

SVE 및 미생물제제를 이용한 유류 오염토양의 현장 복원

박 영준, 염 규진, 김 선미, 이 문현*, 박 광진*, 이 영신*

코엔바이오 기술연구소

* 동명엔터프라이즈 토양지하수사업팀

E-mail : ceb@coenbio.com

요 약 문

This study was conducted to evaluate in-situ bioremediation ability of Bioil-D, microbial material for oil degradation, at a gas station that had been treated by SVE system. TPH concentrations and total contaminated soil volume were rapidly decreased after Bioil-D treatment. The performance of Bioil-D was also estimated based on the observation of microbial population at the soil samples and CO₂ concentration produced at the extraction wells. The field study showed a successful work of Bioil-D.

key words : in-situ bioremediation, Bioil-D, SVE system.

I. 서론

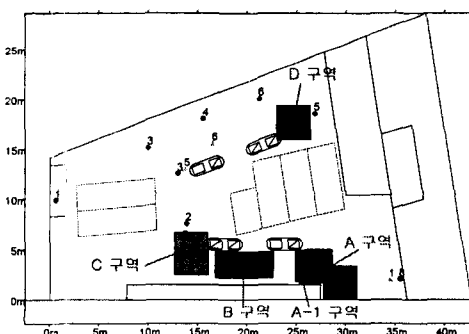
급속한 경제발전 에 따른 산업화로 유류소비가 비약적으로 증가하였고 이에 따른 유류 저장시설이 증가하여 현재 특정 토양오염유발시설을 설치·신고한 업소는 전국적으로 2만1천138 개소, 그중 주유소가 1만2천967개소로서 상당수 차지하고 있다. 그러나 주유소 유류저장시설의 노후화 및 결함에 의해 유류에 의한 토양오염이 사회적 문제로 대두되고 있다.

따라서 본 연구에서는 유류에 오염된 주유소로서, 물리적인 기법으로 토양오염복원이 진행되고 있는 지역을 선정하였으며, 유류분해용 미생물제제인 Bioil-D를 사용하여 부지의 TPH 농도 변화와 3D program을 이용한 오염토양 부피 변화, 토착미생물의 활성도, 발생 CO₂농도 측정치를 검토하여 미생물제제의 성능 및 복원 여부를 확인하였다.

II. 연구내용 및 방법

부지는 S시에 위치한 D 주유소로 대지 882.3m²의 면적에 동쪽으로 하천이 흐르고, 주거 지역이 밀집되어 있으며, 지하저장탱크(UST)는 총 155,000 ℓ로 1985년 4월에 설치된 4기(휘발유 2기, 경유 1기, 실내등유 1기)와 1993년 8월에 2기(경유 1기, 보일러등유 1기)가 설치·운영되고 있었다. 시료채취 지점은 실태조사, 정밀조사 및 물리적인 처리기법인 SVE 가동 중 복원 중간 점검 및 생물학적 처리 후 시료채취 지점을 나타냈다. 또한, 구역지점은 위 지점이 비교적 동일한 지점을 선택하여 구역을 정하였다[그림 1].

본 부지는 물리적 처리 기법으로 SVE를 선택하였으며, 19개의 Extraction Well를 약 6m 깊이로 하여 설치하였으며, 약 18개월을 가동하여 토양 내에 잔류하고 있는 휘발성 가스를 추출하였다.



[그림 1] 시료채취지점 및 구역

따라서, 본 연구는 기존에 설치된 물리적 처리기법인 SVE를 그대로 이용하였으며, 미생물은 유류분해용 미생물제제인 Bioil-D를 사용하였다.

미생물 투입량 산정은 물리적 처리 후 잔존하는 오염부피 및 농도에 따라 투입량을 결정 하였으며, 미생물제제 투입은 200 l/회로 기준으로 하여 7일 간격으로 4회 투입하였다. 미생물제제 투입 후 물리적인 시스템인 SVE를 일정기간동안 Air sparging 형식으로 전환하여 가동하였다.

