

## 생물학적 복원기술에 의한 유류 오염토양의 정화

강희만 · 이주광 · 이용은 · 권수열\*

한국도로공사

\*한국방송대학교

env@freeway.co.kr

### 요 약 문

현장에서 채취한 토양을 이용하여 Microcosm test를 실시한 결과 온도 및 수분함량이 높을수록 BTEX 분해율이 증가하는 것으로 나타났으며 산소 농도는 21~32% 정도가 적당하였다. 그러나 BTEX 초기농도가 높은 경우에는 생분해율이 감소하는 것으로 나타났다. Bioventing 공법을 현장에 적용한 결과 OUR(Oxygen Utilization Rate)값은 6.3~16.3 %O<sub>2</sub>/day로 조사되었으며 Biodegradation rate 값은 3.4~8.8 mg hydrocarbon/kg soil/day로 조사되어 생물학적 처리 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

### 1. 서론

지하저장탱크로부터 누출된 유류로 인한 토양 오염의 피해는 장기적이고 광범위하여 처리에 긴 시간과 막대한 경비가 소요됨에 따라 오염된 토양에 대한 복원 기술의 연구는 매우 시급하다. 특히 유류로 오염된 토양의 경우 석유탄화수소를 많이 함유하고 있어 생물학적 처리공정의 적용이 매우 용이하다. 또한 생물학적 처리의 경우 처리비용이 비교적 저렴하고 타공법에 비해 부대 처리시설이 필요 없으며 장시간 방치해도 큰 문제가 없는 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 생물학적 처리의 가능성을 평가하기 위하여 현장 미생물을 이용하여 실내실험(Microcosm Test)을 수행하였으며 pilot-scale 규모의 현장실험을 수행하였다.

### 2. 실내실험 (Microcosm Test)

토착(현장) 미생물에 의한 BTEX 화합물의 생분해를 위한 온도, 수분함량, BTEX농도, 산소 등의 영향을 평가하기 위하여 연구지역의 BTEX 오염물질을 대상으로 Microcosm Test를 실시하였다.

Microcosm test는 현장에서 직접 채취한 오염토양을 160 ml Serum Battle에 주입한 후 영향인자(온도, 수분함량, BTEX농도, 산소)를 변화시키면서 수행하였다(표 1).

온전온도를 7, 13, 23℃, 수분함량을 5, 15, 25%로 변화시켜가며 온도 및 수분함량이

BTEX 분해에 미치는 영향을 살펴본 결과, 23°C-25%에서는 BTEX가 4~6일 동안 적정 농도 이하로 제거되는 것으로 나타난 반면에 7°C-5%에서는 6일 이후까지도 완전히 제거되지 않는 것으로 나타나고 있다(그림 1). 이는 온도가 높을수록 미생물의 대사활동이 활발해지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 수분함량의 증가할수록 분해가 활발히 일어나는 것으로 나타났는데(그림 2) 이는 미생물이 기질을 흡수하기 위해 적정한 수분이 필요하기 때문이다. 즉 대사과정에는 반드시 적정한 수분 및 온도가 중요한 인자로 작용한다는 것을 알 수 있었다.

표 1. Microcosm Test 운전조건

Microcosm	Source	Initial BTEX (mg/kg)	Moisture Content(%)	Temp. (°C)	O <sub>2</sub> conc. (%)
BTEX	A, B	1,161	5, 15, 25	7, 13, 23	No Control
	C	728	15	13	
		1,601			
		2,339			
D	1,161	15	13	75, 32, 21 5	

온도 13°C, 수분함량 15%의 조건에서 BTEX 농도(2339, 728, 1601 mgBTEX/kg)와 산소 농도에 따른 오염물질 분해율 실험결과 초기 오염농도가 높을수록 분해하는데 소요되는 시간이 증가하는 것으로 나타났으며 BTEX 1,161 mg/kg을 제거하는데 최적의 산소는 21~32%가 가장 적당하다는 사실을 알 수 있었다.

