

동절기 유류 오염토양 복원을 위한  
Co-composting 기술의 현장 적용성 연구

마정재 · 고희석 · 황종식 · 정민정\* · 최상일\* · 김국진\*\*

(주)에코솔루션 기술연구소 · 광운대학교 환경공학과\* · (주)한국미생물기술\*\*

**The Pilot-scale Treatability Studies of Co-Composting for the  
Remediation of Diesel Contaminated Soil during the Winter**

Jung-Jae Ma, Hyung-Suk Ko, Jong-Sic Hwang, Min-Jung Jung\*, Sang-il Choi\*, Kook-Jin Kim\*\*

*ECO Solutions Co., Ltd.*

*Department of Environmental Engineering, Kwangwoon University\**

*Korca Microbial Technology\*\**

## Abstract

This study was conducted to check the applicability of pilot-scale co-composting for the remediation of diesel contaminated soil during the winter. Nutrients and microbes were added to enhance the efficiency of bioremediation and fermenting composts were also added to stimulate the microbial activities.

As a result, the soil pile was kept at adequate temperature for the bioremediation during the test period of 30~40 days and initial concentration(2,340mg TPH/kg dry soil) was reduced to 216mg TPH/kg dry soil (approximately 91% removal). During the initial 10~30 days, it was found that the TPH concentration and the microbial population were rapidly reduced and increased, respectively. The co-composting technology studied can be effectively applied to remediate the diesel contaminated soil during the winter.

**Key words** : Co-composting, TPH, Contaminated soil, The winter, Nutrients, Microbes, Compost

## 요 약 문

유류 오염토양의 생물학적 복원에 있어 동절기의 급격한 온도 저하에 따른 적용 한계성을 극복하기 위한 composting 기술의 현장 적용 가능성을 검토하고, 온도 변화에 따른 분해 특성을 검토하였다. 또한 생물학적 복원에 필요한 영양원(N, P source)과 유류 분해 미생물의 첨가에 따른 분해효율을 검토하기 위한 기초 실험을 실시하였으며, 동절기 낮은 온도로 인한 미생물의 활성도 저하를 막기 위해서 발효가 진행중인 퇴비를 투입하였다.

주입된 퇴비의 영향으로 토양 pile 내부의 온도는 30~40일 동안 중온 상태를 유지하였으며, 초기 2,340mg TPH/kg dry soil에서 시작된 생물학적 반응은 약 40일 경과 후 216mg TPH/kg dry soil로 감소되어 제거효율이 약 91%를 나타냈다. 총균수, 유효균수, TPH간의 상관 관계를 관찰해 본 결과, TPH가 급격한 감소를 나타내는 10~30일 사이에 유효균수가 급격히 상승하는 것으로 관찰되었다. 따라서 landfarming site에서 유류 오염토양을 복원함에 있어 별도의 시설투자 없이 동절기에도 저온의 영향을 받지 않고 유류를 분해시킬 수 있는 composting 기술의 적용 가능성을 확인하였으며, 이는 기타 난분해성 물질의 생물학적 분해에 대해서도 확대 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

**주제어** : Co-composting, TPH, 오염토양, 동절기, 영양원, 미생물, 퇴비

### 1. 서 론

생물학적 복원 기술은 토양환경이 보유하고 있는 자체 복원 능력을 바탕으로, 오염물질 분해 미생물의 생육환경을 활성화시켜 처리 대상물질의 분해속도를 증진시킬 목적으로 필요시 추가적인 물리적 처리 및 각종 첨가제 등을 투입하여 처리효율을 제고시키는 기술이다.

*Ex-situ* 생물학적 복원기술 중 대표적인 기술로써 landfarming과 composting 기술을 들 수 있는데 오염 현장에서의 처리뿐만 아니라 오염토양을 지속적으로 처리하기 위하여 별도의 처리장을 운영하기도 한다. Landfarming 기술은 미생물의 성장을 촉진시키기 위해 영양원(N, P source), 수분, pH를 조절하며 산소를 원활히 공급하기 위해 주기적으로 tilling시켜 처리하는 방식으로, 토양 내에 존재하는 미생물을 이용하는 biostimulation 방식과 특정 오염물질에 대해 분해능이 우수한 미

