지하수토양환경 Vol. 18(5), p. 7~14, 2013 http://dx.doi.org/10.7857/JSGE.2013.18.5.007

≪原著≫

유류오염지역의 지하수 수질특성 및 동절기 토양경작법의 온도보전을 위한 현장사례 연구

조장환[1]* · 김순흠[1] · 안종익[1] · 이윤오[2] · 최상일[2]
[1]한국환경공단
[2]광운대학교 환경공학과

The Characteristics of Groundwater and a Field Test for Thermal Insulation of Landfarming of Petroleum Contaminated Soil in Winter Season

Chang-hwan Cho[1]* · Soon-heum Kim[1] · Jong-ik An[1] · Yoon-oh Lee[2] · Sang-il Choi[2]
[1]Korea Environmental Corporation
[2]Department of Environmental Engineering Kwangwoon University

ABSTRACT

The objectives of this study were to identify the characteristics of groundwater in the petroleum contaminated site and to evaluate the applicability of house-type landfarm facilities heated with briquette stoves in winter season. The six monitoring wells were installed at the site where pH, dissolved oxygen, and temperature were all measured. Also groundwater contaminants, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene and total petroleum hydrocarbon, were analyzed twice. House-type two landfarm facilities (12 m × 40 m × 4.8 m) each installed with four briquette stoves were constructed. During four rounds treatment process, VOCs, moisture, temperature were monitored and soil contaminants were analyzed. The pH was 6.37 and considered subacid and DO was measured to be 3.12 mg/L. The temperature of groundwater was measured to be 9.48°C. The groundwater contaminants were detected only in the monitoring wells within the contaminated area or close to it showing that the groundwater contaminated area was similar to the soil contaminated area. During the landfarm process, 73.3% of VOCs concentration in interior gas was decreased and moisture was lowered from 17.7% to 13.4%. In the morning, at 8:00 am, the temperature was decreased showing soil (5.5°C) > interior (4.8°C) > exterior (3.5°C). In the afternoon, at 2:00 pm, the temperature was soil (8.6°C) < interior (9.9°C) < exterior (11.5°C) with solar radiation. The temperature difference between interior and exterior was 0.7°C in the morning, but it was 1.6°C in the afternoon. A total of 130 days were taken for four round landfarm processes. Each process was completed within 33 days showing 80% of cleanup efficiency (1st order dissipation rate(k) = 0.1771).

Key words : Winter season, Landfarm process, House-type, Briquette stoves, Temperature

1. 서 론

유류저장시설을 보유하고 있는 유류비축기지, 정유공장, 저유소, 주유소 등에서 저장시설의 노후화 및 부적절한 사용에 의해 토양오염이 종종 발견되고 있다(Lee and Park, 2006).

유류의 사용규모나 사용빈도가 높은 미군기지 또한 예외는 아니어서 한·미연합토지관리계획(LPP : land partnership plan)에 의한 반환미군기지 토양오염 조사결과에 의하면 기지내부에 다량의 토양오염이 발견되었으며, 이동성이 뛰어난 유류오염의 특성상 기지내부 오염의 외부 유출로 인해 미군기지와 인접한 주변지역에서 유류유출에 의한 토양오염 사례가 종종 알려지고 있다(MOE, 2010).

최근 들어 '주한미군공여구역주변지역 등 지원 특별법'에 따라 미군기지 주변지역의 환경기초조사가 본격적으로 실시되고 있으며, 발견된 오염토양의 원인규명과 토양정

*Corresponding author : cho6272@keco.or.kr
원고접수일 : 2013. 2. 13 심사일 : 2013. 8. 9 게재승인일 : 2013. 9. 23
질의 및 토의 : 2013. 12. 31 까지

화에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다.

토양에 유출된 유류오염물질은 주변 지하수오염을 야기하고, 오염된 지하수는 이동방향과 수위 변화에 따라 오염구간을 확대시킨다(Meegoda and Hu, 2011). 오염토양 정화를 위해서는 오염지하수의 관리 및 처리가 필수적이며, 오염지하수의 계절에 따른 물리·화학적 특성을 정확하게 파악하는 것은 지중 오염물질의 정화를 위해 중요하다. 지하수의 특성을 결정하는 인자는 pH, 전기전도도(EC : Electrical Conductivity), 용존산소(DO : Dissolved Oxygen), 산화환원전위(ORP : Oxidation Reduction Potential), 온도 등이 있으며, 이 인자들은 지중 생태계에서 오염물질의 흡착 및 확산에 영향을 주고, 미생물의 대사에 중요한 역할을 한다(Choi and Lee, 2010).

