

대규모 유류오염부지에 적용된 토양경작법의 정화효율 평가

주원하¹ · 최상일^{2*} · 김종민² · 김보경² · 김성규² · 박상현²

¹환경관리공단 토양지하수사업처, ²광운대학교 환경공학과

Evaluation of the Large Scale Petroleum-Contaminated Site for the Remediation of Landfarming

Weon-Ha Ju¹ · Sang-II Choi^{2*} · Jong-Min Kim² · Bo-Kyung Kim²
Sung-Gyoo Kim² · Sang-Hean Park²

¹Department of Soil and Groundwater, Environmental Management Corporation

²Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

The remediation efficiency for a large scale petroleum-contaminated site was evaluated by using the Engineered Landfarming system which consists of the following parameters; moisture & nutrient injector data, blower system, HDPE sheet and sump system. To enhance the degradation ability in the early stage, main nutrients such as nitrogen (N) and phosphorus (P) were adjusted for the site condition. As a result of the periodic tilling process, the concentration of contaminated soil was decreased to 348 mg/kg, which was lower than 500 mg/kg (regal standards) while satisfying remediation Efficiency of 82% (the maximum concentration of 1,893 mg/kg). The appropriate temperature range for an active operation was investigated between 28.9~35.6°C. For the contaminated soils having different initial concentration, the TPH (Total Petroleum Hydrocarbons) concentration was decreased evenly along with the CFU (Colony Forming Unit), moisture content and contaminant concentration after 38days of gratifying the legal standards of under 500 mg/kg.

Key words : Landfarming, TPH, Contaminated Soil,

요 약 문

대규모 유류오염 정화부지에 대해 수분 및 영양분 공급장치, 송풍장치, 바닥 차수 및 집수 장치등의 공학적 토양경작 시설을 적용하여 복원효율을 평가하였다. 복원초기 미생물의 생분해활성도 증가를 위해 영양제인 질소(N), 인(P) 등 주요영양인자들을 부지 환경에 맞도록 보정하여 주기적인 톨링 작업을 수행한 결과, 오염토양의 농도가 가장 높은 1,893 mg/kg일 때의 정화효율이 82%로 토양오염우려 “가” 지역 기준 500 mg/kg 이하인 348 mg/kg으로 감소하였다. 가장 원활하게 활동할 수 있는 온도 범위는 28.9~35.6°C로 측정되었다. 또한 초기 농도가 서로 다른 오염토양의 TPH 농도가 법적기준 농도인 500 mg/kg 이하를 만족하는 38일 경과 후의 미생물 균수, 수분함량, 오염토양의 농도가 큰 변화 없이 일정하게 감소하였다.

주제어 : 토양경작, 석유계총탄화수소, 오염토양

1. 서 론

환경문제는 특정 지역과 한 국가의 문제로 그치지 않고

범 지구 차원의 과제로 부상하고 있다. 이러한 환경문제는 국민의 생산과 소비는 물론 국가간의 무역을 규제할 뿐만 아니라 국제 외교의 중요한 핵심 의제로 등장하고

*Corresponding author : sichoi@kw.ac.kr

원고접수일 : 2009. 5. 29 심사일 : 2009. 7. 6 게재승인일 : 2009. 8. 26

질의 및 토의 : 2009. 10. 31 까지

있다(국방부, 1999). 선진국을 중심으로 한 많은 국가들은 토양오염방지를 위한 각종 법률 및 규정을 제정, 시행하면서 토양오염지역 조사와 복원을 실시하고 있다. 우리나라도 1996년 1월 토양환경보전법과 그 하위 법령 등을 통해 토양오염 유발시설, 오염물질 및 오염지역 복원 등을 지속적으로 감시 관리하고 있다(환경부, 2002). 특히, 최근 들어 주한미군기지 이전이 본격화 되면서 시행된 토양오염도조사결과 유류저장시설에서의 누출 및 사격장내 중금속유류 또는 중금속에 의한 오염이 심각한 것으로 보고되면서 토양 정화에 대한 관심이 증대되고 있다(환경부, 2005).

대규모 정화부지에서 유류로 오염된 토양을 처리하는 정화기술은 복원위치에 따라 오염현장내 원위치에서 직접 오염토양을 처리하는 원위치(in-situ) 처리방법과, 지상으로 끌어 올려 오염원을 처리하는 탈위치(ex-situ) 처리방법으로 구분되며, 탈위치 처리 방법 중 일반적으로 널리 알려진 정화기술로는 오염토를 교반시켜 호기성 조건에서 오염물질의 생물학적 분해를 유도하는 토양경작(land farming), 저온에서 오염물을 토양으로부터 분리하는 저온 열탈착(low thermal desorption), 기계적 마찰과 세정수를 이용한 토양세척(soil washing)방법 등이 있다(서용식 외, 2008). 위의 탈위치 정화공법 중 토양경작법은 오염토양을 굴착하여 방수처리 된 지표면에 깔아놓고 정기적으로 뒤집기(Tilling)하여 적정 수분을 유지하고 공기를 공급해 줌으로써 토양미생물에 의한 호기성 생분해 공정을 촉진시키는 공법이다(차재욱 외, 2004). 또한 토양경작법은 거의 모든 종류의 석유류 오염물질에 대해 법적인계치 이하의 농도저감 효과와 휘발유와 같은 휘발성이 강한 유류에서부터 윤활유와 같은 비휘발성 유류까지 모두 복원이 가능한 기술이며, 설계와 복원수행시 기술적으로 간편한 특징을 가지고 있다(전권호 외, 2005).