생물을 첨가하여 처리하는 bioaugmentation 방식으로 나눌 수 있다. 이러한 미생물의 증식에 의한 오염원의 분해에 있어서 C, N, P의 적절한 조합이 매우 중요하다. Landfarming 기술은 처리 비용이 비교적 저렴한 반면, 처리시간이 길고 분해속도가 느리며 주변 온도에 민감하기 때문에 사계절의 온도 변화가 현저한 우리나라의 경우 동절기 운전 한계의 단점을 가진다. 따라서 동절기에 주변 온도의 영향을 최소화하여 미생물의 활성을 유지시킬 수 있는 기술의 개발이 오염토양의 지속적인 생물학적 처리 시스템 운영을 위하여 절실한 실정이다.

Composting 기술 적용시 주변의 온도는 생분해 속도 및 미생물의 성장에 큰 영향을 미친다. 온도는 미생물의 성장과 오염물질 분해를 위한 효소의 활성도를 결정하며, 적정 온도까지 온도가 상승함에 따라 미생물의 활성도는 증가한다. 대부분의 유류 분해 미생물은 최적 성장을 위해 20~30℃ 부

근을 유지해야 한다. 또한 미생물은 에너지를 소비하여 열에너지를 발생시키며, 이런 일련의 반응을 통하여 자체 온도가 상승하게 된다. 이 때 열의 지속적인 발생과 유지는 시스템의 형태 및 크기, 주변온도, 기질의 열량에 따라 변화할 수 있다<sup>1)</sup>.

본 연구에서 적용한 co-composting 기술은 cometabolism 원리<sup>2),3)</sup>를 이용하여 보조 기질로써 발효가 진행중인 퇴비를 주입하여 미생물의 수를 증가시키고, 처리대상 물질인 유류의 분해 속도를 증진시키는 동시에 퇴비화 과정에서 발생하는 고온의 열은 미생물의 활성도를 증진시켜 토양 pile 내부의 온도를 장기간 중온의 상태로 유지시킴으로써 겨울철 낮은 온도로 인한 *ex-situ* 생물학적 복원기술의 적용한계를 극복하고 처리대상 물질인 유류를 효과적으로 분해시킬 수 있는 환경을 유도한다.

따라서 본 연구에서는 생물학적 유류 오염토양 복원을 동절기에도 효과적으로 수행하기 위해서 biostimulation과 bioaugmentation의 조합이 생물학적 분해에 미치는 영향을 살펴보고, 이를 바탕으로 landfarming 기술을 적용하여 온도 변화에 따른 처리효율 검토하였다. 또한 co-composting 기술을 pilot 규모로 현장에 직접 적용함으로써 주변의 낮은 온도 조건에서 기술의 현장 적용 가능성을 검토하고, 온도 변화 및 첨가제 주입 여부에 따른 미생물의 분해 특성을 검토하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 Biostimulation과 Bioaugmentation에 의한 영향 검토

본 실험은 오염토양 정화용 미생물제로 개발된 Bioremax<sup>TM</sup>의 성능을 파악하고, 생물학적 복원을 위한 최적의 첨가제 시스템을 구축하기 위해 Bioremax<sup>TM</sup> 계열중 토양내 유효 균주의 디젤 분해를 촉진시킬 수 있는 biostimulator인 BMX-103N<sup>TM</sup>과 유류 오염지역의 토양에서 분리 동정된 *Pseudomonas sp.* 및 *Acetobactor sp.* 등의 미생물 복합 제재인 BMX-SDK<sup>TM</sup>을 이용하였다.

본 실험에서는 실제 현장에 오염된 디젤과 동일 종류를 이용하여 인위적으로 오염시킨 초기 농도 5,704mg TPH/kg dry soil인 토양 100kg을 사용하였으며, 실험 조건은 Table 1과 같다. 이때 반응기의 수분은 20% 내외, pH는 6~8, 온도는 20~25℃로 유지하면서 1개월간 실험을 실시하였다. 1주일에 시료를 1회 채취하여 TPH, 수분함량, pH 변화, 미생물의 총 균수 및 유효 균수에 대한 변화를 살펴보았다.

