

## 디젤오염토양의 Bench Scale 처리에 있어서 벤팅모드 비교

김영암<sup>†</sup> · 이용희\* · 이동선\*\* · 서명교\*\*

(주)한신환경, \*동의대학교 기초과학연구소, \*\*동의과학대학 신소재생활과학계열 및 의무행정과

## Comparison of Venting Modes for Bench Scale Treatment of Diesel Contaminated Soil

Young-Am Kim<sup>†</sup> · Yong-Hee Lee\* · Dong-Sun Lee\*\* · Myung-Gyo Suh\*\*

Han-Sin Environment Co. Ltd.

\*Research Institute for Basic Science, Dongeui University

\*\*Division of Materials & Fine Chemistry and Department of Medical Administration,  
Dongeui Institute & Technology

(Received July 10, 2006/Accepted October 23, 2006)

### ABSTRACT

Bioventing efficiency was compared in a continuous and an intermittent(6hr injection and 6hr rest) air injection mode. Two lab-scale columns which packed with 5 kg of soil artificially contaminated by diesel oil were operated. The columns were maintained at the 25°C ± 2.5 in order to minimize the effect of exterior temperature variation. The flow rate of air injection mode were maintained constantly at the flow rate of 10 ml/min. The moisture of the columns was stably maintained at 60~80% of field capacity. The nutrient compounds were added to make C:N:P ratio as 100:10:1. The continuous and intermittent injection modes showed 67.56% and 69.63% reduction of initial TPH concentration during 90 days, respectively. Two venting modes showed similar results in the analysis of the trends of the hydrocarbon utilizing bacterial counts for operating periods. The carbon dioxide production rate of the continuous injection mode was higher than that of intermittent injection mode. The loss of diesel oil by volatilization in the continuous and intermittent injection modes were about 5% and 1%, respectively. The lower volatilization loss in the intermittent injection mode suggested that the biodegradation of TPH in the intermittent injection mode was greater than that of the continuous mode. These results suggested that the intermittent injection mode is more efficient than the continuous venting mode.

**Keywords:** bioventing, continuous mode, intermittent air injection mode, diesel oil, volatilization

### I. 서 론

환경오염은 물, 공기 뿐만 아니라 토양에 이르기까지 다양한 경로를 통하여 생태계에 영향을 미치게 된다. 지금까지 우리나라에서는 환경오염을 주로 수질 및 대기오염 부분에만 대처해 왔는데 최근에서야 토양오염에 대해서도 많은 관심을 기울이고 있다.<sup>1,2)</sup> 토양오염은 그 자체만으로도 우려될 뿐만 아니라 오염된 토양으로 인하여 지표수, 지하수 및 대기까지도 오염시킬 수 있다. 오염된 토양을 처리하는 방법에는 물리화학적, 생물학적, 열적, 그리고 전기영동적 처리방법 등이 있다.<sup>3)</sup> 토양오염은 환경에 대한 그 영향이 느리게 나타나는 특

성 때문에 주유소, 지하 유류저장소 및 군부대로부터 유출되는 각종 유류가 토양에 흡착되거나 비수용성 액체상태로 남아 토양과 지하수에 장기적인 오염원이 되고 있다. 이러한 유류오염물 중에서도 토양오염의 주원인이 되는 디젤은 휘발성과 용해도가 낮은 반면에 생분해도가 높기 때문에 생물학적 처리법이 많이 이용되고 있다. 생물학적으로 오염토양을 정화시키는 방법에는 자연상태에서 진행되는 생분해과정을 이용하는 것으로 산소를 별도로 공급하거나 결핍영양분을 제공하는 것 또는 오염물질의 분해에 적절한 미생물을 제공해서 인위적으로 처리속도를 증진시키는 방법 등이 있다. 오염토양의 생물학적 복원기술은 미생물을 이용해서 유해성 유기물을 미생물체, 이산화탄소 또는 물로 무해화 처리한 것이기 때문에 물리화학적 처리에 비하여 경제적이고 2차 오염이 없는 환경 친화적 방법이라

<sup>†</sup>Corresponding author : Han-Sin Environment Co. Ltd.  
Tel: 82-51-624-1793, Fax: 82-51-621-1794  
E-mail : hansin-env@hanmail.net