오염토양 정화방법 중 생물학적 처리방법은 미생물의 활성에 따라 정화효율이 달라진다. 미생물의 활성에 영향을 미치는 인자는 토양수분, 산소농도, 산화 · 환원 전위, pH, C : N : P, 온도 등이 있으며, 이중 온도는 미생물의 활성에 큰 영향을 주어 정화효율에 영향을 미치는 중요한 요소이다(Yadav and Hassanizadeh, 2011). Whyte et al.(1998)은 [1-^{14}C]dodecane을 분해하기 위해 psychrotroph *Rhodococus* sp. strain Q15와 mesophile *P. oleovorans*를 10, 20, 30°C에서 적용한 결과 *P. oleovorans*는 10°C에서 분해효과가 없었으나, Q15는 온도 증가에 따른 분해효과 상승을 확인하였다. 미생물 증식의 최적 온도는 10°C~45°C로 알려져 있으며, 10°C 상승시 미생물의 증식속도는 2배 증가한다. 10°C 이하에서는 활동이 둔화되고 45°C 이상에서는 유류분해 미생물의 활성이 감소하는 것으로 알려져 있다(MOE, 2007).

국내 오염토양 정화기간은 보통 1.5~2.0년이며, 4계절이 뚜렷한 우리나라의 특성상 정화기간 중 1~2회의 동절기가 포함된다. 그러므로 생물학적 정화방법을 적용한 현장에서 정화목표 달성을 위해 동절기 온도보전은 고려해야 할 중요한 요소이다. 이러한 필요성에 따라 동절기 온도보전을 위해 다양한 방법들이 시도되고 있으나, 아직까지 비용 효과적인 보온 수단의 개발은 초기단계이다.

본 연구에서는 유류로 오염된 지역의 지하수 오염특성을 파악하고, 현장에 비닐하우스 형태의 토양경작장과 난방시설을 설치하여 동절기 토양온도 보존 가능성 및 정화효율을 알아보고자 하였다. 이를 위해 오염지역 내·외부에 총 6개의 지하수관측정을 설치하여 지하수 수질특성을 비교하였다. 또한 토양경작장 내부에 연탄난로 방식의 온풍기를 설치하여 토양경작 기간동안 경작장 내 · 외부 및 오염토양의 온도변화를 측정하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 오염지역 현황

대상지역은 전라북도 00지역에 위치하고 있다. 서쪽과 남쪽은 00기지와 접하고 있으며, 동쪽과 북쪽은 농지로 이루어져 있다. 기상청의 평년(1971년부터 2000년까지 30년 기후평균)자료에 의하면 월평균 기온은 12.7°C이고 현장조사 기간인 11월, 12월 및 1월의 평균 기온은 8.4, 2.3, –4.0°C인 것으로 조사되었다. 평년 연평균 강수량은 1,201.3 mm이고 평년 월평균 강수량은 100.1 mm이다. 월평균 강수량의 표준편차는 78.3 mm로서 계절적 변화가 크며, 6, 7, 8, 9월에 내린 비의 양은 780 mm 정도로서 연평균 강수량의 65%를 차지하고 있다.

오염지역 내부인 MW 3 지점과 약 100 m 떨어진 외부 임의의 지점에서 채취한 토양시료를 한국공업규격(KSF) 토질시험법에 따라 물리적 특성을 분석한 결과 토양의 비중은 2.66로 조사되었다. 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 의한 대상지역의 토양은 점토 및 모래가 섞인 점토로 분류되었다. Table 1에 대상지역 토양의 물리적 특성을 정리하였다.

기지 내부로부터 유출된 유류에 의한 오염지역으로써, 오염면적 및 부피는 각각 1,604 m^{2}와 2,250 m^{3}로 조사되었으며, 지하 3 m까지 오염이 확산되었다. 오염현황 및 지하수 관측정 설치 위치를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1. The physical characteristics of soil collected from the site

	Water content (%)	Density	Soil classification	Cumulative Size Distribution (%)				
				No.4 (4.76 mm)	No.10 (2.0 mm)	No.40 (0.42 mm)	No.200 (0.074 mm)	2 μm
Ref. (1~3m)	19.6	2.65	Clay	100	100	68.2	38.4	13.5
MW 3 (1~2m)	32.3	2.70	Sandy clay	100	100	92.3	68.7	23.5
Average	36.0	2.67						

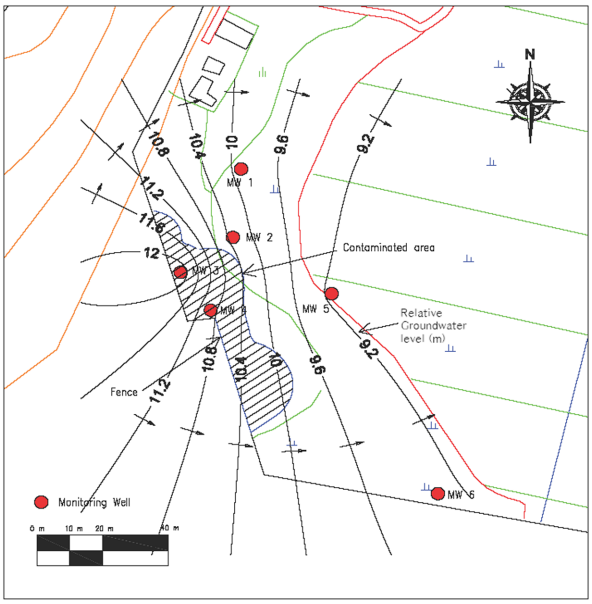

Fig. 1. Groundwater monitoring well locations.

