

## 유류오염토양 정화를 위한 biopile의 현장직용

조장환, 박정구, 서창일, 전권호  
환경관리공단 토양복원진단팀  
cho6272@emc.or.kr

### 요약문

본 연구에서는 현장규모의 biopile을 제작하여 유류로 오염된 토양을 정화하였다. 오염토양의 TPH농도는 평균 2,800mg/kg(최고 3,590mg/kg)이었으며, 오염토양의 양은 746m<sup>3</sup>이었다. Biopile(17×20×2.5m)을 약 3개월간 운전하며 일정 시간 간격으로 토양가스(O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 및 VOCs) 및 토양의 TPH농도를 분석하였다. 지속적인 공기의 주입/추출에 의해 biopile내부는 호기조건을 유지하였으며, 미생물의 활성도 증가에 따라 이산화탄소의 농도가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 토양가스 분석결과 휘발성 유기오염물질(VOCs)은 약 40일 경과 후 90% 제거되었으며, 90일 경과 후 토양의 TPH 제거율은 98%로 나타났다.

주제어 : biopile, 유류오염토양, 토양가스, 공기의 주입/추출, 미생물 활성도

### 1. 서론

Biopile은 미생물 반응을 통해 굴착된 오염토양을 정화하는 대표적인 *ex-situ* 오염토양 정화 기법이다. 오염토양에 인위적으로 미생물을 주입하거나, 산소, 영양물질 및 수분 등을 조절하여 미생물의 활성을 극대화함으로써 오염물질의 분해속도를 증가시킨다<sup>3)</sup>.

본 기법의 장점은 (1) 여타의 기법에 비하여 설계 및 시공이 간단하고, (2) 적절한 조건에서 처리시간이 6개월~2년 정도로 짧은 편이며, (3) 오염토양의 처리비용이 저렴하고, (4) landfarming 기법에 비해 소요부지가 작을 뿐 아니라, (5) 밀폐식 기법으로 휘발성 오염물질의 대기 방출에 의한 2차 오염을 유발시키지 않는 것으로 알려져 있다<sup>5)</sup>. 이러한 biopile 기법은 여타의 생물학적 정화기법과 마찬가지로 정화효율을 극대화하기 위해서는 토착 미생물의 활성을 높여주거나, 유류분해 미생물의 개체수를 증가시켜 주어야 한다. 국내에서도 유류오염토양을 정화하기 위한 미생물의 분리 및 미생물 재제의 개발과 관련된 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>1~2)</sup>.

미생물의 활성은 토양의 수분함량, pH, 통기성, 영양물질 및 온도 등에 따라 민감하게 변화하기 때문에 biopile의 최적 조건을 유지하기 위해서는 지속적으로 모니터링을 실시하면서 운전조건을 수정해야 한다. 유류분해 미생물의 활성을 극대화 하기위해서 토양의 수분함량은 10~20%정도가 적정하며, pH는 5~9의 범위가 적절하다. 토양의 pH가 적정범위를 벗어났을 경우에는 석회(lime), 황산암모늄 및 황산알루미늄을 첨가하여 적정하게 조절하여야 한다. 영양물질의 적정범위는 탄소:질소:인(C:N:P)의 비율이 100:10:0.5에서 100:10:1 범위가 적정한 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>.

본 연구에서는 장기간 유류에 노출된 오염토양을 정화하기 위한 현장규모의 biopile을 제작·운전하였으며, 주기적인 모니터링을 실시하여 현장조건에서 biopile의 오염토양 정화효율을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 오염현황

본 연구의 대상부지는 약 1,200㎡이며, 수십 년 전부터 중산간부에 설치되었던 송유관에서 등유로 추정되는 유류가 1~2m 깊이의 천층지하수를 따라 하부로 이동하여 산의 아래지역까지 오염이 확산된 것으로 파악되었다.