유류분해용 미생물제제인 Bioil-D의 투입은 본 부지에 대한 투입량은 초기 오염부피 및 농도를 기준으로 하여 약 1,200 l로 6회 반복으로 투입예정이었으나 오염 제거 정도에 따라 그 양을 줄여서 약 800 l을 투입하였다.

따라서, 본 부지의 투입량은 약 800 l였으며, [표 1]와 같이 각각의 구역의 오염농도 및 깊이에 따라 그 양을 조절하였다.

[표 1] 구역별 Bioil-D의 투입량

	Bioil-D의 투입량 (l)					합 계
	A구역	B구역	C 구역	D 구역	기타구역	
Extraction Well	120	80	80	-	60	340
Injection Well	60	40	60	80	220	460
합 계	180	120	140	80	280	800

투입량은 오염 깊이에 따라 Extraction Well 과 Injection Well로 구분하였으며, 정밀조사 및 물리적 시스템 가동 후 시료 채취 깊이별 농도에 따라 Bioil-D의 투입 방법을 다르게 하였다.

즉 A,B,C 구역은 Extraction Well과 Injection Well로 구분하였으며, 오염 깊이가 3.0-4.0m에서는 Injection Well에 투입하였으며, 5.0m이하에는 Extraction Well에 직접 투입하였다. 또한 D 구역은 물리적 처리 결과에 따라 약 1.0-3.5m를 기준으로 하여 Injection Well에만 투입하였다. 따라서, 본 부지에 대한 A,B,C,D 구역에 대한 Bioil-D의 투입량은 520 l 이고, 기타 지역은 280 l 이었다. 이는 초기 오염부피당 투입량의 2/3정도 투입하였다.

토양미생물상 분석에 사용된 고체배지는 미생물종(세균, 사상균, 방선균)에 따라 선택배지를 조제하여 균종별로 순수 분리하였으며, 희석평판법을 이용하여 균종별 균수를 측정하였으며, 구역별 발생 CO₂농도는 PCO₂ Plus 장비를 이용하여 미생물 호흡시 발생하는 CO₂ 농도를 측정하였으며, 토양 중 TPH분석방법은 GC 6850을 사용하여 EPA Method의 8015B법으로 분석하였다.

따라서, 대상부지의 오염현황은 현장방문 및 정밀조사 자료를 근거로 하여 조사하였으며, 오염원 확산 부피와 오염운(Plume)은 2D와 3D program(Visual Groundwater)을 이용하여 오염원 제거효율 및 복원상태를 예측하고자 하였다.

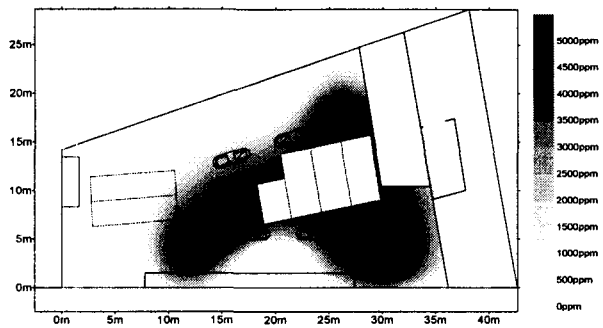
III. 결과 및 고찰

1. 오염분포 현황

D주유소는 2000년 8월에서 UST 검사 결과 휘발유 1기의 모체부에서 심한 부식이 발견되었으며, 부분적으로 결함이 있는 것으로 나타났다. 또한 2001년 3월에 UST 재감사시 실내등유와 보일러 등유에서 결함이 발견되어 오염물질의 누출가능성이 잔존되어 있는 상태인 것으로 조사되었다.

[그림 2]에서 보는 것과 같이 오염원은 상층부에서 UST Box 표면을 따라 부지 동남쪽으로 이동 중 부지 내의 건물구조물에 부딪혀 일시적인 정체현상을 나타냈으며, 이는 수평확산이 멈춤으로서 수직확산으로 변환되었다. 따라서 하층부에서는 수직확산하던 오염원은 4.5m에 흐르고 있던 지하수를 만나 다시 수평적으로 확산된 것으로 사료된다.

또한, 지하수의 수위 변화에 따라 수직적으로 확산이 이루어져 있으며, 이는 국부적인 오염원을 형성하기도 하였다.



