

유류오염지역 정화를 위한 슬러핑과 미생물증진법의 효율평가에 관한 현장 적용성 연구

박응렬¹ · 이광렬² · 서창일³ · 조장환^{3*}

¹환경부

²육군 제1군사령부

³한국환경공단

A Field Study on the Evaluation of Slurping and Bioaugmentation Effect in Petroleum Contaminated Area

Eung-ryeol Park¹ · Kwang-ryeol Lee² · Chang-il Seo³ · Chang-hwan Cho^{3*}

¹Ministry of Environment

²First ROK Army

³Korea Environmental Corporation

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the slurping process affecting the variation of free product and VOCs concentration and the bioaugmentation effect on bioremediation process. Free products and soil gas were extracted from 30 extraction wells installed in a petroleum contaminated area. The extraction system was operated for 10 hours per day with 1 hour on-and-off mode. The thickness of free product in extraction well was decreased from 11.7 cm to 4.5 cm and the VOCs concentration was increased from 10.37 ppm to 30.78 ppm during the operation period. After the slurping process for 2 months, contaminated soil was treated with bioremediation process in 2 cells, 15 × 40 m, biologically enhanced with adjusting oxygen, moisture and nutrients concentration. Total 1,400 L of microbial inoculant, Naturesys. (Dong Myung Ent. Co.) was added to the pile B, which has an outstanding ability for degrading petroleum hydrocarbons. The results showed that bioremediation effect in soil with the microorganisms solution is 33% higher than that in soil with only residual bacteria.

Key words : Slurping process, Free product, VOCs, Bioaugmentation, Biodegradation

1. 서 론

유류저장시설의 노후화 및 부적절한 사용에 의해 유류 유출 사고가 급증하고, 관련 법령의 강화에 따라 오염토양의 정화에 대한 관심이 고조되고 있다(장순웅, 2006; 한승호, 2005).

토양오염을 유발시키는 유류저장시설은 유류비축기지, 정유공장의 원유저장시설, 저유소, 송유관시설, 주유소 등이 있다. 이들 시설은 우리의 생활과 밀접한 관련이 있어 주변에서 흔히 볼 수 있으며, 사용량의 증가에 따라 오염

사고 또한 빈번하여 우리의 건강을 심각하게 위협하고 있다(한국지하수토양환경학회, 2005).

군부대 또한 다량의 유류저장시설을 보유하고 있으며, 그 특성상 사용규모, 사용빈도, 사용기간을 고려하면 토양오염 개연성은 적지 않을 것으로 예상된다. 최근 들어 경기도 북부 및 강원도 일원에서 군부대 내의 유류오염 정화사업이 활발하게 이루어지고 있으며, 적지 않은 비용이 투입되고 있어 어느 때 보다 유류오염 방지 및 효율적인 정화사업의 필요성이 대두되고 있다.

토양으로 유출된 오염물질은 증력에 의해 하강한다. 토

*Corresponding author : cho6272@keco.or.kr

원고접수일 : 2012. 2. 23 심사일 : 2012. 5. 13 게재승인일 : 2012. 5. 14
질의 및 토의 : 2012. 8. 31 까지

양 중에 오염물질들이 모여 물과 섞이지 않고 비교적 순수한 형태로 토양 입자 사이를 흐르게 되는 데 이를 비수용성액체(NAPL: Non aqueous phase liquid)라고 한다. 이중 물보다 비중이 높은 유체는 지하수 아래로 이동하고(DNAPL), 물보다 비중이 작은 유체(LNAPL)는 지하수 상부에 머물러 지하수와 함께 유동하게 된다.

지하수 상부를 유동하는 자유상 유류(Free Products)는 지하수의 이동방향과 수위 변화에 따라 오염구간을 확대시킨다. 또한 오염토양 정화를 위한 굴착 시 토양의 교란에 의해 비오염지역 토양의 오염을 야기 시키게 된다. 그러므로 정화현장에서 우선적으로 수행해야 하는 단계는 바로 오염원의 확산 방지를 위해 자유상 유류를 최대한 추출하여 제거하는 것이다.

