



## 호기성 Bioreactor 매립지에 있어서 공기주입량이 선별토사의 안정화에 미치는 영향

박진규, 이남훈, 김낙주\*

안양대학교 환경공학과, 서울산업대 정밀화학과\*

(2004년 2월 27일 접수, 2004년 3월 15일 채택)

## The Effect of Air Injection Quantity on Stabilization of Screened Soil in Aerobic Bioreactor Landfill

Jin-Kyu Park, Nam-Hoon Lee, Nack-Joo Kim\*

Dept. of Environmental Engineering, Anyang University, Dept. of Fine Chemistry, Seoul National University of Technology\*

### ABSTRACT

In this study, we stabilized the screened soil from landfills by using aerobic bioreactor and evaluated aerobic decomposition of it. Four lab-scale bioreactors (anaerobic and 1 PV/day aeration, 5 PV/day aeration, 10 PV/day aeration) filled with screened soil were operated to investigate the effect of air injection quantity on stabilization of screened soil. In case of aerobic bioreactors, the decomposition of organics in screened soil was higher than anaerobic bioreactor. According to the results of landfill gas and soil respiration test, the air injection quantity of 5 PV/day was most efficient in stabilization of screened soil.

Key Words : Aerobic bioreactor, Air Injection quantity, Screened Soil, Landfill

### 초 록

본 연구는 공기주입에 의한 고형 폐기물의 빠른 안정화를 달성할 수 있는 매립지의 호기성 공정을 평가하는 것을 목표로 하였다. 실험은 매립지에서 최적의 공기주입방법을 평가하기 위해 선별토사를 충전한 4개의 모의 매립조(혐기성, 1PV(pore volume/day) 공기주입, 5PV 공기주입, 10PV 공기주입)를 운영하였다. 선별토사를 충전한 bioreactor를 호기성으로 운전한 경우에 공기를 주입하지 않은 bioreactor에 비해 유기물 분해가 뛰어난 것으로 나타났다. 매립가스의 발생량 및 조성변화와 soil respiration test 결과로부터 5 PV/day으로 공기를 주입한 bioreactor가 유기물 분해율이 가장 높은 것으로 나타났다.

핵심용어 : 호기성 bioreactor, 공기주입량, 선별토사, 매립지

### 1. 서론

현재 국내에 존재하는 사용종료매립지는 1,170 개소이며, 그 중 사후관리대상 매립지는 단순관리 250개소, 정밀조사 244개소로 총 494개소에 이른다. 사용종료매립지를 굴착하여 부지로 재이용할 때 다량으로 발생하는 선별토사는 매립연한이 오래된 매립지의 경우에도 상당량의 유기물이 포함되어, 장기적으로 지반침하, 악취 및 침출수 발생 등의 문제가 발생할 수 있다.<sup>1,2,3)</sup>

선별토사내의 유기물을 분해를 촉진하기 위해 선별토사를 호기성 bioreactor에 투입하여 처리하는 공정을 고려해 볼 수 있다. 호기성 bioreactor를 이용하여 선별토사의 유기물분해를 촉진할 경우에 적절한 공기주입량을 결정하는 것은 공법의 경제성면에서 중요하다. 매립지를 호기성조건으로 유지하기 위해서는 쓰레기 1m<sup>2</sup>당 분당 5L의 공기를 유입하는 것이 적당하다.<sup>4)</sup> 하지만, 비위생 매립지 복원 시 현장 콤포스팅 (in-situ composting)공정을 적용할 경우에 1 pore volume (PV)의 적은 공기주입량으로도 단시간 내에 호기성 미생물의 활성을 증대시켜 유기성폐기물의 안정화를 가속화시킬 수 있다고 한다.<sup>5,6)</sup> 이 등<sup>7)</sup>은 매립연한이 오래된 매립지의 경우 유기물함량이 낮기 때문에 저압/저유량의 연속공기 주입방식이 효과적이며, 토양공기추출법(soil vapor extraction: SVE)을 적용할 경우에는 공기치환에 의해 매립가스 문제를 감소시킬 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서는 선별토사를 충전한 호기성 bioreactor의 생물학적 안정화를 촉진하기 위해 공기를 주입하였으며, 공기주입에 따른 매립가스 발생량 및 조성 변화, 유기물 분해능을 평가하여 향후 선별토사를 호기성 bioreactor로 처리할 때 설계지표로 활용하고자 하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 실험에 사용한 선별토사

본 연구에서는 경기도 광주시 태전동 비위생 매립지의 토사를 현장에서 19.1mm체로 거른 후 시료로 이용하였다.