토양정밀조사 결과 대상부지의 북서쪽을 중심으로 지하 3.5m 까지 오염이 심각한 것으로 조사되었으며 오염지역의 TPH농도는 평균 2,800mg/kg(최고 3,590mg/kg)이었다. 정화대상 오염토양은 토양환경보전법상 '나' 지역의 우려기준(2,000mg-TPH/kg) 초과지역을 대상으로 하였다. 오염토양의 면적은 대상부지의 56%정도에 해당되며, 오염토양의 부피는 지하 3.5m까지 약 505㎡이었다. 굴착하여 매립폐기물 및 건축폐자재를 선별한 후 처리대상 오염토양은 746㎡으로 조사되었다.

### 2.2 Biopile 설치

Biopile(17×20×2.5m)의 바닥은 콘크리트 타설 후 HDPE Sheet을 포설하여 침출수의 누출을 방지하였으며, 침출수의 배출이 용이하도록 바닥은 1~2°의 경사를 두고 PE 유공관을 설치하여 지정된 장소에 차집될 수 있도록 하였다. 차집공에 모인 유출수는 유수분리기를 거쳐 처리한 후 배출되도록 하였다. 토양 내 공기 공급을 위하여 biopile 상부 1.5m 지점에 유공관을 3열로 설치하였으며, 블로워에 연결된 분배기를 통하여 미생물에 필요한 산소를 공급하였다.

오염토양의 상부에는 영양물질과 수분 공급용 PE관을 설치하였으며, 이를 통하여 주기적으로 토양가스를 배출시킬 수 있도록 설계하였다. 배출된 가스는 활성탄 흡착탑을 통과시켜 정화 후 대기 중으로 배출하였다. 토양가스를 측정하기 위하여 biopile 상층부에 토양가스 모니터링 관정을 설치하였다<sup>3)</sup>. 미생물 재제는 국내 R사의 제품을 사용하였으며, 유류분해 미생물은 10<sup>6</sup>CFU/g이상, C:N:P 비율은 100:10:1이 유지되도록 첨가하였다.

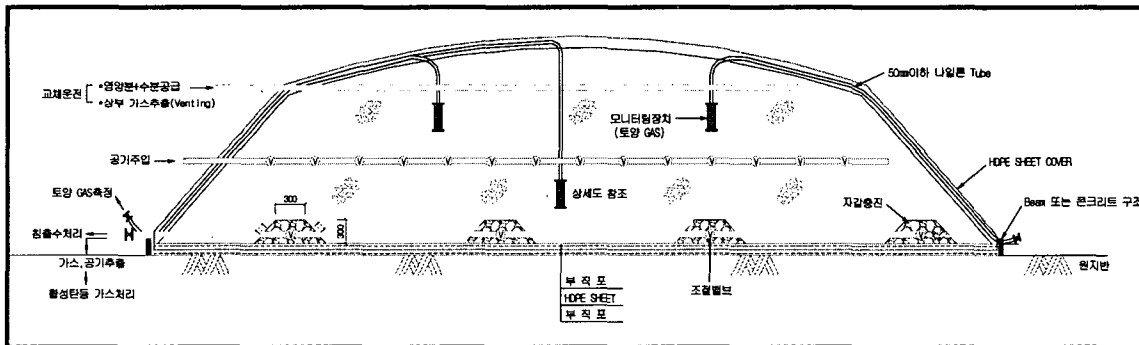


Fig. 1. The schematic of the biopile

### 2.3 모니터링

Biopile 상부 6지점에 가스 모니터링 관정을 설치하여 O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> 및 VOCs를 GA-2000 및 Passport PID Meter를 이용하여 측정하였다. 시료의 채취 및 분석은 토양오염공정시험법을 준용하였으며, biopile 3지점에서 각각 2깊이(1m 및 2m)로 수동타격식 토양시료 채취기를 이용하여 채취하였다.