는 이유로해서 선진국에서는 많이 사용되고 있다. 이러한 생물학적 정화기술의 연구개발이 현재도 진행되고 있다.<sup>4,5)</sup> 그래서 퇴비화나 토양경작법에 대한 연구들이 많이 보고되고 있다.<sup>6,7)</sup> 그러나 이러한 공법들은 오염토양을 굴착하여 처리하는 지상처리(Ex-situ) 기술로서 토양을 굴착하는 데에 많은 토공비가 소요되며 넓은 부지의 오염토양이나 건축 구조물들이 들어서 있는 곳에서는 적용하는데 한계가 있다. 그러므로 오염부지를 굴착하지 않고 처리하기 위한 지중처리(In-situ) 기술들에 의한 정화가 필요하다.<sup>8,9)</sup> 바이오벤팅(bioventing)은 토양중기추출법(SVE)의 수정된 공법<sup>10,11)</sup>으로 오염물질의 휘발을 최소화하며 토양 미생물과 주입된 공기사이의 접촉시간을 최대화시켜 생분해하기 위하여 SVE보다는 상대적으로 낮은 공기량에서 운전되는 경제적이고 효율적인 공법으로 많이 이용되어 왔다.<sup>12)</sup> 따라서 본 연구에서는 비휘발성 유류물질인 디젤을 지중에서 비교적 빠른 시간내에 효과적으로 처리할 수 있는 대안기술을 개발하기 위하여 바이오벤팅 공법을 이용해서 벤

팅모드(venting mode)에 대한 비교를 수행하였다. 그리하여 경제적이고 효율적인 모드를 제시하여 실제 유류오염지역에 대한 적용성에 대한 기초자료로 삼고자 한다.

## II. 연구방법

### 1. 실험에 사용된 토양공기주입 반응조의 구성 및 운전조건

사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 원통형 반응기와 습윤기, soil gas flow rate를 측정하기 위해 유입부에 설치된 Mass Flow Controller(MFC, Bronkhost Co., F-201C-FA-22-V)), CO<sub>2</sub> 제거 및 포집장치, 활성탄튜브 등으로 구성하였다. 반응기는 내경 10 cm이고 높이 60 cm이며 재질은 이중 유리이며 반응조 용적은 4.7 l인 원통형 칼럼으로, 외부 샘플링포트가 대략 15.5 cm 간격으로 3곳이 되도록 제작하였다. 직경이 1.5 cm인 일정한 유리구슬을 이용하여 높이가 60 cm 칼럼내에 채워진 토양으로 일정한 공기의 주입이 이루어지도록 하였으며 칼럼의 잔여부분에 토양을 채웠다. 공급되는 공기중 CO<sub>2</sub>를 제거하기 위하여 NaOH를 통과시켰다. CO<sub>2</sub>제거장치를 통과한 공기는 습윤기를 거쳐 수분이 포화된 공기공급에 의해 오염된 토양의 수분이 증발되는 것을 최소화하였다. 반응기를 통과하고 나온 배가스는 활성탄 튜브를 통과시켜 디젤내 휘발된 유기화합물이 포집되도록 하였다. 마지막으로 디젤의 생물학적인 분해에 의해 생성된 CO<sub>2</sub>를 포집하기 위하여 0.5 M NaOH 100 ml가 들어있는 용기를 통과시켜 배출되도록 하였다. 반응기 양 끝 부분에 칼럼을 완전히 밀폐시켜 주입되는 공기외의 다른 영향을 배제하도록 장치하였다. 주입되는 공기유량은 MFC 제어기를 통해 조절될 수 있도록 설치하였으며 실험목적에 따라 연속식과 간헐식으로 나누어 수분함량과 영양염의 비를 Table 1에서 보이는 조건들로 적용하였으며, pH는 채취토양조건 그대로에 맞추었다. 반응기는 25±2.5°C에서 유지시켜 외부온도의 영향을 배제토록 하였다. 운전비용의 감소

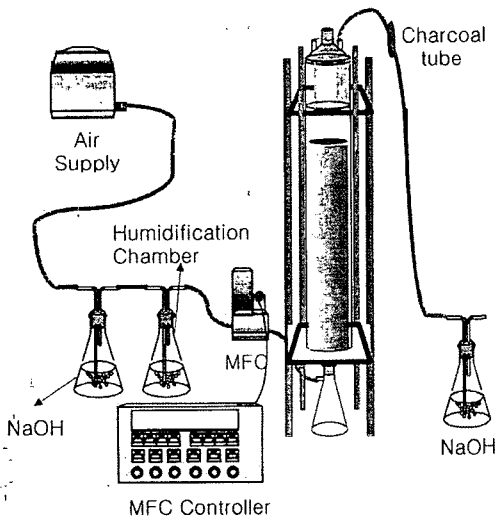


Fig. 1. Schematic diagram of lab-scale bioventing system.

