

## 미생물계면활성제를 이용한 오염토양 복원기법과 현장적용성에 관한 연구

송 태을, 상 병인, 김 만호, 황 종식  
한화에너지(주) 환경사업팀

### 요 약 문

오염토양 복원의 신기술로서 미생물계면활성제를 이용한 생물학적 정화법(Bioremediation)의 표준화된 절차와 현장적용 결과를 제시하였다. 적절한 양분과 수분 그리고 산소를 공급하여 유류 오염물질의 생물학적 제거효율을 극대화시킬 수 있었으며 특히 유류오염물질을 효과적으로 분산시키기 위해 미생물계면활성제를 사용함으로써 오염된 토양을 단기간 내에 복원하는데 상당히 효과적인 기술임을 확인 할 수 있었으며 지속적인 현장적용 기술의 개발을 통하여 국내외적으로 당면하고 있는 토양오염문제를 해결하는데 크게 이바지 할 수 있을 것으로 사료된다.

### 1. 서 론

1996년 1월 6일 시행된 토양환경보전법과 그 하위 법령 등에 의해 토양 오염 유발 시설 및 토양 오염물질의 지정과 관리, 토양보전 대책 지역 지정 등에 대한 법적 근거가 마련되었다. 아울러 토양환경보전법 제19조에 "오염토양 개선사업의 실시를 오염 원인자에게 명할 수 있다."라고 명시됨으로써 토양오염 방지와 평가뿐만 아니라 오염이 확인된 지역의 복원(Remediation)문제가 새로운 분야로 인식되게 되었다.

1980년 CERCLA(Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act)의 Superfund 프로그램과 1986년 SARA(Superfund Amendments and Reauthorization Act)규정에 의하여 미국 EPA는 유독 물질로 오염된 지역을 정화할 책임을 지고 SITE(Superfund Innovative Technology Evaluation)프로그램을 운영함으로써 190여개에 이르는 현장적용 경험과 관련된 신기술을 확보하게끔 되었다. 이러한 기술 가운데 생물학적 정화법은 오염물질을 완전히 분해하여 전혀 독성이 없는 물질로 만든다는 것과 제거 레벨이 ppb단위까지 가능하다는 장점으로 인해 최근들어 가장 활발히 현장 적용되고 있으며 기술 수준 또한 상당히 높다.

따라서 본 논문에서는 생물학적 정화법의 최신 기술로서 미생물계면활성제를 이용한 방법을 간단히 소개하고 실제 현장에의 적용성에 관해 논하고자 한다.

### 2. 미생물계면활성제를 이용한 생물학적 정화법

생물학적 정화법이란 유기물을 분해 가능한 미생물을 이용하여 오염물질의 독성을 제거하여 환경 친화적인 물질로 만드는 기술을 총체적으로 의미한다. 즉 특정오염물질을 생분해할 수 있는 미생물이 생장하는 데 적합한 pH, 온도, 습도 등의 생장 조건을 조절하고 인산, 질소 등의 영양분과 호기성 세균일 경우 산소를 공급하여 오염물질의 분해를 극대화하는 기술이다. 이를 다시 세부적으로 분류하면 Table 1과 같다.

미생물을 이용하여 오염토양 내의 유류 오염물질을 제거하는 데 있어 그동안 가장 큰 문제가 되어 왔던 부분은 오염토양에 접촉되어 있는 오염물질의 입자가 클 경우 미생물이 오염물

질 내부로 침투하지 못하고 외부에서부터 이를 순차적으로 분해하기 시작하므로써 타 복원기법에 비해 비용이나 제거효율 면에서 큰 장점을 지닌 반면 상대적으로는 복원 시간이 길어 진다는 단점이 있다는 것이었다. 따라서 인체에 독성이 없는 미생물계면활성제의 상용화와 함께 국내 최초로 이를 현장에 직접 적용시켜봄으로써 유류 오염물질의 우선적 분산(Emulsification) 과정을 통한 생물학적 처리 효율의 탁월한 상승효과와 함께 복원기간 단축의 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 1에 일반적인 미생물계면활성제를 이용한 생물학적 정화법을 도시하였다.

분류 기준	방법	특징
초기 미생물의 존재 유무	Biostimulation	- 오염 지층에 자생하는 미생물을 이용 - pH, 온도, 영양물질의 양을 조절 - 석유의 경우 호기성 세균에 대해 산소 공급 - 오염된 물질이 오래 방치된 경우 미생물이 자생하므로 효과적
	Bioaugmentation	- 특정 오염물질에 적합한 미생물을 공급 - 이후 작업은 Biostimulation과 동일
처리 위치	원위치 복원 (In-situ)	- 자연 상태에서 처리 - 광범위한 오염에 적합
	지상추출 복원 (Ex-situ)	- 지상으로 운반하여 처리 - 소규모의 오염에 적합 - 효과적인 인자 조절 가능

(Table 1) 생물학적 처리기법

### 3. 현장 적용성 연구

#### 1) 오염지역의 오염도 평가

지하저장탱크(UST ; Underground Storage Tank)에서의 유출과 배관망의 누수에 의해서 Diesel과 Gasoline에 의해 심각하게 오염되었을 것으로 판단되는 주유소를 대상으로 작업하였다. 첨단 시료채취 및 분석 장비를 동원한 일주일간의 정밀평가작업을 거쳐 Fig. 2에서와 같이 3개 지역(A, B, C)에 걸쳐 광범위하게 형성된 오염층을 확인할 수 있었다.