2.2. 수리지질 특성

2.2.1. 지하수위 측정

관측정은 토양오염이 확인된 지점 및 수리지질 특성을 고려하여 오염지역 내·외부에 총 6개를 설치하였다. 길이 6.0 m 직경 10 cm의 PVC 파이프를 이용하여 지상에서 1.5 m까지는 무공관으로 지표의 가스나 유체의 유입을 방지하였으며, 하부 4.5 m까지는 2 mm의 슬롯을 만들어 유체의 이동이 자유롭도록 하였다.

대상지역의 지하수 흐름방향을 파악하기 위해 각 관측정에서 지하수위를 측정하였다. Solinst사의 수위계(Model 101)를 이용하여 지하수면까지 깊이를 측정한 후, 측정지점의 고도를 수준측량을 통하여 해발고도로 환산하여 지하수의 공간적인 분포를 파악하였다.

2.2.2. 수리전도도 측정

대상지역의 수리전도도를 파악하기 위해 순간수위변화 시험을 실시하였다. 부피를 알고 있는 베일러(Bailer)를 이용하여 일정 수량을 추출하여 순간적으로 지하수위를 낮춘 후 자동수위측정계(Levelogger, Eijkelkamp Inc.)를 지하수면 아래에 설치하여 지하수위의 회복 양상을 실시간으로 관측하였다. 시험결과는 수리시험 해석 상용 프로그램인 AQTESOLV(v.3.01, HydroSOLVE, Inc.)를 이용하여 분석하였으며, 결과해석은 자유면 대수층에 주로 적용되는 Bouwer-Rice 모델을 이용하였다.

2.2.3. 지하수 수질측정

2회(1월 및 2월)에 걸쳐 관측정 내부 지하수의 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 수온(T)을 휴대용 수질측정기(YSI-556MPS)를 이용하여 측정하였으며, 지하수를 채취하여 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 및 석유계총탄화수소(TPH : total petroleum hydrocarbon)을 분석하였다. 퍼징과 시료채취에 사용되는 장비들은 일회용 장비를 사용하였고, 재사용하는 장비에 대해서는 사용 전 세척을 실시하여 교차오염을 방지하였다. 분석방법은 수질오염공정시험법을 준용하였다.

2.3. 토양 정화시설

2.3.1. 구성 및 운영

본 연구를 위해 12 m(W) × 40 m(L) × 4.8 m(H) 크기의 하우스형 정화시설 2기를 설치하였다. 강우 시 침출수 발생을 예방하고 동절기 기온강하에 의한 처리효율 저하를 방지하기 위해 비닐하우스 형태의 토양경작장을 설치하였으며, 경작장 바닥은 토양의 2차 오염을 방지하기 위해 고밀도폴리에틸렌(HDPE : High Density Polyethylene)을 포설하였다. 오염토양의 적치높이는 0.7 m로 설정하였으며, 경작단은 양단에서 토사가 흘러내리지 않고 사면을 유지할 수 있는 안식각을 형성하도록 오염토양을 쌓아 경작을 하였다.

반입된 오염토양은 생분해 조건을 최적화하기 위해 2회/주 경작을 하였으며, 미생물 개체수는 1×10^5 CFU/g-soil 이상 유지할 수 있도록 외부미생물을 공급하였다. 토양 함수율은 12~30%를 유지하였으며, C : N : P 비율은 100 : 10 : 1이 유지되도록 질소 및 인 성분을 첨가하였다.

2.3.2. 난방기 선정

기온이 낮은 동절기에 정화효율을 유지하기 위해 난방기를 설치하여 경작장 내부의 온도를 유지하고자 하였다. 비닐하우스와 같은 시설에서 동절기에 필요한 난방열량은 100 kcal/m^2·hr로 알려져 있다(MAF, 1997). 그러므로 경작장 1개동에 필요한 온풍기의 난방열량은 약 50,000 kcal/hr 이다. 난방열 50,000 kcal/hr 능력의 온풍기를 비교한 결과 연탄온풍기가 비용 경제적인 것으로 판단되었으며, 토양경작장 내부 작업여건을 고려하여 각 동당 4지점에 설치하였다. Table 2는 난방기의 비용대비 열효율 성능 비교표이다.

