

토양경작법의 사례 분석을 통한 적용방안 개선

김종원¹ · 최상일^{1*} · 양재규² · 김보경¹

¹광운대학교 환경공학과, ²광운대학교 교양학부

Improvement of Landfarming Applicability from Analysis of Case Studies

Jong-Won Kim¹ · Sang-Il Choi^{1*} · Jae-Kyu Yang² · Bo-Kyung Kim¹

¹Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

²Division of General Education, Kwangwoon University

ABSTRACT

Considering six screen matrix to select an optimum remediation method for the Kunsan military base contaminated with petroleum oil, the following order was obtained: landfarming > biopile > soil washing > thermal desorption ≈ incineration. When the landfarming method was applied for the remediation of 2,250 m³ soil contaminated with petroleum oil ranging from 500 to 2,404 mg/kg as TPH, contamination level decreased below target concentration 450 mg/kg after 20~42 days depending on the initial contamination. From the evaluation of case studies of landfarming, it is suggested that ratty-truss or single-arch structure is suitable in the landfarming plant for the treatment of large-scale contaminated soil requiring long period of remediation. But, vinyl-house structure is suitable in the landfarming plant for the treatment of small-scale contaminated soil requiring short period of remediation. Therefore vinyl-house structure is recommended in the remediation of contaminated soil less than 5,000 m³ requiring within 1 year of remediation period but ratty-truss or single-arch structure is recommended for the remediation of contaminated soil more than 5,000 m³.

Key words : Soil Contamination, Oil, Remediation, Landfarming, Design

1. 서 론

1995년 토양환경보전법 제정으로 국내에서 오염된 토양에 대한 정화가 본격적으로 시작되었다. 초기 오염토양 정화는 대부분 정유소 및 주유소를 중심으로 이루어졌고, in-situ 방법을 적용한 오염토양 정화가 주를 이루었다(한국지하수토양학회, 2003). 오염된 토양 정화의 활성화 과정에서 오염물질 및 토양특성에 따른 난분해성 및 불균질성 등에 따른 in-situ 방법은 적용에 한계를 보였다. 특히 토양환경보전법 상 '가 지역'의 경우 in-situ 방법의 적용 한계가 분명하게 나타나 ex-situ 방법의 적용에 대한 수요가 증가되었다. 최근 군부대, 산업단지, 반환미군기지 등 대규모 토양오염 정화에 있어서 ex-situ 방법이 다수 적용되고 있다(한국지하수토양학회, 2003). 오염토양 정화가 대규모화되면서 정화방법을 적용하기 위한 시설물(Plant)

의 규모 역시 커지고 있고, 이들에 대한 제작·설치비용 역시 사업비에 큰 영향을 미치고 있다. 현재 오염토양에 대한 정화 사례가 적고 대부분 정화 당사자들의 이해관계에 따른 보안사항들이 있어 자료의 축적에 대한 한계가 있으나 정화방법 적용 시 시설물을 최적화시킬 수 있는 효율성 연구가 필요해지고 있다.

오염된 토양의 정화는 오염 규모, 대상 부지 특성, 적용된 정화방법의 효율성 등을 종합적으로 검토하여 합리적 적용에 대한 검증이 필요한 실정이다. 현재까지의 정화방법은 사업기간과 정화비용의 큰 테두리에 각종 시설물들을 끼워 넣는 방법으로 계획되어져 왔고, 일부 지역에서는 정화 비용이 낮거나 높게 책정되어져 어렵게 오염토양 정화가 수행된 경우도 있었다. 오염토양 정화의 규모가 점점 커지고 있는 시점에서 앞에서 이야기한 정화방법 적용에 불합리한 점들을 해결하고 오염토양 정화의 신뢰도를

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2009. 8. 7 심사일 : 2009. 8. 17 게재승인일 : 2009. 10. 21

질의 및 토의 : 2010. 4. 30 까지

확보하기 위해서는 정화 비용의 낮은 책정 또는 높은 책정이 없어야 할 것이고, 이러한 점을 극복하기 위해서는 오염토양 정화방법의 효율적 적용에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것이다. 특히 오염된 토양의 정화 방법 중 토양경작법은 2000~2006년까지 전체 공법 적용률 중 11.2%로 가장 많이 적용되는 토양정화 방법으로 정화공정을 수립하여 적용하는데 가장 위험도가 낮은 방법 중의 하나이나, 토양오염 정화 계획 수립 시 이에 대한 효율적 적용에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다(환경부 토양지하수과, 2007). 바이오파일법 역시 현재까지 많이 쓰고 있는 공법이나 정화효율이 토양경작법에 비해 떨어져 2000~2006년까지 적용된 실적을 비교해 보면 1.1%의 사용실적을 보이고 있다(환경부 토양지하수과, 2007). 따라서 본 연구에서는 토양경작법과 바이오파일법에 대한 효율적 적용의 방향을 제시하고, 토양오염 정화사업 종사자들이 오염토양정화 계획 수립 시 효율적 적용 검토에

활용할 수 있는 토대를 마련하는데 목적을 두고 전라북도 군산시 소재 '군산기지 외부 유류오염지역 토양정화사업' 시 오염토양 정화를 위한 효율적인 처리공법 선정을 실시하였고 이를 토대로 하여 제시된 토양경작법(Landfarming)의 적용결과를 제시하였다. 그리고 2000년부터 최근까지 이루어진 국내의 토양경작법 사례들을 조사 평가하여 년도별 비용증가와 관련한 상관관계식을 도출하였으며 경작기간 및 경작물량별 최적 구조물을 제안하고자 하였다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1. 연구 내용

연구 대상 지역은 전라북도 군산시 소재 군산기지 외부 유류오염지역으로 하였고, 연구 내용은 목적에 부합되도록 다음의 5가지로 구분하여 조사하였다. 첫째, 오염지역의 각종 현황 자료를 수집하여 토양오염 사고의 경위 등