#### 2.2 Bioreactor 실험장치 및 운전방법

본 연구에서는 [Fig. 1]과 같이 4개의 bioreactor를 설치하여 운전하였다. Bioreactor는 내경이 10 cm, 높이 55 cm인 아크릴로 제작하였으며, 매립조 하부에서 공기를 주입하기 위해 직경 0.5 cm의 공기주입구를 만들었으며, 충전재료의 자연적인 건조를 막기 위해 상부에 10 cm 높이로 모래를 충전하였다. 또한 모형 매립조 상부에는 수분주입을 위해 강우주입구와 가스배출구를 설치하였으며, 가스배출구에는 무수황산나트륨으로 채운 수분트랩을 설치하여 배출가스를 통한 수분 손실량을 보정하여 주었다. 모형매립조는 30 ± 2℃로 유지되는 항온실에서 운전하였다.

각 호기성 bioreactor의 주입공기량은 다음과 같이 계산하였다.

Bioreactor 1의 경우

$$\text{총공극율 } \Theta = 1 - P_k / P_t = 1 - 1.40 / 2.65 \approx 0.472$$

여기서, P<sub>k</sub> : 겉보기 밀도 (g-dry soil/cm<sup>3</sup>)

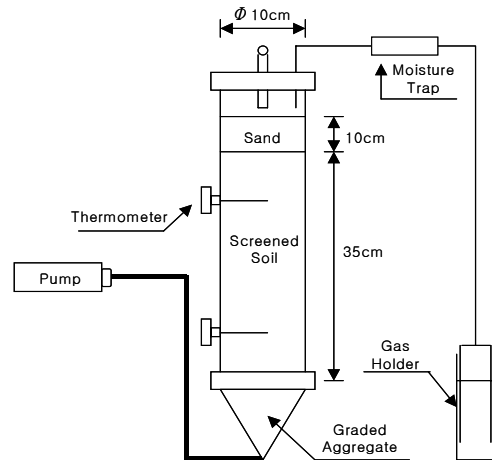
P<sub>t</sub> : 일반 토양밀도 (g/cm<sup>3</sup>, 대략 2.65)

총 공극율을 이용하여 총 공극부피를 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\Theta_v = \Theta \times V = 0.47 \times 2.7475 \approx 1.29 \ell$$

여기서, θ<sub>v</sub> : 총 공극부피 (ℓ, pore volume)

V : 선별토사 부피 (ℓ)



[Fig.1] Schematic diagram of lysimeter.

[Table1] Operational Conditions of Bioreactors Sacked with Screened Soil

	Bioreactor 1	Bioreactor 2	Bioreactor 3	Anaerobic
Density	1.4g/cm <sup>3</sup>			
Air injection quantity	0.33 l/m <sup>3</sup> /min	1.64 l/m <sup>3</sup> /min	3.28 l/m <sup>3</sup> /min	—
Air injection method	Continuous			
Moisture	30%			

하루당 1 pore volume의 공기를 주입하는 경우의 주입공기량(Q)은 다음과 같다.

$$Q = 1.29 \text{ l} \times 1,000\text{m}^3/\text{l} \div (24 \times 60) = 0.90\text{m}^3/\text{min}$$

이를 선별토사 단위부피당 공기주입량으로 환산하면 0.33 l/m<sup>3</sup>/min이 된다.

Bioreactor 2와 3에는 bioreactor 1 공기주입량의 5배수와 10배수의 공기를 각각 주입하였다.

### 2.3 실험방법 및 분석

선별토사에 대하여 삼성분, 입도분석, 원소 분석을 하였으며, bioreactor 운전시에는 가스발생량과 조성을 분석하였다. 원소분석은 원소분석기

(EA-1110)를 이용하여 실시하였다. 가스발생량은 비누막 유량계로 측정하였으며, TCD(Thermal conductivity detector)가 장착된 가스크로마토그래피(Younglin 600D, Korea)를 이용하여 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>를 측정하였다. 실험 종료 후 선별토사에 대해 미생물 호흡량 실험(respiration test)을 실시하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 사용한 선별토사의 성상

선별토사의 삼성분을 분석한 결과 수분 29.95%, 가연분 6.74% 회분 63.31%였으며[Table 3], 원소분석결과 C/N비는 10.9로 안정화가 상당히 진행된 상태였다. 하지만, 환경부에서 제시한 사용