바이오슬러핑은 진공압을 이용하여 지하수면 상부의 자유상 유류 및 휘발성가스를 추출, 제거할 수 있는 기술이다. 동시에 인위적인 압력변화에 의해 불포화지역이 확대되고 통기성이 향상되어 미생물의 활성도가 증진된다. 그러므로 바이오슬러핑 기술은 유류오염지역에서 오염물질의 추출과 생물학적 분해 효과를 동시에 기대할 수 있다(Miller, 1996). 자유상 유류를 감소시킴으로써 오염지역의 굴착 정화 시 교란에 의한 오염 확산을 최소화 할 수 있다(구청완 · 고석오, 2005).

유류오염토양의 정화를 위한 처리기술로는 생물학적 처리기술이 많이 적용되고 있다. 생물학적 처리기술은 오염토양에 인위적으로 미생물을 공급하는 미생물증진법(bioaugmentation)과 산소, 영양물질 및 수분 등을 조절하여 미생물의 활성을 극대화함으로써 오염물질의 분해속도를 증가시키는 미생물촉진법(biostimulation)으로 나눌 수 있다(김중원, 2010).

유류분해 미생물은 오염지역의 유류성분을 탄소원으로 써 대사작용에 이용함으로써 대상지역의 오염물질을 분해하는 역할을 한다. 오염지역에 존재하는 토착미생물은 장기간 오염물질에 순응하며 살아왔기 때문에 충분한 산소 공급에 의해 활성을 극대화 하면 오염물질을 효과적으로 분해할 수 있다(유재봉, 2009). 그러나 최적의 생육조건을 조성하여도 토착미생물의 개체수가 적은 경우에는 단기간에 생분해 효과를 얻을 수 없다. 이를 위해 특정 오염물질 분해에 적합한 미생물을 공급하여 정화효율을 높인다(주원하, 2009).

본 연구에서는 유류저장시설에서 장시간 유출된 유류에 의해 오염된 지역에서 부지외(Ex-situ) 정화 시 굴착 전 슬러핑(slurping)에 의한 자유상 유류(free product) 및 휘발성오염물질(VOCs)의 변화 특성을 파악하고, 굴착

후 부지외에서 토양경작법을 적용하면서 오염물질의 생물학적 분해에 미치는 외부미생물의 영향을 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 오염지역 현황

오염지역은 강원도 00지역에 위치하고 있으며, 대량 유류저장시설로부터 유출된 유류에 의해 오염된 지역이다. 오염면적 및 부피는 각각 6,982 m²와 11,953 m³이었으며, 지하 9 m까지 오염이 확산되었다. 지형은 남쪽이 높고 북쪽이 낮은 남고북저의 지형이며 지하수의 흐름방향 또한 지형을 따라 남쪽에서 북쪽으로 흐르고 있다.

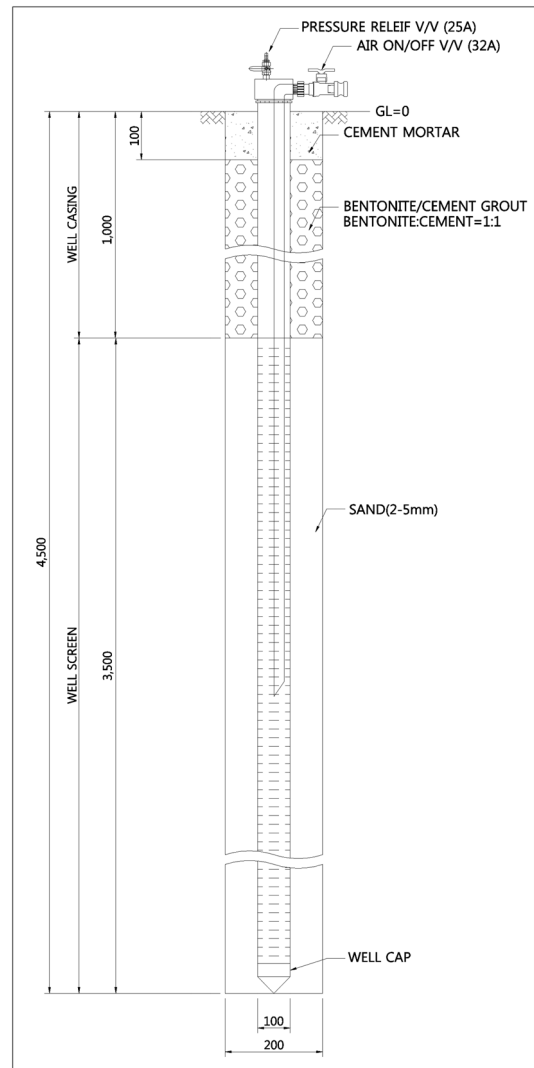


Fig. 1. Schematic diagram of the extraction well.