토양경작법(생물학적) 정화효율에 영향을 미치는 인자들로서는 양분의 유효도, 토양반응(pH), 토양수분, 통기, 분해능이 있는 미생물의 수와 활성 등이 있다(Huesemann, 1994). 오염된 토양에서 토착미생물들은 오염물질이 존재하는 환경에 적응하여 있기는 하지만, 대부분의 경우 양분유효도, 산소 등의 결핍으로 인하여 원위치상태에서의 생물학적 분해는 매우 완만하게 진행된다.(Jorgensen et al., 2000) 따라서 토양경작법을 이용한 유류오염토양 처리기술은 통기, 양분공급, 수분 및 pH조절 등이 공법 적용시 영향을 미치는 주요한 요소라 할 수 있다.

본 적용사례에서는 대규모 유류오염 정화부지에 대해 수분 및 영양분 공급장치, 송풍장치, 바닥 차수 및 집수

장치 등의 공학적 토양경작 시설을 적용하여 지속적이고 효과적인 계절별 모니터링을 통해 오염토양의 분기별 처리효율을 살펴보았다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 경작시설

본 연구가 진행된 대상지역은 W시에 소재한 대규모 오염부지로서 오염원은 경질유 일부에 의해 오염되었으며, 토양경작(Landfarming)공법으로 복원작업을 수행하기 위하여 약 15,230 m²(56,074 m³)의 오염토양을 신속히 굴착 및 이송·적치하여 주변지역으로의 오염물질 추가 확산을 사전에 예방할 수 있도록 하였다. 토양경작장의 하부 바닥면은 경작과정에서 침출수의 유출에 의한 2차오염 방지를 위하여 고밀도폴리에틸렌 재질의 차수용 바닥 및 집수정 등을 설치하였으며, 동절기 운영을 위한 철골구조(레티트러스트) 형태의 비닐하우스 내부에 온도조절을 위한 난방설비를 설치하여 오염토양을 보다 효과적으로 복원이 가능도록 하였다. VOCs(휘발성유기화합물) 배가스 처리 시스템은 배기시스템과 배가스 처리설비를 설치하였으며, 배가스 처리설비는 운전효율이 높고, 시스템 운전이 비교적 용이하며 간헐적 운전(intermittent operation)에도 시스템의 처리효율 저하가 거의 없는 활성탄흡착탑을 적용하여 민원발생을 최소화 하였다. 이러한 토양경작 시설의 사양은 다음과 같다. 너비: 12 m(W), 길이: 120 m(L), 그리고 높이: 4.5m(H-유효높이)로 같은 사양의 경작시설 3개동을 설치하였다.

2.2. 경작운영

오염토양 경작시 1 batch 운전일수 및 오염토의 적치심도는 높은 경제성을 확보하기 위하여 1 batch당 운전기간은 30일 정도, 경작단(Soil stack height)의 높이는 70~110 cm 범위, 토양경작장의 운영동수는 3개동으로 설치하여 각각의 경작시설의 경작토량은 980~1,300 m³가 반입되도록 설치하였다. 경작장 내부로 반입된 오염토양은 평탄화 작업 후 톨링 작업시 작업이 불가능한 크기의 전석을 체바가지가 달린 굴삭기로 선별하고 처리토양 되메움시 같이 되메움 처리 하였다. 오염토양 복원기간 동안 토착미생물 및 유류분해 균주가 양분, 산소, 수분의 접촉성을 높여주기 위하여 톨링 작업을 일주에 2~3회 실시하였으며, 오염저감율에 영향을 미치는 주요 운전인자들을 아래와 같이 정하여 최적 성장조건을 유지할 수 있도록 설정하였다(Table 1).

Table 1. Operation parameters

Parameter	Detect Method	Result
Mixing Rate/Frequency	-	2~3time/week
Moisture Content	Dry Oven	Above 11% (weight)
pH	pH Meter	6.0~8.0
Residence Time	-	About 30 day
Viable cell Count	Incubator for Cell rasing	Above 10 ⁷ CFU/mL
C:N:P	※	C:N:P = 100:10:1
Temperature	-	10~45°C

※ Soil Science Method and Applications.

