

초기농도가 파일럿 규모의 디젤 오염토양 콤포스팅 처리에 미치는 영향

임재량 · 박준석* · 황의영** · 남궁완***

캠바이오테크놀러지아시아, *(재)자연환경연구소

경호엔지니어링 종합건축사사무소 부설기술연구소, *건국대학교 환경공학과

Effect of Initial Concentration on Pilot-Scale Composting of Diesel-Contaminated Soil

Jae Ryang Lim · Joon Seok Park* · Eui Young Hwang** · Wan Nam-Koong***

KAM Biotechnology Asia Ltd.

*Natural Environment Research Institute

**Institute of Technology, Kyong-Ho Engineering & Architects, Co., Ltd.

***Dep. of Env. Eng., Konkuk University

(Received September 22, 2002; Accepted November 15, 2002)

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the effect of initial concentration on pilot-scale composting of diesel-contaminated soil. Sandy soil was used in this study. Target contaminant, diesel oil, was spiked at about 10,000, 25,000, and 50,000 mg TPH/kg of dry soil. Mix ratio of soil to sludge was 1:0.5 as wet weight basis. Removal efficiencies for initial concentrations of 12,966, 23,894 and 51,042 mg TPH/kg were 90, 93 and 54%, respectively, during 33 days of composting. Normal alkanes in TPH ranged from 15 to 22% in initial soils. Volatilization of individual normal alkane in 1,999 mg n-alkanes/kg was completed within 4 days, while n-alkane compounds of C11-C14 in 5,270 and 9,836 mg n-alkanes/kg were volatilized continuously during 33 days of composting operation. The first order degradation rate constants for 12,966, 23,894, and 51,042 mg TPH/kg were 0.058, 0.076, and 0.022/day, and those for 1,997, 5,270, and 9,836 mg n-alkanes/kg were 0.093, 0.100, and 0.019/day, respectively. Considering TPH removal rate, CO₂ production rate, and dehydrogenase activity, the concentration of 51,042 mg TPH/kg inhibited biodegradation of diesel-composting.

Keywords : Diesel oil, Composting, Initial Concentration

I. 서 론

토양오염은 토양자체에 대한 환경문제뿐만 아니라 주변 하천 및 지하수에 대한 2차 오염을 유발하며, 토지 이용률이 매우 높은 국내상황을 고려할 때 그대로 방치 할 수 없는 상황이다. 최근에는 외국기업과 인수합병을 추진할 경우 토양오염도를 평가하여 오염이 진행된 곳은 상당한 평가절하를 받게 되어 외국기업의 국내투자 및 진출에도 큰 장벽으로 작용하고 있다. 주유소, 공장 및 군부대에 설치되어 있는 유류저장탱크

(underground storage tanks)의 누출로 인한 토양 및 지하수오염은 매우 심각한 환경문제를 유발시킬 수 있다.¹⁾ 대부분의 저장연료는 매우 복잡한 석유계탄화수소로 구성되어 있고, 인체 및 토양생물에 유해한 성분들이 많이 포함되어 있기 때문에 오염토양은 반드시 적절하게 처리되어야 한다. 현재 국내에는 1만 2천여 개의 주유소가 영업 중에 있으며, 토양오염을 유발하는 산업체까지 포함하면 그 숫자는 약 2만여 개 이상이 된다. 석유계화합물 중에서 가장 많은 오염을 유발하고 있는 물질은 디젤이다. 디젤의 밀도, 물용해도, 그리고 증기압은 각각 0.84 g/ml, 0.2 mg/l, 그리고 0.03 mmHg로 알려져 있어²⁾ 지하수에 누출될 경우 지하수면을 따라 또는 용해되어 오염이 확산된다. 지하수를 생활용수로 사용할 경우 TPH 수질기준은 1.2 mg/l 이하이다.³⁾

¹Corresponding author : Natural Environment Research Institute
Tel: 063-212-7900, Fax: 063-212-9700
E-mail : jspark3901@hotmail.com

앞에서 기술한 토양오염유발시설에 의하여 오염된 디젤 오염토양은 생물학적인 기술에 의한 정화시 기타 기술에 비하여 적은 비용으로 처리가능하다.⁴⁾ 디젤은 현장조건이나 농도분포에 따라서 다르긴 하지만 일정 농도이상에서는 독성을 유발하는 것으로 알려져 있다.⁵⁾ 그러므로 고농도로 오염된 디젤 오염토양을 생물학적 기술로 처리할 때에는 독성에 의하여 처리효율이 낮아질 수밖에 없다. 이러한 경우에는 다른 기술들과 연계 처리하거나 적정 농도로 희석하여 주는 방법을 고려하여야 한다.