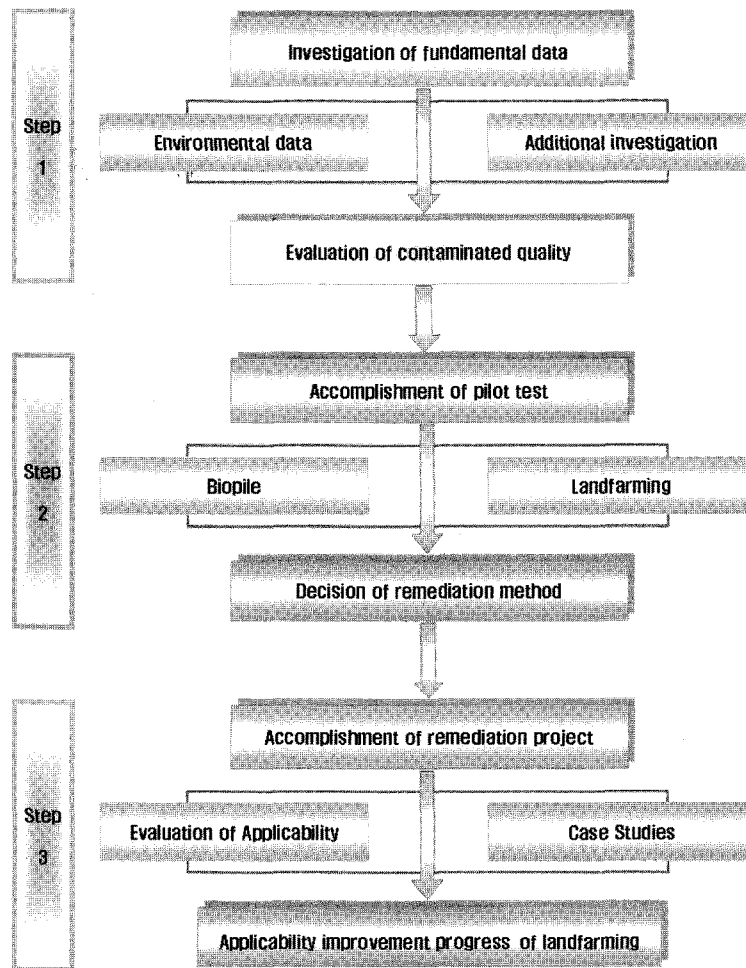


Fig. 1. Procedure of research accomplishment.

을 분석하고, 환경관련 문서 검토 및 관계자 인터뷰를 통하여 오염원의 확인을 실시하였다. 둘째, 대상 지역의 지질 특성 및 토양의 물리·화학·생물학적 특성을 조사하였다. 셋째, 정화 기간 내에 오염토양을 정화할 수 있는 최적의 정화방법을 결정하였다. 넷째, 선택한 정화방법을 현장에 적용하여 정화효율을 확인하였다. 다섯째, 타 지역에서 설계·수행된 정화사례 검토를 통한 적용성을 평가하였다. 대상지역에 적용한 정화방법과 타 지역에서 적용한 정화방법과의 시공성, 안정성, 경제성 등을 비교 평가하여 향후 정화방법 선정 시 지침이 될 수 있는 방안을 제시하였다.

2.2. 연구 방법

연구 방법은 총 3단계로 계획하였다. 1단계에서는 대상 부지의 전반적인 특성을 확인하는 작업과 오염원 및 오염 토양의 분포 현황을 파악하였다. 2단계에서는 적용성시험 등을 통해 대상 부지의 토양오염 정화방법을 결정하였고, 3단계에서는 토양정화사업을 직접 수행하여 그 적용결과를 확인하였고 적용사례와 비교 검토하여 효율적 토양오염 정화방법 선정방안을 제시하고자 하였다. 연구단계별 수행은 Fig. 1에 나타내었다.

2.3. 적용성 시험 방법

유류오염 토양에 효율이 우수한 것으로 알려진 바이오파일법과 토양경작법의 실증시험을 통해 최적의 정화 공법을 선정하고 적정 정화기간 및 주요 정화인자를 결정하고자 하였다.

바이오파일 실증시험에 이용된 장치는 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. 지속적인 공기주입을 위하여 실내에서 실험을 실시하였다. 밀폐형 반응기(0.25 mW × 0.25 mB × 0.5 mH; 31 L)에 유공관을 설치하여 공기주입을 적절히 할 수 있

도록 공기압축기를 이용하였다. 또한 각반응기에 유량계를 설치하여 주입공기량을 제어하였다. 운전조건은 미생 물체재농도를 유류분해균수 1×10^6 CFU/g-soil로, 함수율은 약 20~30% 내외로, 영양제 투입비는 C:N:P=100:10:1로 설정하였다. 초기 오염농도는 2,000 mg/kg의 오염토로 결정하였다. 송풍량의 경우 일정한 기준이 없어 부산D지역(바이오파일사례 3,500 m³ 정화시 10 m³/hr 송풍)을 모델로 선정하였는데, 이것은 너무 과하게 송풍된 것으로 판단하여 송풍 조건을 4가지로 하향 조정하여 실험을 실시하였습니다. 조건 I은 2.5 L/min, 조건 II는 1.25 L/min, 조건 III은 0.6 L/min 그리고 조건 IV는 0.3 L/min로 설정하였습니다.