[Table3] 3-Components of Screened Soil

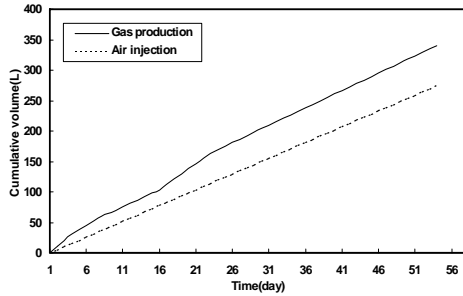
3-components (wet weight basis, %)		
Moisture(%)	Combustible(%)	Ash(%)
29.95	6.74	63.31

[Table4] Particle Size Distribution of Screened Soil

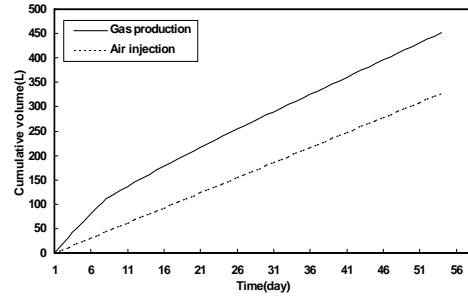
Particle size		(%)(Dry weight basis)
Sieve NO.	Opening size(mm)	
NO. 4 over	4.75	28.62
~ NO. 10	2	31.61
~ NO. 20	0.85	21.93
~ NO. 40	0.425	7.61
~ NO. 80	0.18	4.72
NO. 80 below	0.18 below	5.51
Total		100

[Table 5] Effective Size, Uniformity Coefficient and Concavity Coefficient of Screened Soil

	Effective size ( $D_{10}$ )	Uniformity coeff. ( $C_u$ )	Concavity coeff. ( $C_c$ )
Screened soil	0.415mm	9.62	1.37



[Fig. 2] Cumulative gas production from bioreactor 1.



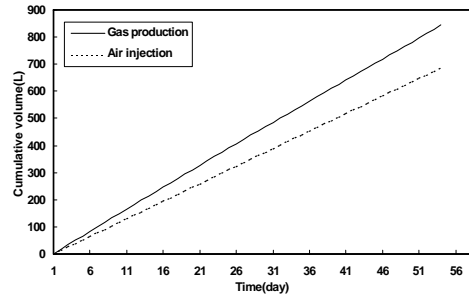
[Fig. 3] Cumulative gas production from bioreactor 2.

종료 매립지의 안정화평가기준인 매립폐기물 토사 성분 중의 가연물 함량이 5%미만이거나 C/N비가 10이하인 기준에는 모두 미치지 못하는 것으로 나타났다.

[Table 4]과 [Table 5]는 선별토사의 입도를 분석한 것이다. 입도분포가 양호한 경우 입경이 넓은 범위로 골고루 섞여 있어 공학적 성질이 양호한 상태로 균등계수가 자갈이 4이상, 모래가 6이상을 나타낸다. [Table 5]에서 보는 바와 같이 선별토사의 균등계수가 9.62로 입도분포가 양호한 것으로 나타나고 있다. 기존 문헌에서도 선별토사의 경우 입도분포가 양호한 것으로 나타났으며, 선별토사의 안정화 이후 성토제로 재이용시 지방공학적으로 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.<sup>1)</sup>

### 3.2 공기주입에 따른 매립가스 발생특성

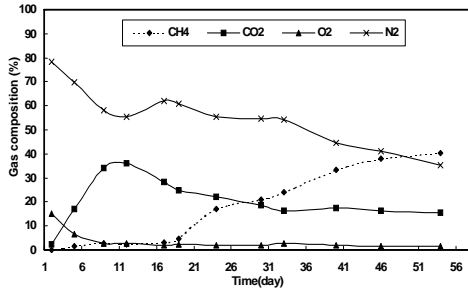
[Fig. 2]~[Fig. 4]는 각 호기성 bioreactor의 가스 발생량을 나타낸 것이다. 혐기성 bioreactor의 경우는 가스가 거의 발생하지 않아 결과에 표시하지 않았다. 가스 발생량을 살펴보면 bioreactor 2 (5PV/day)가 가스 발생량에서 공기주입량을 제외했을 때 가장 많은 가스가 발생하였다. bioreactor 3 (10PV/day)은 주입한 공기량



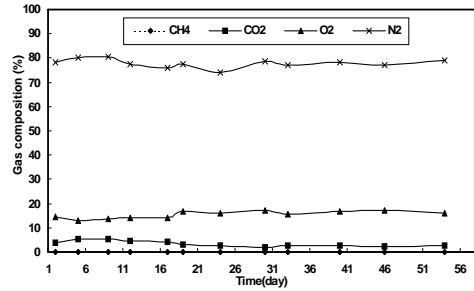
[Fig. 4] Cumulative gas production from bioreactor 3.