Table 1. Operation conditions in continuous and intermittent mode

Operation mode	Operation condition				
	Initial TPH concentration (mg/kg)	Temperature (°C)	Moisture	Nutrient (C:N:P)	Electron acceptor
Intermittent (10 ml/min)	7,345	25	60-80	100:10:1	Air
Continuous (10 ml/min)	7,064				

Intermittent: 6hr injection and 6hr rest.

Bioventing columns were operated as up-flow aeration.

및 효율 측면에서 벤팅모드 평가를 위한 방법으로 총 석유계탄화수소(TPH) 농도변화를 알기 위하여 벤팅모드(연속식, 간헐식)에 따른 디젤 내 탄화수소의 총량인 TPH의 분해를 살펴보고자 가스크로마토그래피(GC, HEWLETT PACKARD 5890)를 이용해서 반응 90일 동안 TPH 농도 변화를 살펴보았다. 이때 연속식의 측정간격은 15일 간격, 간헐식은 30일 간격으로 측정하였으며, 벤팅모드에 따른 복원관별인자의 변화를 보기 위해 반응 90일 동안 유류분해균수의 변화를 관찰하였다. 그리고 벤팅모드에 따른 미생물의 호흡율을 간접적으로 알아보기 위해서 반응 90일 동안 이산화탄소의 발생량도 관찰했다. 벤팅모드별로 TPH 제거에 따른 생물학적 분해 및 비생물학적 제거간의 상관관계도 살펴보고자 활성탄에 포집된 유기물의 양을 측정해서 이를 전체 TPH제거와 비교해 보았다.

**2. 실험재료에 사용한 토양의 특성**

재료로 사용한 실험토양의 특성을 Table 2에 나타내었을 때 토양의 입경분포는 2.0 mm~0.05 mm 입경의 모래가 94.5% 이상인 사질토양이었으며 유기물함량은 2.16%~2.38%, pH는 약산성, 입자밀도는 2.13g/cc, 겉보기밀도는 1.14 g/cc, 공극율은 46.5%~49.3% 등 pH가 약간 높다는 것을 제외하고는 사질토양의 특성을 보였다. Table 3은 질소 및 인 성분의 기타 영양원이 존재하는 지를 알아보기 위해서 X-ray Fluorescence Spectrometer(XRF, Jordan Valley)을 이용해서 분석한 결과로 규소, 알루미늄, 철, 기타 미량원소의 순으로 함량들이 구성되었다. 재료로 사용한 실험토양은 부산의 K 야산에서 지표로부터 깊이 15 cm 지부의 표토층을 채취하여 체로 쳐낸 후, 입자의 크기가 2 mm 이하인 토양만을 사용하였다. 인위적으로 오염시키기 위해서 토양 1 kg당 주요소에서 구입한 디젤을 약 10,000 mg 정도 첨가해서 잘 혼합되도록 했다. 이 때 교반기를 이

**Table 2.** Characteristics of the experimental soil samples

Parameter	Sample soil
Soil texture	Sand (Sand: 94.5%, Silt: 5.5%)
Soil pH	6.8 ± 0.3
Field capacity (cm/m, %)	15.5~16.5
Soil Porosity (%)	46.5~49.3
Organic matter (%)	2.16~2.38
Particle density (g/cc)	2.13
Bulk density (g/cc)	1.14
N(g/kg)	0.05 g/kg
P(g/kg)	0.26 g/kg

Soil used in this research.

**Table 3.** Chemical composition of the soil by X-ray fluorescence spectrometer

Constituent	Value (%wt)	Constituent	Value (%wt)
SiO <sub>2</sub>	61.235	TiO <sub>2</sub>	0.512
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.541	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	D
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.124	SrO <sub>2</sub>	D
MnO	0.123	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	D
CaO	0.745	ZnO	D
MgO	0.654	ZrO <sub>2</sub>	0.12
K <sub>2</sub> O	3.156	Rb <sub>2</sub> O	D
Na <sub>2</sub> O	3.654	SUM	99.98
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.089	L.O.I.	3.026

L.O.I.: Loss on Ignition, D: qualitative analysis.

용하여 60분 정도 혼합시킨 후, 디젤의 휘발성 물질을 제거하기 위해 한달간 실외에 방치해서 초기 TPH 농도를 측정했다. 주입하기 전에 수분함량은 최대 수분보유능력의 60~80%로 유지시켜 주었다.