복원기간 중 미생물제제 원액의 균체수가 1 × 10⁷ CFU/mL 이상인 균체를 운전초기에 1회 이상 공급함으로써 유류분해 미생물을 적정 수준 이상의 균체수(CFU, colony forming unit)를 유지시켰다. 이때 미생물에 의한 유류분해 효율을 높여주기 위해 토양의 pH를 6~8, 토양경작장의 온도를 10~45°C로 그리고 반입된 토양의 수분을 주기적으로 분석하여 침출수가 발생하지 않는 범위 내에서 최적의 수분공급이 이루어지도록 하였다.

2.3. 정화효율 분석

오염토양을 복원하여 오염물질을 완전히 제거하는 것은 불가능하므로 복원기간동안 지속적으로 정화효율을 모니터링 하여 분석결과에 따라 복원방법을 수정하며 오염물질의 저감효율을 분석하였다. 복원기간중 오염토양의 오염저감을 산정을 위한 TPH(석유계총탄화수소), VOCs의 시료채취 및 측정방법은 다음과 같다. VOCs의 측정은 경작동 마다 매일 1회 실시하였으며, 측정방법으로는 휴대용 VOCs 측정장비를 이용하였다. TPH의 경우 1batch당 경작동 마다 5회(반입오염토 1회, 운영과정중 4회)의 시료를 채취하였다. 운영과정중 시료채취는 1회 채취시 4지점을 채취하였으며, 경작동을 30m 간격으로 4등분한 후, 각 구역에서 1개의 시료를 채취하되, 1개시료 채취시 총 5개 지점의 시료를 채취하여 복합시료를 만든후 1개 시료를 조제하여 분석하였다. 채취된 시료의 정화효율 평가를 위한 TPH는 “토양오염공정시험방법”(환경부, 2006)에 준하여 분석하였다.

뿐만 아니라 토양경작 공정운영에 필요한 미생물 균체수, 토양 pH, 토양수분함량, 토양내 질소(N), 인(P)의 모니터링 방법은 다음과 같다. 먼저 토양내 질소(N), 인(P), 미생물 균체수의 경우 경작동 마다 1 batch당 반입오염토양을 고르게 퍼고 경작동을 30 m 간격으로 4등분 한 후, 각 구역에서 1개의 시료를 채취하여 복합시료를 만든 후

1개 시료를 조제하여 분석하였으며, 모니터링 횟수는 1 batch당 경작동 마다(16, 17, 14 batch) 1회의 시료를 측정하였다. 경작시설 내부 및 토양 온도는 경작동 마다 매일 1회씩 측정하여 기록하였다.

2.4. 측정 방법

2.4.1. VOCs 측정

오염토양의 오염저감을 산정을 위한 VOCs의 측정을 위해 일정량의 오염토양을 채취하여 밀봉이 가능한 비닐백에 담아 휴대용 PID(MiniRae2000: PGM-7600, RAE Systems, Inc)를 이용하여 VOCs를 측정하였다.

2.4.2. 토양수분함량 측정

평량병 또는 증발접시(주1)를 미리 105~110°C에서 1시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에서 방냉하고 항량으로 하여 무게를 정확히 달고(W₁) 여기에 시료 적당량을 취하여 평량병 또는 증발접시와 시료의 무게(W₂)를 정확히 단다. 다음에 수욕상에서 수분을 거의 날려 보내고 105~110°C의 건조기 안에서 4시간 건조시킨 다음 데시케이터 안에 넣어 방냉하고 항량으로 하여 무게(W₃)를 측정하였다.

$$\text{수분(\%)} = (W_2 - W_3) / (W_2 - W_1) \times 100$$

2.4.3. TPH(석유계총탄화수소) 측정

토양시료 10~25 g을 비이커에 넣고 시료가 분말형태로 유지되도록 무수황산나트륨을 적당량 넣어 잘 흔들어 섞고 디클로로메탄 100 mL를 넣는다. 이때 함수율이 높은 시료는 물이 흐르지 않도록 무수황산나트륨을 충분량 첨가하여 분말형태가 유지되도록 한다. 초음파추출기의 원추형 팁을 용매 상부층으로부터 1.3 cm 내리되 토양층에는 닿지 않도록 한다. 이때 초음파추출기의 출력을 최대로 하고, 듀티사이클(duty cycle)은 50%에 맞추고 펄스모

드는 1초에 고정된 다음 3분간 초음파로 추출한다. 이와 같은 추출조작을 2회 이상 반복하여 얻어진 추출액을 여지(5B)를 깐 부호너 깔때기로 진공여과하거나 원심분리한 다음, 소량의 디클로로메탄으로 씻어낸다. 이 추출액과 세척여액을 합하여 크로마토그래프용 무수황산나트륨 10g을 충전시킨 분리관을 통과시켜 탈수시킨다. 유출액을 K.D. 농축기 또는 회전증발농축기로 2 mL가 될 때까지 농축한다. 농축된 추출액에 실리카겔 0.3g을 넣고, 약 5분간 진탕하고 정치시킨 후 상등액을 2 mL 바이알에 옮겨 검액으로 사용하였으며, 검액에 대한 정량은 가스 크로마토그래프(GC-FID)를 이용하여 정량하였다.

