

# 토양경작법(Landfarming)을 이용한 유류오염토양의 복원효율 평가

전권호, 한완수, 정현석, 서창일, 박정구  
환경관리공단 기술진흥처 토양복원진단팀  
(e-mail : attest@emc.or.kr)

## 요 약 문

유류로 오염된 토양에 대해 토양경작법(Landfarming)을 적용하여 복원효율을 평가하였다. 복원 초기에는 주로 휘발에 의한 오염물질의 저감이 이루어졌으며, 이 후 미생물성장에 필요한 토양뒤집기와 질소원 영양물질의 공급으로 인해 미생물수가 복원초기에 비해 약 200배 증가하면서 약 30여일 경과 후 초기 20,000ppm에서 복원목표인 TPH의 토양오염우려기준 2,000ppm의 이하인 1,910ppm으로 감소하였다. 시간이 경과할수록 탄소원 섭취기질 부족으로 완만한 오염물질 감소속도를 나타내면서 최종적으로 TPH를 측정된 결과 1,288ppm으로서 제거효율 94%이상을 나타내었다.

**Key word** : 토양경작법, Landfarming, 생물학적 처리, 유류오염, TPH

## 1. 서 론

유류에 의해 오염된 토양의 생물학적 처리기술인 토양경작법(Landfarming)은 오염된 토양을 굴착하여 복원하는 탈위치(Ex-situ) 복원기술로서 굴착된 오염토양을 방수처리 된 부지 위에서 인위적으로 경작하여 적정수분을 유지하고 통풍성을 향상시켜 토양미생물에 의한 호기성 생분해를 촉진시키는 기술이다. 토양경작법은 거의 모든 종류의 석유류 오염물질에 대해 법적인계치 이하의 농도저감 효과와 휘발유와 같은 휘발성이 강한 유류에서 부터 윤활유와 같은 비휘발성 유류까지 모두 복원이 가능한 기술이며, 설계와 복원수행시 기술적으로 간편한 특징을 가지고 있다. 본 연구에서는 유류로 오염된 실제 현장오염토양에 대해 토양경작법을 적용하여 지속적이고 효과적인 모니터링을 통한 오염저감율과 처리 효율을 평가하였다.

## 2. 본 론

본 연구가 진행된 대상지역은 I시에 소재한 오염부지로서 주로 석유계총탄화수소(TPH)에 의해 오염되었으며, 토양오염정밀조사 및 평가결과를 바탕으로 토양경작법에 의한 처리를 위해 약 349.7m<sup>2</sup> (418톤)의 오염토양을 굴착하였다. 복원시설의 설치는 설치예정 부지의 주변여건 및 원활한 복원작업을 위해 설치부지 하부로의 오염물질 확산방지를 위한 차수용 2중비닐과 보호용 모래다짐층 설치하고, 우수침투 등으로 인해 발생하는 침출수의 처리를 위해 유공관 및 침출수 저장조를 설치하였다. 그 상부에 두께가 최소 30cm에서 최대 60cm이상이 되지 않도록 굴착·이송된 오염토양에 대해 평탄작업을 실시하였으며, 우수침투에 의한 침출수 발생을 최소화하기 위해 탈·부착식 우수침투방지용 비닐커버를 설치하였다. 복원기간 동안 주기적인 오염토양의 뒤집기(Tilling)와 영양물질(Nutrient) 공급을 실시하였으

며, 주요 운전인자를 다음 [표 -1]과 같다. 운전인자의 기준은 EPA에서 수행한 "Burlington Northern Superfund Site"에서 실제 적용된 값을 참고하였다.

[표 -1] 주요운전인자

인 자	기준치
토양뒤집기 비율/횟수(Mixing Rate/Frequency)	3회/주, 총 20회(트랙터)
수분함유량(Moisture Content)	20~40% by weight(40~85% by water)
토양 수소이온농도(pH)	6.0 ~ 8.0
복원기간(Residence Time)	3개월
자생 미생물 수(Viable cell count)	10 <sup>7</sup> CFU/ml 이상
토양영양분 조성비율(Nutrients and soil Amendment)	C : N : P = 100 : 2 : 1
온도(Temperature)	26 ~ 32℃(하절기 기준)

복원기간 중 오염토양의 오염저감을 산정과 미생물의 활성화 측정을 위한 시료채취 및 항목별 분석횟수를 [표 -2]에 나타내었으며, 최종복원목표는 석유계총탄화수소(TPH)의 토양오염우려기준인 2,000mg/kg이하로 설정하였다.