본 연구는 디젤 오염토양의 초기농도가 콤포스팅 처리효율에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 실시하였으며, 실험은 파일럿 규모로 실시하여 현장에 보다 가까운 조건에서의 결과를 평가하고자 하였다.

II. 실험방법

1. 실험재료 및 실험장치

본 연구에서는 경기도 Y시 부근의 도로포장용 토양을 채취하여 5 cm 이상의 입자만을 제거하고 풍진한 토양을 전량사용하였다. 체거름에 의한 입도분석결과 gravel이 27.0%, sand가 71.0%이었으며 나머지 2%는 silt와 clay인 사토(sandy soil)이었다. 토양채취시 수분함량과 VS는 각각 12.1%와 2.5%이었다(Table 1). 영양물질 및 미생물식종을 위해 난지도 하수처리장에서 배출된 슬러지를 토양에 대하여 1:0.5(습윤질량비)로 첨가하였다. 하수슬러지의 수분함량은 약 80%이었으며 VS는 45.5%이었다. 실험장치는 반응기, 송풍기, 유량계 및 제어장치 등으로 구성되어 있다(Fig. 1). 반응기는 지름이 1.5 m, 높이가 1.2 m인 원통형 FRP이었으며, 공기를 균등하게 주입하기 위한 자갈층을 토양 하부층에 설치하였다. 반응기의 총부피는 약

Table 1. Characteristics of soils and sewage sludge used for this study

Item	Sandy soil	Sludge
Particle size		
Gravel (2~50 mm)	27.0%	
percent Sand (0.05~2 mm)	71.0%	-
(%) Silt and clay (<0.05 mm)	2.0%	
pH	6.5	7.5
Moisture content (%)	2.179.9	
Water holding capacity (%)	22.0	83.6
Volatile solids (%)	2.5	45.5
Cation exchange capacity (meq/100 g dry matter)	15.2	36.1

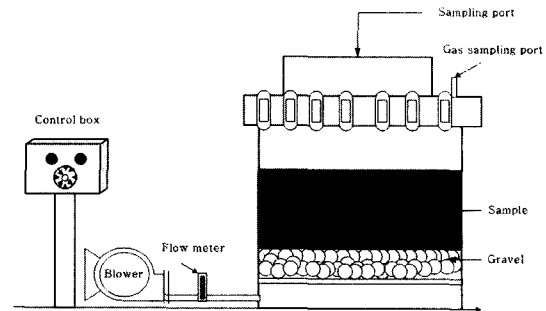


Fig. 1. A schematic diagram of experimental apparatus for this study.

2 m³이었고 이중에서 자갈층과 head space를 제외한 약 50%(약 1 m³)정도를 하수슬러지가 첨가된 디젤 오염토양으로 충전하였다.

2. 실험조건 및 운전방법

초기농도의 영향을 살펴보기 위하여 오염되지 않은 현장토양에 농도를 약 10,000, 25,000, 그리고 50,000 mg TPH/kg가 되도록 오염시켰다. 분석결과 초기농도는 12,966, 23,894, 그리고 51,042 mg TPH/kg이 검출되었다. 실험에 사용된 토양은 weathered된 것이 아니고 fresh diesel로 인위적인 오염이 이루어졌기 때문에 유류와 토양입자가 엉겨붙는 현상 등은 나타나지 않았다. 반응기의 온도는 28~30°C를 유지하였으며, 호기성 조건을 유지시켜주기 위하여 공기는 약 50 l/min/m³ (토양)으로 공급하였다. 토양수분은 수분보유능력(water holding capacity)의 약 70%로 조절하였으며, pH는 6.5~7.0으로 유지하였다.