토양경작법 시험은 정화사업지의 비오염구역에 소규모 시험장을 설치하여 실시하였다. 비오염부지내에 가로 세로 각 0.4 m의 구역을 6구역으로 설정하여 차수매트를 포설하고 높이 0.4 m가 되도록 오염토를 충전하고 각각의 운전조건에 부합되도록 조정하였다. 현장적용 효율의 정확성을 높이기 위하여 우천시 우수가 유입되지 않도록 현장적용시험장의 상부에 비 가림시설을 설치하고, 또한 현장적용시험장으로 우수유출수가 유입되지 않도록 Fig. 3에 나타난 것처럼 현장시험장의 주변에 우회수로를 설치하였다. 경작 조건은 오염토 단독, 오염토 + 미생물(I), 오염토 + 미생물(II), 오염토 + 미생물(III), 오염토 + 미생물(III) + 영양제, 오염토 + 미생물(IV) + 영양제로 총 5가지 조건을 주어 실증시험을 수행하였다. 운전은 조건 I(1×10^3 CFU/g-soil), 조건 II(1×10^4 CFU/g-soil), 조건 III(1×10^5 CFU/g-soil), 조건 IV(1×10^6 CFU/g-soil)의 유류분해균수를 투입하여 운전하였다. 기타, 함수율은 약 $20 \pm 5\%$ 내외로, 영양제 투입비는 C:N:P=100:10:1로, 초기 오염농도는 2000 mg/kg로, 경운 주기는 1주일 당 2회로 조정하여 운전하였다.

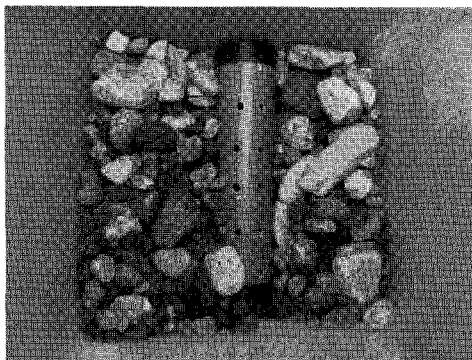
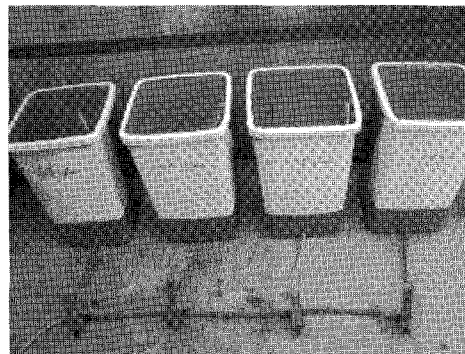
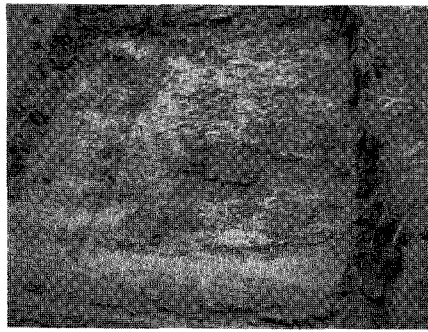
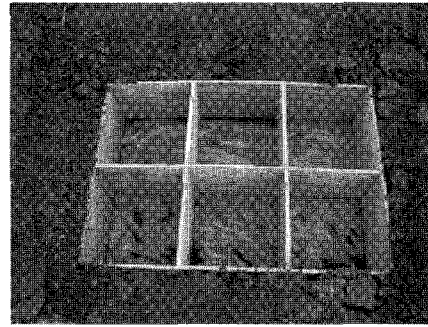


Fig. 2. Pilot test of biopile.

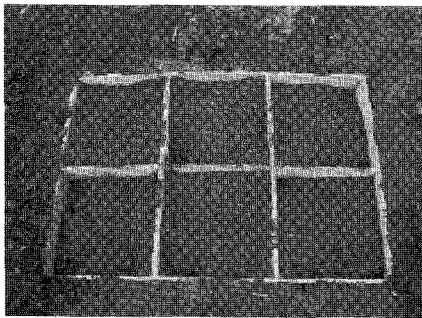




a) Contaminated soil



b) Test pit



c) Setting of the contaminated soil



d) View of the completed setting

Fig. 3. Pilot test of landfarming.

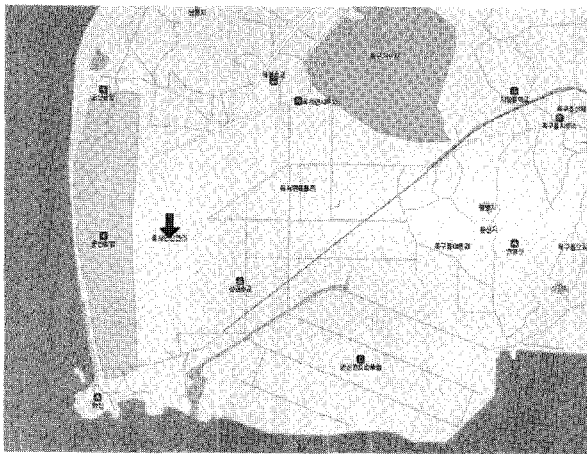


Fig. 4. Map of the contaminated site.

3. 결과 및 고찰

3.1. 대상지역 현황 및 오염도 조사 결과

대상 지역이 위치한 군산시의 총 면적은 약 390.9 km²이다. 군산시는 호남평야 북서부 말단, 금강 하구 좌안(남안)에 있으며, 동쪽은 익산시, 북쪽은 금강을 사이에 두고 충청남도 서천군, 남쪽은 만경강을 경계로 김제시와 접하

고, 서쪽은 서해에 접한다. 대상 지역은 Fig. 4에 나타난 것과 같이 전북 군산시 옥서면 선연리 464번지 미공군기지 주변이며, 대상면적은 약 9,000 m²이다. 현재 옥서면의 총 세대수는 2,103세대, 총 인구수는 6,004명이며, 대상 지역의 서쪽과 남쪽은 군산비행장과 접하고 있으며, 동쪽과 북쪽은 대부분 농지이다(군산시청, 2008).

토양오염 개연성이 있는 지역은 9,000 m²으로 추정하였다. 토양환경정보전법에 의하면 오염면적이 9,000 m²인 경우 적정 토양 시료채취 지점수는 50지점이다. Table 1과 Fig. 5는 정밀조사 결과를 통하여 얻어진 토양오염도 조사 결과를 나타낸다.