2.3.3. 모니터링

토양경작장 내 토양 가스는 휴대용 가스측정기

Table 2. The comparison of heater considered in this study

Feul	Calorie	Price of a heater (1,000 ₩)	Quantity (fuel/day)	Cost (₩/day)	Operation (day)	Total cost (1,000 ₩)	Heater required
Diesel	9,000 kcal/l	1,305	66.7	103,333	88	10,347	1
Electricity	860 kcal/kw	6,800	697.7	48,837	88	11,073	1
Coal	8,300 kcal/kg	2,500	72.3	43,373	88	6,295	1
Briquette	16,560 kcal/ea	594	36.2	17,826	88	2,154	4

Table 3. The result of the measurement of groundwater level

Monitoring well	Absolute elevation level (m)	Ground water level (m)				Absolute Ground water level (m)			
		1st	2nd	3rd	Average	1st	2nd	3rd	Average
MW 1	10.80	0.94	1.01	1.37	1.11	9.86	9.79	9.43	9.69
MW 2	10.88	0.61	0.54	0.59	0.58	10.27	10.34	10.29	10.30
MW 3	12.70	0.42	0.42	0.40	0.41	12.28	12.28	12.30	12.28
MW 4	12.29	1.40	1.61	1.70	1.57	10.89	10.68	10.59	10.72
MW 5	9.33	0.20	0.20	0.28	0.23	9.13	9.13	9.05	9.10
MW 6	10.83	1.55	1.62	1.60	1.59	9.28	9.21	9.23	9.24

(MiniRAE 2,000)를 이용하여 주기적으로 VOCs 농도를 측정하였으며, 토양수분은 사방위 시료를 채취하여 토양오염공정시험법에 따라 중량법으로 측정하였다. 토양경작장 내·외부의 온도는 2회/일(오전 8시, 오후 2시)에 동일한 지점에서 탐침온도계(YT-305, UINS)를 이용하여 측정하였다. 토양시료의 TPH 분석을 위해 각 동당 5지점에서 경작단의 하부시료를 채취하여 혼합시료를 제조 하였으며, 시료의 채취 및 분석은 토양오염공정시험법을 준용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 지하수 유동특성

지하수 수위는 MW 5가 0.23 m로 가장 얕고 MW 6이 1.59 m로 가장 깊게 나타났다. 해발고도 기준으로 환산한 지하수 수위를 살펴보면, 조사지역의 동쪽에 위치한 MW 3이 12.28 m로 가장 깊고, 서쪽에 위치한 MW 5가 9.10로 가장 낮은 것으로 보아 지하수는 조사지역의 지형적 고도분포와 유사한 형태를 보이며, 부지경계를 중심으로 서쪽에서 동쪽 방향으로 흐르는 것으로 확인되었다(Fig. 1). Table 3에 지하수위 측정결과를 정리하였다.

지하수 관측정 6개소의 수리전도도는 1.01×10^{-7} ~3.14×10^{-5} cm/sec 범위인 것으로 확인되었으며, 평균 수리전도도는 2.55×10^{-5} cm/sec로 조사되었다. 지점에 따라 평균 10~100배 정도의 차이를 나타내고 있었다. 순간수위 변화시험의 결과를 Table 4에 정리하였다.

3.2. 지하수 수질특성

2회(1월 및 2월)에 걸쳐 관측정 내부 지하수의 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 온도(Temp.)를 측정하였으며, 지하수를 채취하여 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌 및 석유계총탄화수소(TPH)를 분석하였다.

지하수의 pH는 6.37(1차 : 6.40, 2차 : 6.33)을 나타내어 전반적으로 약산성을 띄고 있었다.

용존산소(DO)는 3.12 mg/L(1차 : 3.36 mg/L, 2차 : 2.88 mg/L)로 조사되었다. 일반적으로 대기압과 동일한 상태에서 0°C인 물 속에 용해되어 있는 산소량은 약 2.9 mg/L이다. 용존산소의 농도가 클수록 지하수는 호기성 상태로 변화하며, 호기성 상태에서 유류 중 BTEX 오염물질은 거의 대부분 호기성 박테리아에 의해 생분해 된다(Han, 1998). 지하수 중 오염물질이 검출된 MW 2, MW 3, MW 4의 DO 평균농도는 2.67 mg/L 이며 오염물질이 검출되지 않은 지하수 관측정 MW 2, MW 3, MW 4의 평균 DO농도는 3.67로 조사되었다. 지하수오염지역에서는 호기성 분해에 의한 산소소모가 증가되어 용존산소 농도가 더 많이 감소한 것으로 판단된다(Cho and Sung, 2013). 그러나 MW 6 지역에서는 비오염지역 임에도 불구하고 오염지역보다 DO농도가 낮은 것으로 조사되었는데, 이는 중금속 등의 부식에 의한 영향으로 판단할 수 있으나, 대상지역의 중금속 농도는 분석하지 않아 정확한 원인은 파악할 수 없었다.