2.2. 슬러핑 시스템

추출관은 주 오염지역에 30개를 설치하였다. 영향반경 시험결과 대상지역의 영향반경(ROI: radius of influence)은 4.8 m로 조사되었으며, 이를 준용하여 균일하게 배치하였다. Fig. 1에 추출정의 모식도와 Fig. 2에 오염지역에 설치한 추출정의 위치를 나타내었다.

슬러핑(slurping)에 이용된 추출관은 기존의 지하수 관 측정과 유사한 형태로 제작하였다. 길이 4.5 m 직경 10 cm의 PVC 파이프를 이용하여 지상에서 1 m까지는 무공관으로 지표의 가스나 유체의 유입을 방지하였으며, 하부 3.5 m까지는 2 mm의 슬롯을 만들어 유체의 이동이 자유롭도록 하였다.

추출관은 진공펌프를 연결하여 연속적으로 토양가스를 추출하였다. 추출공기량은 각 관정에서 0.25 m³/min이었으며, 하루 10시간 동안 1시간씩 단속적(on and off)으

로 운전하였다. 추출관정 내부의 슬러핑 튜브는 수동 조작으로 지하수면 상부의 자유상 유류를 회수할 수 있도록 제작하였다. 각 추출관정은 지중배관을 통하여 슬러핑 시스템에 연결되어 있으며, 추출된 토양가스는 배가스 처리 장치에서 처리하였다.

추출관정 내부의 자유상 유류의 두께, 지하수위는 수동 수위측정기(interface meter)를 이용하여 주 1회 측정하였으며, 측정 후 슬러핑 튜브를 통해 자유상 유류를 완전히 제거하였다. 토양가스의 VOCs 농도는 슬러핑 시스템으로 유입되는 주(main) 배관에서 시료를 채취하였으며, 휴대용가스측정기(MiniRAE 2,000)를 이용하여 주 1회 측정하였다(이준호, 2006).

2.3. 정화시설

2.3.1. 구성 및 운영

본 연구를 위해 15 × 40 m(가로 × 세로) 크기의 하우스형 토양경작장 2기를 설치하였으며, 바닥 및 벽면은 콘크리트로 제작되어 외부로부터 영향을 최소화 하였다. 오염토양은 약 2개월간 슬러핑 과정을 거친 후 굴착하여 2곳의 토양경작장으로 반입하였다. 오염토양은 1 m 높이로 적치하였으며, 각 정화시설에 반입한 오염토양은 약 400 m³이었다.

오염토양의 토성(Table 1)은 양질사토(loamy sand)와 사양토(sandy loam)로 분류되었다. 총인 및 총질소의 함량은 각각 205 mg/kg 및 306 mg/kg이었으며, 유류분해균수는 1.11 × 10⁴ MPN/g으로 조사되었다.

오염토양 반입 후 각 토양경작장의 오염토양은 생분해 조건을 최적화하기 위해 주 2회 뒤집기를 실시하였으며, 여타의 조건은 동일하게 운영하였다. 토양경작장 A의 오

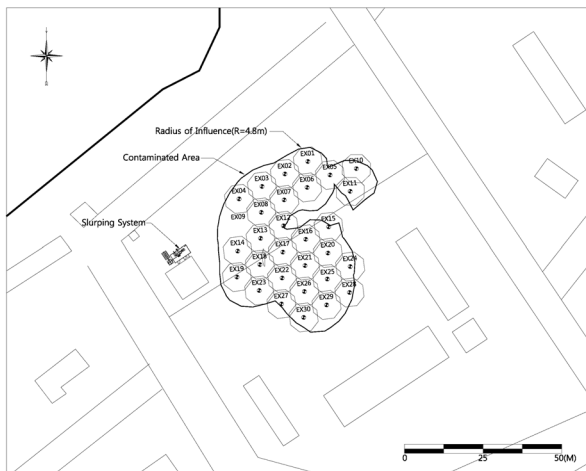


Fig. 2. Extraction well location.

