



## 바이오매스 활용형 폐기물 매립지공법 개발을 위한 실험적 연구

김혜진, 박진규, 정민교, 이남훈<sup>†</sup>

안양대학교 환경공학과

(2007년 1월 30일 접수, 2007년 3월 6일 채택)

### An experimental study to develop operation technique of solid waste landfill for utilization of biomass

Hye-Jin Kim, Jin-kyu Park, Min-Kyo Jeong, Nam-Hoon Lee

Dept. of Environmental Engineering, Anyang University

#### ABSTRACT

In order to investigate the effect of the methanogenic bacteria in leachate on the degradability of landfill waste, this study has created 4 cylinder-shape PVC lysimeters (Diameter: 30cm, Height: 200cm, Volume: 140L) and for the biological treatment and recirculation of the leachate, two anaerobic batch reactors (Diameter: 20cm, Height: 30cm) were created. To simulate a conventional landfill, no recycling was done in L1. In L2, 1,068ml of leachate (twice of rainfall amount) was recycled. In L3 and L4, the leachate was anaerobically digested in a dark room (with  $35 \pm 1^\circ\text{C}$ ) for a week and then recycled by 1,064ml and 2,128ml, respectively, with recycled water only.

In terms of cumulative  $\text{CH}_4$  production, however, L3 and L4 were much higher (three times) than L1 and L2. Between L3 and L4, the latter was 1.23 times higher than the former in terms of cumulative  $\text{CH}_4$  production. In other words, the more the methanogenic bacteria-activated leachate is recycled, the more active the degradation due to the active methane fermentation by the recycled methanogenic bacteria. And methane recovery is different according to the amount of recycled the methanogenic bacteria in leachate.

Keywords : Bioreactor landfill technology, Recycled methanogenic bacterial, Lysimeters, biomass

<sup>†</sup>Corresponding author (nhlee@aycc.anyang.ac.kr)

## 초 록

메탄활성 침출수가 매립폐기물 분해에 미치는 영향을 알아보기 위해 내경 30cm, 높이 200cm, 실용량 140 L의 원통형 PVC로 모형매립조 4기를 제작하였으며, 침출수의 생물학적처리와 재순환을 위한 혐기소화조를 내경 20cm 높이 30cm로하여 2기 제작하였다. L1은 일반적인 매립지를 모사하기 위해 재순환을 행하지 아니하였고, L2는 침출수를 우수의 2배인 1,068ml로 재순환하였다. L3와 L4는 발생된 침출수를  $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되는 암실에서 1주일간 혐기성소화조에서 소화시킨 후 상등수를 L3, L4에 각각 1,064ml, 2,128ml 재순환하였다.

누적메탄발생량이 L3와 L4가 L1과 L2에 비해 약 3배 높게 발생하였으며, 메탄활성 침출수의 재순환량이 더 많은 L4이 L3보다 1.23배 높게 나타났다. 이는 메탄활성 침출수 재순환이 재순환되는 메탄균에 의해 분해가 더 활성화 된 것으로 판단되며, 메탄활성 침출수의 재순환 양에 따라 메탄회수율이 다르다는 것을 알 수 있다.

핵심용어 : Bioreactor 매립기술, 메탄활성 침출수 재순환, 모형매립조, 바이오매스

## 1. 서론

매립은 지금까지 저장(storage)과 차단(containment)을 목적으로 한 위생매립이 폐기물매립지의 기본 개념이었으나, 현재 매립지를 생물반응기(bioreactor)로 사용하여 매립폐기물 내의 유기물을 효율적으로 분해시키는 매립기술의 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 매립의 개념이 물리화학적, 생물학적 정화능력을 극대화하여 대체에너지 생산 및 조기안정화를 도모하는 적극적인 bioreactor 매립으로 변화하고 있다.<sup>1)</sup> 특히 에너지 자원의 부족과 환경 공해 문제 등으로 재생 에너지원에 대한 관심이 높아지면서 바이오매스로부터 바이오가스과 같은 재생연료를 회수하고자 하는 연구가 진행되고 있으며, 매립지로부터 발생하는 메탄가스의 활용에 대한 연구 또한 활발히 이루어지고 있다.<sup>2)3)4)</sup>