3.2. 오염 특성 평가

3.2.1. 오염물질 성분 특성

대상 지역에 오염된 유류의 종류를 파악하고자 토양의 가스크로마토그래피 분석 결과인 크로마토그램(Chromatogram)을 비교, 분석하였다. Fig. 6은 대상지역 토양에 오염된 유류의 크로마토그램으로서 휘발성 성분이 상당량 포함되어 있는 것으로 판단되었다. 기지 내부에서 사용된 유류는 1989년까지 JP-4였으며, 그 후로는 JP-8를 사용한 것으로 알려져 있다(환경관리공단, 2005). JP-4는 JP-8에

Table 1. TPH contamination at various soil depth (additional survey)

| Depth (m) | Above 400 mg/kg | | |
|----------------|------------------------|--------------------------|-----------|
| | Area (m ²) | Volume (m ³) | Ratio (%) |
| 0~1.0 (Zone B) | 798.24 | 798.24 | 52.9 |
| 0~2.0 (Zone A) | 710.45 | 1420.9 | 47.1 |
| Total | 1,508.69 | 2,219.14 | 100 |

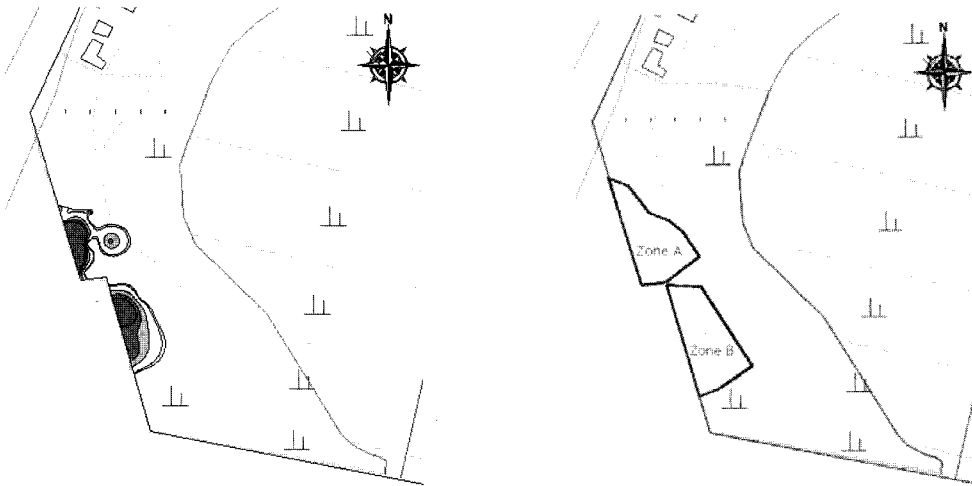


Fig. 5. Map of the contaminated area (left : survey synthesis, right : sector division).

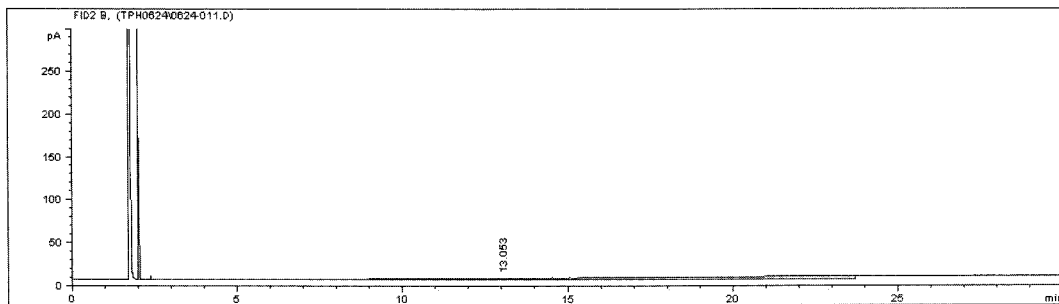


Fig. 6. A chromatogram of contaminated soil (TPH).

비해 휘발성 성분이 상대적으로 많이 포함되어 있는 것으로 알려져 있다. 크로마토그램에 의하면 대상 지역의 유류성분은 JP-4뿐만 아니라 휘발유 성분도 복합적으로 혼재되어 있는 것으로 판단된다.

3.2.2. 지화학적 특성

오염토양의 대표 시료를 이용하여 수행된 지화학적 특성 분석 결과, 농경지 지력 현황에 대한 기준(조성진 등, 2002)과 비교해 보았을 때, 평균 pH는 5.48로 적정 수준 6.5보다 다소 낮은 것으로 나타났으며, 인산함량의 경우 평균 2.96으로 적정 수준 100~300보다 낮은 것으로 나타

났다. 양이온교환능 역시 평균 10.69 cmol/kg으로 적정수준 15 mg/kg보다 작게 얻어졌고, 유기물량의 수준도 작은 것으로 나타나서 오염토양은 논 또는 밭으로 이용되기에는 다소 부적합 것으로 평가되었다.

3.3. 정화방법 도출

토양오염 정화 계획은 정화기간, 부지 특성 등을 고려하여 다음과 같은 필요충분조건을 만족하는 공법을 우선 적용하려고 계획하였다. 첫째, 오염지역이 농경지인 점을 감안하여 표토와 심토를 굴착한 후 정화할 수 있는 지상처리공법을 적용한다. 둘째, 오염도 조사에서 오염특성 및

Table 2. Screen Matrix for the selection of full-scale remediation method for oil contaminated soil

| Remediation method | Commercialization | Reliability | Capital | Period | Treatment | Applicability | Remark |
|--------------------|-------------------|-------------|---------|--------|-----------|---------------|--|
| Biopile | ● | ● | ● | ○ | ● | ○ | Long period of remediation |
| Landfarming | ● | ● | ○ | ● | ● | ● | Construction, economical efficiency excellence |
| Soil washing | ● | ● | △ | ● | ● | ○ | Expensive initial investment |
| Thermal desorption | ○ | ● | △ | ● | ● | △ | “ |
| Incineration | ○ | ● | △ | ● | ● | △ | “ |

*● : Good, ○: Normal, △: Bad

* : Zone of possibly applicable method

부지특성 등 효율적 정화에 필요한 자료를 최대한 반영하여 공법 선정 및 정화계획을 수립한다. 셋째, 정화방법 계획에서 불필요한 공정을 최소화하고 최대오염구간을 집중적으로 처리한다. 넷째, 토양정화가 단시일 내에 가능한 방법을 적용한다.