Table 1. Characteristics of soil used in this study

시료	입도분석 (통과중량백분율,%)							토성	총질소 (mg/kg)	총인 (mg/kg)	유류분해균수 (MPN/g)
	4.75 mm	2 mm	0.85 mm	0.425 mm	0.25 mm	0.15 mm	0.075 mm				
MW-1	95.2	85.8	73.1	63.6	57.7	53.1	49.3	Sandy loam	350	242	6.45×10 ³
MW-2	71.6	44.4	28.0	20.0	15.9	12.8	10.6	Loamy sand	754	176	2.27×10 ⁴
MW-3	95.6	81.7	62.7	51.2	44.4	38.6	33.7	Sandy loam	159	129	6.23×10 ²
MW-4	93.3	78.2	59.0	46.2	38.3	31.3	25.4	Sandy loam	139	223	4.14×10 ⁴
MW-5	90.7	77.3	59.2	45.4	35.9	27.3	21.3	Sandy loam	30	400	3.94×10 ³
MW-6	80.7	62.0	48.0	36.8	28.9	22.9	18.3	Sandy loam	140	357	3.36×10 ⁴
MW-7	94.3	82.7	67.4	56.5	50.1	44.6	40.5	Sandy loam	117	199	4.34×10 ²
MW-8	97.6	90.7	69.4	42.0	22.7	13.9	9.5	Loamy sand	21	276	8.49×10 ²
MW-9	93.6	81.8	66.1	53.6	45.2	39.4	34.9	Sandy loam	122	186	4.80×10 ²
MW-10	85.9	68.5	48.7	36.4	28.5	24.3	20.7	Sandy loam	217	242	8.92×10 ²
평균									205	306	1.11×10 ⁴

염토양에는 수분 및 양분만 공급하였으며, B에는 실험초기에 인위적으로 외부미생물을 공급하였다. 미생물은 유류오염토양 정화에 효과가 높다고 알려진 국내 (주) 동명엔터프라이즈사의 Naturesys 1.4 kl를 희석하여 공급하였다.

토양수분은 운영기간 동안 9.18%~15.98%를 유지하였으며, C:N:P 비율은 100:10:1이 유지되도록 질소 및 인 성분을 첨가하였다.

2.3.2. 시료채취 및 분석

토양경작장에 적치된 오염토양을 길이방향으로 20 m씩 두 구역으로 구분하여 각 구역에서 4방위 시료를 채취하여 분석하였다. 토양시료의 채취 및 분석은 토양오염공정시험법에 준하여 수행하였으며, 미생물 개체수의 분석은 평판계수법을 사용하였으며, 이를 위해 LB배지(*luria-bertani media*)를 이용하였다. 실험기간동안 총 6회의 토양시료를 채취하여 총석유계탄화수소(TPH: total petroleum hydrocarbon) 농도 및 미생물 개체수를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유류오염지역 특성

3.1.1. 지하수위

초기 지하수의 깊이는 약 3.50 m(2.95 m~4.28 m)이었으나, 시간이 지남에 따라 차츰 깊어져서 45일 후에는 약 4.39 m(3.99 m~4.99 m)로 관측되었다. 모든 추출관정에서 관측된 지하수위는 시간이 지남에 따라 낮아지는 경향을 보였으며, 지역에 따라 차이는 있으나, 45일 동안 0.58 m(0.02~2.04 m)의 변화를 나타내었다. Fig. 3에 시간에 따른 지하수위 변화를 나타내었다.

3.1.2. 자유상 유류

유류오염지역에 설치한 30개의 추출관정 중 다량의 유동유분이 관측되는 11개 관정의 자유상유류 두께와 지하수위를 측정하였다. 추출정 11개 중에서 상대적으로 많은 양의 자유상유류가 관측된 지점은 EX3, EX4, EX7, EX8, EX13, EX18, EX19의 7개 지점이며, 여타의 추출관정에서는 미량의 자유상유류와 휘발성오염물질(VOCs)이 측정되었다.