채취한 토양은 오염정도에 따라 10~25g을 비이커에 넣고 무수황산나트륨을 적당량 섞어 수분을 제거한 후, 디클로로메탄 100ml를 넣었다. 초음파추출기로 3분씩 2회 이상 반복하여 얻어진 추출액을 여과한 다음, 소량의 디클로로메탄으로 씻어냈다. 이 추출액과 세척액을 합하여 크로마토그래프

용 무수황산나트륨으로 탈수한 후, 유출액을 K.D. 농축기로 2ml가 될 때까지 농축하여 GC로 분석하였다. 오염토양의 TPH분석에 이용된 GC는 FID 검출기를 장착한 Varian(GC3600CX)이며, CP-Sil8CB Low Bleed/MS (30m×0.25mm×0.25 $\mu$ m) 컬럼을 이용하였다. GC의 내부온도는 45도에서 320도까지 8 $^{\circ}$ C/min의 승온조건으로 분석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 산소 및 이산화탄소의 농도변화

Biopile의 중간 배관을 통해 약 12 m<sup>3</sup>/min로 공기를 주입하였으며, 운전 중 산소농도 측정결과, 15.4~21.0 % (평균 산소 농도 : 20.2 %)로 나타나 호기조건에서 운전되고 있는 것으로 조사되었다(Fig. 2,(a)). 오염토양 굴착 및 야적과정 중에 대기 접촉 및 회석에 의해 초기 이산화탄소 농도는 감지되지 않았지만, 공기주입과 미생물 활성도를 증가(수분, 미생물 및 영양분 주입 등)에 따라 오염물질의 생분해가 이루어져 이산화탄소 농도가 최대 2.0 % 까지 증가하였다(Fig. 2,(b)).

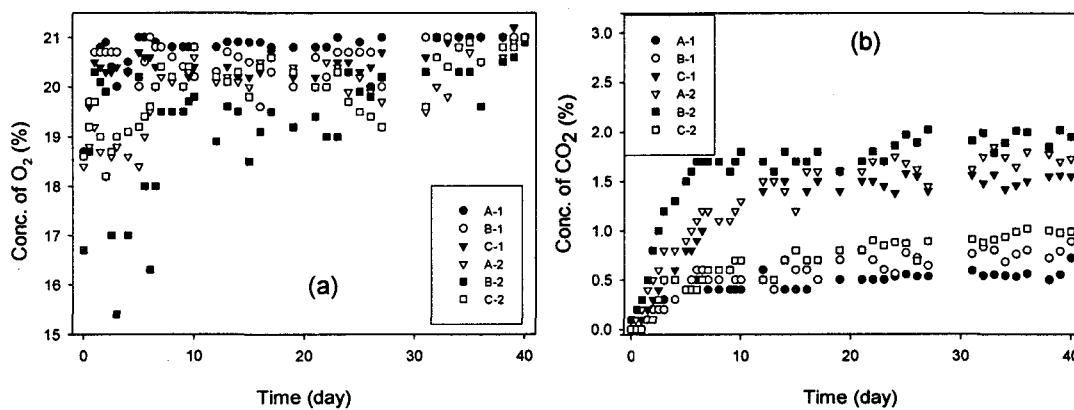


Fig. 2. The relative of the O<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> concentration of soil-gas in the biopile.

#### 3.2 VOC 및 TPH 농도변화

Biopile 야적 후 초기 VOC 농도는 최대 54 ppmV (평균치 : 34 ppmV)이었으나, 7일 후에는 평균 10 ppmV로 감소되었다. 이는 운전과정에서 공기주입과 토양가스 추출을 병행함으로써 야적토사의 공기투과성이 증가하여 물리적 공기치환(회석)이 이루어 졌으며, 미생물 및 영양제 주입에 의한 미생물 활성도 증가에 따라 오염물질의 생분해가 이루어져 VOC 농도가 감소한 것으로 판단된다(Fig. 3,(a)).

