}$)	5.5E-02
	Inhalation unit risk factor (URF, $\mu g/m^3 \cdot day^{-1}$)	7.8E-06

Fig. 2. Risk assessment procedures for a fuel-contaminated site.

는 가스상 물질의 농도는 226 g/m^3 ¹⁶⁾, 가스 추출유량은 $34 \text{ m}^3/\text{hr}$ ¹⁸⁾로 설정하였다. 일반적 SVE 설계 시 토양 내 가스의 채널링 및 물질전달 감소 현상 등으로 추출 정화효과를 9~11%¹⁶⁾로 잡고 있으므로 본 연구는 11%를 적용하였다. 초기 TPH 5000 mg/kg에서 500 mg/kg까지 90% 저감에 필요한 시간은 710 day로 산정되었다. SVE 정화비용 예측에 적용된 처리 단위부피당 평균 정화비용은 $134 \text{ \$/yd}^3$ ($176 \text{ \$/m}^3$)¹¹⁾였다.

생물학적정화공법에 의한 유류의 생분해율 0.021 /day ¹⁹⁾를 적용할 경우 유류오염농도 90% 저감에 필요한 시간은 110 day로 산정되었다. USEPA자료에 제시된 ex-situ bioremediation의 처리 단위부피당 평균 정화비용은 $267 \text{ \$/yd}^3$ ($349 \text{ \$/m}^3$)였다.¹¹⁾ 열탈착공법의 열탈착율은 0.5 /min ²⁰⁾을 적용할 경우 초기 유류오염농도 90% 저감에 필요한 시간은 4.6 min이었다. USEPA자료에 제시된 Thermal desorption 정화비용 데이터를 이용하였고, 처리 단위 무게 당 평균 정화비용은 $224 \text{ \$/ton}$ 이었다.¹¹⁾

2.4. 위해도 저감에 상응하는 정화비용 예측

본 연구에서는 위해성이 높은 시범부지에서 SVE, Bio-remediation, Thermal desorption 등 세 가지 정화기술을 적용하여 발암 위해도 및 비발암 위해도를 저감시킬 경우 소요되는 정화비용을 각각 예측해 보았다. 시범부지 초기 TPH 5000 mg/kg (Benzene 10.5 mg/kg)조건을 기준하여 TPH를 2000, 1410, 500, 50 mg/kg 단계별로 정화할 경우 각각의 발암 위해도 및 비발암 위해도를 산정하였다. 그리고 유류 오염 TPH농도를 상기한 단계별 농도까지 정화하는 데 소요되는 시간을 산정하고 각 기술별 단위 정화비용을 곱하

Table 3. Operation parameters of remediation technologies

Technologies	Conditions	Values
SVE	Weathered gasoline vapor concentration	226 g/m ³ ¹⁶⁾
	Extraction flow rate	34 m ³ /hr ¹⁸⁾
	Overall efficiency factor	0.11 ¹⁶⁾
	Remediation cost/volume removed	134 \$/yd ³ (176 \$/m ³) ¹¹⁾
Boiremediation (ex-situ)	Decay kinetic constant	0.021 /day ¹⁹⁾
	Remediation cost/volume removed	267 \$/yd ³ (349 \$/m ³) ¹¹⁾
Thermal desorption	Decay kinetic constant	0.5 /min ²⁰⁾
	Remediation cost/mass removed	224 \$/ton ¹¹⁾

여 정화비용을 예측하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유류오염 시범부지 위해성평가

본 시범평가 위해성평가의 대표 물질은 대부분의 독성 및 특성자료가 완비되어 있는 Benzene으로 설정하였으며 풍화된 유류 중 0.21%¹⁶⁾ 존재하는 것으로 가정하였다. 시범부지 초기 TPH 5000 mg/kg (Benzene 10.5 mg/kg) 조건에서 토양오염물질 위해성평가 지침에 의한 평가결과, 발암 위해도 지수는 1.18E-3, 비발암 위해도 지수(hazard quotient, HQ)는 5.36으로 위해성이 높게 나타났다. TPH 2000, 1410, 500, 50 mg/kg 조건의 발암 위해도는 각각 4.50E-4, 3.22E-4, 1.07E-4, 1.07E-5로 산정되었고 비발암 위해도는 각각 2.04, 1.45, 0.49, 0.05로 나타났다.