추출공정이 시작된 초기의 유류두께는 11.7 cm(최고 21.0 cm)이었으며, 약 20일 경과 후 15.5 cm(최고 69.0 cm)까지 증가하였다가, 약 45일 후 4.5 cm(최고 20.0 cm)로 감소하였다. 지속적인 추출공정에 의해 주변의 자유상 유류가 유입되어 상승하다가 유입이 감소하며 감소한 것으

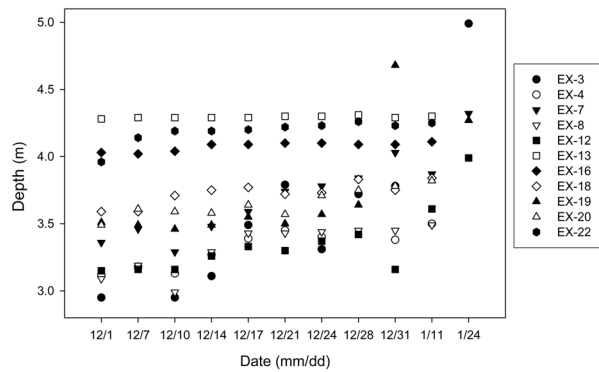


Fig. 3. Depth to water level at each extraction well.

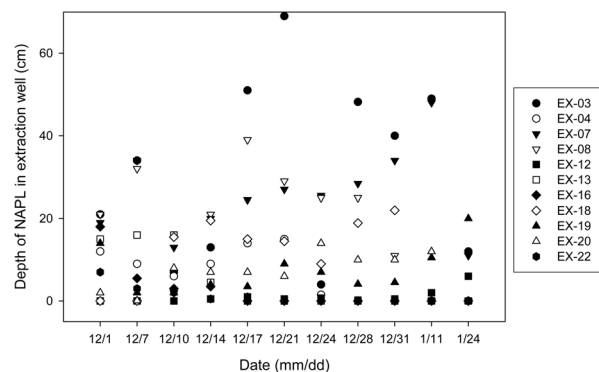


Fig. 4. The variation of NAPL depth at each extraction well.

로 판단된다. Fig. 4에 각 추출정 내부에 있는 자유상 유류 변화를 나타내었다.

오염지역에서 관측되는 유류의 두께는 관정 외부의 두께보다 2~10배까지 커질 수 있다. 이는 관정내부에는 모관대가 형성될 수 없어 증력에 저항하는 모관장력이 없기 때문에 지하수 수위가 낮아지며, 자유상유류가 존재하는 지역에서는 관정내부로 유류의 유입이 증가한다. 이 현상은 지하수면 상부의 LNAPL 무게와 대수층 지하수 상향압력이 추출정 내부에서 평형을 이룰 때까지 계속된다(송영재, 2007).

일반적으로 자유상 유류는 지하수위가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동한다. 또한 추출정 내부 자유상유류의 두께는 지하수위가 상승하면 자유상유류가 지하수면 아래에 위치하여 이동성이 저하되면서 얇아지고, 지하수위가 하강하면 유동성을 갖게 되어 지하수면 상부에 집적되므로 두꺼워진다. 대상부지의 하류방향인 북쪽에 위치한 추출정 EX3,4,7,8의 유류두께는 상승하다 감소하는 경향을 보인다. 이는 지하수 흐름의 하류방향으로서 자유상유류가 상대적으로 많이 모이며, 지하수위 하강에 따른 유동유분의 집적에 의한 증가와 슬러핑에 의한 감소의 영향으로

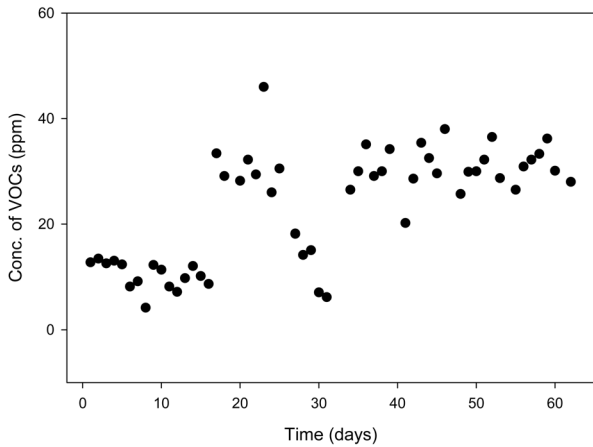


Fig. 5. The concentration of VOCs at the inlet port of slurping system.