2.4.4. 토양 pH 측정

국내토양오염공정시험법에 따라 Orion사의 pH meter 420 A를 이용하여 풍건시킨 분석용 토양시료 50g을 500 mL 비이커에 취하고 증류수 250 mL를 넣어 Jar-tester를 이용하여 1시간동안 교반시킨 후 pH 표준액으로 잘 맞춘 다음 깨끗하게 씻어 말린 유리전극을 넣고 60초 이내 상정액을 측정하였다.

2.4.5. 미생물 균체수 측정

토양중의 미생물 균체수내의 측정은 phosphate buffer로 토양을 단계적으로 희석한 후 탄소원으로 경유와 윤활유 1:1 혼합액을 섞은 MM(mineral medium)에 접종하여 20°C에서 20일간 배양후 측정하였으며, MM(mineral

medium)의 조성은 배지 1liter 당 NH_4NO_3 (1 g), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.2 g), K_2HPO_4 (1 g), CaCl_2 (0.02 g), FeCl (0.05 g)이다.

2.4.6. 질소 측정

습토에 2N KCl을 가하여 NH_4^+ , NO_3^- 를 추출하고 NH_4^+ 를 phenol과 sodium hypochlorite(NaClO)의 존재하에 sodium nitroprusside를 촉매로 청색을 형성하는 반응에 기초한 Indophenol-blue 방법에 따라 정량하였고, NO_3^- 은 NO_3^- 가 brucine과 농황산 존재하에서 작용하여 황색물질을 생성하는 Brucine 법에 기초하여 정량하였다.

2.4.7. 인 측정

본 실험에서는 분석용 토양 1g에 질산 5 mL를 넣어 낮은 온도 (110°C, 10 min)로 토양내의 유기물을 분해한 후, 과염소산 10 mL를 넣어 높은 온도(220°C, 7 hr)에서 구성 광물 중 무기물(&중금속)을 분해하였고 규소성분의 광물입자만 남도록 하였다. 여기서 증류수를 넣어 여과 후 발색시약을 첨가하여 U.V. spectrophotometer(파장 440 nm)로 T-P를 비색정량 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 경작장의 분기별 영향인자

2007년 6월부터 2008년 12월까지 3개의 경작시설을 설

Table 2. Result of 1, 2, 3 house monitoring

	Quarter [1year/4]	Soil Temp (°C)	pH	Water content (%)	VOCs (ppm)	TKN	TP	
						(mg/kg)		
1 house	First	7.4	6.66	9.5	3.0	235.1	7.3	
	Second	20.0	6.48	9.7	0.8	243.2	7.5	
	Third	31.2	6.48	10.4	0.5	223.5	13.5	
	Last	13.3	6.80	8.1	0.7	206.6	9.4	
2 house	Quarter [1year/4]	Soil Temp (°C)	pH	Water content (%)	VOCs (ppm)	TKN	TP	
							(mg/kg)	
	First	7.6	6.68	10.07	1.97	1166.0	ND	
	Second	19.7	6.48	9.54	0.8	912.9	4.7	
Third	31.0	6.48	10.29	0.5	174.9	12.5		
Last	13.4	6.80	11.23	1.2	286.7	12.6		
3 house	Quarter [1year/4]	Soil Temp (°C)	pH	Water content (%)	VOCs (ppm)	TKN	TP	
							(mg/kg)	
	First	7.9	6.66	9.87	7.5	1166.0	ND	
	Second	20.4	6.60	9.09	5.7	912.9	4.7	
Third	31.6	6.80	9.00	0.7	174.9	12.5		
Last	13.6	6.76	10.07	1.2	286.7	12.6		

치하여 56,080 m³의 오염토를 경작장 별로 16, 17, 14 batch로 하여 535일간 토양경작을 운영하였다. 반입된 오염토양의 계절별 정화효율 평가를 위해 전체 정화기간 중 4분기별(12개월) 경작장 내의 토양온도, 토양 pH, 수분함량, VOCs 그리고 초기 오염토양의 질소, 인을 3개 시설에서 분석하였으며, 분석된 분기별 평균값은 다음과 같다 (Table 2). 토양 pH는 3개동에서 계절에 상관없이 6.48~6.80으로 경작운영에 효율적인 6.0~8.0의 범위를 유지하였으며, 경작장 내에서 발생하는 VOCs의 농도는 1,2경작동 3분기에서 0.5 ppm으로 가장 낮은 값을 나타냈고, 3경작장 1분기에서 7.5 ppm으로 가장 높은 값을 기록하였으나, 대기환경보전법 시행규칙에서 정하고 있는 벤젠화합물의 배출허용 기준치인 30 ppm(mg/m³) 이하의 농도로 배출되었다. 하지만 주기적인 활성탄흡착탑을 가동함으로써 경작장 내부의 원활한 작업환경을 조성하였다. 토양경작공법 운영중 미생물의 생분해활성도에 영향을 주는 영양분인 질소(N) 및 인(P)을 분석한 결과, 질소(N)의 농도는 165.4~1166.0 mg/kg 으로 3경작장 1분기에서 가장 높은 1,166 mg/kg으로 측정됐으며, 평균 445 mg/kg인 것으로 나타났다. 인(P)의 농도는 ND(불검출)~13.5 mg/kg으로 평균 8.4 mg/kg인 것으로 산출되었다. 이러한 영양염류는 토양으로부터 충분한 양을 얻을 수 있었으나, 간혹 인(P)성분이 부족한 것으로 나타나 인산비료(NH₄H₂PO₄)를 물에 녹여 미생물 또는 수분 첨가시 공급하여 영양분을 충분히 공급하였다.