Bioreactor 매립기술 중 침출수의 재순환공법은 매립지에서 발생된 침출수를 매립지 상부로부터 재주입하여 오염물질의 배출농도와 발생량을 감소시켜 침출수처리 및 처분비용을 감소시킬 뿐만 아니라 매립지 내부에 수분을 공급하여 매립폐기물의 분해를 촉진시킨다. 또한 매립가스 발생율과 총가스발생량을 증가시킴으로서 매립가스를 바이오가스로 활용하는데 주요한 역할을 한다. 특히 침출

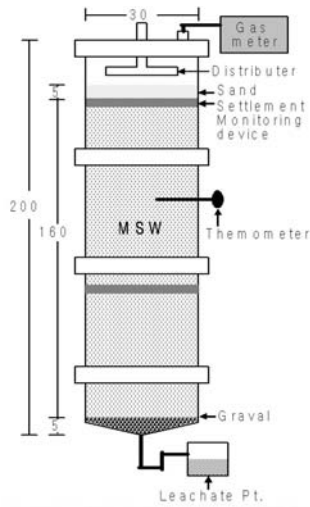
수를 혐기소화한 후 이를 재순환할 경우 침출수에 존재하는 높은 알칼리도와 메탄생성균에 의해 매립가스의 생산량은 크게 증대되는 것으로 보고되고 있다.<sup>5)6)7)8)</sup>

본 연구에서는 폐기물매립지에서 발생하는 침출수를 메탄 생성균의 활성도를 높여 매립지 내부로 재순환하였을 때 발생하는 매립가스 생산량 및 조기 안정화에 미치는 영향을 검토하기 위해 모형매립실험을 추진하였다. 그리고 혐기소화 한 침출수의 재순환에 있어서 그 양을 달리 하여 최종적으로는 침출수의 최적 재순환 공법을 확립하고자 한다.

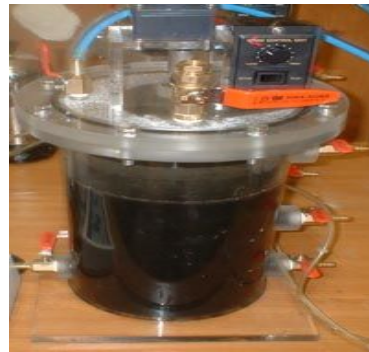
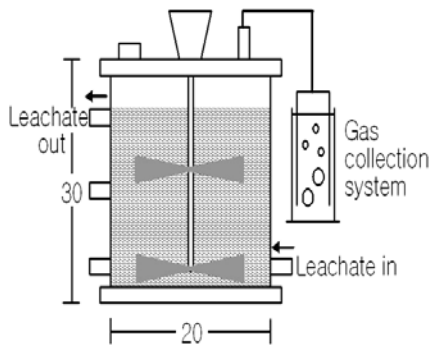
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 모형매립조 및 혐기소화조의 설계

본 연구는 침출수의 메탄균 활성이 매립폐기물 분해속도에 미치는 영향을 연구하기 위해 [Fig. 1]과 같이 내경 30 cm, 높이 200 cm, 실용량 140 L의 원통형 PVC로 모형매립조 4기를 제작하였다. 그리고 발생침출수의 메탄활성을 목적으로 한 혐기소화조를 [Fig. 2]과 같이 2기를 제작하였다. 혐기소화조 상부중앙에는 침출수와 미생물이 완전 혼합할 수 있도록 임펠러와 모터를 부착하였으며, 혐기소화조의 미생물의 활성을 위한 빛의 차단과



[Fig. 1] Schematic of the anaerobic lysimeter. (unit : cm)



[Fig. 2] Schematic of the anaerobic sequencing batch reactor. (unit : cm)

온도 유지를 위해 혐기소화조의 암실을 따로 제작하여 운전하였다. 모의매립조, 혐기소화조에서 발생하는 가스량을 측정하기 위해 각각 가스포집조를 설치하였다.

