

유류오염지역 정화를 위한 토양경작법 설계 표준화방안 A Case Study of Landfarming Design Procedures for Remediation of Oil-contaminated Site

조장환 · 박정구 · 박민규 · 정승우*[†]

Chang-Hwan Cho · Jeong-Gu Park · Min-Gyu Park · Seung-Woo Jeong*[†]

한국환경공단 토양지하수처 · *군산대학교 환경공학과

Environmental Site Assessment & Remediation Team, Environ. Management Corp.

*Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

(Received March 26, 2014; Revised September 3, 2014; Accepted September 20, 2014)

Abstract : The purpose of this study was to suggest a standard design procedure of landfarming for clean-up of oil-contaminated soils. The standard design procedure consisted of four main phases; soil characterization, determination of contaminated soil volume, determination of nutrient and microbial doses, and estimation of the total remedial period. This study selected standard design parameter values or ranges among various forms used in environmental engineer communities. Those were determination procedures for the contaminated soil volume, the initial contamination concentration and nutrient doses. The suggested standard design procedure were applied for a landfarm design for remediation of a real oil-contaminated site. Soil texture of the site was classified as sandy clay loam and sandy loam. Total nitrogen and total phosphorus were estimated to be 57.01 mg/kg and 83.40 mg/kg, respectively. Also the viable bacterial numbers was assessed to be 1.78×10^4 CFU/g dry soil. The amount of TPH contaminated soil was estimated to be 4,092 m³. With the application of remedial factors, it was estimated that the contaminated soil could be treated through 9 batches with a duration of 315 days for a landfarming unit of 15 m × 40 m × 1 m. The amount of liquid microorganisms and fertilizers were recommended to be 4,025L and 4,641kg, respectively.

Key Words : Remedial Action Plan, Remedial Factors, Oil-contaminated Site, Soil Contamination, Landfarm

요약 : 본 연구는 유류오염토양 정화를 위해 널리 사용되는 토양경작법의 표준 설계방안을 제안하고자 하였다. 표준설계방안은 토양특성 파악 및 오염부피 산정, 영양분 및 미생물 투입량 결정, 분해속도 실증실험을 통한 정화기간 산정 등으로 크게 구분하여 진행할 것을 제안한다. 그리고 그동안 설계자간 다양하게 사용되고 있는 오염토양 부피 산정절차, 오염토양 대 표 초기농도결정 방법, C : N : P 영양염류 투입량 결정방법 등에 대한 표준화 방안을 제시하였다. 시범지역에 대한 토양특성 및 오염부피를 산정한 결과 유류오염지역의 토성은 사질 식양토와 사양토로 분류되었으며, 총질소 농도는 57.01 mg/kg, 총인 은 83.40 mg/kg, 유류분해미생물은 1.78×10^4 (CFU/g dry soil), 정화대상 토량은 4,092 m³으로 산정되었다. 시범적용지역의 모 든 오염토양을 토양경작장(15 m(가로) × 40 m(세로))에서 1 m 높이로 적치하여 정화할 경우 약 9배치로 처리가 가능한 것으 로 평가되었다. 오염토양 1배치의 처리기간은 35일이 소요될 것으로 판단되며, 대상 지역의 모든 오염토양은 토양경작법으 로 처리하는 경우 총 315일이 소요될 것으로 예상된다. 오염토양의 정화를 위해 필요한 미생물제제의 양은 4,025 L이며, 요 소비료는 총 4,642 kg가 소요될 것으로 판단된다.

주제어 : 토양정화 설계, 설계인자, 유류오염부지, 토양오염, 토양경작

1. 서론

국내 오염토양의 관리는 1995년 토양환경보전법의 제정 을 시작으로 본격적인 토양오염의 조사 및 정화가 이루어 졌으며, 최근 들어 육군 제2정비창 오염부지 정화사업, 반 환미군기지(land partnership plan, LPP) 정화사업, 한국중단 송유관(trans korea pipeline, TKP) 정화사업 등과 같이 대규 모 국책사업의 실시로 오염토양의 정화에 대한 관심이 고 조되고 있다.¹⁻³⁾ 오염토양 정화사업은 천문화적인 비용이 소 요되므로 정확한 사업비의 산정이 필요하며 현행법령에서 허용하는 정화기간 내에 사업을 완료하기 위해서는 정확한 소요기간의 산정이 필수적이다. 그러나 오염물질 및 부지특 성, 오염규모, 적용된 정화공법의 효율성, 운영방법 등에 따

라 정화비용 및 기간의 산정에 많은 차이를 나타내므로 적 정 사업비 및 기간의 산정을 위해서는 정화설계의 표준화 가 선행되어야 하지만 아직 이에 대한 근거가 부족한 실정 이다.¹⁾

오염지역의 정화설계는 일반적으로 부지현황조사, 정화공 법의 선정, 실증시험, 정화설계의 단계를 거쳐 완성된다. 부 지현황조사에서는 부지 내 오염정도를 파악하고, 정화공법 선정단계에서는 인자 도출, 기술검토, 경제성 분석, 오염 및 부지특성을 정확히 파악한 후 공법이 선정되며 실증실험을 아울러 시행한다. 최종 정화설계 단계에서는 도출된 인자를 적용하여 현장규모 정화시설 및 운영방법을 설계하고, 운영 기간 및 적정 사업비를 산출한다.⁴⁾ 정화설계 인자의 부적절 한 적용은 사업비의 변동을 야기할 뿐만 아니라 예정된 정

[†] Corresponding author E-mail: swjeong@kunsan.ac.kr Tel: 063-469-4767 Fax: 063-469-4954

화기간 및 목표 달성에 대한 불확실성을 야기한다.⁵⁾ 그러므로 정확한 설계인자의 도출 및 적용과정 등 전반적 정화설계에 대한 표준화과정이 요구되며 이에 대한 지속적 연구가 필요하다.