토양온도는 미생물의 성장에 가장 큰 영향을 미치는 인자로 각기 다른 3개의 경작장에 반입된 오염토양의 온도 변화를 일 년 동안 측정된 결과, 토양의 온도는 3개의 경작장에서 계절에 상관없이 영상의 기온변화를 일정하게 유지하는 것으로 나타났으며, 최저 온도는 12월에 3.6°C. 최고 온도는 8월에 35.6°C의 온도로 측정되었다(Fig 1).

3.2. 처리효율에 따른 미생물 개체수 변화

각기 다른 경작시설로 반입된 오염토양을 대상으로 약 38일 동안 영양물질, 온도 등 운영 조건을 동일하게 적용하여 톨링 작업을 진행하며, 토양미생물, 수분함량 그리고 TPH 저감효율을 측정된 결과(Fig. 2, 3, 4), 토양의 평균 수분함량은 운영초기에 10.8%에서 정화완료 후 6.8%로 감소하였다. 복원을 시작한지 12일 경과 후 3개의 경작시설에서 오염토양의 TPH 농도가 급격하게 저감되는 것으로 나타났다. 이러한 결과는, 오염물질의 대기로의 휘발 및 미생물의 분해 작용에 의해 유류성분이 소모되고 있는 것으로 볼 수 있다. 반입된 오염토양의 초기 미생물 균체

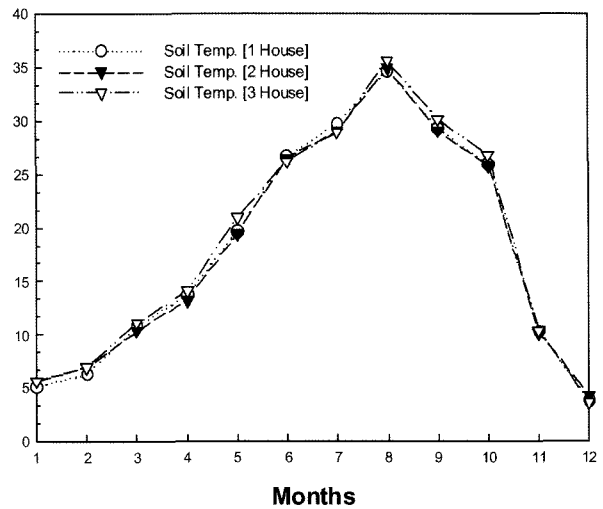


Fig. 1. The variation of temperature inside the house for landfarming (for 12 month).

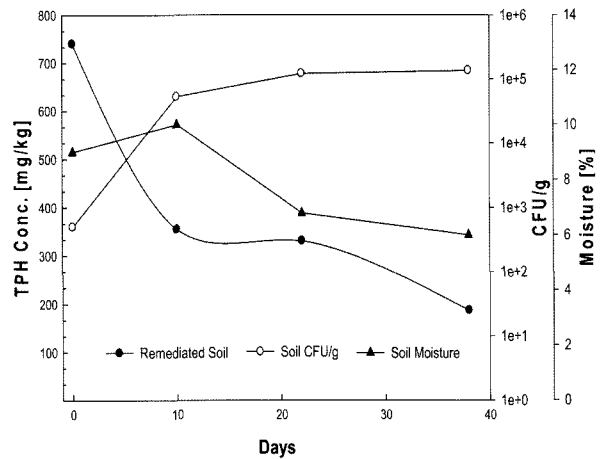


Fig. 2. The variation of TPH, CFU and moisture content in the period of operation (the 1 house).