## 2.2 실험방법

### 2.2.1 충전 재료 및 혐기소화슬러지

모형매립조에 충전한 시료는 [Table 1]과 같이 수도권 매립지에 반입되는 생활폐기물의 물리적 조성을 기준으로 안양시 적환장에서 채취한 시료를 5cm 이하로 분쇄한 후 풍건하여 모형매립조에

충전하였다. 그리고 혐기소화조의 소화슬러지는 안양하수처리장의 소화조에서 충분히 활성화된 슬러지를 채취하였다.

### 2.2.2 운영조건

메탄활성 침출수의 재순환이 메탄가스 생산량 및 초기안정화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 [Table 2]와 같은 조건으로 모의매립조 4기를 운영하였다. L1은 다른 모형매립조와 비교하기 위한 control, L2는 침출수의 재순환이 매립조내 미생물의 활성화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 운영되었다. 그리고 L3와 L4는 모형매립조에서 발생한

**[Table 1]** Physical Composition of Solid Wastes Filled in Lysimeter

Item	Component	Composition (%)	Weight (kg)
Combustible	Food waste	26.0	16.35
	Paper	35.1	22.08
	Textile	3.2	2.01
	Wood	1.2	0.75
	Rubber/Leather	0.1	0.06
	Vinyl/Plastic	26.4	16.61
Non-combustible	Metals	2.0	1.26
	Glass/Ceramic	6.1	3.84
Total		100.0	62.9

**[Table 2]** Operation Conditions of Simulated Lysimeters

Lysimeter	Characteristics	Recycle methods		
		Rrainfall	Recycle rate	Recycle time
Lysimeter 1 (L1)	Control (rainfall only)	532ml	-	1 time / week
Lysimeter 2 (L2)	Rainfall + Leachate recycle	532ml	1,064ml	
Lysimeter 3 (L3)	rainfall + anaerobic sludge (leachate after ASBR process) recycle	532ml	1,064ml	
Lysimeter 4 (L4)	rainfall + anaerobic sludge (leachate after ASBR process) recycle	532ml	2,128ml	

침출수를 혐기소화조에서 일주일 동안 메탄을 활성화 시킨 후 모의매립조에 각각 1,068ml, 2,128 ml 씩 주입하여 재순환량에 따른 메탄발생의 증가와 폐기물의 조기안정화를 평가하고자 하였다. L1, L2, L3, L4는 30±1℃로 유지되는 항온실에서 운영되었고, L3와 L4에서 발생된 침출수를 혐기소화를 위한 R1, R2는 35±1℃로 유지되는 암실에서 1주일간 혐기성소화조에서 소화시킨 후 상등수만을 재순환 하였다.

2.2.3 분석방법

모의매립조 운영시에 발생하는 가스조성은 GC(Younglin 6000D, Korea)로 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 4항목을 분석하였고, 가스발생량은 가스포집조를 이용하여 가스발생량을 측정하였다. 그리고 수

질오염공정시험법으로 발생한 침출수의 BOD, COD<sub>Cr</sub>를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

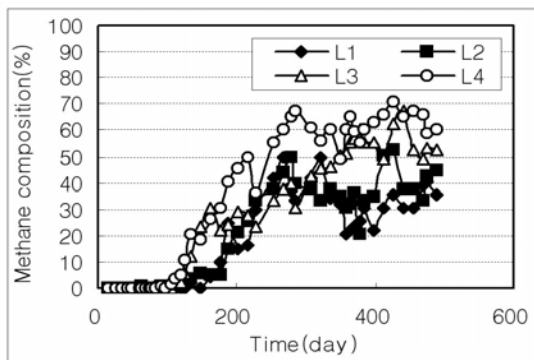
3.1 침출수의 메탄균 활성이 가스 발생특성에 미치는 영향 (매립가스발생량에 미치는 영향)