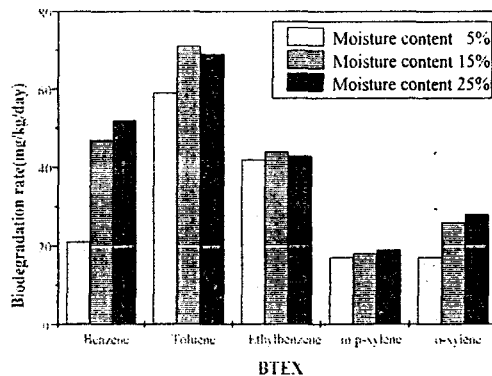
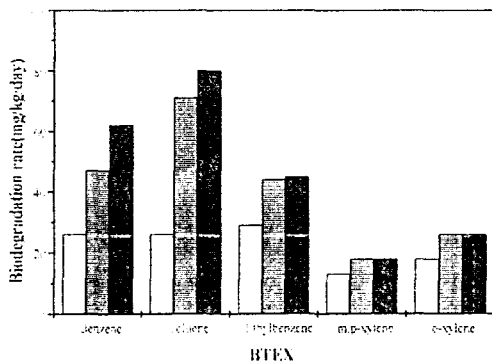


그림 1. 온도에 따른 BTEX 분해율 비교

그림 2. 수분함량에 따른 BTEX 분해율 비교

또한 BTEX 각각 성분의 분해속도는 대체로 toluene의 분해가 가장 빨리 일어나는 것으로 나타나고 있으며, 이러한 이유는 미생물 분석결과 실험에 사용된 토양내에 toluene을 기질로 사용해서 나머지 성분들을 분해하는 *pseudomona sp.*가 우점종으로 존재하기 때문인

것으로 판단된다. 본 실험결과로부터 Toluene > Benzene > Ethylbenzene > o-Xylene > m,p-Xylene 순서로 분해가 일어나는 것으로 관찰되었다.

### 3. 현장실험 (Bioventing)

오염지역 중앙 하부지역에 주입정을 설치하였으며 공기주입을 위한 블로워를 설치하였는데 진공펌프는 최대 진공압 1,100 mmH<sub>2</sub>O, 최대 공기량 13 m<sup>3</sup>/min의 용량이었다. 공기 주입관은 50 mm의 PVC 파이프가 되어 있으며 스크린은 상부 1 m까지 설치하였다. In situ respiration 실험과 공기투과계수를 구하기 위하여 주입정 주변의 4개의 모니터링 well을 이용하였다.

주입정에 일정유량의 공기를 주입하면서 관측정에서의 압력변화를 이용하여 공기투과계수를 구한 결과 0.3 ~ 10.5 darcy 값을 나타냈는데, 이 값은 본 현장의 토양이 fine sand에서 medium sand에 해당되는 값을 보여주는 것이며 그 값이 어느 정도 큰 차이를 보여주고 있어 지반이 불균일한 지형으로 구성되어 있음을 보여준다. 공기투과계수 결정시 측정된 각 모니터링 well에서의 최대압력을 이용하여 공기를 주입하는 경우의 영향반경을 계산한 결과 영향반경은 대략 2.8 ~ 2.9 m 정도로 나타났다. 이때 공기 주입유량은 0.38 m<sup>3</sup>/min이었고 진공압력은 1,100 mmH<sub>2</sub>O 였다.

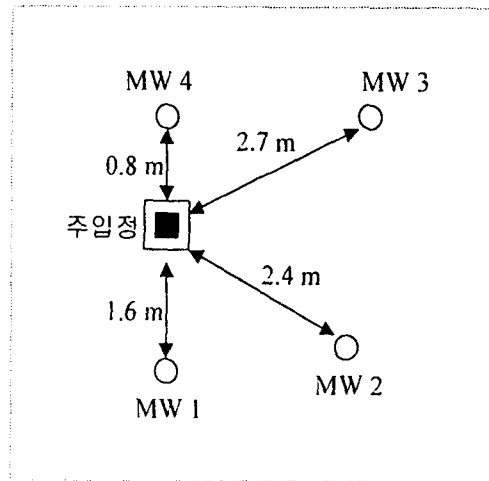
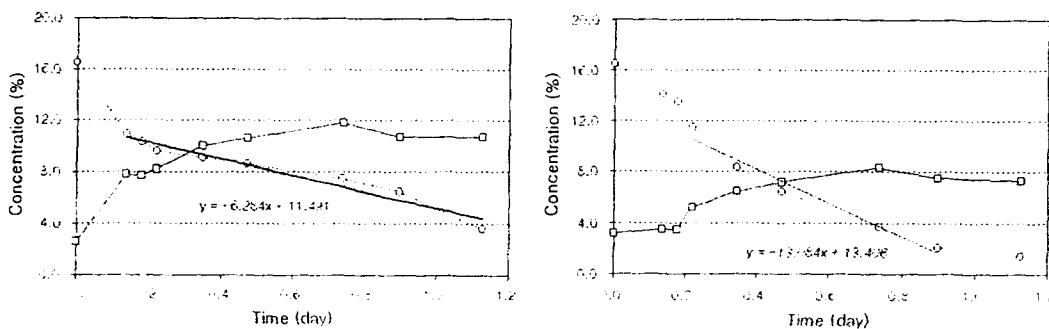