3. 시료채취 및 분석방법

시료는 반응기 상부로부터 15 cm 깊이의 세 지점에서 분취한 후 하나의 시료로 혼합하였다. 채취한 시료는 무수황산 나트륨(Na₂SO₄)을 첨가하여 수분을 제거한 후 메틸렌클로라이드(methylene chloride)를 1:5 (w:v)의 비율로 첨가하여 200 rpm으로 2시간 동안 교반하여 추출하였다. 추출된 시료는 0.2 μm PTFE (polytetrafluoroethylene) 여지로 여과한 후 검액시료로 사용하였다. 추출액은 GC를 이용하여 TPH를 분석하였다. 칼럼은 길이 25 m, 내경 0.32 mm, film thickness가 0.52 μm인 methyl silicone capillary column(HP-1)이었다. 오븐 온도는 초기 50°C에서 300°C까지 25°C/min으로 승온시켰다. 시료주입부와 검출부의 온도는 각각 250°C와 300°C로 하였다. 휘발된 TPH 또는 노르말 알칸류는 반응기의 배출구에서 gas sampling bulb로

배가스를 포집한 후 gastight syringe로 주입하여 GC로 분석하였다. 탈수소효소는 기질에서 수소를 제거하는 역할을 하는 것으로서 토양화학분석법⁶⁾에 의하여 분석하였다. 생물학적 반응에 의하여 생성된 이산화탄소는 GA-94를 이용하여 모니터링한 후 가스유량과 시간을 고려하여 총량으로 환산하였다. 디젤분해에 의하여 발생하는 이산화탄소 발생량만을 구하기 위하여 첨가된 하수슬러지량과 동일한 양으로 대조실험을 실시한 후 이산화탄소 총발생량에서 보정하였다. 탄화수소를 분해하는 미생물수를 평가하기 위해서 MPN법을 이용하였으며,⁷⁾ 사용된 배지는 디젤유에 적응된 Bushnell-Haas 배지였다. 이 배지는 1l 중에 MgSO₄ 0.2 g, CaCl₂ 0.02 g, KH₂PO₄ 1.0 g, NH₄NO₃ 1.0 g, FeCl₃ 0.05 g이 용해되어 있다.

III. 결과 및 고찰

1. TPH의 분해

초기농도에 따른 TPH의 분해특성을 Fig. 2(a)에 나타내었다. 초기농도가 12,966과 23,894 mg/kg인 경우에

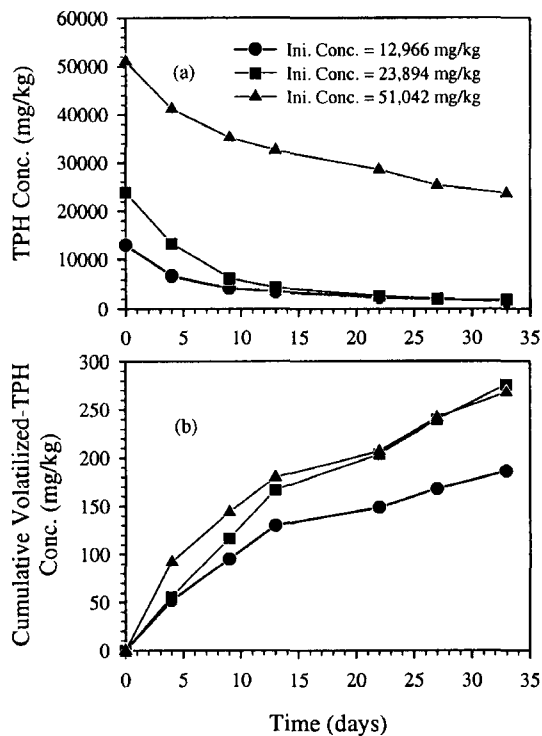


Fig. 2. TPH variation in soils with different initial diesel concentrations during composting period.

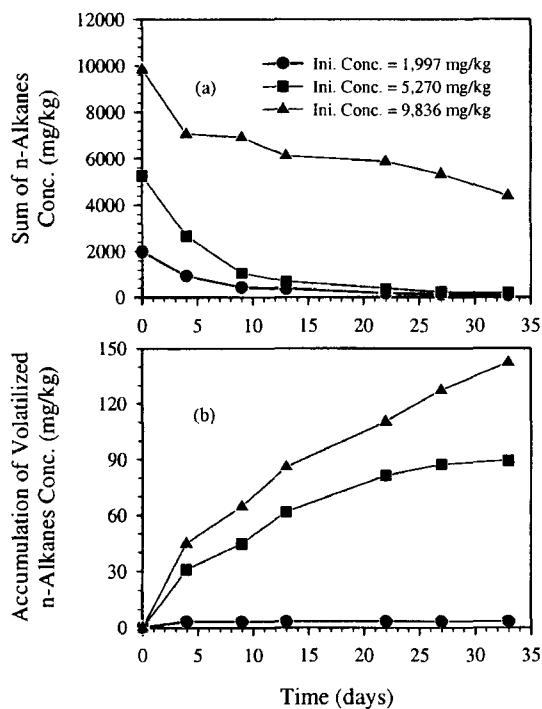
Table 2. Total removal, volatilization, and degradation portions in aged diesel contaminated soil during composting process