굴착토양 선별 후 biopile 초기 토양의 TPH 농도는 굴착 전 2,211~3,590 mg/kg에 비해 약 30% 정도 감소한 것으로 나타났는데, 이는 선별과정에서 대기 중 휘발 및 회석 효과와 선별된 토양에 미생물 및 영양제를 주입하여 균일하게 혼합되었기 때문인 것으로 판단된다. 90일 후 토양의 TPH농도는 약 98%정도까지 감소하였다(Fig. 3,(b)).

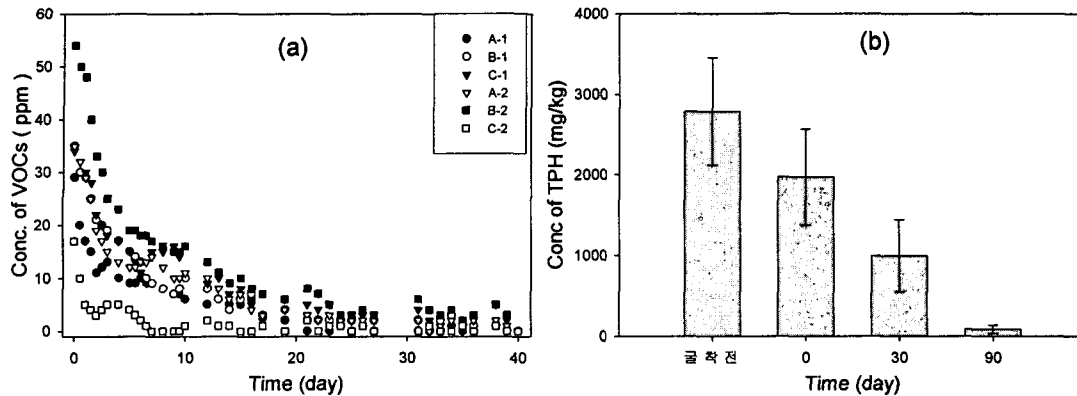


Fig. 3. The remaining concentration of VOCs in soil-gas and TPH concentration in soil.

#### 4. 결론

본 연구에서는 장기간 유류로 오염된 토양을 정화하기 위하여 biopile 기법을 적용하였으며, 주기적인 모니터링을 통하여 biopile의 효율을 파악하였다.

지속적인 공기의 주입추출에 의해 biopile 내부는 운전기간 동안 호기조건을 유지하였으며, 미생물의 활성도 증가에 의해 이산화탄소의 농도는 지속적으로 증가하였다. VOCs의 농도는 40일 후 90% 감소하였으며, 90일 후 토양의 TPH농도는 약 98%정도까지 감소하였다. 지속적인 토양 가스의 주입/추출에 의해 토양내부는 호기조건이 형성되며, 미생물의 활성이 극대화되는 것으로 나타났다.

Biopile 기법은 비휘발성 유기오염물질 뿐만 아니라 휘발성 오염물질의 처리에도 효과적인 것으로 사료되며, 향후 미생물의 첨가에 따른 효율평가에 대한 연구가 좀 더 깊이 있게 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### 4.참고문헌

1. 조미영, 김무훈, 이두명, 최우진, 최진규, "유류오염토양 복원을 위한 Biopile 적용성 연구", 한국지하수토양환경학회 춘계학술대회 논문집, pp326-329(2003)
2. 박종천, 오재영, 정용욱, 이우법, "Biopile을 이용한 유류오염토양의 복원에 관한 연구", 한국지하수토양환경학회 추계학술대회 논문집, pp310-314(2002)
3. F. Michael von Fahnestock, Lawrence A. Smith, Godage B. Wickramanayake, Matthew C. Place, "Biopile Design and Construction Manual", Technical Memorandum TM-2189-ENV, Naval Facilities Eng. Service Center, Port Hueneme, CA, 93043-4301
4. John W. Davis, Steve Madsen, "Factors affecting the biodegradation of toluene in soil", *Chemosphere*, Vol. 33, No. 1, pp. 107-130(1996)
5. USEPA, "How to evaluate alternative cleanup technologies for underground storage tank sites", EPA 510-B-95-007(1995)