본 연구는 국내 토양정화업체가 가장 널리 사용하고 있는 유류 정화공법중 하나인 토양경작법에 대한 정화설계 표준화방안을 제안하였다. 토양경작법은 오염토양을 굴착하여 지표면에 깔아놓고 정기적으로 뒤집어줌으로써 공기 중의 산소를 공급해 주는 호기성 생분해 공법이다. 유류분해 미생물 개체수가 적정할 경우에는 산소, 영양물질 및 수분 등을 조절하여 미생물의 활성을 극대화시켜 오염물질의 분해 속도를 증가시킨다. 반면, 미생물 농도가 낮을 경우에는 오염토양에 인위적으로 미생물을 공급하여 정화효율을 극대화 한다.⁶⁾

오염지역에 토양경작법을 적용하는 경우 소요비용은 크게 토양경작장의 설치, 오염토양 굴착 및 퇴매움, 토양경작장 운영, 약품 및 미생물 구입비, 기타 전기료 및 부지정리 비용 등으로 구성된다. 오염토양의 양에 따라 정화기간이 달라지고, 토양의 특성에 따라서는 미생물 제제 및 영양분의 필요량이 결정된다. 토양경작공법에 대한 최적의 정화설계를 위해 먼저 대상 부지의 특성 및 오염특성을 정확히 파악해야 한다. 대상 부지의 정화 설계인자는 토양물질, 미생물 농도, 질소 및 인 농도, 오염물질의 확산범위 등이며, 이들 인자의 정확한 파악 및 적절한 적용에 따라 최적의 비용효과적인 정화설계가 가능해진다. 본 연구에서는 실제 유류오염지역에서 토양경작법 적용시 정화설계에 필요한 설

계인자들을 시범평가하고, 이를 적용하여 정화설계를 작성함으로써 정화설계의 표준화방안을 제시하고자 하였다.

2. 시범 오염부지 현황

2.1. 시범 부지현황

대상지역은 강원도 원주시 중앙에 위치하고 있으며, 북쪽으로는 섬강과 동쪽으로는 원주천이 흐르고 있다. 주변이 산으로 둘러싸인 완만한 분지에 위치하고 있으며, 기반암인 화강암의 풍화에 의해 투수성이 양호한 조립질 토양으로 형성되어 있다.

지난 10년간(2001~2010) 연 강수량은 775~1,745 mm 범위이며, 연평균 강수량은 1,396 mm이다. 연강수량의 70%가 여름철인 6월~9월에 집중되어 강수량의 계절적 편차가 크게 나타난다. 대상 부지가 위치한 원주시는 내륙지역에 있어 기온의 연교차가 크고, 여름에는 높새바람의 영향으로 가뭄이 심하다. 1월 평균 기온은 -4.8 °C, 8월 평균기온은 24.5°C이다.

1995년부터 차량의 주유를 위해 부지 내에 주유대를 사용하고 있었으며, 주유대는 지하저장탱크(2만 L×2개)와 연결되어 있었다. 최근 실시한 토양오염도 검사결과 유류에 의한 토양오염이 발견되어 주유대의 사용이 중지된 상태이다. 대상 부지 주변은 운동장, 창고, 테니스장, 이동식 유류저장시설 보관소 등이 있다. 대상 부지의 개략적 배치도와 관측정 설치지점 및 토양시료 채취 위치를 Fig. 1에 나타내었다.

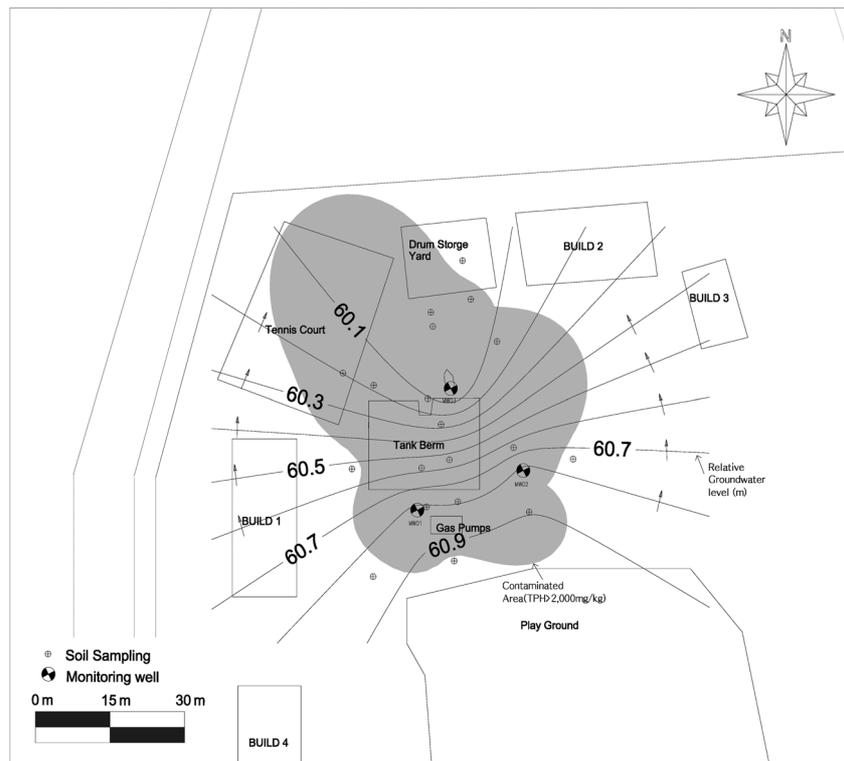


Fig. 1. The locations of monitoring wells and soil sampling points.