**3. 시료분석 방법**

실험오염토양에서 대상오염물질은 속시렛추출법에 의해 추출하였으며, 추출용매는 디클로로메탄을 사용했다. 텀블필터에 시료량 10g과 수분증발을 유도할 분말 형태의 무수황산나트륨을 적당량 넣고 혼합해서 속시렛사이펀에 걸은 후, 시간당 6사이클 정도로 8시간 추출하였다. 추출과 방냉과정을 거쳐 추출액을 약 2~5 ml 정도 농축한 다음 2ml를 4°C 냉장 보관하였다. 농축시료내 디젤농도를 정량화하기 위해 n-C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>부터 n-C<sub>40</sub>H<sub>82</sub> 사이의 35개 화합물이 함유된 표준시약(500 µg/ml, Multi-State Hydrocarbon Window Defining Standard)를 디클로로메탄에 희석해서 3가지 농도(총농

**Table 4.** Conditions of a gas chromatography

Parameter	Value
Gas chromatography/ Data system	HP5890 Series II/HP3365
Injection/Detector port temperature	300°C/320°C
Carrier gas/ Carrier flow-rate	Helium/1.0 ml/min constant flow
Column	50 m Length(5%PH ME Siloxane) 0.32 mm I.D., 0.17 µm film thickness
Temperature	50°C initial temperature; 5 min hold at initial temperature 5°C/min ramp to 320°C final temperature; 10 min hold at final temperature
Detector	Flame ionization detection(FID)

도 10, 30, 50 µg/ml)로 준비했다. Table 4에 나타난 GC 운전조건으로 추출시료를 분석했다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 벤팅모드에 따른 TPH 농도변화

연속 벤팅모드와 간헐 벤팅모드를 비교하면서 간헐적 공기주입에 대한 성능을 평가하고자, 간헐 공정은 6 hr 멈추고 6 hr 주입하는 식으로 운전하였다. 일일 주입되는 최종 시간은 12 hr이었고, 호기성 조건을 유지시켜 주기 위해서 칼럼 반응기에 주입되는 공기량은 10 ml/min이었다. Fig. 2에서는 수분함량이 수분보유능력의 60%, C:N:P비가 100:10:1이며 사질토양에 간헐 벤팅모드가 TPH 분해에 미치는 영향을 보여주고 있다. 반응 90일 동안 연속식과 비교하여 간헐식 모드가 TPH 분해에 매우 효과적이었으며, 초기농도 7,345 mg/kg에서 반응 90일째에는 2,230 mg/kg으로 제거율은 69.63%이었다. 반면 연속식 조건에서는 반응 90일째 농도가 2,291 mg/kg이며 제거율은 간헐식에 비하여 상대적으로 낮은 67.56%이었다. 이와 같이 간헐적 주입이 연속식

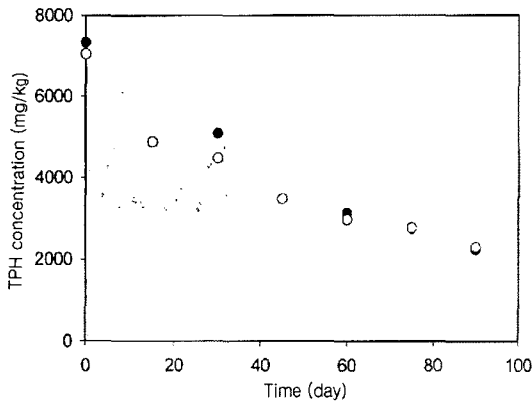


Fig. 2. Variation of residual TPH concentration in intermittent injection and continuous injection experiments at 10 ml/min; ●: 6 hr injection/6 hr rest (10 ml/min), ○: continuous injection (10 ml/min).