지하수의 온도는 9.48°C(1차 : 10.53°C, 2차 : 8.42°C)를

Table 4. The results of the analysis of slug test

Monitoring well	Test date	Depth to water (m)	Initial displacement (cm)	Hydraulic conductivity (K, cm/sec)
MW 1	02/08 15:25~16:13	1.01	92.4	1.01×10^{-7}
MW 2	02/08 15:40~16:00	0.54	82.5	6.09×10^{-6}
MW 3	02/08 16:25~17:10	0.42	80.8	3.14×10^{-5}
MW 4	02/08 16:09~16:31	1.61	93.0	6.78×10^{-6}
MW 5	02/08 16:39~16:55	0.20	143.1	1.86×10^{-5}
MW 6	02/08 16:52~17:10	1.62	55.6	1.57×10^{-6}
Average				2.55×10^{-5}

Table 5. The results of measurements for pH, DO, Temp. and the results of contaminants analysis

Monitoring well		Field Measurements			Contaminants (mg/L)				
		pH	DO (mg/L)	Temp. (°C)	Benzene	Toluene	Ethyl-benzene	Xylene	TPH
MW 1	1st	6.67	4.34	12.60	ND	ND	ND	ND	ND
	2nd	6.40	2.88	9.20	ND	ND	ND	ND	ND
MW 2	1st	6.59	2.09	9.60	ND	ND	ND	ND	ND
	2nd	6.54	2.60	6.80	ND	ND	ND	ND	0.462
MW 3	1st	6.48	2.37	7.40	0.003	ND	ND	ND	0.241
	2nd	6.53	2.92	7.40	0.022	0.001	0.003	0.001	0.939
MW 4	1st	6.53	3.31	12.70	ND	ND	ND	ND	ND
	2nd	6.47	2.75	9.20	0.002	ND	ND	ND	ND
MW 5	1st	5.73	6.16	10.50	ND	ND	ND	ND	ND
	2nd	5.66	3.94	9.70	ND	ND	ND	ND	ND
MW 6	1st	6.42	1.90	10.40	ND	ND	ND	ND	ND
	2nd	6.39	2.21	8.20	ND	ND	ND	ND	ND

ND = Not Detected

나타내었다.

대상지역의 관측정 중 유류오염물질은 오염지역 내부 및 인접한 지역에 설치된 MW 2, MW 3, MW 4에서 검출되었다. MW 2 관측정의 경우 TPH가 0.462 mg/L 검출되었다. MW 3 관측정의 경우 벤젠은 0.002 mg/L에서 0.023 mg/L, 톨루엔은 0.001 mg/L, 에틸벤젠은 0.003 mg/L, 크실렌은 0.001 mg/L, TPH는 0.241 mg/L에서 0.939 mg/L 로 각각 검출되었다. MW 4 관측정의 경우 벤젠이 0.002 mg/L로 검출되었다. 오염지역 내부 및 인접지역의 지하수에서만 오염물질이 검출되었으며, 오염지역 외부 지하수에서는 오염물질이 검출되지 않았다. 지하수의 오염범위는 토양오염 지역에 한정되어 있는 것으로 조사되었는데, 이는 대상지역의 토질이 세립질인 실트나 점토로 구성되어 수리전도도가 낮아(평균 $k = 2.55 \times 10^{-5}$ cm/sec) 지하수 유동에 의한 오염물질의 확산이 활발하지 않기 때문인 것으로 판단된다. Table 5에 지하수의 pH, DO, 온도의 측정결과 및 오염물질 농도의 분석결과를 정리하였다.

3.3. 휘발성오염물질(VOCs) 및 수분

1배치 토양경작장 내부의 초기 VOCs 농도는 41.6 mg/L이었으며, 22일 후 농도는 7.8 mg/L으로 감소하였다. 이 기간동안 토양의 수분함량은 12.5%에서 11.8%로 0.7% 감소하였다. 2배치 초기 VOCs 농도는 19.5 mg/L이었으며, 25일 후 농도는 12.2 mg/L이었다. 토양의 수분함량은 17.0%에서 13.6%로 3.4% 감소하였다. 3배치 초기 VOCs 농도는 21.1 mg/L이었으며, 26일 후 농도는 0.8 mg/L이었다. 토양의 수분함량은 19.3%에서 12.7%로 6.6% 감소하였다. 4배치 초기 VOCs 농도는 21.0 mg/L이었으며, 16일 후 농도는 0.6 mg/L이었다. 토양의 수분함량은 22.0%에서 14.9%로 7.1% 감소하였다.