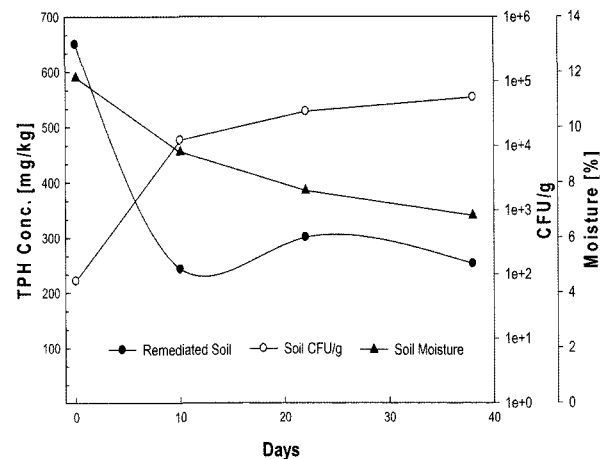


Fig. 3. The variation of TPH, CFU and moisture content in the period of operation (the 2 house).

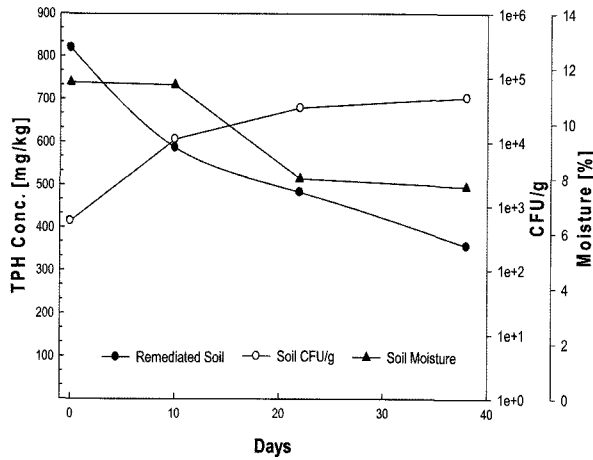


Fig. 4. The variation of TPH, CFU and moisture content in the period of operation (the 3 house).

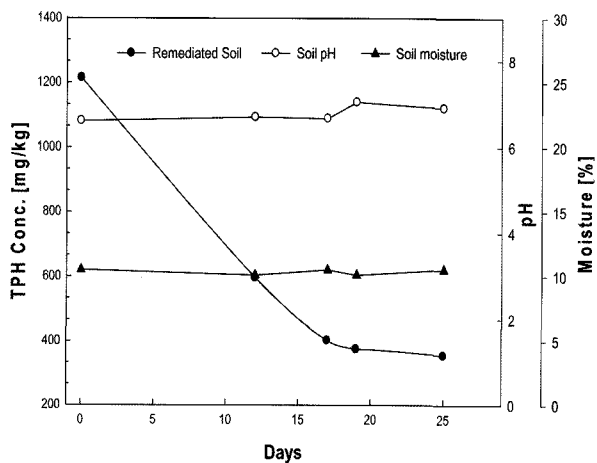


Fig. 5. The results of the clean-up efficiency in the period of the first quarter.

수를 3개의 경작시설에서 측정된 결과 값이 1경작장의 경우 4×10^3 CFU/g, 2경작장에서 7×10^2 CFU/g, 3경작장은 8×10^2 CFU/g인 토양에, 액상 미생물 균체수가 1×10^7 CFU/mL 이상인 균체를 주입하고 10일 경과 후 토양 내 존재하는 미생물 군수를 측정된 결과, 1경작장의 경우 5×10^5 CFU/g, 2, 3경작장에서 1×10^5 CFU/g로 토양내 존재하는 미생물 군수의 급격한 증가와 수분함량의 감소 현상이 나타났는데, 이는 지속적인 영양분 주입 및 톨링 작업으로 오염된 토양과 공기와의 접촉이 원활하게 진행되어 초기 주입했던 유류분해 미생물 군수의 미생물 군수 증가로 인한 것으로 판단된다.

오염토양의 TPH 농도가 법적기준(토양오염우려기준 “가” 지역) 농도인 500 mg/kg 이하를 만족하는 38일 경과 후의 미생물 군수는 각각의 경작시설에서 1×10^6 ,

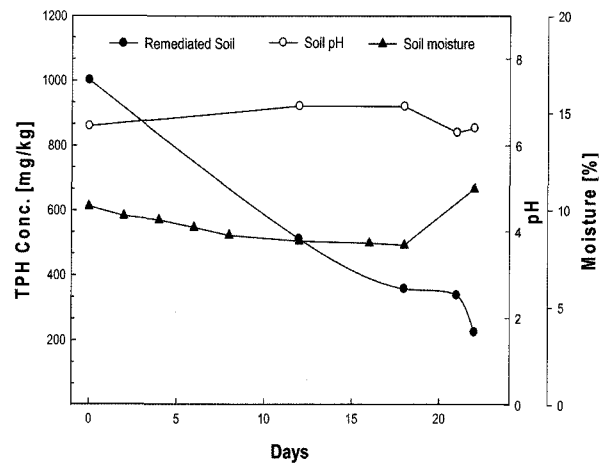


Fig. 6. The results of the clean-up efficiency in the period of the second quarter.