에 비해 가스 발생량이 적어 유기물의 분해에 의한 가스 발생이 미미한 것으로 판단된다. 따라서, 1PV 호기성 bioreactor와 5PV 호기성 bioreactor에서는 미생물 활성이 일어났지만, 10PV 호기성 bioreactor에서는 미생물의 유기물 분해가 느린 것으로 판단된다.

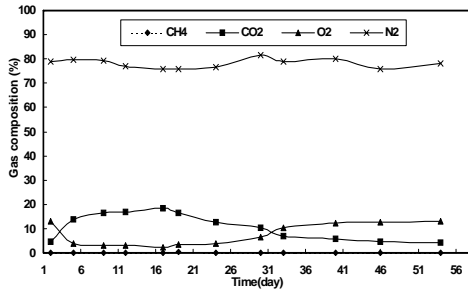
[Fig. 5]~[Fig. 8]은 각 bioreactor별 gas 조성변화를 나타내었다. 혐기성 bioreactor의 경우  $O_2$ 가 감소하면서,  $CH_4$ 이 시간의 경과와 함께 점차 증가해 실험 종료시 40.29%를 나타냈으며,  $CO_2$ 는 최고 35.96%까지 증가하다가 점차 감소하여 실험 종료시 15.54%를 나타내고 있다. 이는 실



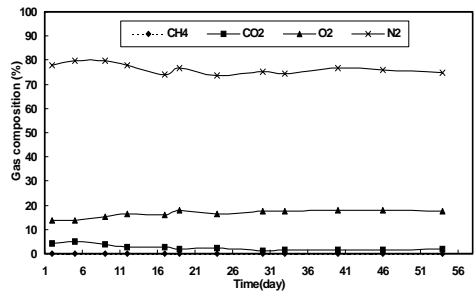
[Fig. 5] Composition of gas from anaerobic bioreactor.



[Fig. 7] Composition of gas from bioreactor 2.



[Fig. 6] Composition of gas from bioreactor.



[Fig. 8] Composition of gas from bioreactor 3.

혐초기에 분해도가 높은 유기물의 발효가 일어났고, 이후 CO<sub>2</sub>농도 감소는 CO<sub>2</sub>로부터 CH<sub>4</sub>발생의 시작과 더불어 정상적인 메탄화가 일어났기 때문으로 사료된다.

호기성 bioreactor의 경우 1PV 호기성 bioreactor의 O<sub>2</sub>농도가 초기에 13%의 농도에서 시간이 경과하면서 17일째에 2.11%의 최저 산소 농도를 나타낸 후 점차 상승하기 시작하여 실험 종료시 13.12%를 나타내고 있고, O<sub>2</sub>농도의 감소와 함께 CO<sub>2</sub> 농도가 증가하여 17일째에 최고 18.57%를 나타낸 후 산소의 감소와 함께 점차 감소하기 시작해 실험 종료시 4.21%를 나타내고 있다. 이는 일반적으로 토양과 매립지 내부를 호기성 상태로 변화하기 위해 필요한 적정 산소농도를 2~5%로 볼 경우 1PV 호기성 bioreactor 전체가 호기성 조건을 유지하고 있다고 판단된다.

5PV 호기성 bioreactor와 10PV 호기성

bioreactor는 유사한 가스조성을 나타내고 있다. 5PV 호기성 bioreactor의 경우 O<sub>2</sub>농도가 초기 14.34%에서 실험 종료시 16.18%로 증가하는 경향을 나타내고 있으며, CO<sub>2</sub>농도는 초기 3.82%에서 9일째 최고 5.32%를 나타낸 후 점차 감소하여 실험 종료시 2.6%의 농도를 보이고 있다. 10PV 호기성 bioreactor도 동일하게 초기 O<sub>2</sub>농도가 13.9%에서 17.57%로 증가하였고, CO<sub>2</sub> 농도는 초기 4.2%에서 5일째 최고 4.93%를 기점으로 감소하기 시작하여 실험 종료시 1.85%를 나타내고 있다.