대상오염지역 주변 토층은 Silt가 다수 함유된 Sandy Soil이었으며 지하 약 1.5m 부근에 포화된 점토층이 존재하므로 오염 물질이 지하 심부까지는 침투하지는 않았을 것으로 판단되었으며 실제 측정 결과에서도 지하 2m 이상 심부에서는 오염물질이 검출되지 않았다. 복원작업 전 평균 초기 오염도를 전문분석GC를 이용하여 측정한 결과 Table 2에 나타난 것과 같았으며 토양환경보존법에 명시된 우려기준과 대책기준이 각각 80ppm과 200ppm인 것을 감안할 때 오염농도가 상당히 높다는 것을 알 수 있었다. TPH(Total Petroleum Hydrocarbon), BTEX(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene)의 측정은 각각 EPA 418.1, EPA 8015M Standard Method에 의해 수행되었다.

처리 위치	TPH(ppm)	BTEX(ppm)
A 지역	538.4	101.2
B 지역	488.6	114.3
C 지역	1331.0	347.8

(Table. 2) 대상 지역의 초기 오염도

## 2) 복원 과정

본 오염지역의 경우 초기 오염농도가 상당히 높은 반면 오염된 범위가 협소하고 천부지층이므로 Landfarming을 이용한 생물학적 정화법을 적용하기로 결정하였다. 1차, 2차 처리에서는 충분히 배양된 호기성 미생물체가 포함된 미생물계면활성제와 산소공급용액, 보조영양물질을 적정 비율로 투여하였으며 3차 단계에서는 산소공급용액과 보조영양물질만을 투여하였다. 처리 단계별 소요 기간은 2주일이며 개토부터 복토시까지 총 작업 기간은 6주가 소요되었다. 각 단계 별로 투입된 미생물계면활성제와 산소공급용액의 양을 Table 3에 나타내었다. 한편 미생물의 활발한 성장을 위해서는 다량의 수분이 필요하므로 수시로 수분을 공급하였다.

구역	처리 토양 m <sup>3</sup>	구분	1차 처리 l/m <sup>3</sup>	2차 처리 l/m <sup>3</sup>	최종처리 l/m <sup>3</sup>
A	108	미생물 계면활성제	1.25	0.625	미처리
		산소공급용액	1.25	1.25	1.25
B	64.5	미생물 계면활성제	2.50	1.25	미처리
		산소공급용액	2.50	2.50	2.50
C	25	미생물 계면활성제	2.50	1.25	미처리
		산소공급용액	2.50	2.50	2.50

(Table 3) 미생물 계면활성제와 산소공급용액의 투여량

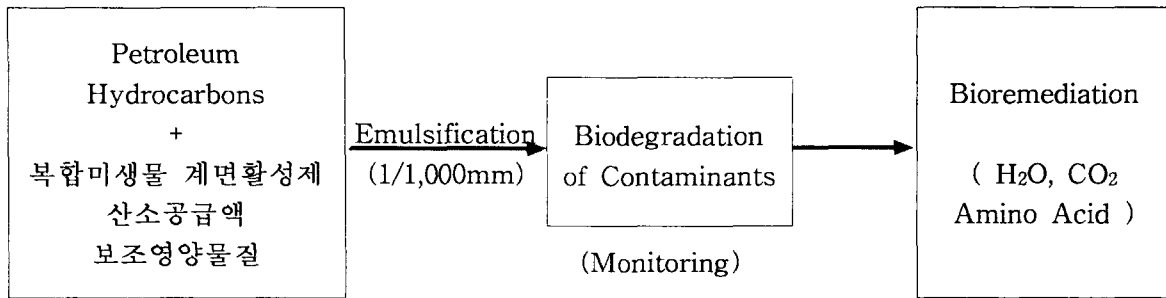
## 3) 복원결과 및 향후 예측

복원시공작업 각 단계별로 토양을 채취한 후 TPH와 BTEX분석을 실시하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯 우려수준 이하로 오염도가 현저히 감소되고 있었으며 1, 2차 처리단계에서 투여된 미생물이 3차 처리단계까지 생장이 활발하게 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 한편 초기 오염농도가 상당히 높은 C지역의 경우 BTEX가 여전히 우려수준 이상으로 높게 나오고 있으나 미생물 활동이 최종단계까지 지속적으로 활발하게 나타나므로 장기적으로 볼 때 충분한 제거효과가 기대된다.