판단된다. EX18,20에서도 상승하다 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 상대적으로 지하수의 흐름 및 하강에 의한 영향보다는 슬러핑의 영향이 강하게 나타난 결과로 판단된다.

그러나 추출정 EX13,16,22에서는 감소하는 경향을 보였는데, 이는 상대적으로 지하수위가 높아 주변에서 유입되는 NAPL의 양은 작고 슬러핑에 의한 감소영향은 크게 작용한 것으로 판단된다.

추출정 EX12,19에서는 NAPL의 두께가 오히려 상승하거나, 감소하다 상승하는 경향을 나타내었다. 이는 슬러핑이나 지하수의 흐름에 의한 영향보다 토양의 불균질성에 따라 자유상유류가 존재하는 토양층의 특성 및 두께가 상이하여 추출되는 유류의 양이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

3.1.3. 휘발성오염물질(VOCs)

슬러핑 과정에서 추출한 배출가스의 VOCs 농도를 배출가스처리시설의 유입부에서 채취하여 가스측정기(MiniRAE 2,000)를 이용하여 측정하였다. 전체 추출기간 동안 VOCs 농도는 23.16 ppm(4.2~46 ppm)으로 조사되었다. 초기 16일간의 농도는 10.37 ppm(± 2.61 ppm)이었으나, 중반부 17일간의 농도는 24.28 ppm(± 11.43 ppm), 후반부인 32일간의 농도는 30.78 ppm(± 3.97 ppm)으로 측정되었다. Fig. 5에 가스처리시설로 유입되는 추출가스의 VOCs 농도의 변화를 나타내었다.

추출이 시작된 초반부에 비해 후반부에 VOCs의 농도가 약 3배 정도 높게 나타났으며 초반부와 일정시간이 지난 후반부에는 가스농도의 편차가 중반부에 비해 상대적으로 작은 것으로 조사되었다. 진공압에 의한 VOCs의 탈

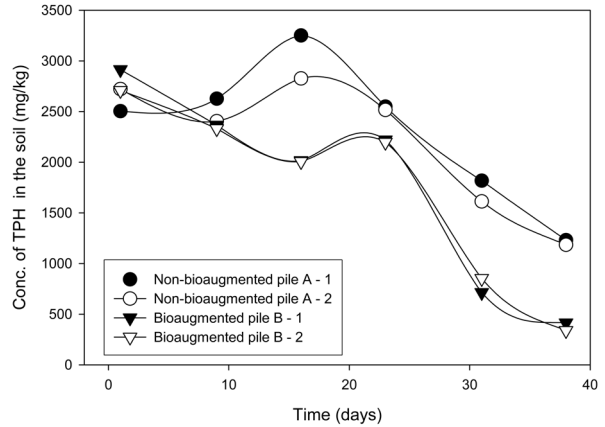


Fig. 6. The variation of TPH concentration in the soil.

착율이 약 30일 정도 후에 일정하게 유지되는 것으로 조사되었다. 32일 후에는 탈착공정의 안정화 단계로서 VOCs의 농도가 비교적 일정하게 유지되는 경향을 나타내었다.

추출공정 약 60일 동안 자유상 유류는 감소하였지만 토양에 잔류하는 오염물질은 지속적으로 VOCs의 농도를 증가시키는 것으로 조사되었다.