본 연구에서 설정한 토양섭취, 토양접촉, 지하수섭취, 비산먼지 흡입, 실외공기 휘발물질 흡입 등 5개 노출경로로 노출경로별 발암 위해도 결과를 보면 총 발암 위해도에 지대한 영향을 미치는 노출경로는 “지하수섭취”였다. 예를 들어, 초기 TPH 5000 mg/kg (Benzene 10.5 mg/kg)조건의 발암 위해도 1.18E-3 가운데 “지하수섭취”경로에 의한 발암 위해도가 1.17E-3이었고 그 다음은 “실외 휘발물질 흡입”경로에 의한 발암 위해도가 1.05E-5였다. 초기 비발암 위해도 5.35 가운데 “지하수섭취”경로에 의한 비발암 위해도가 5.30이었고 그 다음은 “실외 휘발물질 흡입”경로에 의한 비발암 위해도가 0.05였다. 본 연구에서는 우리나라 위해성평가지침에서 고려가 가능한 “실내 휘발물질 흡입”경로를 고려하지 않았다. 현재 지침에서 오염토양 내 휘발성물질이 실내로 유입되는 경로에 대해 기본 식이 주어져 있으며 이를 이용해 실내 휘발물질 농도 기본 값을 예측하고 있다. 그러나 실측 값이 아닌 지침에서 산정된 휘발물질 농도 기본값들을 단순하게 적용할 경우 위해도가 지나치게 높게 산정될 수 있어 제외하였다.

3.2. 발암 위해도와 정화비용 예측 결과

시범부지 초기 TPH 5000 mg/kg (Benzene 10.5 mg/kg)를

2000, 1410, 500, 50 mg/kg 단계별로 정화할 경우 발암 위해도는 1.18E-3 → 4.50E-4 → 3.22E-4 → 1.07E-4 → 1.07E-5 순으로 낮아지게 된다. Fig. 3은 유류오염 시범부지 발암 위해도를 단계별로 낮추기 위해 소요되는 정화비용 예측값을 같이 도시하였다. 초기 발암 위해도 1.18E-3을 10⁻⁴ 수준까지 낮추는 데 소요되는 정화비용은 SVE 68만불, 열탈착은 36만불, 생물학적공법은 21만불로 예측되었다. 발암 위해도 수준을 더 낮은 10⁻⁵ 수준까지 저감하기 위해 소요되는 정화비용은 SVE 75만불, 열탈착은 71만불, 생물학적공법은 42만불로 예측되었다.

SVE 정화비용 예측에 적용된 처리 단위부피당 평균 정화비용은 134 \$/yd³ (176 \$/m³)로서 ex-situ bioremediation의 처리 단위부피당 평균 정화비용은 267 \$/yd³ (349 \$/m³)보다 낮았으나 SVE의 정화기간이 상대적으로 길게 예측되어 총 정화비용이 커지게 된 것이다. SVE는 토양 내 채널링과 물질전달 제약으로 전반적 추출효율을 9~11%¹⁶⁾로 보고 설계되므로 목표 수준까지 정화기간이 늘어나게 된다.

발암 위해도 목표수준에 따라 기술별 정화비용이 큰 차이를 보이고 있다. Fig. 1에 도시한 바대로 열탈착공법과

Fig. 3. Estimated remediation cost for reducing cancer risk of a fuel contaminated site.

생물학적공법은 정화 목표수준을 10^{-4} 에서 10^{-5} 으로 낮추는데 거의 두 배 가까운 정화비용이 소요된다. 열탈착공법이 생물학적공법보다 정화비용 증가폭이 크게 나타났다. 반면 SVE는 초기 정화목표수준인 10^{-3} 에서 10^{-4} 까지 낮추는데 막대한 비용이 소요되지만 이후 수준에서는 증가폭이 가장 낮게 나타났다.

3.3. 비발암 위해도와 정화비용 예측 결과

시범부지 초기 TPH 5000 mg/kg (Benzene 10.5 mg/kg)를 2000, 1410, 500, 50 mg/kg 단계별로 정화할 경우 비발암 위해도는 $5.36 \rightarrow 2.04 \rightarrow 1.46 \rightarrow 0.49 \rightarrow 0.0495$ 순으로 낮아지게 된다. Fig. 4는 유류오염 시범부지 비발암 위해도를 단계별로 낮추기 위해 소요되는 정화비용 예측값을 같이 도시하였다. 초기 비발암 위해도 5.36을 1.0 수준까지 낮추는데 소요되는 정화비용은 SVE 60만불, 열탈착은 28만불, 생물학적공법은 16만불로 예측되었다. 비발암 위해도 수준을 더 낮은 수준인 0.46까지 저감하기 위해 소요되는 정화비용은 SVE 68만불, 열탈착은 36만불, 생물학적공법은 21만불로 예측되었다. SVE는 토양 내 채널링과 물질전달 제약으로 목표 수준까지 정화기간이 늘어나 상대적인 정화비용이 타 공법보다 높게 예측되었다.