### 2.2 Pilot-scale Landfarming 및 Co-composting 기술의 현장 적용성 연구

#### 2.2.1 Landfarming

본 실험은 온도 변화에 따른 미생물의 분해 특성을 파악하여 겨울철 온도 저하로 인한 생물학적 복원 기술의 적용 한계를 극복할 수 있는 해결책을 제시하고자 하였다. 디젤로 오염된 군부대내 오염토양을 이용하였으며, 온도 변화에 따른 미생물의 디젤 분해 특성을 살펴보기 위해 2가지 온도 조건으로 실내(상온)와 실외(겨울철 온도)에서 실시하였다(Fig. 1 & 2). 실외 실험은 1998년 12월말부

**Table 1.** The Experimental Conditions of Biostimulation and Bioaugmentation Test

	C : N : P	총균수(CFU/g)	BMX-103N <sup>TM</sup>	BMX-SDK <sup>TM</sup>	유효균수(CFU/g)
Class A	—	3.2 × 10 <sup>7</sup> /g	×	×	2.1 × 10 <sup>7</sup> /g
Class B	100 : 10 : 1	3.2 × 10 <sup>7</sup> /g	○	×	2.1 × 10 <sup>7</sup> /g
Class C	100 : 10 : 1	3.2 × 10 <sup>7</sup> /g	○	○	4.6 × 10 <sup>7</sup> /g

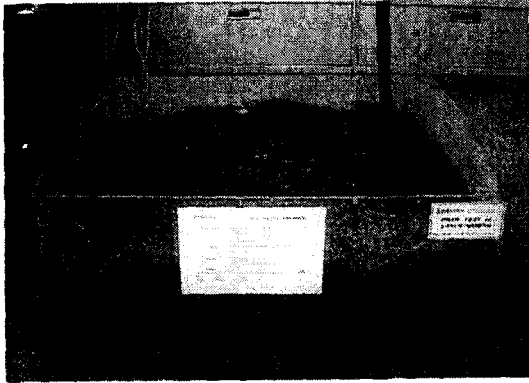


Fig. 1. Indoor landfarming test.

터 1999년 2월 중순경까지 55일간 겨울철 온도 조건하에서 open-air landfarming 기술을 적용하였으며, 실내 실험은 중온 조건을 유지하는 실내에서 lab.-scale landfarming 기술을 적용하여 비교·검토하였다.

실외 실험에 사용된 오염토양의 초기농도는 2,340mg TPH/kg dry soil 였으며 앞의 2.1절 실험에서 결정된 조건을 유지시키기 위해 수분 및 주입원 첨가제의 농도를 주기적으로 모니터링하며 전자 수용체의 원활한 공급을 위해 주기적으로 tilling 작업을 실시하였다. 또한 실내 실험과의 온도변화 상태를 관찰하기 위하여 실외 주변 온도 및 오염토양내 온도를 측정하였다. 그리고 2주에 한번씩 시료를 채취하여 TPH, 수분함량, pH 변화, 미생물의 총 균수 및 유효 균수의 변화를 살펴보았다.

실내 실험은 정사각형 모양의 반응기를 설치하여 실외 실험과 같은 조건으로 실험을 수행하였다. 실내에 설치한 반응기의 용적은 1m×1m×0.5m, 주입된 토양은 500kg 이었고, 온도를 상온으로 유지하며 2주에 한번씩 시료를 채취하여 TPH, 수분함량, pH 변화, 미생물의 총 균수 및 유효 균수의 변화를 살펴보았다.



Fig. 2. Open-air landfarming test.

### 2.2.2 Co-composting

겨울철과 같이 상온 조건에서 크게 벗어나는 기 후 조건에서는 일반적인 생물학적 복원 기술의 적용에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 겨울철과 같이 낮은 온도 조건하에서도 효과적인 복원을 유지시키기 위한 방안으로 발효가 진행중인 퇴비를 적용하였다. 퇴비는 토양개량을 목적으로 인근 농가에서 사용하는 돈분, 계분, 축분과 같은 발효가 진행중인 유기성 폐기물로 톱밥이 혼합되어 있으며, 영양원과 유효 균주의 주입은 기초 연구를 통해 결정된 biostimulator인 BMX-103N™를 C : N : P=100 : 10 : 1의 비율로 첨가하였고, 유류 분해 미생물로는 BMX-SDK™를  $4.6 \times 10^6$ /g dry soil 주입하였다. 대상 오염토양의 초기농도는 2,340mg TPH/kg dry soil 이었으며, pile의 용적은 10m×2.5m×2m 이었다(Fig. 3). 또한 사전 기초 실험 결과를 이용하여 오염토양과 퇴비의 혼합비는 1 : 1(부피비)로 하였으며, 포크레인 장비를 이용하여 5일마다 1회 tilling작업을 수행하였다.