Compounds	Initial concentration (mg/kg)	Total removal (%)	Volatilization (%)	Degradation (%)
TPH	12,966	89.6	1.4	88.2
	23,894	93.3	1.2	92.1
	51,042	54.2	0.5	53.7
Σn-alkanes	1,997	96.5	0.2	96.3
	5,270	98.3	1.7	96.6
	9,836	56.6	1.4	55.2

는 13일차까지 농도가 급격히 감소되었다. 특히 농도감소가 가장 많이 일어났던 4일차에는 초기농도의 약 50%와 45%가 제거되었다. 초기농도가 51,042 mg/kg일 경우 4일차의 제거효율은 약 20%이었다. 4일차까지의 절대제거량은 6,313, 10,599 그리고 9,836 mg/kg으로 나타나 초기농도 23,894 mg/kg일 때에 가장 많았다. 33일 동안의 총제거율은 초기농도 12,966과 23,894 mg/kg에서는 각각 약 90%와 93%이었으나 51,042 mg/kg에서는 54%로 크게 감소하였다(Table 2). 10,000 mg/kg 이하의 농도에서 실험하였던 최 등(2002)⁷⁾의 연구에서는 30일 동안 총제거율이 86%이상이었으며 농도에 따라 약 7% 정도 차이가 있다고 하였다. 콤포스팅 기간 동안 TPH 휘발량을 누적인 결과를 살펴보면(Fig. 2(b)), 33일 동안 초기 12,966, 23,894 그리고 51,042 mg/kg의 농도에서 각각 182, 287, 그리고 255 mg/kg이 휘발되었다. 이는 각각 초기농도의 1.4, 1.2, 그리고 0.5%에 해당하는 값이다(Table 2). 침출에 의한 제거는 없었으므로 총제거량에서 휘발량을 보정하면 생물학적 분해량을 계산할 수 있으며, 계산결과 약 25,000 mg/kg이하에서는 90%, 50,000 mg/kg정도에서는 54%정도가 분해되었다(Table 2). 디젤 오염토양 처리에 관한 본 연구결과를 다른 연구자들의 결과와 함께 농도별로 Table 3에 나타내었다.⁸⁻¹⁴⁾ 약 25,000 mg/kg 이하의 농도에서는 제거효율이 84%이상이었으나 약 50,000 mg/kg 이상에서는 50~60%에 그쳤다. 그러므로 초기농도 약 25,000 mg/kg까지는 콤포스팅 적용시 농도에 의한 저해를 크게 받지 않으며 약 50,000 mg/kg에서는 고농도에 의한 저해가 일어나는 것으로 판단된다. 콤포스팅은 ex situ 공정이므로 고농도에 의한 저해가 발생할 경우 환경인자를 바꾸어 줄으로써 문제를 감소시킬 수 있다. 예를 들어 숙성퇴비, 반송토양 또는 공극개량제 등을 첨가한다면 미생물농도의 증가와 더

Table 3. The first order degradation rate constants of biodegradation of diesel-contaminated soil reported in the literatures⁸⁻¹⁴⁾

Initial conc. (mg/kg)	Final conc. (mg/kg)	Removal Efficiency (%)	First order kinetic constant(day ⁻¹)	Half-life (day)	References
1,200	100	92	0.089	8	9)
1,350	100	93	0.010	70	9)
2,117	199	91	0.079	8.8	8)
3,400	797	77	0.07	10	10)
3,985	496	88	0.069	10.0	8)
4,500	270	94	0.058	12	9)
5,000	Not detected	≈100	0.027	26	11)
9,551	1,536	84	0.061	11.4	8)
10,000	203	98	0.120	5.8	12)
12,966	-	90	0.058	11.9	this study
15,916	-	-	0.096	7.2	13)
23,894	-	93	0.076	9.1	this study
51,042	-	54	0.022	31.5	this study
100,000	42,000	58	0.015	50	14)

**Fig. 3.** n-Alkanes variation in soils with different initial diesel concentrations during composting period and cumulative n-alkanes concentrations in off gases.