5×10^5 , 4×10^5 CFU/g로 증가한 것으로 나타났다. 수분함량 및 유류오염물질의 양은 큰 변화 없이 일정하게 감소해 가는 경향을 나타내었으며, 미생물 군수의 증가속도 또한 매우 완만해졌다. 이러한 결과로는, 토양미생물의 주 섭취원인 유류오염물질의 양이 감소하여 일정량의 미생물이 활동할 수 없게 됨으로써 나타난 결과로 판단된다.

이상환 외(2007)는 장기간에 걸쳐 오염이 유발되고 지속되면서 aging 과정에서 weathering되면서 생분해가 용이하지 않은 성분들이 집중적으로 잔류되거나 생물학적 유효도가 낮은 양태로 존재하는 특성을 가지게 된다고 언급하였듯이, 반드시 토양경작법의 현장 적용전 오염토양의 특성 분석을 통해 원활한 복원 효율과 오염특성에 맞는 설계 인자 도출이 선행되어야 할 것으로 사료된다.

3.3. 분기별 처리효율 평가

초기 오염토양의 TPH 농도가 1,500 mg/kg 전,후인 토양을 대상으로 톨링 작업 및 영양분을 주입하며 분기별 오염토양의 정화효율, 토양의 pH 그리고 수분함량을 함께 측정된 결과, 먼저 각 분기별 경작장의 초기 TPH 농도는, 1,215, 1,001, 1,893, 1,459 mg/kg이며, 분기별 토양의 평균 pH는 1분기 6.79, 2분기 6.59, 3분기 6.02, 4분기 6.52 정도로 위에서 언급한 바와 같이 토양경작법을 적용하기에 적합한 토양의 pH 범위를 유지하는 것으로 나타났고, 수분함량은 각 분기별로, 10.3%, 9.4%, 10.2%, 8.9%로 측정되었다(Fig. 5, 6, 7, 8).

오염토양의 정화효율을 모니터링한 결과, 복원수행이 시작 된지 10~15일 사이 분기별 토양 pH, 수분과 상관없이 오염물질의 농도가 50% 이상 급격하게 저감된 것으로 나타났으며, 각 분기별 최종 TPH 농도는 355, 225,

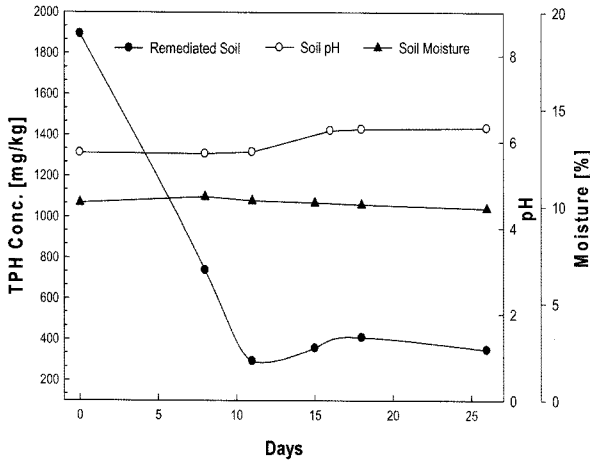


Fig. 7. The results of the clean-up efficiency in the period of the third quarter.

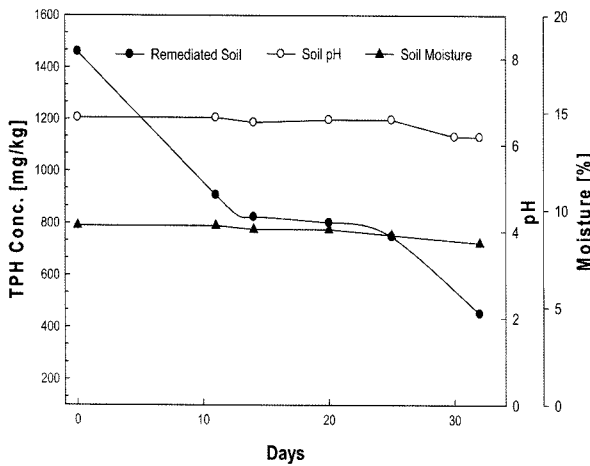


Fig. 8. The results of the clean-up efficiency in the period of the last quarter.

348, 451 mg/kg으로 71, 77, 82, 60%의 정화효율을 보이는 것으로 추정되었다. 특히 초기 오염토양의 농도가 1,893 mg/kg인 3분기일 때 정화효율이 82%로 가장 높게 나타났다. Fig 7에서 3분기에 해당하는 온도는 28.9~35.6 °C로 미생물이 가장 원활하게 활동할 수 있는 범위이다. 이는 미생물의 활성이 원활하게 이루어지고 있으며, 미생물이 실제로 토양 내에서 분해 작용을 하여 다른 분기와 비교하여 정화효율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 오염농도 분포를 갖는 대규모 유류오염부지 현장에서 토양경작공법을 적용하여 유류오염 토양의 정화효율을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 토양경작공법을 적용한 대규모 유류오염부지 오염토양의 평균 TPH 농도는 1,650 mg/kg으로 1 batch 당 약 28일 정화기간이 소요되어 86%의 정화효율을 보였으며, 대상 토양온도의 경우, 운영기간 전반에 걸쳐 가능한 최저 10°C 이상 유지되도록 하였는데 동절기 경우 온도유지에 다소 어려움이 발생되어 톨링 작업 횟수를 증가하여 이를 보완 운영하였다.