[표 -2] 토양시료 채취 및 분석횟수

항 목	분석횟수 (A × B)	시료채취 지점(A)	채취횟수 (B)	비 고
합 계	480			
석유계총탄화수소(TPH)	45	5	9	복원완료
벤젠 · 톨루엔 · 에틸벤젠 · 자일렌 (BTEX)	5	5	1	시료채취1회
자생 미생물 수(Viable cell count)	75	5	15	
토양 수소이온농도(pH)	75	5	15	
수분함유량	75	5	15	
TKN(Total Kjeldahl Nitrogen)	65	5	13	
s-TKN(soluble - TKN)	65	5	13	
TP(Total Phosphorus)	75	5	15	

### 3. 결 과

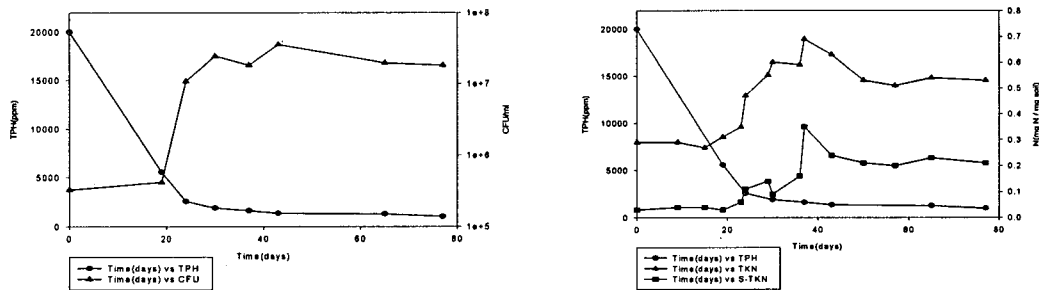
#### 3.1 복원초기(0~20일) 단계

[그림 1~3]에 나타난 바와 같이 복원초기, 즉 오염토양을 굴착하고 이송한 시기부터 20일이 경과 될 때까지 오염토양의 농도가 정밀조사 결과의 평균 오염농도인 약 TPH 20,000ppm에서 TPH 5,565ppm으로 72.2% 정도가 저감되었다. 이와 같은 결과는 [그림 1]의 결과에서 나타난 바와 같이 미생물 군수의 증가가 미비한 상태에서 단지 오염토양의 이송 및 적치 과정 중에 토양혼합 등으로 발생한 오염물질 휘발에 따른 오염농도 저감효과로 판단되며, 또한 측정된 토양 중 미생물수가 3×(10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>)cell/g으로서 일반적으로 토양에 존재하는 미생물 군수인 10<sup>4</sup>cell/g과 유사하여 아직 본격적인 미생물의 활동은 일어나지 않은 것으로 확인되었다. 미생물 성장에 중요한 질소(N)원의 경우 초기 시료분석 결과 약 200ppm 으로 측정되었다. 그러나 미생물이 실제로 토양 내에서 분해과정을 통해 영양분으로 이용할 수 있는 질소원을 측정하기 위해 용해성질소원(s-TKN)원 분석한 결과 질소원의 농도가 30~60ppm으로 나타났다. 미생물의 성장에 필요한 C : N : P의 비율이 100 : (10~20) : 1임을 감안하면 초기 오염토양의 농도가 TPH 5,000ppm일 경우 요구되는 질소(N)원은 500 ~ 1,000ppm, 즉 0.5~1g

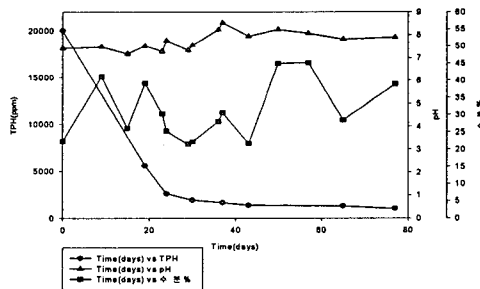
N/kg soil이 된다. 그러나 분석결과 나타난 초기 총 질소원 양인 200ppm 또는 용해성-질소원(s-TKN)의 양인 30~60ppm의 일부를 미생물이 섭취하여도 미생물 군수의 성장에 필요한 질소(N)원은 상당량이 부족함을 알 수 있었으며, 복원초기부터 20일 경과까지 미생물의 수가 거의 변동이 없는 것으로 보아서 초기 200ppm의 질소원을 미생물이 거의 섭취하지 못한 것으로 판단되었다.

초기 토양의 수소이온농도(pH)는 7.2~7.6사이를 나타내었고 20일 경과까지 일정하게 유지되었으며, 일반적인 토양의 pH가 7~8사이를 유지하는 것과 일치하였다. 또한 토양 내 수분함유량은 초기에 20%를 약간 상회하였으며 지속적인 수분공급을 통해 평균 20~40%을 유지하여 미생물이 활동할 수 있도록 조절하였다.

인(P)은 일반적으로 토양 내에 존재하는 양으로도 미생물 성장에 충분하여 대부분의 토양경작법 처리시 별도로 첨가하지 않으며 분석결과 인의 농도는 2~17ppm을 나타내어 별도의 첨가는 불필요할 것으로 판단되었다.