위 조건에 만족하는 정화방법을 검토해 본 결과 Table 2에서(이민호 등, 2006) 보듯이 총 6개항의 분석 기준을 적용하여 검토하여 본 결과 토양경작법 > 바이오파일법 > 토양세척법 > 열탈착법 ≈ 소각법 순서로 나타났다. 이에 정화 효율이 가장 우수한 토양경작법과 바이오파일법을 우선 선정하였다.

3.4. 실증시험 및 정화방법 결정

군산기지 외부 유류오염지역의 정밀조사 시에 위에서 제시된 바이오파일법과 토양경작법에 대한 실증시험을 실시하여 최적정화공법을 선정하도록 하였다. 실증시험 대상 토양은 오염토양 중 대부분을 차지하는 평균입도 분포가 모래 41.17% 실트 28.17%, 점토 30.66% 정도의 미세토가 많이 함유된 오염토를 대상으로 실시하였다. 바이오파일 실증시험 결과는 Fig. 7과 같이 얻어졌는데, 공기 주입량을 0.3 m³/hr에서 2.5 m³/hr까지 8배 정도 차이를 두고 주입하였으나 정화효율에 미치는 영향은 거의 없었다. 실증시험 4주의 기간 동안 매주 124 mg/kg의 TPH가 감소되어, 4주 후 TPH는 28%가 저감된 약 1,447 mg/kg으로 정화되었다. 이러한 낮은 정화효율은 초기 미생물과 영양제 성분추가시의 고함수(수분함량 21.01%) 조건과 미세토가 많아 공기투과성이 낮아 나타난 결과라고 판단된다.

토양경작 시험결과는 Fig. 8과 같이 나타났는데, 정화효율은 미생물 주입농도에 비례하여 증가하지는 않고 10⁵ CFU/g 전후로 크게 양분되는 양상을 보였다. 즉 10⁵ CFU/g보다 낮은 경우에는 미생물 주입농도가 100배 변화함에도 TPH 제거율은 유사하게 얻어졌다. 반면 10⁵

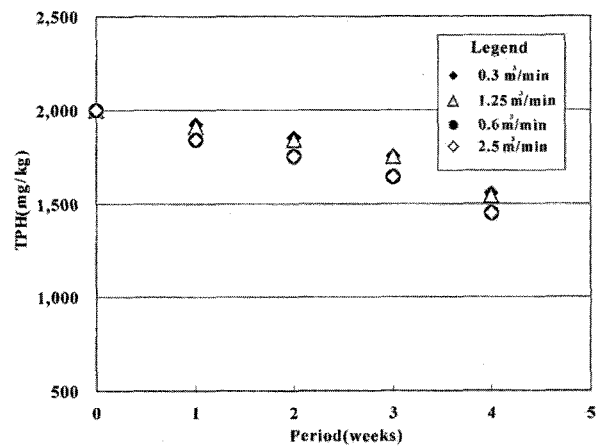


Fig. 7. Result of the Biopile test.

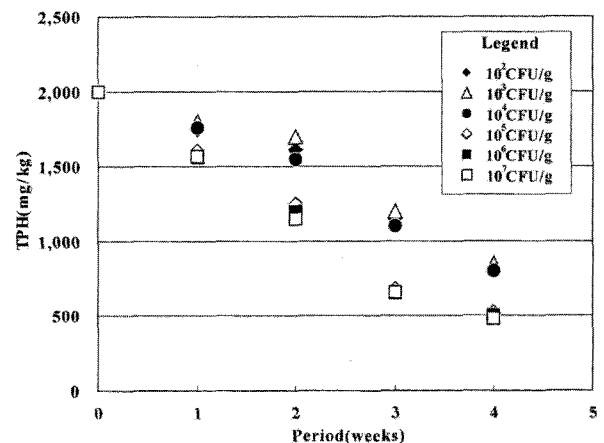


Fig. 8. Result of the landfarming test.

CFU/g 이상 주입시 TPH는 매주 평균 413.7 mg/kg의 저감속도를 보여서 10⁵ CFU/g 보다 낮은 농도에서의 TPH 제거율보다는 크게 얻어졌으나 역시 미생물 주입농도를 10⁷ CFU/g까지 100배 변화시켰으나 제거율은 유사하게 얻어졌다. 이러한 현상에 대한 원인 규명은 본 연구에서는

이루어지지 못하였다.

실증시험을 적용한 바이오파일법과 토양경작법에 의한 최고 정화효율을 나타낸 조건에서의 실험결과를 Fig. 9에 나타난 바와 같이 토양경작법에 의한 정화효율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 바이오파일법의 경우 공기를 강제 주입하였지만, 미세토양에 의한 영향으로 유로가 형성되어 주입된 공기가 오염토양 전체에 공급되는 것이 제한적이었기 때문에 정화효율이 낮게 나타났다고 판단된다. 한편 토양경작의 경우 주기적(주 2회)으로 인력에 의한 경

운을 실시하였기 때문에 미세토가 많이 함유된 오염토가 이완되어 공기와의 접촉이 원활히 이루어졌고, 이완된 틈으로의 미생물 증식이 원활히 이루어졌으며, 미생물의 증식에 따른 유류분해가 급속히 이루어져, 정화 효과가 바이오파일법에 비해 상대적으로 높게 분석결과가 나왔다고 판단된다. 미세토가 많이 함유된 군산기지와 같은 오염토에서는 입단을 부술 수 있는 토양경작법이 정화공정에 보다 더 적합한 것으로 판단되므로, 군산기지의 토양정화공법은 토양경작법이 적합한 것이라고 사료된다.