오염토양 반입초기 경작장 내부의 VOCs 농도는 평균 25.8 mg/L으로 조사되었으며, 경작운영에 따라 점차적으로 감소하여 최종적으로 평균 6.9 mg/L로 약 73.3% 감소하였다. 이 기간동안 토양의 수분함량은 평균 17.7%에서 13.4%로 약 4.3% 감소하였다.

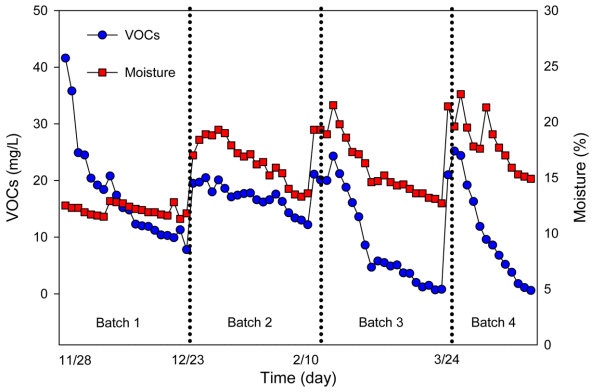

Fig. 2. The concentration of VOCs and moisture of soil.

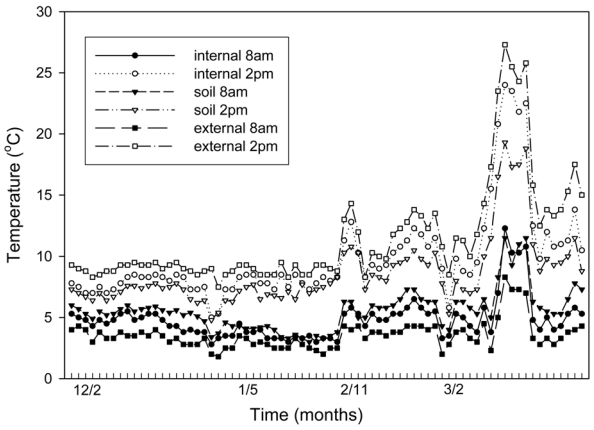

Fig. 3. The variation of temperature.

일반적으로 VOCs는 수분함량이 높을수록 휘발이 억제되며 토양수분에 강하게 흡착되려는 경향이 있다(Cho et al., 2005). 그러나 본 연구에서는 수분함량에 따른 VOCs의 농도변화는 관찰되지 않았다. 이는 오염토양의 물리적인 교란과 경작장 내·외기의 불규칙적인 혼합 때문인 것으로 판단된다. Fig. 2에 경작장 내부의 VOCs 농도 및 토양의 수분함량 변화를 나타내었다.

3.4. 온도

경작장 내·외부 및 경작장 내부 오염토양의 온도를 하루 2회(오전 8시, 오후 2시) 측정하였다. 경작장 내부 및 경작장 내부 오염토양의 온도는 2개의 경작장에서 측정한 중간값으로 나타내었다.

토양경작장 내부온도는 오전 및 오후 각각 4.8°C(3.0~12.3°C) 및 9.9°C(5.8~24.0°C)이었으며, 경작장 토양은 5.5°C(3.3~11.5°C) 및 8.6°C(4.8~19.3°C), 외기온도는 3.5°C(1.8~8.3°C) 및 11.5°C(8.3~27.3°C)으로 조사되었다.

조사기간 중 오전 평균온도는 경작장 토양(5.5°C) > 경작장 내부(4.8°C) > 외기(3.5°C) 순으로 낮아졌으며, 오후에는 태양의 복사열에 의해 경작장 토양(8.6°C) < 경작장 내부(9.9°C) < 외기(11.5°C)의 순으로 온도가 높아졌다. 경작장 내 · 외부의 온도차는 오전 0.7°C이며 오후는 1.6°C이다.

토양경작장 내 · 외부의 온도차이가 크지 않은 것은 VOCs 처리를 위해 지속적으로 공기 순환이 이루어졌으며, 작업자와 작업차량의 빈번한 출입으로 경작장의 밀폐가 어려웠기 때문으로 판단된다.

비닐하우스형 토양경작장과 연탄난로 형태의 난방시설은 토양의 동결 방지 및 온도유지에 효과가 있는 것으로 판단된다. 토양경작장 내·외부 및 경작장 내부 오염토양의 온도 변화를 Fig. 3에 나타내었다.

3.5. TPH

오염토양의 초기농도는 경작장 내부로 오염토양을 반입하여 7일간 경작을 수행한 후 각 경작동의 중심부에서 채취하였다. 반입 즉시 채취한 토양시료는 지점에 따라 농도의 편차가 크기 때문에 대표성을 나타내기 어려운 것으로 판단되었다. 그 후 지속적으로 토양경작을 수행하면서 각 경작동의 5지점에서 시료를 채취하였다.