3.2. 오염토양 정화

3.2.1. TPH 농도

정화시설 A(pile A)와 B(pile B)에 반입되는 오염토양은 EX20, 21, 22, 25, 26 지역에서 굴착하였다. 오염토양의 초기농도는 2,504~2,914 mg/kg, 23일째 정화시설 A와 B의 TPH 농도는 각각 2,516~2,549 mg/kg, 2,197~2,220 mg/kg로 조사되었으며, 38일째에는 각각 1,185~1,231 mg/kg, 339~414 mg/kg로 감소하였다.

정화시설 운영 시작 후 23일까지 TPH 농도는 초기농도에 비해 큰 차이를 나타내지 않았으나, 23일 이후 급격히 감소하였다. 32일째 정화시설A의 TPH 농도는 초기농도 2,613 mg/kg에 비해 54%가 감소하여 1,208 mg/kg이 되었으며, 정화시설B는 초기농도 2,811 mg/kg에 비해 87%가 감소하여 377 mg/kg이 되었다.

외부 미생물을 공급한 정화시설B는 자체 미생물만을 이용한 정화시설A에 비해 약 33% 정화효율이 우수한 것으로 조사되었다. 오염토양의 TPH농도 변화를 Fig. 6에 나타내었다.

3.2.2. 미생물 농도

오염토양에 존재하는 초기 미생물의 개체수는 $1.4 \times 10^4 \sim 4.9 \times 10^4$ CFU/mL로 조사되었다. 외부 미생물을 공급하

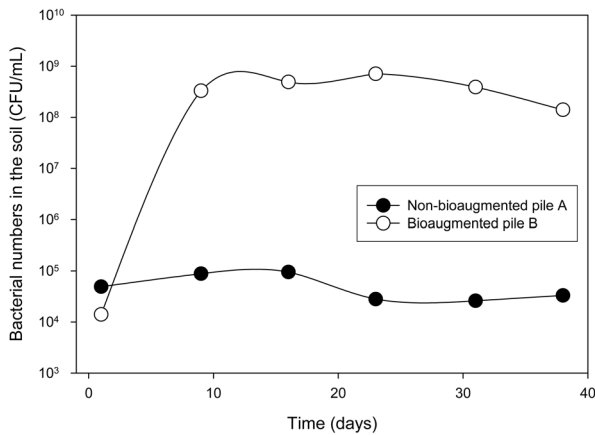


Fig. 7. The viable bacterial numbers in the soil.

지 않은 정화시설A의 미생물 개체수는 $2.6 \times 10^4 \sim 9.5 \times 10^4$ CFU/mL를 유지 하였으며, 외부미생물을 공급한 정화시설 B의 미생물 개체수는 $1.4 \times 10^8 \sim 7.1 \times 10^8$ CFU/mL로 조사 되었다.

정화시설A의 경우 기존 미생물의 호기성 조건 조성에 의한 미생물 개체수의 증가는 관찰되지 않았다. 또한 외부에서 미생물을 공급한 정화시설B에서도 외부 미생물 공급에 의한 미생물 개체수의 변화는 있었으나, 호기조건 조성에 의한 미생물 개체수의 변화는 나타나지 않았다. Fig. 7에 오염토양의 미생물 개체 수 변화를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 유류오염지역의 정화를 위해 굴착 전 슬러핑(slurping)에 의한 자유상 유류(free product) 및 휘발성오염물질(VOCs)의 농도변화 특성을 파악하고, 이 지역에서 굴착한 오염토양을 토양경작법으로 처리하면서 오염물질의 생물학적 분해에 영향을 미치는 인위적으로 투입된 외부미생물의 영향을 알아보하고자 하였다.

슬러핑 적용에 의해 대상부지의 자유상유류는 지하수 흐름에 따라 하류방향인 EX3,4,7,8에서 초기에 증가하다가 감소하는 경향을 보였는데, 이는 지하수 흐름의 하류방향으로서 자유상유류가 상대적으로 많이 모이며, 지하수위 하강에 따른 유동유분의 집적에 의한 증가와 슬러핑에 의한 감소의 영향으로 판단된다. 상대적으로 상류 부분인 EX18,20에서도 상승하다 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 지하수의 흐름 및 하강에 의한 영향보다는 슬러핑의 영향이 강하게 나타난 결과로 판단된다. 추출정 EX13,16,22에서 감소하는 경향을 보였는데, 이는 상대적으로 지하수위가 높아 주변에서 유입되는 NAPL의 양은

작고 슬러핑에 의한 감소의 영향이 크게 작용한 결과이다.