Table 5. Comparison of residual TPH degradation kinetic parameters calculated on the first order kinetic equation at various air flow managements

Condition		First order		
Venting mode	Flow rate	k (1/day)	R <sup>2</sup>	Half-life (day)
Continuous injection	10 ml/min	0.0117	0.97	59
Intermittent injection	10 ml/min	0.013	0.99	53

보다 빠른 TPH 분해를 보인 것은 공기가 주입되지 않은 시간으로 인한 정지식 pile system에서의 혐기적 상태가 영향을 미친 것으로 생각된다. Table 5는 오염된 토양에서 벤팅모드 변화에 따른 TPH 분해제거 속도를 반응차수 1차로 나타내었을 때의 분해속도상수와 반감기를 비교하여 나타낸 것이다. 반응일수 동안 TPH 분해를 1차반응으로 가정하였을 때 간헐식 조건에서의 상관계수(R<sup>2</sup>)가 연속식 조건에 비해 상대적으로 높은 99%이었다. TPH 제거율과 분해속도상수를 종합적으로 비교하여 보았을 때 간헐주입이 연속주입에 비하여 더 효율적인 공정인 것으로 생각된다. 따라서 하루에 12시간씩(6 hr injection/6 hr rest)를 주입한 간헐식 벤팅모드를 적용하여도 바이오벤팅 모드에 따른 blower/pump의 에너지 및 운전비용을 저감시킬 수 있을 것으로 생각된다.

#### 2. 벤팅모드에 따른 노르말알칸(n-alkane)과 이소프레노이드(isoprenoid)의 반응속도상수의 비교

Fig. 3은 영양염류가 첨가되었으며, 공기량 10 ml/min의 주입조건에서 연속식과 간헐식 모드를 비교하기 위해 반응 90일 동안 공기주입 모드에 따른 노르말알칸류와 이소프레노이드의 비에 대한 변화를 살펴본 것으로 연속식과 간헐식의 둘 다의 경우, 디젤 내 TPH의 구성성분인 노르말알칸류와 이소프레노이드의 농도변화를 동력학적 모델중 오염물질의 분해해석에 관한 동력학 1차 반응으로 가정해서 비선형회귀분석법으로 계산한 1차 분해속도상수를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 3의 연속식에서 탄소수 n-C<sub>10</sub>에서 n-C<sub>15</sub>까지는 1차 분해속도상수값이 각각 0.059, 0.072, 0.063, 0.036,

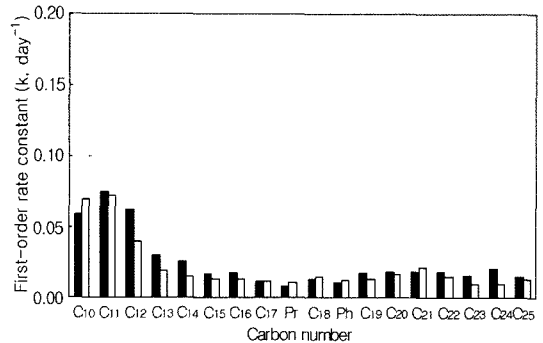
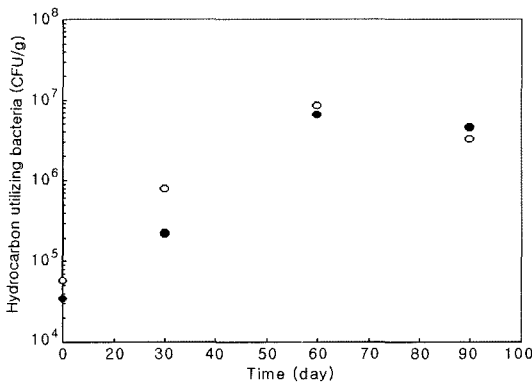


Fig. 3. Comparison of the first-order rate constants for n-alkanes and isoprenoids computed by nonlinear regression. Values are the means of three replicates; ■: 6 hr injection/6 hr rest (10 ml/min), □: continuous injection (10 ml/min).