본 실험은 1998년 12월말부터 1999년 2월 중순까지 약 55일 동안 실험을 진행하면서 2주에 한번씩 시료를 채취하여 TPH, 수분함량, pH 변화, 미생물의 총 균수 및 유효 균수의 변화를 관찰하였



Fig. 3. Pilot-scale co-composting test.

다. 온도는 5일마다 1회 tilling 작업 직전에 측정하였으며 외부 온도가 pile내부 온도저하에 미치는 영향을 검토하기 위하여 pile 윗부분과 아랫부분, 가운데 부분의 온도를 각각 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

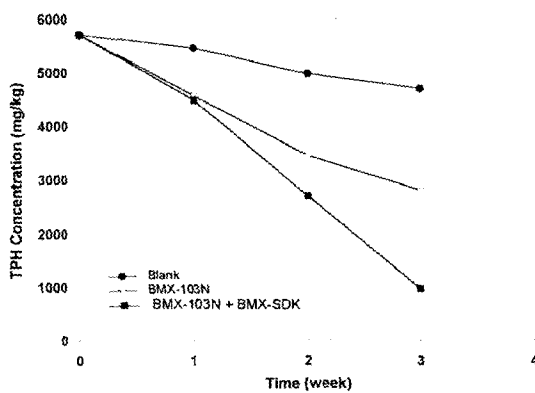
#### 3.1 Augmentation에 의한 영향 검토

생물학적 복원 효율을 극대화하기 위한 방법으로 biostimulation 방식과 bioaugmentation 방식을 비교 검토하였다. 현장 적용 실험에 앞서

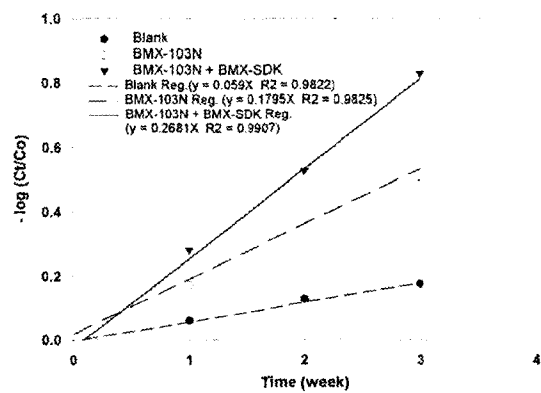
유효 균주의 분해 효과를 관찰하기 위하여 실험 실내 실험을 통하여 시간에 따른 TPH 잔류 농도를 관찰하였다(Fig. 4). 관찰 결과 2주 후 biostimulation과 bioaugmentation을 적용한 경우 잔류 TPH 농도가 각각 3,500mg TPH/kg dry soil과 2,700mg TPH/kg dry soil로 나타났다(제거효율 : 39%, 53%).

또한 bioaugmentation 적용시 21일 후에는 잔류 TPH 농도가 975mg TPH/kg dry soil로 나타났다(제거율 : 83%). 분해 속도 상수 k값은 자연 분해의 경우 0.06 day<sup>-1</sup>, biostimulation은 0.18 day<sup>-1</sup>, bioaugmentation은 0.26 day<sup>-1</sup>로 나타났다(Fig. 4).

유류의 생물학적 분해 지표로 사용되는 미생물의 총 균수와 유효 균수를 측정한 결과, biostimulation과 bioaugmentation의 경우 미생물 수의 급속한 증가가 관찰되었다. 특히 bioaugmentation의 경우에 예상한 바와 같이 더 우수한 경향을 나타내었다(Fig. 5). 이상의 결과를 종합해 볼 때, 해당 유류 오염토양은 유효 미생물을 포함하고 있기는 하나 초기 미생물의 수가 절대적으로 부족하여 biostimulation만으로는 충분한 분해속도에 도달하는데 bioaugmentation에 비하