2.2. 토양 특성 파악

토양특성 파악을 위한 시료는 관측정 설치 시 주요 지질층을 대표할 수 있는 심도에서 채취하였다. 토성은 한국공업규격(KSF)에 따른 토질시험법을 적용하여 분석하였다. 총질소 분석은 킬달법(Kjeldahl method), 총인은 Vanado molybdate 법에 의해 (재)자연환경연구소에서 분석하였다. 토양 내 질소 및 인함유량은 영양염류 투입량 결정에 사용하였다. 또한 토양 내 유류분해균수는 희석평판배양법에 따라 전주대학교 토양복원연구실에서 분석하였고, 이 결과 역시 미생물 투입량 결정에 활용하였다.

2.3. 토양오염 특성 파악

직관타격식 토양시료채취장비(direct push drilling devices)를 이용하여 지표에서 1 m 간격으로 심도를 증가시켜 한 지점에서 5개의 토양시료를 채취하였다. 총 19지점에서 63개의 시료를 채취하였으며, 채취한 토양시료는 석유계총탄화수소(TPH), 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene) 에틸벤젠(Ethylbenzene), 크실렌(Xylene)을 분석하였다. 시료분석은 토양오염공정시험법에 따라 한국환경공단 토양지하수분석센터에서 수행하였다. TPH 분석결과는 본 기술자료에서 언급되거나 외 항목 결과는 본 기술자료 목적과 다르므로 언급하지 않았다.

3. 결과 및 고찰

토양경작법 정화설계의 절차는 토양특성 파악 및 오염부피 산정, 영양분 및 미생물 투입량 결정, 분해속도 실증실험을 통한 정화기간 산정 등으로 크게 구분하여 진행할 것을 제안하였다. 구체적인 절차와 인자는 Fig. 2와 같다.

3.1. 토양특성 파악 및 오염부피 산정 표준화

3.1.1. 입도, 총인, 총질소 및 유류분해균수 분석

토양특성파악을 위한 시료채취는 부지 내 지하수 관측정을 설치한 세 지점에서 채취한 토양시료를 이용하였다. 관측정 설치지점의 심도 2~3 m에서 채취한 토양시료에 대해 입도, 총인(T-P), 총질소(T-N), 유류분해균수 등을 분석한다. 시범부지에 대한 입도분석결과 모든 관정에서 채취한 토양물성시료의 입경분포는 약간씩 상이하나 토성은 Sandy clay loam(사질 식양토)와 Sandy loam(사양토)으로 분류되었다. Table 1에 입경분포 분석결과를 정리하였고, Fig. 3에 토성구분 삼각도표를 나타내었다. 입도분석은 가장 기본적 토양

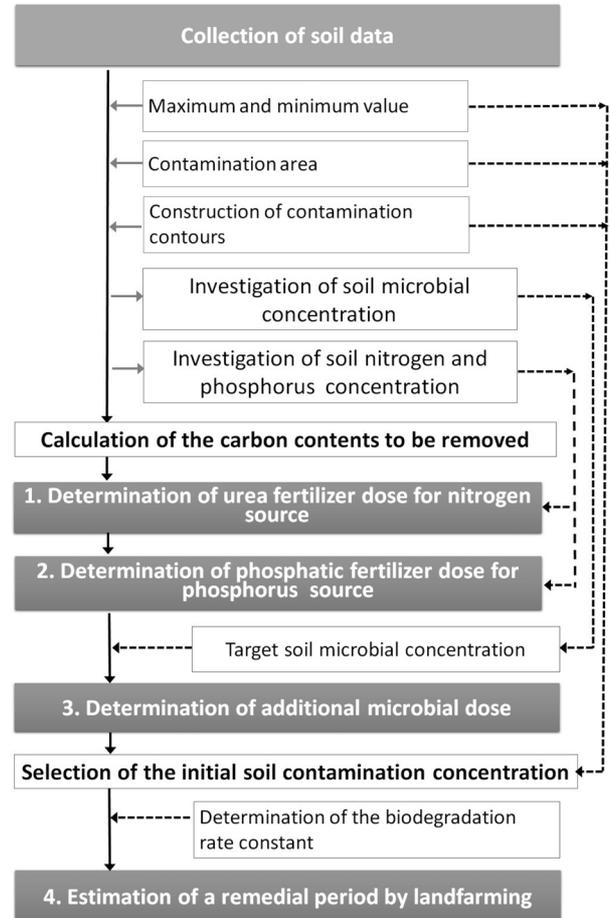


Fig. 2. Suggested remediation system design procedures for landfarming of oil contaminated-soils.