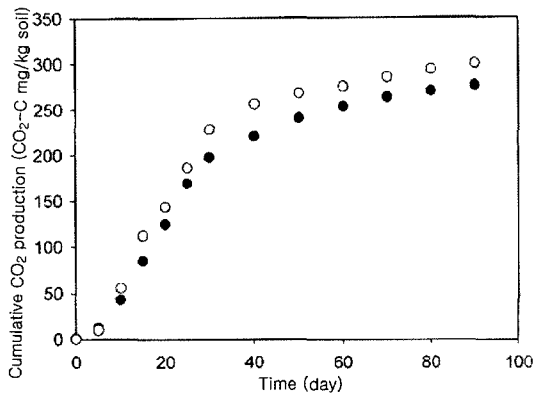
0.266 day<sup>-1</sup>이면서 지수곡선으로 감소하는 경향을 보이고 있으나, C<sub>15</sub>부터 C<sub>25</sub>까지는 0.013~0.010 day<sup>-1</sup> 사이의 완만한 감소 경향을 보이고 있다. 또한 연속식에서는 개별성분의 1차 분해속도상수의 상관관계값(R<sup>2</sup>)이 n-C<sub>10</sub>에서 n-C<sub>17</sub>까지 98% 이상을 보였으나 n-C<sub>17</sub> 이상에서는 상관관계 값이 85~90%를 보여주었다. 반면 간헐식에서는 상관관계값이 평균 95% 이상을 보였다. 이상 두 벤팅모드를 분해속도상수로 비교하였을 때 간헐식의 분해속도상수값(k)이 연속식에 비하여 상대적으로 높음을 나타냈다. 따라서 간헐식이 연속식에 비해 개별 성분, 즉 노르말 알칸류와 이소프레노이드 성분을 더 빨리 분해하는 것으로 생각된다. 이는 부분적으로 탄소수의 용해도로써 설명이 가능하지만, 탄화수소 생분해율은 분자량이 증가할 수록 감소된다는 연구내용과 부합되는 것이다.<sup>13)</sup> 특히 이소프레노이드 성분인 프리스탄과 피탄의 경우 분해속도 상수값과 상관관계 값이 다른 노르말알칸에 비해 상당히 낮은 값이었다. 이는 탄소수의 용해도로써의 설명보다는 노르말알칸과 이소프레노이드의 분해경로가 서로 상이하기 때문에 두 벤팅 모드에서도 프리스탄과 피탄은 노르말알칸에 비해 제거속도가 낮은 것으로 생각된다.



**Fig. 4.** Variation of hydrocarbon utilizing bacteria counts in intermittent injection and continuous injection experiments at 10 ml/min; ●: 6 hr injection/6 hr rest (10 ml/min), ○: continuous injection (10 ml/min).

**3. 벤팅모드에 따른 토양 복원 판별을 위한 유류분해균수의 변화**

Fig. 4는 공기유량 10 ml/min 주입조건에서 연속식과 간헐식 모드를 비교하기 위해 반응 90일 동안 공기주입 모드에 따른 복원 모니터링 판별인자인 유류분해균수의 변화를 관찰하여 비교하였다. 유류분해균수가 반응초기(0일)에는 5.8×10<sup>4</sup> CFU/g(연속식), 3.4×10<sup>4</sup> CFU/g(간헐식)이었고, 0일째 이후부터는 점진적인 증가를 하면서 반응 30일째에는 7.9×10<sup>5</sup> CFU/g(연속식), 2.1×10<sup>5</sup> CFU/g(간헐식)이면서 반응 60일째까지 계속 증가함을 나타내었다. 반면 반응 60일과 90일째에는 유류분해균수가 각각 8.5×10<sup>6</sup> CFU/g(연속식), 6.5×10<sup>6</sup> CFU/g(간헐식)과 3.2×10<sup>6</sup> CFU/g(연속식), 4.5×10<sup>6</sup> CFU/g(간헐식)을 나타내었다. 이러한 결과는 유류분해균수가 반응 60일까지 성장률이 증가하다가 이후 둔화되는 경향을 보였는데 이유가 영양염이나 기질의 부족에 기인한 것으로 생각된다.<sup>14)</sup> 따라서 하루에 12시간씩(6 hr injection/6 hr rest)를 주입한 간헐식 벤팅모드를 적용하여도 바이오벤팅 공정에는 큰 영향을 끼치지 않음을 알 수 있다.



**Fig. 5.** Cumulative CO<sub>2</sub> production(CO<sub>2</sub>-C mg/kg of soil) from diesel contaminated soil versus time in intermittent injection and continuous injection experiments at 10 ml/min. ●: 6 hr injection/6hr rest (10 ml/min), ○: continuous injection (10 ml/min).

**Table 6.** Cumulative CO<sub>2</sub> production calculated versus time in intermittent injection and continuous injection experiments at 10 ml/min

Time (day)	5	10	15	20	25	30	40	50	Injection mode
Cumulative	12	43.2	96.3	145.2	172.6	198.4	220.8	240.7	Intermittent injection
CO <sub>2</sub> -C (mg/kg)	12	31.2	53.1	48.9	27.4	25.8	22.4	19.92	
Cumulative	10	52.6	112.5	153.6	190.5	228.7	256.3	267.8	Continuous injection
CO <sub>2</sub> -C (mg/kg)	10	42.6	59.9	41.1	36.93	38.12	27.7	11.5	