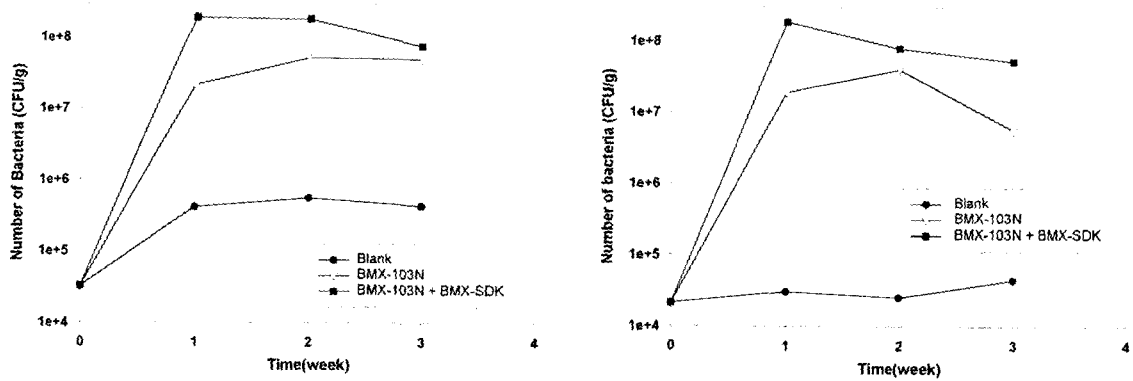


(a) TPH concentration vs. time



(b) TPH biodegradation velocity vs. time

Fig. 4. TPH biodegradation in biostimulation and bioaugmentation.



(a) Total bacteria (b) Hydrocarbon degrading bacteria  
**Fig. 5. Microbial numbers in biostimulation and bioaugmentation.**

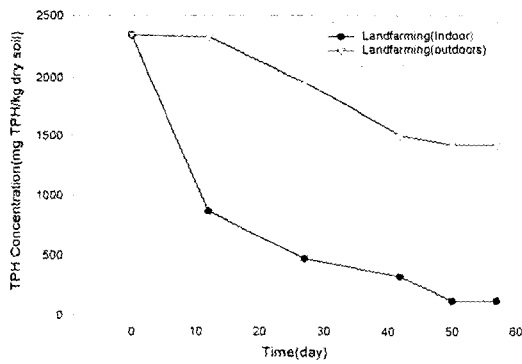
여 많은 시간이 소요되는 것으로 확인되었다. 따라서 현장 적용의 경우 이러한 초기 분해속도 증진은 운전 조건의 간소화와 부대비용의 절감을 위해 매우 중요한 인자라 할 수 있을 것이다<sup>9)</sup>.

3.2 동절기 분해 특성 검토

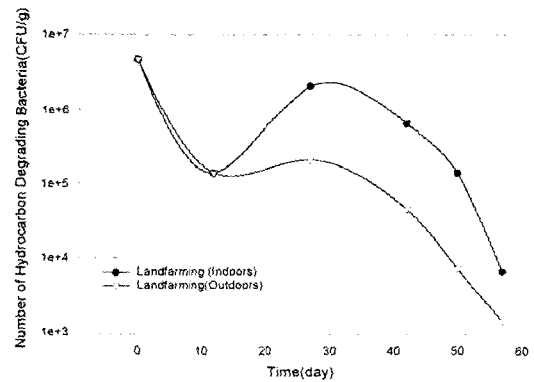
3.2.1 Landfarming에서 온도에 따른 분해 특성 검토

생물학적 복원에 있어 온도가 미치는 영향을 검

토하기 위하여 landfarming 장치를 실내와 실외에 각각 설치하고 오염도양의 TPH 분해정도와 유효 균수의 변화를 검토한 결과, 실내 실험에서는 10일 경과 후 TPH가 초기 농도 2,340mg TPH/kg dry soil 에서 866mg TPH/kg dry soil 로 감소하였다 (제거율 63%). 반면 온도에 직접적인 영향을 받은 실외 실험에서는 TPH의 변화가 거의 없었다(Fig. 6 & 7). 따라서 TPH 분해 과정에서 온도가 미생물의 성장과 오염물질의 분해를 위한 효소 반응도를 결정하는 중요한 운전 인



**Fig. 6. TPH concentration (open-air landfarming vs. indoor landfarming).**



**Fig. 7. Microbial number (open-air landfarming vs. indoor landfarming).**

자<sup>5), 6), 7), 8)</sup>임을 확인할 수 있었다.