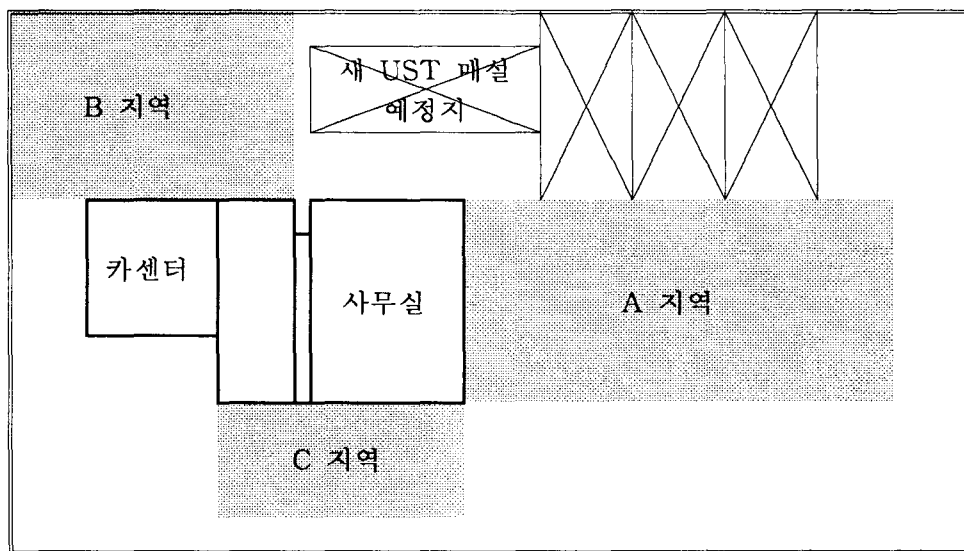
## 4. 결론

오염토양 복원의 신기술로서 미생물계면활성제를 이용한 생물학적 정화기법을 소개하고 이의 현장적용 결과를 제시하였다. 적절한 양분과 수분 그리고 산소를 공급할 경우 2차처리 단계까지 투여된 미생물의 성장활동을 지속적으로 활발하게 유지시킬 수 있었으며 유류 오염물질의 제거효율을 극대화시킬 수 있었다.

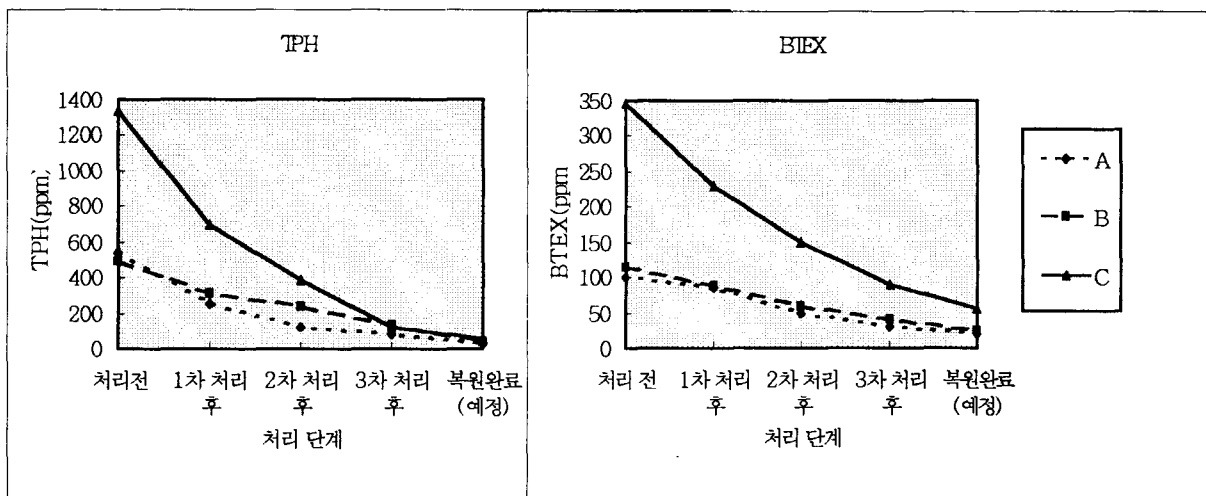
직접적인 비교 대상은 될 수 없지만 일반적으로 오염토양의 생물학적 정화기법의 총 복원기간이 수 개월 내지 수 년 이상 소요되는 것을 감안할 때 본 적용사례의 경우 초기 오염도가 상당히 높았음에도 불구하고 비교적 빠른 시간 내에 복원이 진행되고 있음을 알 수 있었다.



(Fig. 1) 생물학적 정화기법의 절차



(Fig. 2) 오염지역 오염( )현황



(Fig. 3) 대상 오염지역의 각 처리단계별 오염도 변화 추이