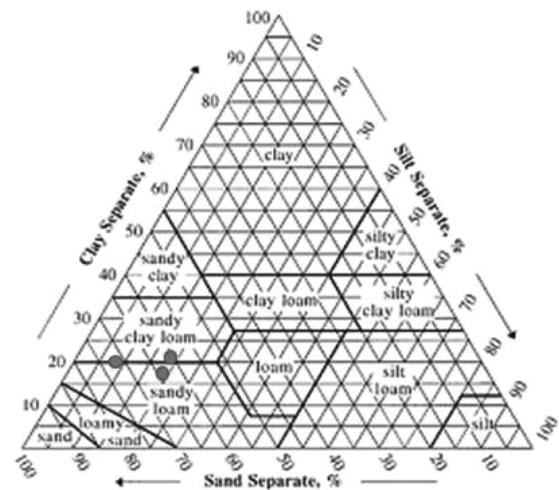


Fig. 3. The results of soil texture analysis for each soil samples.

Table 1. The results of particle size analysis

Soil sample	Particle size analysis						Soil texture
	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Effective porosity	Uniformity coefficient	Coefficient of curvature	
YJMW-01	60.54	18.04	21.42	0.09	11.67	2.38	Sandy clay loam
YJMW-02	62.74	18.03	19.23	0.11	9.58	2.05	Sandy clay loam
YJMW-03	71.99	8.20	19.81	0.11	10.15	2.14	Sandy loam

Table 2. The characteristics of soil used for this study

Soil sample	Total nitrogen (mg/kg)	Total phosphorus (mg/kg)	Viable bacterial numbers (CFU/g dry soil)
YJMW-01	42,759	89,734	4.5×10^3
YJMW-02	71,265	87,833	7.5×10^3
YJMW-03	57,012	72,624	4.15×10^4
Average	57,012	83,397	1.78×10^4

특성으로 토양정화설계에 있어 먼저 파악되어야 한다. 토양특성 분석 중 두 번째로 이루어져야 할 사항은 토양 내 총질소 및 총인을 분석해야 한다. 총질소와 총인 농도분석은 유류 생분해 미생물의 활성을 유지하기 위해 필요한 영양분 공급분을 산정하기 위해 필요하다. 부족분에 대해서는 외부에서 공급해 주어야 하기 때문이다. 시범부지에 대한 총질소 분석농도는 42.76~71.27 mg/kg(평균 57.01 mg/kg), 총인(T-P)은 72.62~89.73 mg/kg(평균 83.40 mg/kg)이었다. 토양특성 분석 중 세 번째로 이루어져야 할 사항은 토양 내 유류분해미생물의 수이다. 토양 내 적정한 유류분해 미생물 수가 존재하지 않을 경우 이 또한 외부에서 공급해 주어야 한다. 시범부지에 대한 유류분해미생물 수는 $4.5 \times 10^3 \sim 4.15 \times 10^4$ (CFU/g-dry soil), 평균 1.78×10^4 (CFU/g-dry soil)으로 조사되었다. Table 2에 토양특성 분석결과를 정리하였다.

3.1.2. 오염토양 부피 산정

오염토양의 부피는 정화기간 및 정화비용을 결정짓는 중요한 인자에 해당한다. 일반적으로 오염토양의 부피산정은 평가자에 따라 매우 다양하게 산정되고 있어 표준화 되어야 할 필요가 있다. 본 연구에서 제안하는 오염토양 부피 산정 표준화 절차는 농도 contour 프로그램을 이용하여 오염 확산 현황을 파악하고 1 m 심도단위로 오염여부를 판단하여 오염 깊이를 결정짓고 흐트러짐 계수를 고려한 후 오염토양 부피를 최종 산정하는 방안이다.

시범부지에 대한 토양오염물질 농도를 분석한 후 Surfer Program을 활용하여 오염확산 현황을 평가하였다. 석유계 총탄화수소(TPH)의 1깊이(0-1 m) 확산면적은 45 m², 2심도(1-2 m)는 1,846 m², 3심도(2-3 m)는 2,166 m², 4심도(3-4 m)는 35 m²로 추정하였다. 오염물질은 지하 4 m까지 확산되었으며, 전체 오염토양은 4,092 m³이며, 흐트러짐 계수 1.2를 고려한 정화대상 토양은 4,910 m³으로 조사되었다. 토양용적밀도는 1.7 g/cm³로서 정화대상 토양 무게는 8,347 ton이다.

대상지역의 토양오염은 대량탱크에 연결되어 있는 지하배관의 균열로 누출된 유류에 의한 것으로 판단되었다. 누출된 유류는 토양을 오염시키고 지하수면과 접촉하여 지하수 흐름을 따라 유동하면서 확산범위를 넓히고 있는 것으로 판단된다.

3.2. 설계인자의 도출 표준화 방안

3.2.1. 영양분 및 미생물 투입량 결정

문헌에 토양내 미생물의 적정 양은 $10^4 \sim 10^7$ CFU/g으로 되어 있으며 각 설계자에 따라 적용되는 미생물 농도는 매우

다양하다.⁷⁾ 본 연구에서는 토양경작법을 위한 적정 미생물 농도를 문헌의 중간부분에 해당하는 5×10^5 CFU/g-soil로 제안하는 바이다.