#### 4. 벤팅모드에 따른 이산화탄소 발생량의 변화

Table 6과 Fig. 5는 벤팅모드별로 운전일 수에 따라 미생물의 호기성 분해를 통해 생성된 CO<sub>2</sub>량과 누적량을 나타낸 것이다. 반응 90일 동안 연속식과 간헐식의 유량이 10 ml/min으로 유지하였을 때 15일까지는 이산화탄소 발생량이 증가하는 경향을 보였지만 이후, 20일째 7.9%로 감소하여 전체 누적량의 기울기가 감소하는 경향을 보였다. 90일간의 운전동안 오염된 TPH 농도가 감소함에 따라, 누적 이산화탄소 발생량도 증가하였다. 높은 증가율을 보이다가 이후 감소하는 경향을 보였다. 이것은 TPH 농도의 감소와 밀접하게 연관되는데 반응 일 수별 증가량의 규칙성은 관찰할 수 없었다. 그러나 CO<sub>2</sub>의 누적발생량은 간헐식보다 연속식이 많이 발생하였다.

#### 5. TPH 제거에 대한 제거, 분해, 휘발의 상관관계

Fig. 6은 영양염류가 첨가된 연속유량 10 ml/min과 간헐식 벤팅모드에서 얻은 TPH 제거량을, 휘발과 분해의 비율로 나타낸 것으로 공기유량 10 ml/min로 연속 주입한 경우와 10 ml/min으로 6 hr의 주기로 간헐적 주입을 한 것이다. 이때 실험일수는 90일로 연속식의 경우도 90일까지의 데이터를 기준한 것이다. TPH 총제거량은 연속식과 간헐식 각각 67.56%, 69.63%로, 간헐식이 다소 높았다. 생분해로 여겨지는 분해율은 연속식의 경우 62.43%, 간헐식은 69.2%로 간헐식이 연속식보다 6.8% 높았으며, 특히 휘발에 의해 저감되는 양은 간헐식이 연속식보다 4.3% 적었다. 그리고 연속식의 휘발량이 많았는데 이는 주입 공기량의 증가에 의해 휘발

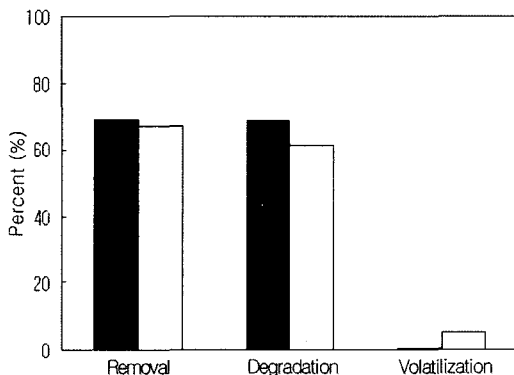


Fig. 6. Correlation among removal, degradation, and volatilization of TPH in bioventing columns with adding nutrients. comparison of intermittent injection and continuous injection experiments at 10 ml/min; ■: 6 hr injection/6hr rest (10 ml/min), □: continuous injection (10 ml/min).

되는 휘발성유기화합물(VOCs)의 양이 증가했기 때문이라 생각된다. 간헐식 주입보다 연속식 주입이 휘발에 의해서 TPH의 제거가 증가된 것이다. 이는 주입되는 공기유량이 반응기내에서 연속식보다 간헐식에 더 오래 체류하므로 인하여 유류를 분해하는 미생물과의 접촉이 많아서 생분해라고 여겨지는 비율이 다소 상승한 것으로 생각된다. Margesin 등<sup>15)</sup>은 초기 디젤농도가 5,000 mg/kg soil인 알프스지역의 오염토양에서 비생물학적 공정에 의해 탄화수소의 손실량이 16~23%이었다고 했다. 그러나 본 연구에서는 휘발에 의한 손실량이 약 5% 이내로 나타났다. 이것은 복원을 위해 적용한 과정이 각기 다를 뿐 아니라 원유를 정제하는 과정에서 생기는 정제방식 및 각기 다른 첨가제, 그리고 실험 준비중 순유기간 방식의 차이라고 생각된다. 따라서 공기의 간헐적 주입은 주입된 산소의 이용을 최대화하여 오염물질을 제거하는데 연속식과 비교하여 대등하거나 그 이상인 것으로 판단되며 또한 가스의 휘발을 최소화 할 수 있어 잠재적으로 배출가스의 처리비용을 감소시킬 수 있는 효과적인 방안인 것으로 생각된다.