경작장 내부 오염토양의 TPH 제거 속도를 1차 반응으로 가정하면 TPH농도 변화는 아래의 식으로 표현될 수 있다.

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt}$$

여기서, C_t는 t 시간 이후의 TPH 농도(mg/kg), C_0는 TPH의 초기농도, k는 1차 분해속도(day^{-1}), t는 시간(day)이다.

오염토양의 초기농도는 601 mg/kg~2,404 mg/kg이었으며, 최종농도는 100~362 mg/kg으로 조사되었다. 총 4배치의 오염토양을 처리하는 기간은 약 130일이 소요되었으며, 1배치당 평균 경작기간은 토양 반·출입 기간을 포함하여 약 33일로 조사되었다. 평균 정화효율은 약 80%를 나타내었다. 분해속도 상수(k)는 0.0234~0.4131(평균 0.1771)로 나타났다. 상대적으로 초기농도가 높은 1배치 및 4배치의 평균 k값은 0.063로서, 2배치 및 3배치 k 평균값인 0.2912보다 약 4.6배 큰 것으로 나타났다. 오염토양의 TPH농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 토양경작법을 적용한 오염토양 정화현장에서 토양경작(tilling)은 토양미생물에 원활한 산소 공급과 오염물질의 휘발 효과를 증가시킨다(Ju et al., 2009, Park et al., 2012). Paudyn et al.(2008)의 연구에 의하면 오염물질의 감소율에 대한 휘발의 효과는 미생물 분해에 의한 감소율과 거의 유사하며,

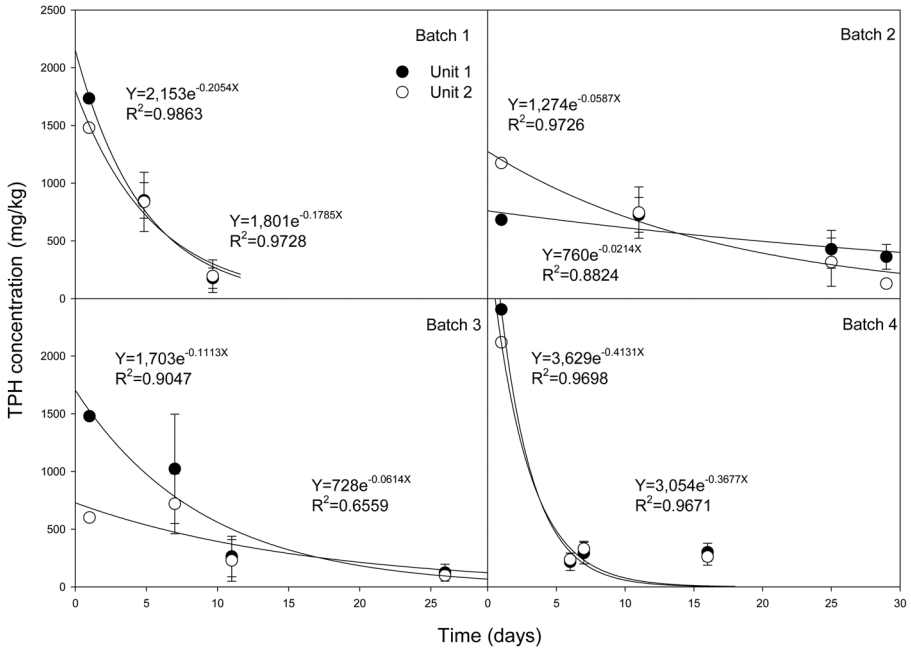

Fig. 4. Regression analysis for the TPH removal from the contaminated soil.

이 두 가지 기작에 의한 오염물질의 감소 효과는 온도가 상승함에 따라 증가한다고 보고하였다. 본 연구에서도 경작장 내부온도 유지를 위해 적용한 난로 형태의 온풍기에 의해 미생물분해 효과 및 오염물질 휘발 효과가 증가한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 미군기지 주변 유류로 오염된 지역의 동절기 지하수 오염특성을 파악하고, 현장에 비닐하우스 형태의 토양경작장과 난방시설을 설치하여 오염토양 정화효율을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

지하수의 pH는 6.37로서 약산성을 띄고 있었으며, 용존산소(DO)농도는 3.12 mg/L를 나타내어 대기와 접촉이 적은 지하수의 특성을 잘 반영한다. 지하수의 온도는 9.48 ºC를 나타내었다. 오염지역 내부 및 인접지역의 지하수에서만 오염물질이 검출되었으며, 오염지역 외부 지하수에서는 오염물질이 검출되지 않았다. 낮은 수리전도도에 의해 오염물질의 확산이 활발하지 않은 것으로 판단된다.