토양경작법에서의 영양염류는 미생물의 생분해 활성도 증가를 위해 투입되는 질소 및 인 공급원을 의미한다. 정화대상 오염 토양 내 존재하는 질소 및 인의 농도를 조사하여 부족한 영양분 공급량을 결정하여야 한다. 문헌에 나와 있는 최적의 C:N:P 비율은 100:10:1로 알려져 있다. 그러나 문헌상 비율이 물비율과 중량비율 등 다양하며 또한 탄소의 함량을 TPH 농도로 보거나 헥산, 도데케인 등의 화합물로 간주하는 경우도 있다. 따라서 표준화를 위해 본 연구에서는 C:N:P비율을 중량비율로 보며 탄소의 함량은 도데케인(C₁₂H₂₆, Dodecane)으로 간주하여 산정하는 것으로 제안하는 바이다.

3.2.2. 정화기간의 산정

오염토양을 정화하는데 소요되는 기간은 생물학적반응시간과 목표농도를 고려하여 산정할 수 있다. 토양경작장 내부 오염토양의 TPH 제거 속도를 1차 반응으로 가정하면 일정시간(t) 후 TPH 농도 변화는 아래의 식으로 표현할 수 있다. 아래 식에서 오염토양 TPH에 대한 1차 분해속도 k는 실증시험에 의해서 결정한다.⁸⁾

$$C_t = C_0 \times e^{-kt} \quad (1)$$

여기서,

C_t : t 시간 이후의 TPH 농도(mg/kg),

C_0 : TPH의 초기농도,

k : 1차 분해속도(day⁻¹),

t : 시간(day)

오염토양의 1배치 정화기간은 위 식의 C_t 를 토양환경보전법의 3지역 우려기준인 2,000 mg/kg 이하까지 감소하는 기간을 기준으로 설정할 수 있다. 그리고 오염토양의 반입과 반출에 각 2일이 소요되는 것을 감안하여 전체 오염토양 정화기간을 산정한다. 그러나 이때 최종 오염토양 정화기간은 각 토양경작장의 1배치 정화가능 토양량이므로 정화대상 토양량이 많다면 다수 배치 운영에 따른 전체 정화기간을 고려하여야 한다.

오염토양의 초기농도(C_0)결정은 그동안 설계자에 따라 매우 다양하였지만 본 연구는 오염플럼의 중간 값과 면적 가중치를 이용하여 구하는 방법을 제안한다. 첫째, 오염플럼의 2,000 mg/kg 이상인 지역을 500 mg/kg씩 세분화한다. 둘째, 각 구간의 중간 값(최대 값과 최소 값 합 1/2)과 오염면적이 차지하는 비율을 곱한다. 셋째, 중간값과 면적가중치를 곱한 값을 모두 더하여 오염부지의 대표 초기농도 값(C_0)을 결정하는 방법을 제안한다. 이어 언급되는 3.3.2절에서 실제 사례를 통해 초기농도 결정과정을 보다 자세히 설명한다.

3.3. 시범지역에 대한 설계인자 표준방안 적용

3.3.1. 생분해 속도 결정

시범부지 오염토양 TPH 분해속도 파악을 위한 실증시험은 1 m (L) × 1 m (W) × 0.3 m (H)의 아크릴 반응조에서 수행되었다. 오염토양은 0.3 m³을 이용하였으며, 초기농도는 3,572 mg/kg이었다. 세 개의 반응조(반응조 1, 2, 3)를 사용하여 다양한 조건에서 생분해 속도를 결정하였다.

반응조 1은 오염토양에 수분만을 공급한 것으로 토양의 수분함량을 20%로 유지하였다. 반응기 2는 추가적으로 영양염류를 공급하여 수분은 20%, C:N:P가 100:10:1을 유지하도록 하였다. 반응기 3은 수분함량은 20%, C:N:P가 100:

10:1을 유지하도록 영양염류를 주입하였으며, 미생물 농도는 10⁵ MPN/g-soil 이상 유지되도록 추가적인 미생물을 주입하였다. 반응초기 미생물 수는 각각 2 × 10⁴ cfu, 4 × 10⁴ cfu, 8 × 10⁵ cfu이었다. 반응기간 동안 2~3일에 1회 주기로 경작(뒤집기)을 수행하여 하부층의 토양이 충분히 대기에 노출될 수 있도록 하였으며, 일정기간 간격으로 오염토양의 TPH농도를 분석하였다. 실험결과 반응조 1과 반응조 2의 k값은 0.0244 및 0.0295로 나타났다. 반응조 3의 k값은 0.0341 day⁻¹로 조사되었으나, 안전율을 고려하여 대상지역의 TPH에 대한 1차 분해속도 k는 0.0323 day⁻¹으로 결정되었다. Fig. 4에 정확 조건에 따른 TPH 농도변화 실증시험 결과를 나타내었다.

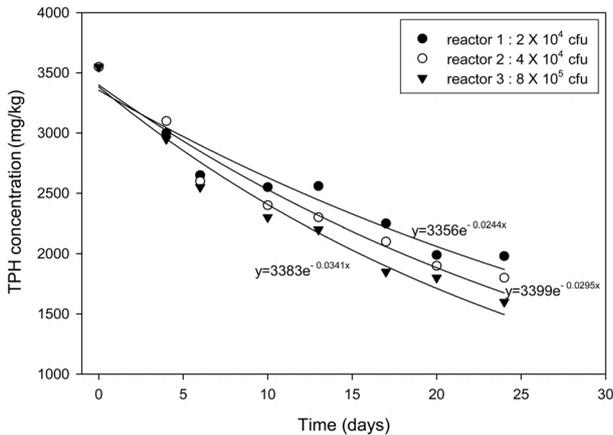


Fig. 4. Regression analysis for the TPH removal from the contaminated soil.