[그림 2] 2D Visualization에 의한 대상부지 TPH의 오염분포도

2. 오염농도 및 부피 변화

[표 2]와 같이 TPH의 농도 제거율을 살펴보면 정밀조사와 Bioil-D를 투입 후 농도를 비교한 경우 제거효율은 약 83.0 ~ 97.7%로 나타났다.

또한, 물리적 처리 후와 Bioil-D 후의 제거효율은 약 86.5 ~ 95.0%로 나타났는데 B구역과 D구역에서는 Bioil-D 투입 후 시료채취시 유동성 오염원이 비점오염원으로 존재하며, 이는 Clay층에 오염원이 잔류되어 있는 것으로 판단된다.

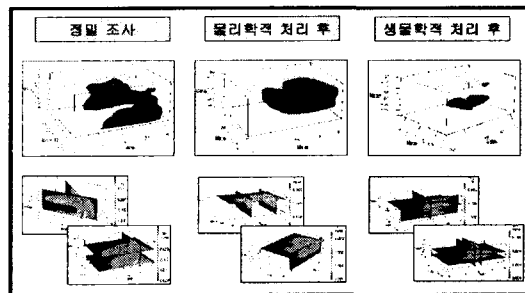
Extraction Well 내의 유동성 Oil 두께가 초기에는 약 10cm정도였으나 Bioil-D의 2차 처리 후 약 7일이 지난 다음 Oil 두께가 2cm로 줄어들었다. 이때 Extraction Well 내에 퇴적된 토양을 분석한 것은 A-1 구역과 같이 TPH 농도가 약 2,337ppm로 나타났다. 그러나 A-1 구역의 유기물 함량이 다른 일반 토양에 비해 2.5배정도 높게 나온 것으로 보아 TPH 측정시 영향을 미친 것으로 사료된다. 이와 같이 유기물 함량이 높게 나온 것은 Bioil-D가 잔존되어 있는 것으로 판단된다.

[그림 3]는 3D 프로그램에 의한 오염 토양 부피의 변화를 나타낸 것이며, 정밀조사 때와 비교하여 Bioil-D를 투입한 후 감소율은 79.2%이며, 정밀조사와 물리학적 처리 후의 감소효율은 21.1%, 물리적 처리 후와 Bioil-D 투입 후 감소효율은 73.7%로 나타났다.

그러나, 국부적으로 오염원이 잔재되어 있으므로 초기 투입량 산정과 같이 남은 미생물제제 400ℓ 을 투입할 필요성이 있다.

[표 2] 구역간 농도 변화

정밀조사		물리학적 처리 후		생물학적 처리 후			
구역	TPH(ppm)	구역	TPH(ppm)	구역	TPH(ppm)		
A 구역	1.0-1.6	1,630	1.0-1.5	21,850	0.5-1.1	2,337	
	3.0-3.6	3,970	3.0-3.5	6,450	3.0-3.5	1,703	
	5.0-5.6	440	5.0-5.5	-	5.0-5.5	254	
	6.0-6.6	65,640					
B 구역	1.0-1.6	-	1.0-1.5	2,620	A-1 구역	5.5-6.5	2,007
	3.0-3.6	-	3.0-3.5	3,690	B 구역	0.5-1.3	914
	5.0-5.6	-	5.0-5.5	-	3.0-3.5	7,378	
	6.0-6.6	-			4.0-4.5	405	
C 구역	1.0-1.5	1,500	1.0-1.5	5,610		5.0-5.5	-
	3.0-3.5	32,790	3.0-3.5	770	C 구역	1.5-2.0	250
	5.0-5.5	-	5.0-5.5	-	3.0-3.7	-	
D 구역	2.0-2.6	2,000	1.0-1.5	3,490		5.0-5.5	-
	2.6-3.2	150	3.0-3.5	3,870	D 구역	0.5-1.2	471
	3.4-4.0	4,500	5.0-5.5	-	3.0-3.5	-	
	4.0-4.6	280			5.0-5.5	2,247	
	5.4-6.0	17,190					



[그림 3] 3D Visualization (TPH>800ppm)에 의한 대상부지의 오염 부피 변화

4. 미생물상 변화

[표 3]은 생물학적 처리 후 측정된 것으로 초기 오염 토양보다 종수 및 균 농도가 상당히늘어났으며, 이는 Bioil-D에 의해 난분해성 유류가 다른 미생물이 섭취가능한 형태로 변화시킨 것을 간접적으로 나타낸 결과이며 고농도 유류에 의한 독성이 투입된 미생물제제에 의하여 저감되었음을 알 수 있다.