비발암 위해도는 목표수준에 따른 정화비용 변화가 발암 위해도와는 차이를 보였다. 열탈착과 생물학적공법의 경우만 보면 발암 위해도 목표수준에 따른 소요되는 정화비용이 비례관계를 보이지만, 비발암 위해도는 초기 목표수준에 소요되는 정화비용은 완만하게 증가하지만 목표수준 1.0 이상을 달성하기 위해 소요되는 정화비용은 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 반면, SVE는 목표수준 범위에 상관없이 비례관계를 보였다.

Fig. 4. Estimated remediation cost for reducing non-cancer risk of a fuel contaminated site.

3.4. 시사점 및 제언

발암 및 비발암 목표 위해도에 따라 각기 다른 정화비용이 예측되었다. 또한 정화기술에 따라 서로 다른 정화비용이 예측되었다. 발암 위해도 일반적 정화목표 수준은 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 범위이며 비발암 위해도는 1.00이 일반적이다. 비발암 위해도에 비해 발암 위해도 정화목표 수준은 범위가 넓게 설정되어 있다. 상대적으로 가장 적은 정화비용이 예상되는 생물학적 정화기술을 예로 보면, 발암 위해도 정화목표를 10^{-5} 로 설정한다면 정화비용이 42만불, 비발암 위해도 정화목표 1.00에서는 정화비용이 16만불 소요되는 것으로 예측되었다. 위해도 목표수준 설정에 따라 2개의 정화비용이 예측된다. 본 결과는 시범부지를 생물학적정화 공법 적용으로 위해도 저감 계획을 세운다면 최소 16만불에서 최대 42만불이 소요되는 것을 시사한다.

상기 연구결과로부터 좀 더 구체적 연구시사점을 도출할 수 있다. 발암 위해도 정화수준은 일반적으로 10^{-5} 이하부터 설정된다는 점을 고려하면 정화비용은 42만불 이상 소요되는 것으로 예상할 수 있다. 42만불 이상 소요되는 정화비용은 비발암 위해도 또한 만족시킬 수 있다. 본 연구는 부지 및 정화기술에 대한 개략적인 사항만 규정하고 정화비용 실제 데이터도 세부사항에 따라 구분하지 않은 제한점들이 존재하지만 개략적 정화비용 범위를 예측할 수 있게 한다.

우리나라 토양오염물질 위해성평가 방법에 따라 발암 위해도와 비발암 위해도를 산정하고 예측된 정화비용과 대비시켜 본 결과 같은 수준의 위해도까지 정화하더라도 정화방법에 따라 정화비용이 큰 차이를 보였다. 본 연구는 위해도 대비 정화비용 예측 접근방법에 대한 가능성을 제시하였다. 앞으로 현장조사 및 위해성평가 결과, 적용된 정화기술 및 정화비용 등 우리나라 자료가 확보된다면 보다 구체적인 연구가 가능할 것으로 본다.

본 예측은 토성, 함수율, 복합오염물질 구성, 위해성평가 노출인자 등을 충분히 고려하지 않았으므로 직접적 해석은 무리다. 본 연구는 가능한 접근방법을 제시해 본 것뿐이다. 따라서 위해도와 정화비용 간 구체적 관계는 차후 상세 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구는 유류오염 시범부지 시나리오를 설정하여 토양 환경보전법 『토양오염물질 위해성평가 지침』에 따라 발암 위해도와 비발암 위해도를 산정하고, SVE, Bioremediation, Thermal desorption 등 세 가지 정화기술을 적용하여 발암 위해도 및 비발암 위해도를 저감시킬 경우 소요되는 정화비용을 각각 예측해 본 결과 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 『토양오염물질 위해성평가 지침』에 의한 시범부지 초기 오염시나리오 TPH 5000 mg/kg (Benzene 10.5 mg/kg)의

발암 위해도 지수는 1.18E-3, 비발암 위해도 지수는 5.36으로 위해성이 높게 나타났다.

2. 초기 발암 위해도를 10^{-5} 수준까지 저감하기 위해 소요되는 정화비용은 SVE 75만불, 열탈착은 71만불, 생물학적 공법은 42만불로 예측되었다. SVE는 토양 내 채널링과 물질전달 제약으로 목표 수준까지 정화기간이 늘어나 상대적인 총 정화비용이 커지는 것으로 예측되었다.

3. 초기 비발암 위해도를 1.0 수준까지 낮추는 데 소요되는 정화비용은 SVE 60만불, 열탈착은 28만불, 생물학적공법은 16만불로 예측되었다.