다만, 5PV 호기성 bioreactor는 초기에 17일째까지 O<sub>2</sub>농도가 13~14%를 유지하였으며, 10PV 호기성 bioreactor의 경우는 O<sub>2</sub>농도가 지속적으로 상승하는 경향을 나타내었다. 이는 5PV 호기성 bioreactor에서는 미생물의 활성이 어느 정도 발생한 반면에 10PV 호기성 bioreactor는 실험 초



[Fig. 9] Cumulative CO<sub>2</sub> production in soil respiration test.

기부터 가스치환 효과가 큰 것으로 사료된다.

### 3.3 Soil Respiration Test

실험종료 후 각 bioreactor에 충전한 선별토사와 실험 전의 선별토사를 대상으로 soil respiration test를 실시하였다. [Fig. 9]는 각 시료의 호흡률에 따른 누적 CO<sub>2</sub>발생량을 나타낸 것이다. 누적 CO<sub>2</sub>발생량은 원시료와 혐기성 조건에서 각각 0.052 mg CO<sub>2</sub>/g soil, 0.049 mg CO<sub>2</sub>/g soil로 가장 많은 CO<sub>2</sub>발생량을 나타내어, 혐기성 조건에서는 유기물이 거의 분해되지 않았음을 나타냈다. 호기성 조건에서 실험한 선별토사는 1PV의 누적 CO<sub>2</sub>발생량은 0.035 mg CO<sub>2</sub>/g soil 이었으며, 5PV과 10PV 선별토사의 누적 CO<sub>2</sub>발생량은 각각 0.020과 0.023 mg CO<sub>2</sub>/g soil 으로 가장 적게 발생하였다. 이는 5PV과 10PV의 공기주입량일 때가 가장 분해효율이 좋다는 것을 시사하고 있다.

## 4. 결론

Ex situ bioreactor 공정을 이용한 선별토사 안정화에서 공기주입량이 미치는 영향을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 선별토사를 충전한 bioreactor를 호기성으로 운전한 경우에 공기를 주입하지 않은 bioreactor에 비해 유기물 분해가 뛰어난 것으로 나타났다. 이는 bioreactor내 호기성 미

생물의 활성화가 진행됨에 따라 유기물질이 미생물의 대사활동에 의하여 CO<sub>2</sub>가스로 전환되어 제거된 것으로 판단된다.

- 2) 공기 주입시 공기 주입량에 따라 선별토사의 유기물 분해에 차이가 있었다. 1 PV/day의 공기주입량의 경우 산소이용률은 가장 좋았으나 유기물 분해효율이 낮았고, 10PV/day의 공기주입량은 공기주입량이 가장 많았음에도 불구하고 5PV/day의 공기주입량과 유기물 분해율에 차이가 없었다. 따라서 과도한 공기 주입은 적정 공기 주입에 비해 유기물 분해에 큰 효과가 없는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 남궁완, 황의영, 윤범한, 윤석표, 이남훈, "폐기물매립지 선별토양의 물리화학적 특성", 한국폐기물학회, 13(6), pp. 783~792 (1996).
2. 박동운, 문세흠, 이남훈, 남경평, 김재영, "사용종료매립지 선별토사의 특성분석을 통한 안정성 평가". 대한토목학회지, 22(5-B), pp. 723~732 (2002).
3. 윤석표, 윤범한, "비위생매립지의 굴착, 선별, 재활용에 관한 사례 연구", 한국폐기물학회지, 14(6), pp. 541~547 (1997).
4. 농어촌진흥공사, "농어촌지역 자원재활용형 쓰레기 매립기술 개발", (1997).
5. 한병현, 송창규, 나승우, 최봉근, 전양근, "Bioventing 기술을 응용한 비위생매립지 복원 방안", 대한환경공학회 춘계학술대회 발표, (1998).
6. 김수철, 박대원, 남궁완, "In Situ Composting 공정을 이용한 매립지 안정화", 한국폐기물학회지, 16(6), pp. 674~681 (1999).
7. 이환, 이채영, 전연호, 김경, 김두일, 이철효, "공기주입방식을 통한 쓰레기 안정화의 현장적용에 관한 연구", 한국유기성폐자원학회지, 8(4), pp. 121~128 (2000). 