불어 농도회식의 효과도 볼 수 있을 것이다. 그러나 과량첨가는 경제성이 많이 떨어지므로 현장적용시에는 최소첨가량으로 최대효율을 얻을 수 있는 적정 첨가비에 대한 연구가 이루어져야 한다.

2. 노르말 알칸류의 분해

Fig. 3(a)와 (b)에 나타난 노르말 알칸류의 제거특성 및 휘발누적량은 TPH의 경향과 유사하였다. 초기 TPH가 12,966, 23,894, 그리고 51,042 mg/kg인 경우 노르말 알칸류가 차지하는 비율은 15~22%로 각각 1,997, 5,270, 그리고 9,836 mg/kg의 농도이었다. 최 등(2002)⁸⁾의 연구에서 초기농도가 9,551 mg TPH/kg일 때 노르말 알칸류는 20%이었다. 33일 동안 노르말 알칸류의 총제거율은 5,270 mg/kg 이하에서는 TPH보다 5~6% 높았으며 9,836 mg/kg에서는 2% 높았다(Table 2). 그러나 휘발량을 보정한 생물학적 분해량은 저농도일수록 휘발량이 적어서 1,997 mg n-alkanes/kg에서는 분해율이 96.3%로 12,966 mg TPH/kg의 88.2%보다 약 10% 증가하였다. Table 2에 나타난 휘발률을 살펴보면 고농도로 갈수록 TPH 휘발률은 감소하지만 노르말 알칸류의 휘발률은 증가하고 있다.

노르말 알칸류의 휘발특성을 좀 더 자세히 살펴보면 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 노르말 알칸류의 각 화합물별 휘발손실량을 누적한 결과 C10은 콤포스팅 9일 이내에 휘발이 완료되어 더 이상 검출이 되지 않았다. 또한 1,999 mg n-alkanes/kg에서는 4일 이후에도 C10-C25까지의 화합물과 pristane이 모두 검출되지 않아 초기에 휘발이 종료되었음을 알 수 있었다. 그러나 5,270 mg n-alkanes/kg 이상에서는 C11-C14의 화합물들이 33일의 운전기간 동안 계속 휘발되었다.

3. 동력학적 상수

앞에서 살펴보았듯이 콤포스팅 처리시 디젤의 휘발량은 매우 적은 양이어서 총제거량과 분해량과의 차이는

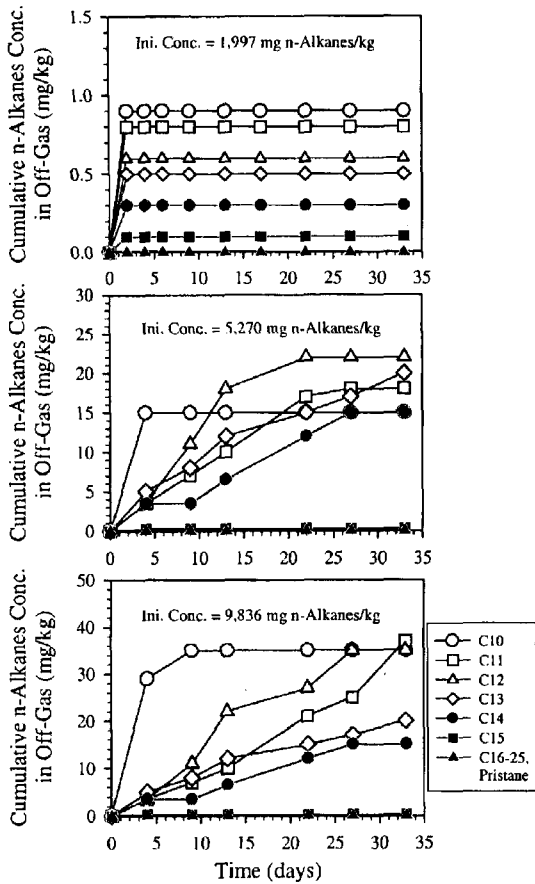


Fig. 4. Accumulation of individual n-alkane compound in off gases during composting period.