(2) 오염토양의 초기 농도가 서로 다른 토양의 TPH 농도가 법적기준(토양오염우리기준 “가” 지역) 농도인 500 mg/kg 이하를 만족하는 약 10일(1, 2경작장), 20일(3경작장) 경과 후의 미생물 군수는 각각 5×10^5 , 1×10^5 , 3×10^5 CFU/g로 나타났으며, 복원을 완료한 38일 경과 후 미생물 군수는 각각의 경작시설에서 1×10^6 , 5×10^5 , 4×10^5 CFU/g로 증가한 것으로 나타났다. 수분함량 및 유류오염물질의 양은 큰 변화 없이 일정하게 감소해 가는 경향을 나타내었으며, 미생물 군수의 증가속도 또한 매우 완만해졌다. 이는 토양미생물의 주 섭취원인 유류오염물질의 양이 감소하여 일정량의 미생물이 활동할 수 없게 됨으로써 나타난 결과로 판단된다.

(3) 분기별 경작장의 초기 TPH 농도가, 1,215, 1,001, 1,893, 1,459 mg/kg인 오염토양을 대상으로 톨링 작업 및 영양분을 주입하며 분기별 오염토양의 정화효율을 모니터링한 결과, 각 분기별 최종 TPH 농도는 355, 225, 348, 451 mg/kg으로 71, 77, 82, 60%의 정화효율을 보이는 것으로 추정되었으며, 정화효율이 가장 높은 3분기의 온도는 28.9~35.6°C로 미생물이 가장 원활하게 활동할 수 있는 범위이다.

(4) 토양경작공법(Landfarming)은 물리적인 공정에 의하여 오염토양의 농도가 전부 이루어지는 것이 아니라, 토양내 존재하는 토착 미생물, 토양경작 운영시 주입되는 유류분해 미생물 균, 영양물질, 온도, pH 그리고 수분함량 등 이러한 영향인자들을 부지 환경에 맞도록 보정 해주어야 경제적인 복원을 수행할 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부의 “토양·지하수 오염방지기술개발사업”과 “토양지하수복원관리 환경기술교육혁신지원사업단”의 연구비 지원을 받은 과제입니다.

참 고 문 헌

고성환, 김용현, 송현주, 심두섭, 정홍배, 구분삼, 최도원, 2007,

- 한국실정에 적합한 생물학적 처리(토양경작) 방법 및 적용사례, 한국환경농학회 추계워크샵, p. 71-85.
- 국방부, 1999, 군 오염토양 효율적 복원을 위한 최적방안 연구.
- 김국진, 고일원, 이광표, 이철효, 2003, 유류 오염 토양의 생물학적 토양복원 설계를 위한 사전조사 및 이를 이용한 현장복원, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, p. 322-325.
- 서용식, 최상일, 장 민, 2008, 현장규모의 유류오염토양 세척공법에 다단연속탈착 및 교반탈착기법을 이용한 세척공정 성능 향상에 관한 연구, 한국지하수토양환경학회지, **13**(5), 81-87.
- 이상환, 김을영, 최호진, 2007, 중질유 오염토양의 생물학적 처리에 있어 amendments의 효과, 한국지하수토양환경학회, **12**(5), 54-63.
- 전권호, 한완수, 정현석, 서창일, 박정구, 2005, 토양경작법(Landfarming)을 이용한 유류오염토양의 복원효율 평가, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표회, p. 219-222
- 차재욱, 염규진, 박영준, 김선미, 최기창, 이문현, 박광진, 김정철, 2004, 한국지하수토양환경학회 추계학술발표대회, p. 39-42.
- 환경부, 2002, 토양복원 기술 및 사례집.
- 환경부, 2005, 특정오염관리대상시설 설치신고 및 검사결과 현황.
- 환경부, 2007, 오염토양 정화방법 가이드라인.
- 환경부, 2007, 토양오염공정시험방법.
- 환경부, 2008, 토양환경보전법.
- EPA, 2004, How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Site; A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, EPA, 510-R-04-002.
- Huesemann, M.H., 1994, Guidelines for land-treatment petroleum hydrocarbon contaminated soils, *J. Soil Contam.*, **3**, 299-318.
- Jorgensen, K.S., Paustinein, J., and Suortti, A.M., 2000, Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by composting in biopile, *Environmental Pollution*, **107**, 245-254.