### 3.2.2 Co-composting 기술의 적용에 따른 분해 특성 검토

위의 연구결과를 바탕으로 재래식 생물학적 복원기술의 단점을 보완하고 겨울철 온도의 영향을 극복할 수 있는 기술의 개발을 시도하고자 하였다. 따라서 본 연구에서는 발효가 진행중인 유기성 폐기물 퇴비를 이용하는 co-composting 기술의 현

장 적용성을 검토하고자 하였다. 해당지역의 겨울철 평균 대기 온도와 co-composting pile의 내부 온도를 비교 측정한 결과, 겨울철 평균 대기 온도는 0℃~-10℃를 나타내었으나 pile 내부 온도는 초기 50℃에서 시작하여 30~40일 동안 중온 상태를 유지하였다(Fig. 8 & 9). 이러한 현상은 주입된 퇴비의 발효가 진행되는 동안 유지되는 적절한 온도에 의해 미생물이 해당 오염물질을 효율적으로 분해시킴으로써 이때에 발생하는 열에 의해서도

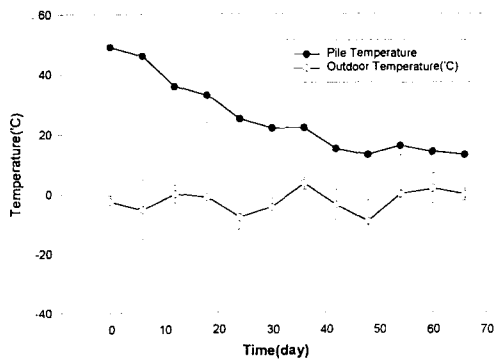


Fig. 8. Temperatures of pilot pile and open-air during the co-composting.

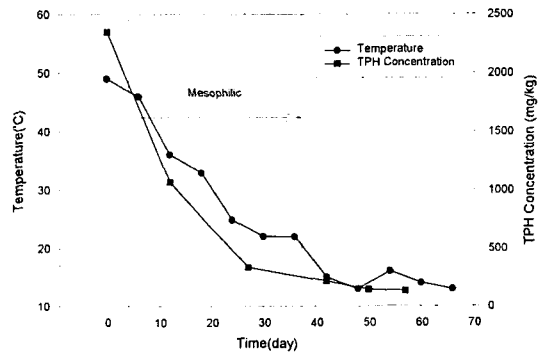


Fig. 9. The change of temperature and TPH concentration during the co-composting.

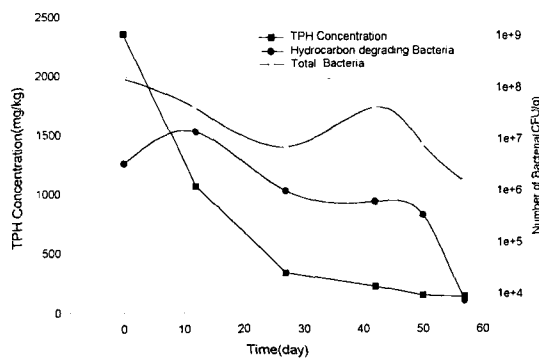


Fig. 10. TPH concentration and microbial numbers during co-composting.

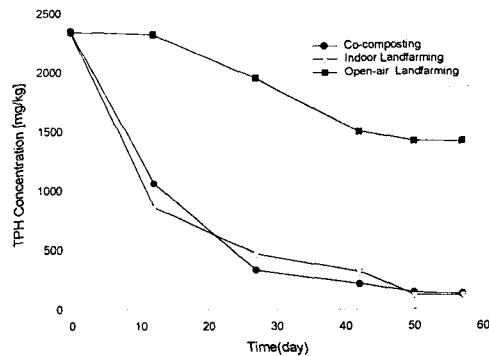


Fig. 11. TPH concentration during indoor landfarming, open-air landfarming and co-composting.

pile 내부의 온도가 장시간 중온 상태로 유지되는 것으로 판단된다. 또한 10~30일 사이에 급격한 TPH의 분해를 보였다(Fig. 9). 이때의 TPH 잔류 농도를 분석하여 제거율을 관찰한 결과, 초기농도 2,340mg TPH/kg dry soil의 토양이 40일 경과 후 216mg TPH/kg dry soil까지 감소하였고, 이때의 제거율은 약 91%이었다. 또한 bioaugmentation의 영향을 검토하기 위한 생물학적 지표인 총 균수와 유효 균수는 초기 유효 균수  $3.4 \times 10^6$  CFU/g이 10일 후  $1.4 \times 10^7$  CFU/g까지 증가하였다. 유효균수의 급격한 증가에 따라 TPH의 분해율도 급격히 증가한 것으로 관찰되었다(Fig. 10).