[Fig. 3]은 각 모의매립조의 시간경과에 따른 CH<sub>4</sub>농도를 나타낸 그래프이다. CH<sub>4</sub>가 일정하게 발생한 시점을 살펴보면 L1의 경우 161일이 경과한 후, L2, L3은 112일, L4는 105일을 전후하여 메탄이 발생하는 것으로 나타났다. 이후 모든 모의매립조의 CH<sub>4</sub> 농도는 꾸준히 증가하고 있으며, 경과일수 490일 시점에서 L1, L2, L3, L4의 CH<sub>4</sub>농

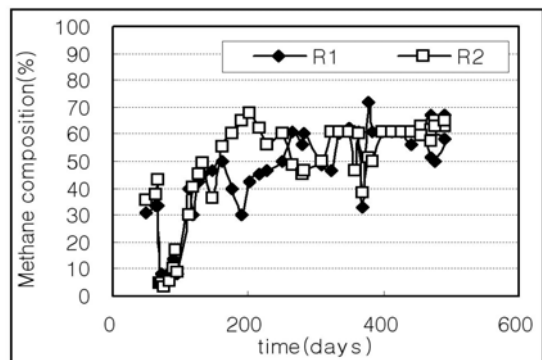
도는 각각 35.3%, 44.4%, 52.2%, 60.2%로 그 농도가 침출수의 메탄 활성을 높여 재순환한 L3와 L4의 메탄 농도가 50%이상으로 다른 모의매립보다 활발한 분해가 일어나고 있음을 알 수 있다. 이는 L1과 L2가 메탄활성침출수를 재순환 시킨 L3와 L4보다 메탄균이 번식하지 않았음을 의미한다. L3는 350일부터 메탄농도가 이산화탄소보다 높아지는 메탄발효 정상기를 보이고 있으며, L4의 경우 250일 경부터 이산화탄소 농도가 약 20~30%, 메탄농도가 약 60~70%로 L3보다 메탄발효의 정상기가 약 3개월 이전에 이루어져 메탄활성 재순환에 있어 재순환양이 폐기물 분해에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 반면 혐기소화조 R1, R2은 L3와 L4의 침출수가 발생한 49일부터 침출수를 혐기소화조에 주입하여 침출수의 메탄균을 활성화

시켰으며 이때 R1과 R2의 CH<sub>4</sub>농도의 변화를 [Fig. 4]에 나타내었다. 메탄농도가 초기 18일간은 CH<sub>4</sub>농도가 30~40%를 유지하였으나 이후 13일 동안 10% 이하를 나타내었다. 이는 반응조를 35±1℃로 유지하여야 하는데, 침출수를 혐기소화시키기 시작한 20일째에 정전으로 인하여 혐기소화조의 온도가 낮아져 미생물이 충격부하를 받은 것으로 사료된다. 온도를 정상으로 돌린 이후 서서의 메탄균의 활성은 정상상태로 돌아와 현재 50% 이상의 메탄농도를 나타내고 있다.

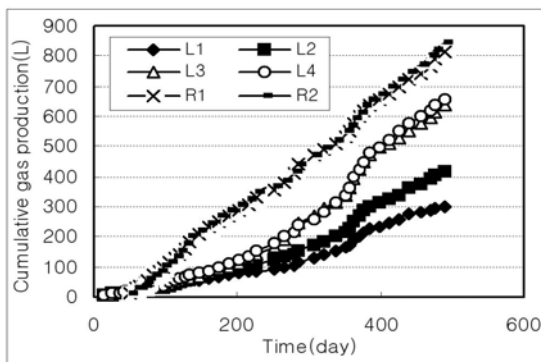
그리고 [Fig 5], [Fig 6]에 실험기간동안 매립가스의 누적발생량과 CH<sub>4</sub>의 누적발생량을 나타내었다. 가스의 누적발생량은 L1, L2, L3, L4가 각각 300 l, 418 l, 626 l, 653 l로 나타나 발생한 침출수를 단순히 재순환 한 L2가 우수만 주입한 L1