4. 본 연구 시범부지에 가장 낮은 정화비용이 예상되는 생물학적정화공법을 적용하고 발암 위해도 정화수준을 10^{-5} 로 설정한다면 정화비용은 42만불 이상 소요되는 것으로 예상할 수 있다. 42만불 이상 투입되는 정화조건에서 비발암 위해도 또한 만족시킬 수 있는 것으로 예측되었다.

5. 본 연구는 위해도 대비 정화비용 예측 접근방법에 대한 방안을 제시하였다. 앞으로 현장조사 및 위해성평가 결과, 적용된 정화기술 및 정화비용 등 우리나라의 자료가 확보된다면 보다 구체적인 연구가 가능할 것으로 본다.

Acknowledgement

동해종합기술공사, 한국연구재단(2018R1A2B6006139) 지원으로 연구되었습니다. 이에 감사드립니다.

KSEE

References

- Ministry of Environment, "2017 Investigation Results of Soil Quality Monitoring Network and Soil Contamination Search Project," Ministry of Environment, Sejong, Korea (2018).
- Ministry of Environment, "2018 White Paper of Environment," Ministry of Environment, Sejong, Korea (2018).
- Goldstein, M. L. and Ritterling, J. M., "A practical guide to estimating cleanup costs," *Remediation*, **11**(4), 103~121(2001).
- ITRC (Interstate Technology & Regulatory Council), Use of risk assessment in Management of Contaminated Sites, ITRC, Washington, D.C., USA (2008).
- Khadam, I. and Kaluarachchi, J. J., "Applicability of risk-based management and the need for risk-based economic decision analysis at hazardous waste contaminated sites," *Environ. Int.*, **29**(4), 503~519(2003).
- CRC CARE, Risk-based Management and Remediation Guidance for benzo(a)pyrene, Technical Report no. 39, CRC for Contamination Assessment and Remediation of the Environment, Newcastle, Australia (2017).
- North Carolina, Technical Guidance for Risk-based Environmental Remediation of Sites, Dep. Environ. Quality, North Carolina, USA (2017).
- Sate of California, 2018 Report on Estimated Direct Site Remediation Costs for National Priorities List and State Orphan Sites, Department Of Toxic Substances Control, California, USA (2018).
- Karachaliou, T., Protonotarios, V., Kaliampakos, D. and Menegaki, M., "Using risk assessment and management approaches to develop cost-Effective and sustainable mine waste management strategies," *Recycl.*, **1**(3), 328~342(2016).
- Kaufman, M. M., Rogers, D. T. and Murray, K. S., "An empirical model for estimating remediation costs at contaminated sites," *Water Air Soil Pollut.*, **167**(1-4), 364~386(2005).
- USEPA, Remediation Technology Cost Compendium-Year 2000, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington D.C., USA (2001).
- Jeong, S-W., An, Y-J., Song, S., Hyun, I. and Hyun, S., "Probabilistic risk assessment of inhalation of nickel-rich soil particulates on Jeju Island, Korea," *Hum. Ecol. Risk Assess.*, **22**(6), 1301~1311(2016).
- Lim, T. Y., Lee, S. W., Park, M. J., Lee, S. H. and Kim, S. O., "Comparative study on the human risk assessment of heavy metal contamination between two abandoned metal mines in Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **37**(11), 619~630(2015).
- An, Y-J., Kim, S. W., Moon, J., Jeong, S-W., Kim, R-Y., Yoon, J-K. and Kim, T-S., "An introductory research for development of soil ecological risk assessment in Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(6), 348~355(2017).
- Kim, D., Kim, S. W. and An, Y-J., "Research trend for on-site soil ecotoxicity evaluation methods for field soil," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **41**(3), 125~131(2019).
- Johnson, P. C., Stanley, C. C., Kembrowski, M. W., Byers, D. L. and Colthart, D., "A practical approach to the design, operation, and monitoring of in situ soil-venting systems," *Ground Water Monitor. Rem.*, **10**(2), 159~178(1990).
- Ministry of Environment, Risk Assessment Guidelines for Soil Contaminants Ministry of Environment, Sejong, Korea (2018).
- Martins, S. and Gregory, S., "Effects of natural environmental changes on soil-vapor extraction rates," in *Proceedings of Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*, Monterey, CA, United States (2006).
- Jeong, S-W., Jeong, J. and Kim, J., "Simple surface foam application enhances bioremediation of oil-contaminated soil in cold conditions," *J. Hazard Mater.*, **286**, 164~170(2015).
- Falciglia, P. P., Giustra, M. G. and Vagliasindi, F. G. A., "Low-temperature thermal desorption of diesel polluted soil: Influence of temperature and soil texture on contaminant removal kinetics," *J. Hazard. Mater.*, **185**(1), 392~400(2011).