## IV. 결 론

본 연구에서는 효과적인 벤팅모드를 개발하기 위해 바이오벤팅 공법을 연속식, 간헐식으로 나누어서 운전한 후, 그 결과를 비교했다. 반응 90일동안 두 벤팅모드 별로 TPH 분해를 1차 반응으로 가정하여 상관계수(R<sup>2</sup>)를 비교해 본 결과, 간헐식 조건이 연속식에 비하여 상대적으로 높은 99%였기에 간헐식 조건에서 TPH분해가 1차 반응인 것으로 생각된다. 또한 간헐식과 연속식에서 90일 동안의 TPH 제거율이 각각 69.63%, 67.56%을 나타냈다. 두 벤팅모드의 분해속도상수를 비교해보면 간헐식이 연속식에 비해서 상대적으로 높았고, 유류분해균수는 60일까지 성장률이 증가하다가 그 이후로 둔화되는 경향을 나타냈다, 그리고 벤팅모드 별로 반응일 수에 따라 측정된 이산화탄소 발생량도 모두 반응 15일까지는 증가하다가 그 이후로는 증가가 둔화되었다. 또한 상대적으로 공기를 많이 주입한 연속식이 간헐식에 비해 이산화탄소가 많이 발생하였다. 벤팅모드에 따른 TPH 분해 및 휘발의 관계에서도 연속식 조건에서는 5%의 휘발이 나타났고 간헐식 조건에서는 휘발에 의한 제거가 1%로 낮았지만 생분해도는 높았다.

## 참고문헌

1. 문경환, 김우현, 이병철, 김덕환 : 마이크로파에 의한

- 휘발성 유기토양오염물질제거에 대한 연구. 한국환경보건학회지, **22**(3), 116-122, 1996.
2. 이혜령, 고경숙, 임경택 : 토양상에 의한 Trichloroethylene 처리에 관한 연구. 한국환경보건학회지, **24**(3), 41-47, 1998.
  3. Sims, R. C. : Soil remediation techniques at uncontrolled hazardous waste sites; a critical review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **40**(5), 704-732, 1990.
  4. 박천보, 허병기, 윤현식 : 유류 오염지역으로부터 분리된 균주를 이용한 디젤류의 분해. 한국생물공학회지, **16**(6), 632-637, 2001.
  5. 김일배, 홍원학, 이학성, 서명교, 서정호 : 비전시스템을 이용한 토양미생물 관측장비 개발. 한국환경보건학회지, **30**(2), 108-114, 2004.
  6. 최정영, 남궁완, 박준석, 황의영 : 디젤초기농도가 오염토양의 콤포스팅 처리에 미치는 영향. 한국 유기성 자원학회지, **10**(1), 120-127, 2002.
  7. 임계량, 박준석, 황의영, 남궁완 : 초기농도가 파일럿 규모의 디젤오염토양콤포스팅처리에 미치는 영향. 한국환경보건학회지, **28**(5), 35-41, 2002.
  8. Jorgensen, K. S., Puustinen, J. and Suoritti, A. M. : Bioremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil by composting in biopiles. *Environmental Pollution*, **107**, 245-254, 2000.
  9. Laine, M. M., Haario, J. and Jorgensen, K. S. : Microbial functional activity during composting of chlorophenol contaminated sawmill soil. *Journal of Microbiological Methods*, **30**, 21-32, 1997.
  10. 이종열, SBC system(Mobile SVE & Bioventing co-existing system). *News & Information for Chemical Engineers*, **21**(4), 491-494, 2003.
  11. 윤석표, 차명철, 류범수, 윤범한 : Soil vapor extraction 과 Biobenting 기술의 원리와 적용에 대한 고찰. 한국 폐기물학회지, **13**(1), 161-171, 1996.
  12. 박준석, 김승호, 박연구 : 온라인 모니터링에 의한 디젤오염토양의 토양증기추출 공정시 추출모드 평가. 한국유기성자원학회지, **11**(4), 90-96, 2003.
  13. Atlas, R. M. and Bartha, R. : Hydrocarbon biodegradation and oil spill bioremediation, In Marshall KC(ed) *Advances in microbial ecology 12* Plenum, New York, 287-338, 1992.
  14. Moller, J. and Winther, P. : Bioventing of diesel oil-contaminated soil. *Journal of Industrial Microbiology*, **16**, 110-116, 1996.
  15. Margesin, R. and Schinner F. : Monitoring of bioremediation by soil biological activities. *Chemosphere*, **40**, 339-346, 2000.