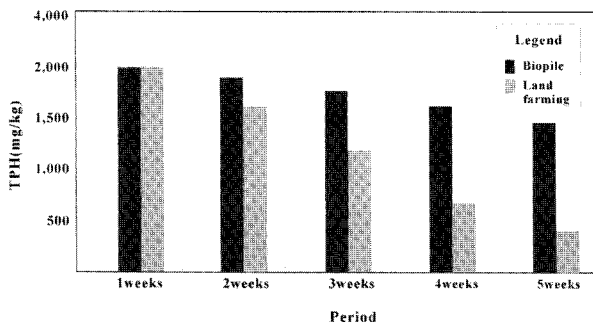


Fig. 9. A comparison between Biopile and landfarming.

3.5. 토양 정화사업 수행

토양경작장 시설물의 설치사양은 크기가 12 m(W) × 40 m(L) × 4.8 m(H)로, 작업가능 높이 4.2 m, 경작토 상부 여유공간 3.4 m로 설치하였다. 시설물 수량은 2개동으로, 오염토 경작높이가 1.04 m의 두께를 유지하도록 하였다. 토양경작장 구조는 내재해형 비닐하우스구조(온실형 토양경작장)로, 강우 시 침출수 발생을 방지하고 동절기 기온강하에 의한 처리효율 저하를 사전에 방지하기 위해 비닐하우스 형태로 설계하였으며, 토양경작장 바닥은 토사의 2

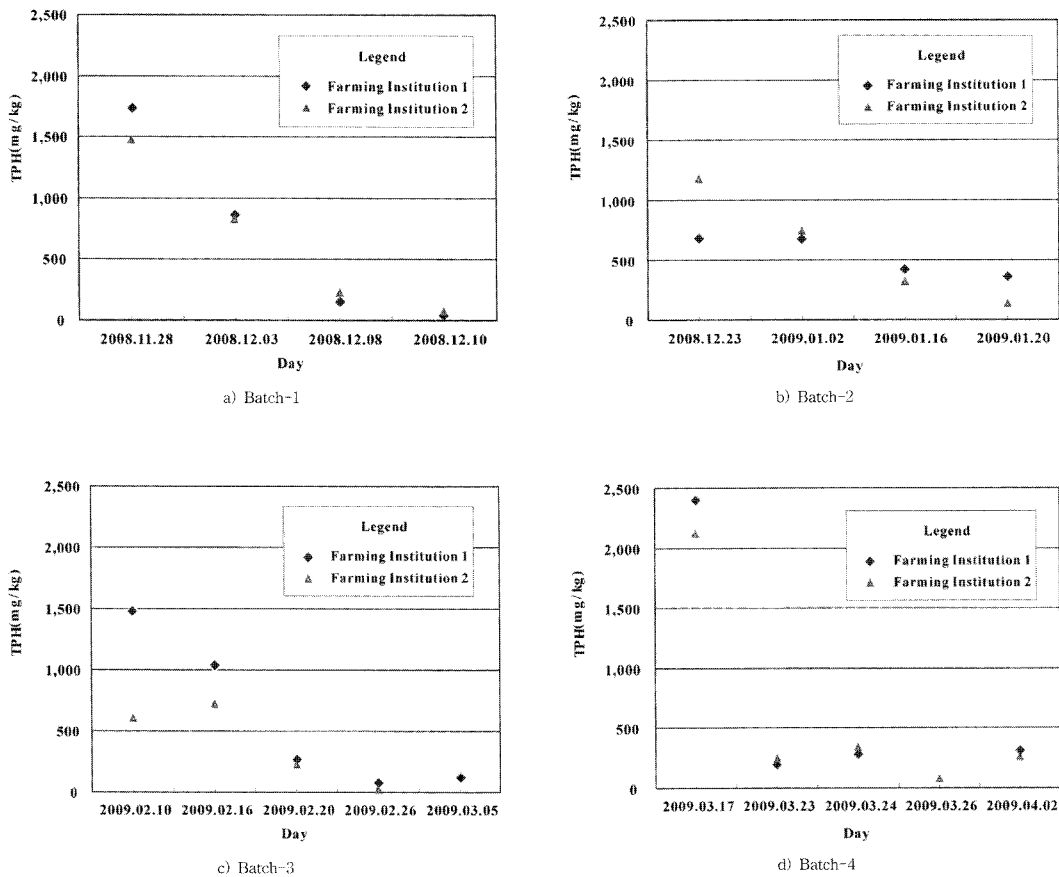


Fig. 10. Removal of TPH during the landfarming monitoring.

차 오염을 방지하기 위해 차수성 재질의 방수시트와 이를 보호하기 위한 부직포를 포설하였다. 또한 군산지역의 최대풍속(40 m/sec 이상)과 최심적설량(40 cm 이상) 등을 고려하여 농림부에서 고시된 내재해형 구조의 토양경작장을 설치하였다. 경작단은 양단에서 토사가 흘러내리지 않고 사면을 유지할 수 있는 안식각을 형성하는 기울기를 갖도록 오염토사를 쌓아 경작을 수행하였다. 또한 비닐하우스 내부의 유해가스 제거를 위해 배기가스 처리장치를 설치하였고, 겨울철 보온을 위해 난방시스템을 추가로 설치하였다. 경작대상토량은 전체 오염토인 2,250 m³로, 총 4개의 batch로 운영하였다. 경작기간(약 4개월, 총 4 batch) 동안의 오염토양의 TPH 모니터링 결과는 Fig. 10에서 보듯이, 반입농도는 500 mg/kg 이상 농도로 최대 2,404 mg/kg의 오염토가 반입되었고, 오염도에 따라 정화목표인 450 mg/kg 이하로의 경작기간은 최소 7일에서 최대 30일 까지 각각 다르게 나타났으나 모든 경우에서 30일 이후에는 정화 목표치 이하로 정화할 수 있었다.