거의 없었다. 분해에 의한 TPH와 노르말 알칸류를 1차 반응 모델에 적용한 결과를 Fig. 5(a)와 (b)에 나타내었다. 상관계수 분석결과 $r > 0.94$ 로 1차반응 모델로 표현하기에 적합하였다. TPH에 대한 1차분해속도상수 (k_1)는 23,894 mg/kg의 경우 0.076/day로 가장 높았으며, 51,042 mg/kg에서 0.022/day로 가장 낮았다(Fig. 5(a)). 약 10,000 mg TPH/kg이하에서 연구한 다른 연구자의 결과에서는 초기농도가 증가할수록 1차반응속도상수가 감소한다고 하였다.⁸⁾ 노르말 알칸류의 k_1 값은 9,836 mg/kg에서 0.019/day로 1,997과 5,270 mg/kg의 0.093과 0.100/day보다 낮았다(Fig. 5(b)). 다른 연구자와 본 연구의 결과를 초기농도별로 정리한 TPH의 1차분해속도상수(k_1)는 0.010-0.120/day까지 다양하게 나타났다(Table 3).⁸⁻¹⁴⁾ 이 때의 초기농도는 1,200부터 100,000 mg/kg까지이었다. 약 10,000 mg/kg의 농도에서 토양에 슬러지를 습윤질량비로 1:0.3으로 첨가하였

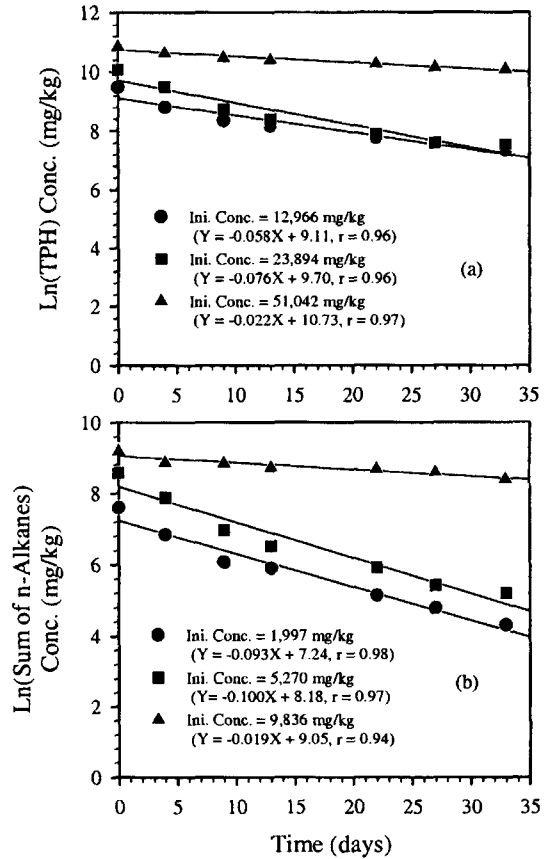


Fig. 5. First order kinetic models for biodegradation of TPH and n-alkanes in soils during composting period.

던 Namkoong 등(2002)¹²⁾의 연구에서는 k_1 값이 0.120/day로 토양에 슬러지를 습윤질량비로 1:0.5로 첨가하였던 본 연구의 0.058/day보다 높았으나, 토양에 슬러지를 습윤질량비로 1:0.3으로 첨가하였던 최 등(2002)⁸⁾의 연구는 0.061/day로 본 연구결과와 유사하였다. 반감기는 1,200 mg/kg의 저농도에서는 8일로 짧았고 50,000 mg/kg이상의 고농도에서는 1개월 이상이었다. 제거효율도 50,000 mg/kg이상에서는 50-60%정도로 낮게 나타났다. 이로써 약 50,000 mg/kg 이상의 디젤 농도에서는 이 보다 낮은 농도와 다른 분해특성을 나타내는 것으로 보아 농도에 의한 악영향(inhibition)이 일어나는 것으로 사료된다.