동절기 기온강하에 의한 처리효율 저하를 사전에 방지하기 위해 비닐하우스 형태의 토양경작장을 제작하였으며, 연탄난로 방식의 온풍기를 각 동당 4지점에 설치하였다.

오염토양 반입초기 경작장 내부의 VOCs 농도는 평균 25.8 mg/L으로 조사되었으며, 경작운영에 따라 점차적으로 감소하여 최종적으로 평균 6.9 mg/L로 약 73.3% 감소하였다. 이 기간동안 토양의 수분함량은 평균 17.7%에서 13.4%로 약 4.3% 감소하였다.

조사기간 중 오전 평균온도는 경작장 토양(5.5ºC) > 경작장 내부(4.8ºC) > 외기(3.5ºC) 순으로 낮아졌으며, 오후에는 태양의 복사열에 의해 경작장 토양(8.6ºC) < 경작장 내부(9.9ºC) < 외기(11.5ºC)의 순으로 온도가 높아졌다. 경작장 내・외부의 온도차는 오전은 0.7ºC이었으며 오후는 1.6ºC이었다. 비닐하우스형 토양경작장과 연탄난로 형태의 난방시설은 토양의 동결 방지 및 온도유지에 효과가 있는 것으로 판단된다.

총 4배치의 오염토양을 처리하는 기간은 약 130일이 소요되었으며, 1배치당 평균 경작기간은 약 33일, 정화효율은 약 80%를 나타내었다. 분해속도 상수(k)는 평균 0.1771로 나타났다. 동절기 오염물질의 감소는 생물학적인 분해요인 보다 희석, 휘발, 흡착 등 물리적인 영향을 더 많이 받은 것으로 판단된다.

향후 동일한 현장 조건에서 계절에 따른 오염토양 정화효율 파악을 위한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구의 일부는 2012년도 광운대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

Cho, C., Sung, K., Corapcioglu, M.Y., and Drew, M., 2005, Influence of Water Content and Plants on the Dissipation of Chlorinated Volatile Organic Compounds in Soil, *Wat. Air Soil Pol*., **167**, 259-271.

Cho, C.H. and Sung K.J., 2013, The Characteristics of Shallow Groundwater in Petroleum Contaminated Site and the Assessment of efficiency of Biopile by Off-gas Analysis, *J. Soil & Groundwater Env.*, **18**(2), 36-44.

Choi, H.M. and Lee J.Y., 2010, Hydrogeological Characterization of Petroleum Contaminated area in Kangwon, *J. Soil & Groundwater Env.*, **15**(2), 1-9.

Han, J.S., 2000, Groundwater Environment and Contamination, Parkyoungsa publisher, p. 525-527.

Ju, W.H., Choi, S.I., Kim, J.M., Kim, B.K., Kim, S.G., and Park, S.H., 2009, Evaluation of the Large Scale Petroleum-Contaminated Site for the Remediation of Landfarming, *J. Soil & Groundwater Env.*, **14**(4), 15-22.

Lee, J.H. and Park, K.S., 2006, TPH, CO_2 and VOCs Variation Characteristics of Diesel Contaminated Aquifer by In-situ Air Sparging, *J. Soil & Groundwater Env.*, **11**(6), 18-27.

MAF (Ministry of Agriculture and Forestry), 1997, Development of Greenhouse Heating System Using Natural Energy Resources.

Meegoda, J.N. and Hu, L., 2011, A Review of Centrifugal Testing of Gasoline Contamination and Remediation, *Int. J. Environ, Res. Public Health*, **8**, 3496-3513.

MOE (Ministry of Environment), 2007, The guideline of remediation technology for contaminated soil.

MOE (Ministry of Environment), 2010, Standardization and improvement of competitiveness for vitalization of the soil remediation industry.

Park, E.L., Lee K.R., Seo, C.I., and Cho, C.H., 2012, A Field Study on the Evaluation of Slurping and Bioaugmentation Effect in Petroleum Contaminated Area, *J. Soil & Groundwater Env.*, **17**(3), 32-38.

Paudyn, K., Rutter, A., Rowe, R.K., and Poland, J.S., 2008, Remediation of Hydrocarbon contaminated soils in the Canadian Arctic by Landfarming, *Cold Regions Sci. and Tech.*, **53**, 102-114.

Whyte, L.G., Hawari, J., Zhou, E., Bourbonniere, L., Inniss, W.E., and Greer, C.W., 1998, Biodegradation of variable-chain-length alkanes at low temperature by a Psychrotrophic *Rhodococcus* sp., *Applied and Environmental Microbiology*, **64**(7), 2578-2584.

Yadav, B.K. and Hassanizadeh, S.M., 2011, An Overview of Biodegradation of LNAPLs in Coastal(Semi)-arid Environment, *Wat. Air Soil Pol*., **220**, 225-239.