3.3.2. 오염토양 초기농도

오염토양의 초기농도는 오염플럼의 중간 값과 각 세부 면적 비율을 이용하여 구하였다. 오염플럼의 2,000 mg/kg 이상인 지역을 500 mg/kg 씩 세분화한다. 각 구간의 중간값(최대값과 최소값의 1/2)과 면적 비율을 곱한 후 모두 더하였다. 위와 같이 구한 오염토양의 초기농도는 5,680 mg/kg로 산정되었다. Fig. 5는 2깊이(1~2 m)의 TPH 오염 2,000 mg/kg을 나타내고 있다. 예를 들면, 등농도 곡선의 2,000 mg/kg과 2,500 mg/kg 사이의 면적(a1)은 189 m²이며 전체 면적 4,092 m²에 대한 비율(a1/A)은 0.125이다. 2,000 mg/kg과 2,500 mg/kg 구간의 중간값은 2,250 mg/kg이다. 그러므로 중간값과 면적비율을 곱한 값은 280이 된다. 모든 깊이에서 중간값과 면적비율을 곱한 값을 모두 더하면 초기

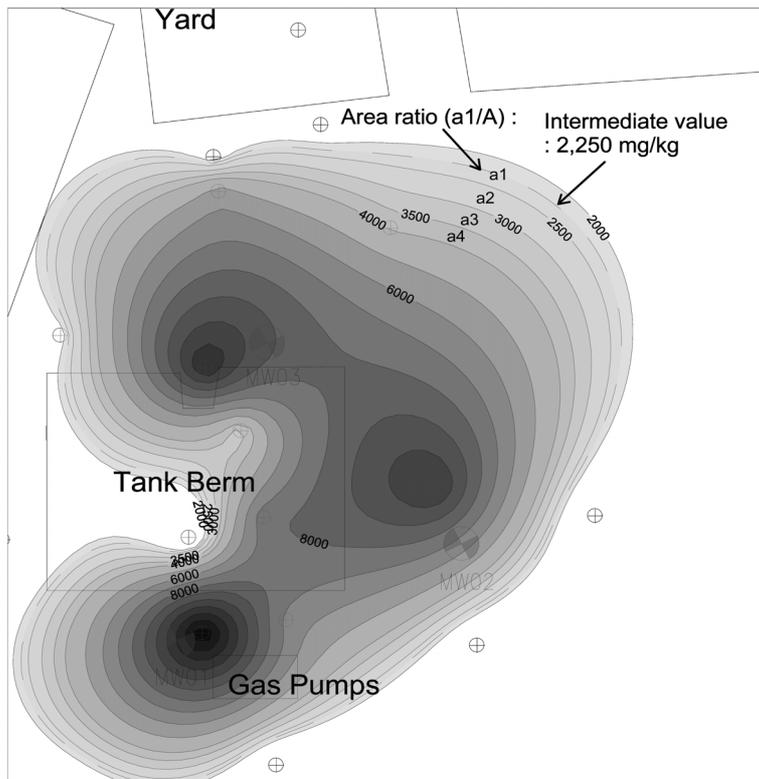


Fig. 5. Distribution of the TPH concentration in the depth 2.

Table 3. Determination of the initial concentration of TPH contaminated- area for design of remediation systems

TPH range (mg/kg)	Intermediate value	Contaminated area (m ²)				Area (m ²)	Each ratio to total	Intermediate value × area ratio
		Depth 1 (0~1 m)	Depth 2 (1~2 m)	Depth 3 (2~3 m)	Depth 4 (3~4 m)			
2,000~2,500	2,250	35	189	268	18	510	0,125	280
2,500~3,000	2,750	10	158	216	10	394	0,096	265
3,000~3,500	3,250	-	139	177	6	322	0,079	256
3,500~4,000	3,750	-	123	170	1	294	0,072	269
4,000~4,500	4,250	-	107	150	-	257	0,063	267
4,500~5,000	4,750	-	98	128	-	226	0,055	262
5,000~5,500	5,250	-	103	100	-	203	0,050	260
5,500~6,000	5,750	-	100	140	-	240	0,059	337
6,000~6,500	6,250	-	89	111	-	200	0,049	305
6,500~7,000	6,750	-	97	83	-	180	0,044	297
7,000~7,500	7,250	-	101	71	-	172	0,042	305
7,500~8,000	7,750	-	106	66	-	172	0,042	326
8,000~8,500	8,250	-	104	59	-	163	0,040	329
8,500~9,000	8,750	-	88	49	-	137	0,033	293
9,000~9,500	9,250	-	71	67	-	138	0,034	312
9,500~10,000	9,750	-	56	60	-	116	0,028	276
10,000~10,500	10,250	-	44	62	-	106	0,026	266
10,500~11,000	10,750	-	37	34	-	71	0,017	187
11,000~11,500	11,250	-	18	31	-	49	0,012	135
11,500~12,000	11,750	-	7	27	-	34	0,008	98
12,000~12,500	12,250	-	3	16	-	19	0,005	58
12,500~13,000	12,750	-	3	14	-	17	0,004	52
13,000~13,500	13,250	-	2	18	-	20	0,005	66
13,500~14,000	13,750	-	2	18	-	20	0,005	66
14,000~14,500	14,250	-	1	17	-	18	0,004	63
14,500~15,000	14,750	-	-	14	-	14	0,003	51
Total		45	1,846	2,166	35	4,092	1,000	5,680

농도는 5,680 mg/kg이 된다. Table 3에 대상 부지의 초기농도 값 계산 과정을 보다 자세하게 나타내었다.