4. 이산화탄소 발생량, 탈수소효소 및 탄화수소분해미생물
생물체는 대사활동의 결과물로서 이산화탄소를 배출한다. 또한 유기화합물은 산화가 이루어지는 과정에서

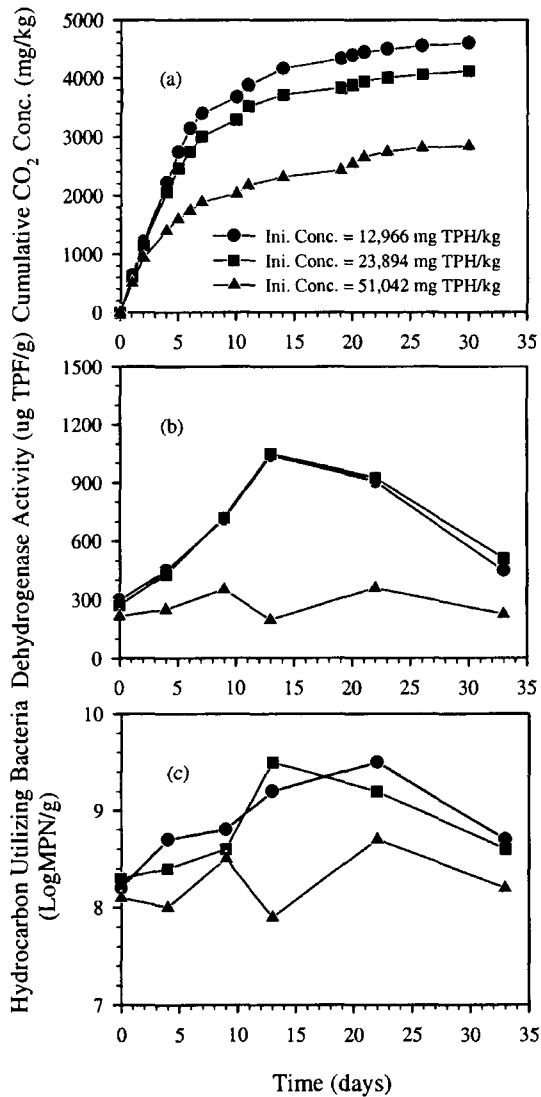


Fig. 6. CO₂ concentration, dehydrogenase activity, and hydrocarbon utilizing bacteria during composting.

탈수소(dehydrogenase)라는 효소에 의하여 전자와 수소가 소모된다.¹⁵⁾ 그러므로 이산화탄소 발생량과 탈수소 효소의 측정은 생물학적 활성도의 간접지표로 사용될 수 있다. 초기농도별로 33일의 콤포스팅 기간 동안 발생하는 이산화탄소 발생량을 누적하여 Fig. 6(a)에 나타내었다. 이는 하수슬러지에서 발생하는 이산화탄소를 보정한 것으로서 탄산염형태로 토양에 흡수되는 이산화탄소는 고려하지 않았다. 12,966과 23,894 mg TPH/kg에서는 4,000 mg/kg 이상의 이산화탄소가 발생되어 51,042 mg TPH/kg에서는 2,900 mg CO₂/kg보다도 높

았다. 탈수소효소도 12,966과 23,894 mg TPH/kg이 51,042 mg TPH/kg 보다 3배 이상 높았다(Fig. 6(b)). 탈수소효소는 9일과 13일차에 최고치를 나타낸 이후 감소하였는데 이는 이산화탄소 발생량의 누적치가 이 시점 이후 급격히 감소하기 시작한 것과 일치하였다. 탄화수소를 분해하는 미생물수도 초기 약 8 LogMPN/g이었던 것이 13일차에 최고치를 나타내었다(Fig. 6(b)). TPH농도가 23,894 mg/kg 이하일 때에는 최고 농도가 9.5 LogMPN/g이었으나 51,042 mg/kg에서는 8.7 LogMPN/g이었다. 생물학적 분석항목을 종합한 결과 앞절에서 언급하였던 51,042 mg TPH/kg에서는 디젤 분해에 저해가 일어났다는 사실을 확인할 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구는 초기오염농도가 파일럿 규모의 디젤 오염 토양 콤포스팅 처리시 제거효율에 미치는 영향을 살펴보고자 실시하였으며 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 초기농도가 12,966, 23,894 그리고 51,042 mg TPH/kg일 때 30여일 동안의 총제거율은 각각 90, 93, 그리고 54%이었다.
2. 초기 TPH가 12,966, 23,894, 그리고 51,042 mg/kg 인 경우 노르말 알칸류가 차지하는 비율은 15~22%였으며, 33일 후 각각 97, 98, 그리고 57%가 제거되었다.
3. 1,999 mg n-alkanes/kg에서는 4일 이후에 휘발이 종료되었으나 5,270 mg n-alkanes/kg 이상에서는 C11-C14의 화합물들이 33일의 운전기간 동안 계속 휘발되었다.
4. TPH에 대한 1차분해속도상수 k는 23,894 mg/kg의 경우 0.076/day로 가장 높았으며, 51,042 mg/kg에서 0.022/day로 가장 낮았다. 노르말 알칸류의 k값은 9,836 mg/kg에서 0.019/day로 1,997과 5,270 mg/kg의 0.093/day과 0.100/day보다 낮게 나타났다.
5. TPH제거율과 이산화탄소 발생량 및 탈수소효소 검토결과 51,042 mg TPH/kg에서는 디젤분해에 저해가 일어났다.