그림 3. 바이오벤팅 공정을 위한 주입정 및 모니터링 well

바이오벤팅 실험 전에 관측공의 토양가스(산소, 이산화탄소 및 탄화수소)들의 농도를 측정 한 결과 산소농도는 2~4%내외, 이산화탄소의 농도는 6~10% 정도를 나타내어 본 현장의 호기성 토양미생물을 이용한 생물학적 복원의 적용가능성을 보여 주었다. 오염현장 미생물의 생분해 정도를 측정하는 In-situ Respiration(ISR) 실험을 통해 도출한 Oxygen Utilization Rate(OUR) 값은 6.3~16.3%O<sub>2</sub>/day로 비교적 큰 값을 나타내었다(그림 4).



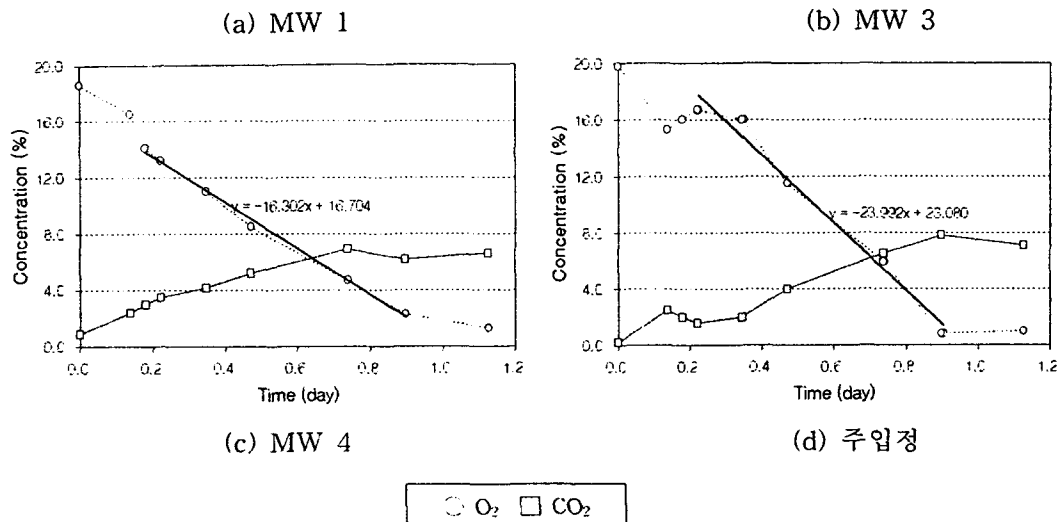


그림 4. ISR 실험시 주입정 및 관측정 토양가스 중 산소, 이산화탄소 농도

한편 이 값을 이용하여 구한 Biodegradation rate 값은 3.4~8.8 mg hydrocarbon/kg soil/day로 실험실에서 구한 30-80 mg hydrocarbon/kg soil/day 보다는 작으나 문헌상의 자료들과는 거의 유사하거나 큰 것으로 나타났다. ISR 실험시 토양가스 중 BTEX의 농도 초기에는 정도의 차이는 있지만 각 well에서의 BTEX 농도가 다소 감소하는 추세를 보였으며 시간이 지나면서 BTEX 농도가 다시 증가하였는데 이는 산소부족 때문으로 사려된다. 한편 현장에 적용한 바이오벤틱 운전 결과는 운전기간이 너무 짧았던 관계로 정확한 바이오벤틱의 효과를 보여주기에는 부족하다고 사려된다.

#### 참고문헌

1. Johnson et al., "Quantitative Analysis for the Cleanup of Hydrocarbon-Contaminated Soils by In Situ Soil Venting", Groundwater, 28(3), 1990.
2. AFCEE, "Bioventing Principles and Practice, Vol 1 : Bioventing Principles", EPA, 1995
3. AFCEE, "Bioventing Principles and Practice, Vol 1 : Bioventing Design", EPA, 1995.
4. Norris et al., "H/B of Bioremediation", Lewis publisher, 1996.