[그림 1] 복원기간 경과에 따른 TPH와 [그림 2] 복원기간 경과에 따른 TPH와 CFU(미생물군수) 변화



[그림 3] 복원기간 경과에 따른 TPH, pH 및 수분함유량 변화

### 3.2 복원중기(21~40일) 단계

복원중기 단계에서 오염토양의 TPH 농도가 완만하게 저감되는 경향을 보였다. 이는 복원초기 휘발성분이 대부분 휘발되고 미생물의 분해작용에 의존하기 때문에 오염농도의 저감속도가 감소한 것으로 판단된다. 복원중기 단계에서 약 30여일 경과 후 전체 오염토양의 농도가 복원목표치인 TPH 2,000ppm이하인 1,910ppm으로 저감되었으며, 복원을 시작한지 20일 경과 후 토양뒤집기를 시행하였음을 고려할 때 [그림 1]에서와 같이 미생물군수가 초기분석치과 비교하여 25일 경과 시점에서는 약 200배에 해당하는 급격한 증가를 나타내었고, 30일까지의 성장속도는 지수성장(Logarithmic Growth)의 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 20일 경에 투입한 영양분, 특히 질소(N)의 공급이 이루어지고 난

후 발생한 결과로써 질소(N)원의 공급이 미생물 군수의 성장에 매우 중요함을 알 수 있다. 20일 경에 투입한 질소(N)원은  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 의 형태로써 8kg을 400톤의 토양에 살포하면  $(2 \times 15/60) \times 8\text{kg} / 400\text{톤} = 10\text{ppm}(\text{mg N/kg soil})$ 의 농도가 증가된다. 30일째 추가로 64kg을 투입하여 전체공급 질소(N)원은 약 100ppm(mg N/kg)의 증가효과를 가져왔다. 이 때 측정된 전체 질소(N)원의 농도는 470~690ppm이고 용해성 질소(N)원은 90~350ppm을 나타내었다. 30일 이후 미생물군수는 약간 증가하였으며, 아울러 오염토양의 TPH의 감소량도 초기단계보다는 저감속도가 매우 완만해 졌으나 지속적으로 감소되고 있음을 볼 수 있었다. 오염토양 농도의 저감속도가 완만해진 것은 미생물군수의 급격한 지수성장이 지난 후에도 용해성 질소(N)의 값이 90~350 ppm을 유지되고 있는 것으로 미루어 판단해 보면 영양분의 부족으로 인한 것은 아닌 것으로 보인다. 다만, 오염농도가 복원목표 이하로 저감된 후 토양미생물의 주 섭취기질인 토양 내 탄소량 즉, 유류오염물질의 양이 감소하여 일정량 이상의 미생물이 활동할 수 없게 됨으로써 나타난 결과로 판단된다. 아울러 미생물군수가 급격히 증가한 시기에 토양 내 수분함량이 급격히 감소하는 현상이 나타나 미생물의 성장에 수분이 많이 소요된 것으로 나타났다.

### 3.3 복원말기(41~80일) 단계

복원중기 단계에서 복원목표치인 토양오염우려기준 이하로 저감된 오염토양의 농도는 장기간에 걸쳐 점진적인 감소경향을 보이며 최종적으로 약 TPH 1,288ppm이 검출되었다. 기타 오염물질 농도 저감에 관여한 미생물군수, 수분함유량과 토양영양분의 양은 큰 변화 없이 일정하게 감소해 가는 경향을 나타냈다. 이는 토양 내 잔존하고 있는 유류성분이 미생물에 의해 서서히 정화되고 있다는 증거로 볼 수 있다. 질소(N)원 분석결과 전체 질소(N)원은 500~600ppm, 용해성 질소(N)은 200~240ppm이 유지되고 있는 것으로 나타나 공급된 영양분만큼 미생물에 의해 소모가 되고 있음을 알 수 있었다. 최종단계에서 pH의 상승은 주목할 만한 것으로서 복원중기에 영양분 첨가 후 pH가 7.4부근에서 약 8.5까지 증가하였다. 이는 첨가한 영양물질인  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ 가 미생물에 의해 분해되면서  $\text{NH}_2$ 에서  $\text{NH}_4^+$ 이 발생된 것으로 판단되며 이로 인하여 pH가 증가한 것으로 사료된다.

### 4. 결론

유류로 오염된 토양에 대해 토양경작법(Landfarming)을 적용하여 오염저감을 평가한 결과, 복원초기(0~20일)에 주로 오염물질의 휘발에 의한 급격하게 오염농도가 감소하였으며, 본격적인 미생물 활동에 의해 복원중기(21~40일)에는 영양물질의 투입으로 인한 질소(N)의 공급증가로 미생물군수의 급격한 증가를 보였으며 복원시작 후 약 30여일이 경과한 후부터 복원목표치 2,000ppm 이하인 1,910ppm으로 저감되었다. 이 후 오염물질의 저감으로 탄소원이 감소됨에 따라 미생물 성장이 감소되고 이에 따라 오염물질의 농도저감 또한 완만한 속도를 나타내었다. 오염토양의 TPH 농도를 최종적으로 측정된 결과 1,288ppm으로서 제거효율 94%이상을 나타내어 토양환경보전법에 의한 토양오염우려기준 이하로 법적 복원기준치를 만족하였다.

### 5. 참고문헌

- 1) U.S. Environmental Protection Agency(EPA), How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites ; A Guide for Corrective Action Plan Reviewers. EPA 510-R-04-002. 2004.
- 2) U.S. Environmental Protection Agency(EPA), Abstracts of Remediation Case Studies, Volume 2, EPA 542-R-97-010. 1997.