3.3.3. 정화기간 산정

최종 정화 목표농도는 2,000 mg/kg이므로, 식 (1)에 따라 1배치 정화기간은 $2,000 \text{ mg/kg} = 5,680 \text{ mg/kg} e^{-0.0323t}$ 에 의해 30.57일이 된다. 오염토양의 반입과 반출에 각 2일이 소요된다고 가정하면, 1배치 정화기간은 약 35일이 될 것이다. 그러나 시범 대상지역의 부지활용 여건을 고려한 결과 설치 가능한 경작장의 크기는 15 m × 40 m이었으며, 경작단의 높이는 1 m이었다. 경작장의 벽면으로부터 약 1 m의 여유를 두었을 때 1배치 처리 가능한 오염토양의 양은 546 m³에 해당하여, 전체 오염토양 4,910 m³을 모두 정화하기 위해서는 아홉 번의 처리과정을 거쳐야 하는 9배치로 처리가 가능하다. 따라서, 모든 오염토양을 토양경작법으로 정화하는데 소요되는 기간은 약 315일로 산정될 수 있다.

$$4,910 \text{ m}^3 \div [(15 \text{ m}-1 \text{ m}) \times (40 \text{ m}-1 \text{ m}) \times 1 \text{ m}] = 8.9 \text{ 배치} \approx 9 \text{ 배치}$$

3.3.4. 미생물제제 투입량

시범지역의 오염토양 정화를 위해 필요한 미생물제제의 총량은 목표 미생물 농도에서 토양에 존재하는 미생물 농도를 감하여 구하였다. 총 공급 미생물 개체 수는 다음과 같다. 오염토양은 산정된 오염부피에 토양밀도 1.7 g/cm³을 곱하여 구하였다. 시범지역 오염토양에 이미 존재하는 미생물의 농도는 1.78 × 10⁴ CFU/g-soil이며, 이 토양 정화를 위해 필요한 액상 미생물 공급량은 4,025 L로 산정되었다.

$$4,910 \text{ m}^3 \div [(15 \text{ m}-1 \text{ m}) \times (40 \text{ m}-1 \text{ m}) \times 1 \text{ m}] = 8.9 \text{ 배치} \approx 9 \text{ 배치}$$

- 오염토양 : 8,347 ton
- 목표 미생물 농도 : 5 × 10⁵ CFU/g-soil
- 현존하는 미생물 농도 : 1.78 × 10⁴ CFU/g-soil
- 미생물 제제의 미생물 농도 : 1 × 10⁹ CFU/mL
- 액상미생물 공급량 : 8,347 ton × (5 × 10⁵ CFU/g-soil - 1.78 × 10⁴ CFU/g-soil) ÷ 1 × 10⁹ CFU/mL = 4,025 L

3.3.5. 영양염류 투입량

앞서 제안된 생분해에 용이한 탄소함량 대비 영양분 표준 비율인 C : N : P ratio = 100 : 10 : 1과 도데케인(C₁₂H₂₆, Dodecane)을 기준하여 산정된 탄소함량을 바탕으로 시범지역 정화대상 토양에 대한 영양염류 투입량을 결정하여 보았다.

오염토양 평균농도는 5,680 mg/kg, 정화목표 농도는 2,000 mg/kg, 정화대상 오염토양은 8,347 ton으로써, 정화대상 오염물질 중 탄소량은 다음과 같이 구할 수 있다.

- 오염토양 평균농도 : 5,680 mg/kg
- 정화목표 농도 : 2,000 mg/kg
- 오염토양량 : 8,347 ton
- 도데케인의 탄소함량 비 : 0.85
- 탄소함량 : $(5,680 \text{ mg/kg} - 2,000 \text{ mg/kg}) \times 8,347 \text{ ton} \times 0.85 = 26,109 \text{ kg}$

유류오염물질은 수많은 종류의 탄화수소로 이루어져 있으나, 평균 탄소수 12개인 도데케인(C₁₂H₂₆, Dodecane)으로 보면, 오염물질내 탄소함량은 85%이며, 오염물질 중 탄소함량은 26,109 kg이 된다.

최적의 미생물 분해효율을 얻기 위해 필요한 토양중 질소 농도는 탄소량의 10%이며, 이중 현존하는 질소 농도를 감하여 필요한 질소의 양을 구하였다. 필요한 질소요구량은 2,135 kg 정도 다음과 같다. 시판되고 있는 요소비료는 46%의 질소를 포함하고 있을 경우 총 4,642 kg의 요소비료가 필요한 것으로 산정된다.