[표 3] 구역별 미생물농도 분석

구역	미생물 종류 및 종수	균농도(CFU/g)	
		세 균	방선 균
A 구역	세 균	Type 1	1.3×10^7
		Type 2	7.0×10^7
		Type 3	4.6×10^7
		Type 4	4.0×10^8
B 구역	세 균	Type 1	0.7×10^7
		Type 2	0.7×10^7
		Type 3	7.6×10^7
		Type 5	1.6×10^7
C 구역	세 균	Type 1	2.4×10^7
		Type 2	4.3×10^7
		Type 5	1.8×10^7
		Type 6	8.6×10^7
		Type 2	1.0×10^7
		Type 2	1.5×10^7
D 구역	세 균	Type 2	4.0×10^7
		Type 5	2.5×10^7
		Type 1	6.0×10^7
		Type 1	0.7×10^7
사상 균	사상 균	Type 1	6.0×10^7
		Type 1	0.7×10^7

5. 발생 CO₂ 농도 변화

[표 4]는 구역별 토양 내의 발생 CO₂ 농도를 측정된 결과이다.

[표 3]과 [표 4]의 결과를 비교해 보면 미생물 균종수 및 농도가 증가할수록 발생 CO₂의 양도 증가한 것을 알 수 있다. 따라서 Bioil-D의 투입으로 인해 난분해성 유류를 다른 토착미생물이 보다 쉽게 탄소원으로 이용할 수 있도록 변화시킨 것을 간접적으로 알 수 있다.

[표 4] 구역별 Extraction Well의 CO₂농도 분석

구역	CO ₂ 농도 [ppm]	비고
A 구역	2,483	현장 대기 중 CO ₂ 농도 : 최소 420 ppm : 최대 460 ppm
B 구역	2,600	
C 구역	3,325	
D 구역	650	

IV. 결론

본 연구는 기존에 물리화학적 복원 시스템(SVE)이 설치된 현장에서 생물학적 복원을 위하여 Bioil-D를 투입하여 복원 진행과정을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) TPH의 농도 제거율을 살펴보면 정밀조사와 Bioil-D 투입 후 농도를 비교해보면 제거효율은 약 83.0 ~ 97.7%로 나타났다.

또한, 물리적 처리 후와 Bioil-D 후의 제거효율은 약 86.5 ~ 95.0%로 나타났다. 특히 B구역과 D구역에서는 Bioil-D 투입 후 시료채취시 유동성 오염원이 비점오염원으로 존재하며, 이는 Clay 층에 오염원이 잔류되어 있는 것으로 나타났다.

(2) 3D 프로그램에 의한 오염 토양 부피의 감소효율을 살펴보면, 정밀조사와 Bioil-D을 투입 후 감소율은 약 79.2%이며, 정밀조사와 물리학적 처리 후의 감소효율은 약 21.1%, 물리적 처리 후와 Bioil-D 투입 후 감소효율은 약 73.7%로 나타났다.

(3) 미생물 상의 변화와 발생 CO₂ 농도의 상관관계를 살펴보면, 초기 오염 토양보다 종수는 다양해졌으며, 균수 또한 증가하였다. 이는 Bioil-D에 의한 오염농도의 감소에 따라 토양 토착 미생물의 균수 및 활성이 높아지므로 발생 CO₂ 농도가 증가한 것으로 판단된다.

V. 참고문헌

1. Bruce E. Rittmann, 'In Situ Bioremediation', NOYES PUBLICATIONS
2. John E. Matthews, 'Handbook of Bioremediation', LEWIS PUBLISHERS