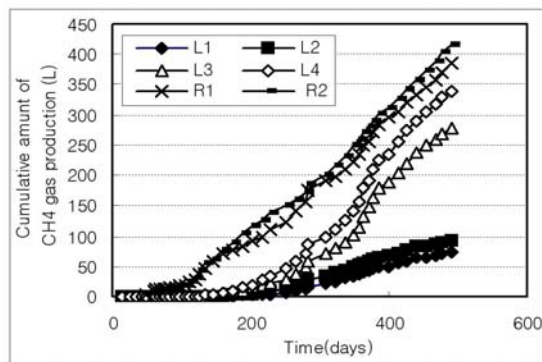
[Fig. 3] CH<sub>4</sub> composition profile of each lysimeter



[Fig. 4] Profiles of CH<sub>4</sub> composition from R1, R2



[Fig. 5] Cumulative gas production.



[Fig. 6] Cumulative CH<sub>4</sub> gas production.

보다 118 l 더 많이 발생하였다. 그리고 L3와 L4의 누적가스발생량은 큰 차이가 없었으나 CH<sub>4</sub>만의 발생량에 있어서는 L4가 약 1.3배 더 많은 것으로 나타났다. 특히 [Fig 6]에 나타난 바와 같이 메탄 누적 발생량에 있어서 L1, L2와 L3, L4가 큰 차이를 보이고 있으며, 이는 메탄균 활성침출수의 재순환이 모형매립조 내 혐기성미생물 활동에 의한 폐기물분해 속도를 증진시키는 것으로 판단된다. R1과 R2의 가스누적발생량은 814 l, 844 l로 재순환한 모형매립조 L3, L4보다 그 발생량이 높은 것으로 나타났으며, 메탄가스 발생량 또한 높아 폐기물매립지에서 발생하는 메탄가스와 함께 이를 바이오가스로 충분히 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

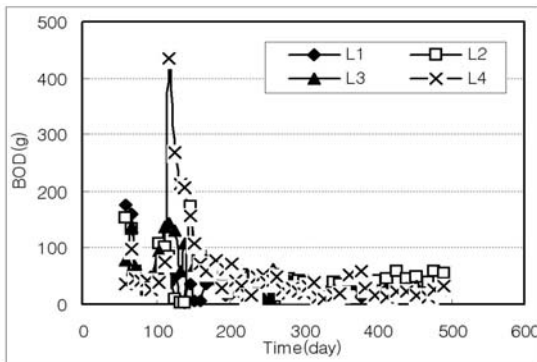
### 3.2 침출수의 메탄균 활성이 침출수 발생 특성에 미치는 영향 (조기안정화에 미치는 영향)

현재까지 발생된 침출수의 BOD, COD<sub>Cr</sub> 농도와 침출수 발생량의 곱으로 나타낸 총 BOD(g), COD<sub>Cr</sub>(g) 결과는 [Fig. 7], [Fig. 8]과 같다. 490일경까지 유출된 COD<sub>Cr</sub> 총 양은 L1, L2, L3, L4 각각 약 2,469g, 4,967g, 3,655g, 5,744g으로 재순환량이 1,064ml로 같은 L2와 L3를 비교하였을 때, L3 침출수 중의 COD<sub>Cr</sub>가 L2의 침출수보다 작은 이유는 L3의 메탄활성화가 높아 CH<sub>4</sub>로의 전환율이 크기 때문인 것으로 사료된다. 반면 발생 가스 분석에 있어 메탄균의 활성이 가장 크다고 판단된 L4는 COD<sub>Cr</sub> 총 양이 5,744g으로 가장 높은