- 토양의 질소농도 : 57.012 mg/kg
- 오염토양 : 8,347 ton
- 질소필요량 : $(26,109 \text{ kg} \times 0.1) - (57.012 \text{ mg/kg} \times 8,347 \text{ ton} \times 10^{-3} \text{ (kg, 단위환산)}) = 2,135 \text{ kg}$
- 요소비료량 : $2,135 \text{ kg} \times 100/46 \text{ (질소함유비)} = 4,642 \text{ kg}$

탄소량의 1 %가 필요한 인산 비료의 추가량은 약 261 kg이지만, 토양내 현존하는 인 함유량이 필요량 보다 많으므로 인을 추가로 공급할 필요는 없었다.

- 토양의 인 농도 : 83.397 mg/kg
- 오염토양 : 8,347 ton
- 인 필요량 : $(26,109 \text{ kg} \times 0.01) - (83.397 \text{ mg/kg} \times 8,347 \text{ ton} \times 10^{-3} \text{ (kg, 단위환산)}) = -435 \text{ kg}$

4. 결론

본 연구는 국내 토양정화업체가 가장 널리 사용하고 있는 유류 정화공법중 하나인 토양경작법에 대한 정화설계 표준화방안을 제안하였다. 그리고 실제 유류오염지역의 토양경

작법 적용시 정화설계에 필요한 설계인자들을 평가하고, 이를 적용하여 정화설계서 작성을 위한 수량을 산정함으로써 차후 정화설계의 지침 자료가 되고자 하였다. 본 연구에서 제안하는 표준화 방안과 실제 적용에 따른 결과는 다음과 같다.

1) 토양경작법 정화설계의 절차는 토양특성 파악 및 오염부피 산정, 영양분 및 미생물 투입량 결정, 분해속도 실증 실험을 통한 정화기간 산정 등으로 크게 구분하여 진행할 것을 제안한다. 그리고 그동안 설계자간 다양하게 사용되고 있는 오염토양 부피 산정절차, 오염토양 대표 초기농도결정 방법, C:N:P 영양염류 투입량 결정방법 등에 대한 표준화 방안을 제시하였다.

2) 오염토양 부피 산정 표준화 절차는 농도 contour 프로그램을 이용하여 오염확산현황을 파악하고 1 m 심도단위로 오염여부를 판단하여 오염 깊이를 결정짓고 흐트러짐계수를 고려한 후 오염토양 부피를 최종 산정하는 방안이다.

3) 정화기간 산정에 필요한 오염토양의 대표 초기농도(C₀)는 오염플럼의 중간값과 면적비율을 이용하여 구하는 방법을 제안하였다.

4) C:N:P비율은 중량비율로 보며 탄소의 함량은 도데케인(C₁₂H₂₆, Dodecane)으로 간주하여 산정하는 방안을 제안하였다.

5) 시범지역에 대한 토양특성 및 오염부피를 산정한 결과 유류오염지역의 토성은 Sandy clay loam(사질 식양토)와 Sandy loam(사양토)으로 분류되었으며, 총질소 농도는 57.012 mg/kg, 총인은 83.397 mg/kg, 유류분해미생물은 1.78×10^4 (CFU/g dry soil), 정화대상 토량은 4,092 m³으로 산정되었다.

6) 시범적용지역의 모든 오염토양을 토양경작장(15 m(가로) × 40 m(세로))에서 1 m 높이로 적치하여 정화할 경우 약 9배치로 처리가 가능한 것으로 평가되었다. 오염토양 1 배치의 처리기간은 35일이 소요될 것으로 판단되며, 대상 지역의 모든 오염토양은 토양경작법으로 처리하는 경우 총 315 일이 소요될 것으로 예상된다. 오염토양의 정화를 위해 필요한 미생물계제의 양은 4,025 L이며, 요소비료는 총 4,642 kg가 소요될 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 환경부, 한국환경산업기술원의 토양·지하수 오염방지기술개발사업(GAIA Project) (RE201202062) 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

Reference

1. Kim, J. W., Choi, S. I., Yang, J. K. and Kim, B. K., "Improvement of landfarming applicability from analysis of cast studies," *J. Soil Groundwater Environ.*, **15**(1), 19~28 (2010).

2. Ju, W. H., Choi, S. I., Kim, J. M., Kim, B. K., Kim, S. G., and Park, S. H., *J. Soil Groundwater Environ.*, **14**(4), 15~22(2009).
3. Lee, G. S., Kim, Y. B., Jand, J. S., Um, J. Y., Song, S. H., Kim, E. Y., *J. Soil Groundwater Environ.*, **17**(1), 13~21 (2012).
4. MOE, The Plan to Enhance Competitiveness of Soil Remediation Industry, 112~116(2010).
5. Seo, Y. S. Choi, S. I., Kim, J. M., Kim, B. K., Kim, S. G., Park, S. H. and Ju, W. H., "Full-scale soil washing and non-discharged washing water treatment process of soil contaminated with petroleum hydrocarbon," *J. Soil Groundwater Environ.*, **14**(1), 61~67(2009).
6. Park, E. R., Lee, K. R., Seo, C. I. and Cho, C. H., "A field study on the evaluation of slurping and bioaugmentation effect in petroleum contaminated area," *J. Soil Groundwater Environ.*, **17**(3), 32~38(2012).
7. MOE, Soil Remediation Method Guideline, Gwachun, pp. 75~88(2007).
8. Jeong, S. W., An, Y. J. and Lee, B. J., Soil Remediation Engineering, Dongwha Publication Inc., Gyonggi-Do, pp. 250~251(2012).