참고문헌

1. Watts, R. J.: Hazardous Waste: Sources, Pathways, Receptors, John Wiley & Sons, Inc., 1997.
2. Custance, S. R., Sullivan, M. J., McCaw, P. A. and Kopf, A. C.: Environmental Fate of the Chemical Mixtures: Crude Oil, JP-5, Mineral Spirits, and Diesel Fuel, *Hydrocarbons Contaminated Soils and Groundwater* Vol. 3, Calabrese, E.T. and Kostechi,

- P.T.(eds.), Lewis Publishers, 205-212, 1993.
3. 환경부 : 지하수의 수질보전 등에 관한 규칙중 개정령 (안). 2001.
 4. 박준석, 남궁완, 이노섭, 인병훈, 황의영 : 오염토양 정화를 위한 콤포스팅 기술의 원리와 적용에 관한 고찰. 한국유기성폐자원학회지, **9**(3), 77-87, 2001.
 5. Miller, R. N., Vogel, C. C. and Hinchee, R. E. : A Field-Scale Investigation of Petroleum Hydrocarbon Biodegradation in the Vadose Zone Enhanced by Soil Venting at Tyndall AF, Florida, *In Situ Bioreclamation: Applications and Investigations for Hydrocarbon and Contaminated Site Remediation*, Hinchee, R. E. and Olfenbittel, R. E., Butterworth-Heinemann (eds.), 283-302, 1991.
 6. 농업기술연구소 : 토양화학분석법. 1988.
 7. Song, H. G. and Bartha, R. : Effects of Jet Fuel Spills on the Microbial Community of Soil, *Appl. & Env. Microbiol.*, **56**(3), 646-651, 1990.
 8. 최정영, 남궁완, 박준석, 황의영 : 디젤 초기농도가 오염토양의 콤포스팅 처리에 미치는 영향. 한국유기성폐자원학회지, **10**(1), 120-127, 2002.
 9. Bossert, I. D. and Compeau, G. C. : Cleanup of Petroleum Hydrocarbon Contamination in Soil, *Microbial Transformation and Degradation of Toxic Organic Chemicals*, Young, L. Y. and Cerniglia, C. E. (eds.), WILEY-LISS Inc., 77-125, 1995.
 10. Saberiyan, A. G., MacPherson, J. R., Andrienas, J. S., Moore, R. and Pruess, A. J. : Bench-Scale Biotreatability Methodology to Evaluate Field Bioremediation, *Monitoring and Verification of Bioremediation*, Hinchee, R. E., Douglas, G. S. and Ong, S. K. (eds.), Battelle Press, 185-191, 1995.
 11. Berry, K. A. T. and Burton, D. L. : Natural Attenuation of Diesel Fuel in Heavy Clay Soil, *Canadian J. of Soil Sci.*, **77**, 69-477, 1997.
 12. Namkoong, W., Hwang, E. Y., Park, J. S. and Choi, J. Y. : Bioremediation of Diesel- Contaminated Soil with Composting, *Env. Pollu.*, **119**(1), 23-31, 2002.
 13. Demque, D. E., Biggar, K. W. and Heroux, J. A. : Land Treatment of Diesel Contaminated Sand, *Canadian Geotech. J.*, **34**, 421-431, 1997.
 14. Song, H. G., Wang, X. and Bartha, R. : Bioremediation Potential of Terrestrial Fuel Spills, *Appl. & Env. Microbiol.*, **56**(3), 652-656, 1990.
 15. Van der Waarde, J. J., Dijkhuis, E. J., Henssen, M. J. C. and Keuning, S. : Enzyme Assays as Indicators for Biodegradation, *Monitoring and Verification of Bioremediation*, Hinchee, R. E., Douglas, G. S. and Ong, S. K.(eds.), Battelle Press, 59-63, 1995.