이런 결과를 종합하여 시간에 따른 TPH의 분해율을 검토해 볼 때 동절기 온도의 영향을 고려하여 실내에 설치한 landfarming과 co-composting은 실외에 설치한 landfarming에 비해 월등한 분해율을 갖는 것으로 관찰되었다(Fig. 11).

따라서 본 연구에서 적용된 발효가 진행중인 퇴비를 이용하는 co-composting 기술은 동절기의 낮은 온도에 의한 영향을 극복할 수 있을 뿐만 아니라 bioaugmentation에 의한 반응 초기 유효 미생물의 수적 우위 또한 확보함으로써 유류 오염토양에 적용시 효율적인 복원이 진행될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

최근 유류 오염토양에 의한 환경오염의 심각성이 인식됨에 따라 이를 복원하기 위한 여러 가지 기법들이 시도되고 있다. *Ex-situ* 생물학적 오염토양 복원기술 중 널리 사용되는 landfarming 기술은 사계절 온도의 변화가 뚜렷하고 강수량이 현격한 차이를 보이는 우리나라의 경우 1년 내내 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 사업장이나 군부대 등과 같은 단위시설에서 landfarming site를 효

율적으로 운영하기 위한 동절기 운영방법의 개발과 함께 처리속도의 향상이 문제점으로 지적되어 왔다. 본 연구에서는 발효가 진행중인 퇴비를 주입하는 co-composting기법의 적용을 통하여 동절기 낮은 온도의 영향을 극복하고 오염물질 분해 미생물을 초기에 대량 확보함으로써 초기 미생물 적용 시간(lag time)을 최소화하여 미생물에 의한 오염원의 분해 속도를 극대화 할 수 있었다. 이를 통하여 단위 사업장에서 landfarming 적용시 효율적인 운영과 함께, 더 나아가서는 분뇨, 음식물 쓰레기 등 유기성 폐기물과 유류 오염토양을 동시에 처리함으로써 비용절감 및 그 효율을 극대화 할 수 있는 방법도 모색될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Laine, M. M. and S. J. Kirsten, "Effective and Safe Composting of Chlorophenol Contaminated Soil in Pilot-Scale". Environ. Sci. Technol., 31(2), pp.371-378 (1997).
- 2) Katherine, H. B. and S. H. Diane, Bioremediation, 1st Edition, McGraw-Hill, Inc., New York (1994).
- 3) Cooksoon, J. T., Bioremediation Engineering, McGraw-Hill, Inc., New York (1995).
- 4) Venosa, A., J. Haines, and D. Allen, "Efficiency of Commercial Inocula in Enhancing Biodegradation of Weathered Crude Oil Contaminating a Prince William Sound beach". Journal Ind. Microbiol., 10, pp.1-11 (1992).
- 5) Walworth, J. L. and C. M. Reynolds, "Bioremediation of a Petroleum-Contaminated Cryic Soil : Effect of Phosphorous, Nitrogen, and Temperature". Journal of Soil Contamination., 4(3), pp.299-310 (1995).
- 6) Huesemann, M. H., "Guidelines for Land-Treating Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil".



- Journal of Soil Contamination., 3(3), pp.1-17 (1994).
- 7) Andrew, A. R. and M. E. Gray, "An Effective Remedial Alternative for Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil", Environmental Progress., 11(4), pp. 318-322 (1992).
- 8) Awadhi-Al, N., R. Al-Daher, A. Elnawawy., and M. T. Balba, " Bioremediation of Oil-Contaminated Soil in Kuwait. I. Landfarming to Remediate Oil- Contaminatrd Soil", Journal of Soil Contamination, 5(3), pp.243-260 (1996).