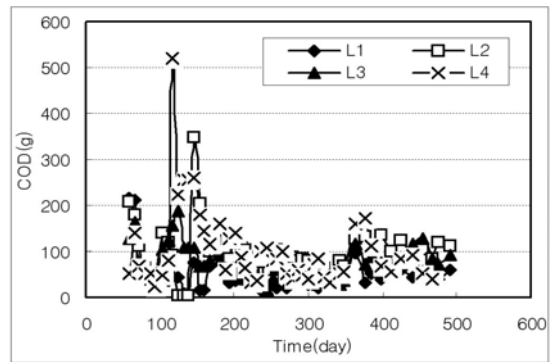
데 이는 재순환량이 L2와 L3의 2배로 재순환되는 침출수 자체의 COD<sub>Cr</sub>의 영향으로 판단되고, L1의 경우 약 1840g인데 이는 다른 모형매립조에 비하여 가수분해가 천천히 이루어져 그만큼 유출되는 COD<sub>Cr</sub>양이 적은 것으로 판단된다.

## 4. 결론

1. 메탄누적발생량은 L3, L4가 L1, L2보다 3배 이상 발생되고 있으며, 재순환량이 L3보다 2배 높은 L4의 메탄발생량이 가장 많이 발생하였다. 이는 메탄균 활성을 위해 소화시킨 침출수의 재순환이 모형매립조 내 혐기성미생물 활동을 증진시키며, 재순환량에 따라 메탄회수율이 다르다는 것을 알 수 있다.
2. 혐기소화조 R1, R2에서 발생한 메탄농도는 50%이상을 유지하고 있으며, 그 발생량 또한 모형매립조에서 발생한 매립가스보다 높은 것으로 보아, 폐기물매립지에서 발생하는 메탄가스와 함께 이를 바이오가스로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단된다.
3. 침출수의 BOD, COD<sub>Cr</sub>발생량(g)을 보면 L3에서 메탄균에 의한 유기물 분해가 활발히 일어나 폐기물 분해속도가 빠르게 진행되고 있으며, L4의 COD<sub>Cr</sub> 총 양이 5,744g으로 가장 높은데 이는 재순환량이 L2와 L3의 2배로 재순환되는 침출수 자체의 COD<sub>Cr</sub>의 영향으로 사료된다.



[Fig. 7] BOD profile of each lysimeter.



[Fig. 8] COD<sub>Cr</sub> profile of each lysimeter.

## 참고문헌

1. Foppe B., Edward s. k. Chian, M. ASCE, and Edward Hammerberg, "Gas production from solid waste in landfills", Journal of the Environmental Engineering Division, 104(3), pp. 415~432 (1978).
2. Demir, A., Bilgili, M.S., Ozkaya, B., "Effect of leachate recirculation on refuse decomposition rates at landfill site: a case study." International Journal of Environmental and Pollution 21 (2), pp. 175~188 (2004).
3. Perera, L.A.K., Achari, G., Hettiaratchi, J.P.A., "Determination of source strength of landfill gas: a numerical modeling approach." Journal of Environmental Engineering, ASCE 128 (5), pp. 461~471 (2002)
4. Ozkaya, B., Demir, A., Bilgili, M.S., "Enhanced stabilization and methane potential of MSWs in a field-scale landfill with leachate recirculation." International Journal of Environment and Pollution 21 (3), pp. 277~292 (2004)
5. 범봉수, "유기물 조기안정화, 메탄회수 및 질소제거를 위한 폐기물 신매립공법의 개발", 공학박사학위청구논문, pp. 53~54 (2001).
6. Stegmann, R, "Landfill gas utilization : an overview, In landfilling of waste : Biogas", E & FN SPON, London pp. 76~81 (1996).
7. Pohland, F. G. "Fundamental principals and managment starategies for landfill codiposal practice", Proceeding of the third international landfill symposium, Sardinia, Italy, pp. 1445~1460 (1991).
8. Stamm, "Evaluation of the impact of sludge landrilling", U.S. EPA. (1984).