3.6. 토양정화방법 적용사례 평가 및 최적 조건 제시

과거 적용되었던 사례를 통해 토양경작법의 설치 및 운영에 대한 비용의 적용에 대한 변천과정과 이를 토대로 경제적 적용성에 대한 평가를 수행하였다. 비교검토 조건

은, 1) 토양경작장 시설의 설치비, 2) 토양경작장 순수 운영비, 3) 토양경작장 운영에 필요한 부대시설 비용 검토 제외 그리고 4) 모니터링비용 검토 제외 등이었다. 이와 같은 조건을 고려하여 과거 토양경작이 이루어진 부지에서 토양경작장 구조에 따른 오염토양 정화사업 수행 현황을 Table 3에 기술하였다. 이들 부지에 대한 자세한 사항은 사업의 특수성 및 민원에 의한 보완 준수에 따라 익명으로 처리하였다.

3.6.1. 토양경작장 시설비

일반적으로 레티트러스구조의 토양경작시설과 원형단동구조의 토양경작시설의 설치 비용은 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 설치비용이 요구된다. Table 4에서 보듯이 레티트러스구조, 원형단동구조의 설치비는 비닐하우스구조에 비해 약 300~900% 정도로 고비용인 것으로 나타났다. 비닐하우스구조는 레티트러스구조에 비해 19.4~32.5%의 비용으로, 원형단동구조에 비해 11.0%의 비용으로 설치가 가능하였다. 비닐하우스구조의 경우 옹벽 기초의 부재로 인해 장기 사용시 비탈림이 발생, 지표수의 유입에 따른 2차 오염 확산의 가능성이 있다. 군산 C7지에서의 설치 사례로 볼 때 돌풍이나 적설량이 클 경우 비닐하우스구조의 변형이 발견되어 장기간 설치에는 다소 무리가 있을

Table 3. Case studies of landfarming

| Classification | | Chunchon A Site | Wongju B Site | Kunsan C Site | Pusan D Site | Inchon E Site |
|--|-----------|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| Landfarming Plant Area (m ²) | | 15 × 80 | 12 × 120 | 10 × 55 | 15 × 110 | 20 × 120 |
| Structure | | Ratty-Truss | Ratty-Truss | Vinyl-House | Ratty-Truss | Single-Arch |
| Quantity (Plant) | | 1 | 3 | 2 | 4 | 11 |
| Treatment (m ³ /batch) | | 746 | 2,784 | 734 | 2,513 | 29,284 |
| 1 batch Period (day) | | 45 | 33 | 30 | 49 | 42 |
| Total batch | | 16 | 21 | 4 | 12 | 11 |
| Total period (day) | | 720 | 693 | 135 | 582 | 465 |
| Design (year) | | 2005 | 2006 | 2008 | 2000 | 2007 |
| Expense (won) | Building | 133,583,520 | 558,042,469 | 72,264,697 | 517,197,931 | 5,995,083,701 |
| | Operating | 249,909,131 | 633,970,374 | 73,704,547 | 1,032,092,779 | 9,164,564,388 |
| | Total | 383,492,651 | 1,192,012,843 | 265,969,244 | 1,549,290,710 | 15,159,648,089 |

Table 4. Building cost of landfarming plant

| Region | Design (year) | Structure | Specifications (m) | Quantity (Plant) | Building cost (won/m ²) |
|-----------------|---------------|-------------|--------------------|------------------|-------------------------------------|
| Chunchon A Site | 2005 | Ratty-Truss | 15 × 80 | 1 | 111,320 |
| Wongju B Site | 2006 | Ratty-Truss | 12 × 120 | 3 | 129,176 |
| Kunsan C Site | 2008 | Vinyl-House | 10 × 55 | 2 | 25,092 |
| Pusan D Site | 2000 | Ratty-Truss | 15 × 110 | 4 | 78,363 |
| Inchon E Site | 2007 | Single-Arch | 20 × 120 | 11 | 227,087 |

Table 5. Operating cost of landfarming plant

| Region | Design (year) | Total treatment volume (m ³) | Operating cost (won/m ³) |
|-----------------|---------------|--|--------------------------------------|
| Chunchon A Site | 2005 | 11,940 | 20,930 |
| Wongju B Site | 2006 | 56,074 | 11,306 |
| Kunsan C Site | 2008 | 2,431 | 30,319 |
| Pusan D Site | 2000 | 29,825 | 34,605 |
| Inchon E Site | 2007 | 323,990 | 28,287 |

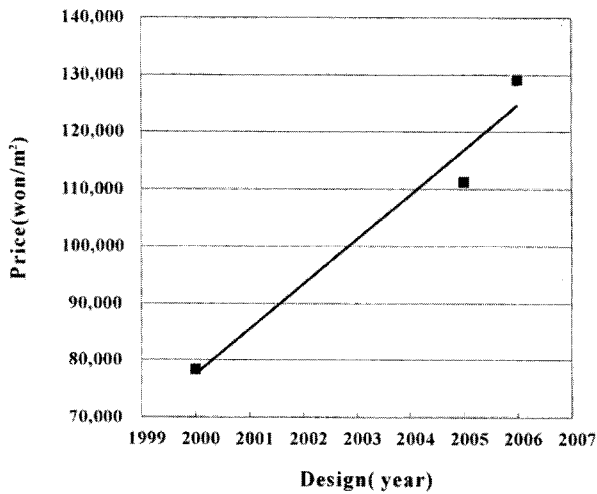


Fig. 11. Building cost of landfarming plant (Ratty-Truss).

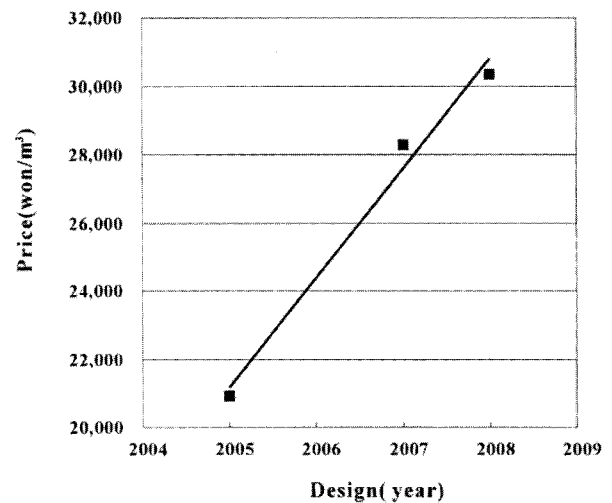


Fig. 12. Operating cost of landfarming plant.