그러나 추출정 EX 12,19에서는 오히려 상승하거나, 감소하다 상승하는 경향을 나타내었다. 이는 슬러핑이나 지하수의 흐름에 의한 영향보다 토양의 불균질성에 따라 자유상유류가 존재하는 토양층의 특성 및 두께가 상이하여 추출되는 유류의 양이 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

오염지역의 자유상유류를 회수하는 것은 굴착 시 토양의 교란에 의한 오염물질의 확산을 방지하고, 인위적인 압력변화에 의해 불포화지역이 확대됨으로 통기성이 향상되어 미생물의 활성도가 증진된다. 자유상유류를 최대한 추출하기 위해서는 지하수의 흐름방향, 지하수위 및 토질특성을 잘 파악하여 추출정 위치를 선정하여야 한다.

토양경작장 운영 결과 TPH의 초기농도가 2,500~3,000 mg/kg인 오염토양의 경우 토착미생물만으로 생육조건을 활성화시켜 오염토양을 정화하는 것보다 생육조건 최적화 및 인위적으로 외부미생물을 공급한 경우가 약 33% 정도 효율이 우수한 것으로 조사되었다.

생분해 조건을 최적화 하였으나 두 조건 모두 미생물 개체수가 증가하는 경향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 이는 현 토양의 조건에서 미생물의 성장과 사멸의 비율이 비슷하기 때문인 것으로 판단된다.

슬러핑의 적용으로 유류오염지역에서 자유상유류 및 휘발성가스의 추출과 생물학적 분해 효과에 의해 오염물질이 효과적으로 감소하였으며, 또한 자유상 유류의 제거로 인해 오염토양 굴착시 오염지역의 확산을 방지할 수 있었다. 그러나 지중에서 통기성이 미생물 활성도 증진에 미치는 영향은 명확하게 조사되지 않았다.

슬러핑 시스템의 자동화 및 지하수 변화에 따른 자유상 유류의 유동에 대한 추가적인 연구와 보다 정확한 미생물 공급의 영향을 파악하기 위해서는 오염농도 및 토양특성에 따른 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

구청완, 고석오, 2005, 토양내 저휘발성 유류오염물 제거를 위한 고온공기 주입/추출기술 연구, 지하수토양환경, 10(1), 6-12.
 김종원, 최상일, 양재규, 김보경, 2010, 토양경작법 사례 분석을 통한 적용방안 개선, 지하수토양환경, 15(1), 19-28.
 송영재, 2007, 유류오염토양에 대한 개량 슬러핑의 통기성과 효율성 개선에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위 논문.
 유재봉, 김정호, 김국진, 오승택, 이철효, 박이경, 장윤영, 2009, 생장 온도 범위별 최적의 유류분해 미생물을 이용한 토양경작 정화기술의 효율성 제고에 관한 현장 적용성 연구, 지하수토양환경

경, **14**(5), 10-17.

이준호, 박갑성, 2006, 공기분사공정에 의한 유류오염대수층의 TPH, CO₂, V OCs 변화 특성, 지하수토양환경, **11**(6), 18-27.

장순웅, 이시진, 조수형, 윤준기, 2006, 디젤오염 토양 및 지하수 복원을 위한 공기주입정화법 실험실 연구 : 공기주입량과 공기주입방식의 영향, 지하수토양환경, **11**(4), 10-17.

주원하, 최상일, 김종민, 김보경, 김성규, 박상현, 2009, 대규모 유류오염부지에 적용된 토양경작법의 정화효율 평가, 지하수토양

환경, **14**(4), 15-22.

한국지하수토양환경학회, 2005, 토양환경공학, 향문사.

한승호, 공성호, 강정우, 2005, 유류오염 토양/지하수 정화를 위해 개발된 DSB(Deep-Site Biopile) System 현장적용특성, 지하수토양환경, **10**(2), 28-34.

Ralinda R. Miller, 1996, Technology Overview Report : Bio-slurping, Ground-Water Remediation Technologies Aanalysis Center, TO-96-05.