것으로 사료된다. Table 4와 Fig. 11에서 보듯이 매년 토양경작장 시설물 설치비는 증가를 보였다. 이를 년도별 토양경작장 시설물 설치단가 대비표로 나타냈고, 동일 구조인 레티트러스구조의 사례에 대한 회귀분석 결과 다음과 같은 선형 상관관계식이 도출되었다.

$$y = 7863.2x - 2 \times 10^6 \quad (1)$$

여기서 x는 정화 계획년도이며 y는 레티트러스 구조의 토양경작장 설치비(원/m²)를 나타낸다. 이는 신뢰도로 표현하면 96.15%로 통계분석을 하기에는 수집된 자료의 수량이 작아 발생하는 것으로 판단된다. 결론적으로 년도별 설치비용은 계속적으로 증가되므로 차후 토양경작법에 의한 정화 계획 수립 시 이러한 점을 통계학적으로 분석하여 보다 논리적이고 타당한 시설물 설치비를 산정해야 할 것으로 판단되었다.

3.6.2. 토양경작장 운영비

토양경작장 운영비는 원주 B부대를 제외하고는 대부분 20,930~34,605 원/m³ 정도로 나타났다. 부산 D정비창의 경우 운영비용이 34,605 원/m³로 타 부지에 비해 크게

나타났다. 이는 우리나라에 토양경작법이 대규모로는 처음 적용된 사례인 특수성에 의해 발생된 것으로 사료된다. Table 5와 Fig. 12에서 보듯이 매년 토양경작장 운영비는 증가를 보였다. 이를 년도별 토양경작장 운영비 단가 대비표로 나타냈고, 회귀분석을 수행해 본 결과 다음과 같은 적용식이 도출되었다. 토양경작법 초기 사업인 부산 D정비창은 다양한 방법의 적용에 따른 운영비용의 증가분이 있었고, 원주 B부대 토양경작장 운영비는 과소비용이 책정되었으므로 제외하였다.

$$y = 3207.8x - 6 \times 10^5 \quad (2)$$

여기서 x는 정화 계획년도이며 y는 토양경작장 운영비(원/m³)를 나타낸다. 직선의 상관관계계수(r²)는 0.9841로 얻어졌다.

앞에서 언급하였듯이, 대규모 오염토양을 처리하고 정화기간이 장기간 일 경우 토양경작장의 시설물은 레티트러스구조나 원형단동구조가 적합하고, 소규모 오염토양을 처리하고 정화기간이 짧은 경우에는 시설물 설치비용의 최적화를 위해 비닐하우스구조를 적용하는 것이 바람직한 것을 알 수 있었다. 따라서 토양경작장 시설물은 정화기

간이 1년을 넘지 않고 경작물량이 약 5,000 m³ 이하 일 경우에는 W10 m × L50 m × H8 m 정도의 비닐하우스구조를, 그 이상일 경우에는 보다 견고한 15 m × 100 m × H8 m 정도의 레티트러스구조나 원형단동구조를 추천한다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양지하수복원관리 환경기술교육 혁신지원사업단”의 지원을 받은 과제입니다.

4. 결 론

본 연구결과 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1) 비닐하우스구조의 토양경작법으로 전체 오염토인 2,250 m³로, 총 4 batch를 운영해본 결과, 약 4개월의 경작기간 동안 반입농도는 500 mg/kg 이상에서 최대 2,404 mg/kg으로 오염도가 반입되었고, 오염도에 따라 정화목표인 450 mg/kg 이하로의 경작기간은 최소 7일에서 최대 30일까지 각각 다르게 나타났으나 모든 경우에서 30일 이후에는 정화 목표치 이하로 정화할 수 있어, 점토질 토양이 다소 많이 분포하는 지역에서 휘발성이 강한 유류(항공유)의 정화에 토양경작법이 적정함을 알 수 있었다.

2) 토양경작법에서의 기초 시설인 토양경작장의 구조물 설치비용 조사 결과, 레티트러스구조 및 원형단동구조의 설치비는 비닐하우스구조에 비해 약 300~900% 정도로 고비용인 것으로 나타났다. 즉 비닐하우스구조는 레티트

러스구조에 비해 19.4~32.5%의 비용으로 그리고 원형단동구조에 비해 11.0%의 비용으로 토양경작장 시설물 설치가 가능함을 알 수 있었다.

3) 사례로 본 비닐하우스구조 토양경작장의 경우 약 4개월간 2,250 m³의 오염토량을 정화하였고, 1년간 처리한다고 가정한다면 6,750 m³ 정도의 오염토양을 처리할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 토양경작장 시설물의 시공성, 경제성, 안정성 등을 고려하면 비닐하우스구조로 약 5,000 m³은 처리가 가능할 것으로 판단된다.

4) 정화기간이 1년을 넘지 않고 경작물량이 약 5,000 m³ 이하일 경우에는 W10 m × L50 m × H8 m 정도의 비닐하우스구조가 가장 효율적인 토양경작장 시설물인 것으로 판단되고, 정화기간이 1년을 넘기고 경작물량이 약 5,000 m³ 이상일 경우에는 보다 견고한 15 m × 100 m × H8 m 정도의 레티트러스 구조나 원형단동구조가 가장 효율적인 토양경작장 시설물인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 군산시청, 2008, 군산시 통계연보(<http://www.gunsan.go.kr/>)
- 이민효, 최상일, 이재영, 이강근, 박재우, 2006, 토양지하수환경, 동화기술.
- 환경관리공단, 2005, 토양환경조사 보고서, 행정간행물.
- 한국지하수토양환경학회, 2003, 토양환경공학, 향문사.
- 환경부 토양지하수과, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인, 행정간행물.