



## 혐기성 폐기물매립지에 있어서 수분이 매립폐기물의 안정화에 미치는 영향

김혜진, 김종호, 오동익, 김석찬, 이남훈, 김낙주\*  
안양대학교 환경공학과, 서울산업대 정밀화학과\*

### Effect of Moisture on Stabilization of Municipal Solid Wastes in Anaerobic Landfill

Hye-Jin Kim, Jong-Ho Kim, Dong-Ik Oh, Seok-Chan Kim, Nam-Hoon Lee, Nack-Joo Kim\*

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

#### ABSTRACT

Landfilling is most widely used as the final disposal tool of solid wastes. Solid wastes landfilled are stabilized by microbial degradation which is affected by several factors such as moisture, oxygen, pH, alkalinity, sulphate, nutrient, inhibitor, hydrogen, and temperature. Especially moisture plays a major role in microbial degradation. In this study, the effects of moisture on the degradation of municipal solids waste (MSW) were investigated. Four lysimeters with four different levels of moisture content i.e., 20, 30, 40, and 50% were operated; lysimeters were packed with MSW, and anaerobically operated. Anaerobic lysimeters with higher moisture content produced more CO<sub>2</sub> and landfill gases (LFG). It means that the moisture has a positive effect on the microbial degradation.

Keywords : Moisture content, Anaerobic landfill, Lysimeters, Microbial degradation, Municipal solids waste (MSW)

#### 초 록

매립은 폐기물의 최종처분방법으로 광범위하게 이용되며, 매립된 폐기물은 미생물의 활동에 의해 분해된다. 미생물에 의한 생분해는 수분함량, 산화환원전위, pH, Alkalinity, 황산염, 영양물질과 미량원소, 방해인자, 미량이온, 온도와 같은 여러 인자에 의해 영향을 받는다. 특히, 수분은 미생물의 활성화에 주요한 인자이다. 본 연구에서는 수분이 고형폐기물(MSW)의 분해에 미치는 영향을 조사하여 분석하였다. 이를 위해 총 8기의 모의매립조에 고형폐기물을 충전하였고, 수분함량을 20, 30, 40, 50% 4개로 하여 운전하였다. 그 결과 수분함량이 높을수록 CO<sub>2</sub>의 농도가 높았고, 매립가스 또한 많이 발생 하였다. 이는 수분함량이 높을

수록 미생물 분해가 효과적임을 의미한다.

핵심용어 : 수분함량, 혐기성 매립지, 모의매립조, 미생물분해, 고품폐기물

### 1. 서론

최근까지 저장(storage)과 차단(containment)을 목적으로 한 위생매립이 폐기물매립지의 기본 개념이었으나, 오늘날의 폐기물매립지는 생물반응기(bioreactor) 개념을 접목하여 매립폐기물내의 유기물을 효율적으로 분해시키는 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉 폐기물매립의 기본개념이 물리·화학적, 생물학적 자정능력을 극대화하여 대체에너지 생산 및 조기안정화를 도모하는 적극적인 bioreactor 매립으로 변화하고 있다. 이는 장기간 여러 단계로 진행되는 기존 매립지와는 달리 안정화기간을 단축시켜 조기안정화 함으로써 매립지 주변 환경부하를 줄이고 매립 부지를 빠른 시일에 다른 용도로 활용이 가능하게 함을 목적으로 하고 있다.<sup>1)</sup>

이러한 생물반응기 개념인 Bioreactor 매립의 안정화는 여러 인자에 영향을 받으며, 그중 수분함량은 미생물의 고품폐기물 분해에 많은 영향을 미친다.<sup>2),-4)</sup> 여러 연구를 통해 추천된 수분함량은 최소한 25%(w/w), 최적수분함량으로 40~70%

(w/w) 정도가 보고되고 있다. 하지만 포화상태의 수분함량은 오히려 메탄생성에 부정적인 효과를 가진다고 할 수 있는데, 이러한 역효과는 침출수의 저하된 순환과 휘발성 유기산의 축적에 기인한 것이다. 게다가 침출수가 매립지 경사면과 표면으로 흘러나오는 현상을 유발하기도 한다.<sup>5)</sup>

따라서 본 연구에서는 폐기물매립지의 안정화에 미치는 수분의 영향을 평가하기 위해 매립폐기물에 수분함량을 각각 20, 30, 40, 50%로 조절하여 시간경과에 따른 매립가스의 발생량과 성상을 조사하여 유기물의 생물학적 분해정도를 평가하였다.

### 2. 실험재료 및 방법

#### 2.1 대상시료

본 실험에서 사용한 시료는 [Table 1]과 같이 수도권 매립지에 반입되는 생활폐기물의 물리적 조성을 기준으로 안양시 적환장에서 시료를 채취하여 5cm 이하로 분쇄하였고, 이를 풍진한 후 총 4기의 모의매립조에 9.42kg 씩 충전하였으며, 함수율을 각각 20, 30, 40, 50%로 조절하였다. 이때

[Table 1] Physical Component of Refuse Filled in Lysimeter

Item	Component	Composition(%)
Combustible	Food waste	26.0
	Paper	35.1
	Textile	3.2
	Wood	1.2
	Rubber/Leather	0.1
	Vinyl/Plastic	26.4
Non-combustible	Metals	2.0
	Glass/Ceramic	6.1
Total		100.0

음식물은 풍건하지 아니하고, 자체 함수율을 구하여 충전 시 각각의 함수율에 따른 수분침가량에서 그 수분양 만큼을 감하여 주었다.

## 2.2 모의매립조 장치 및 운전방법

### 2.2.1 실험장치

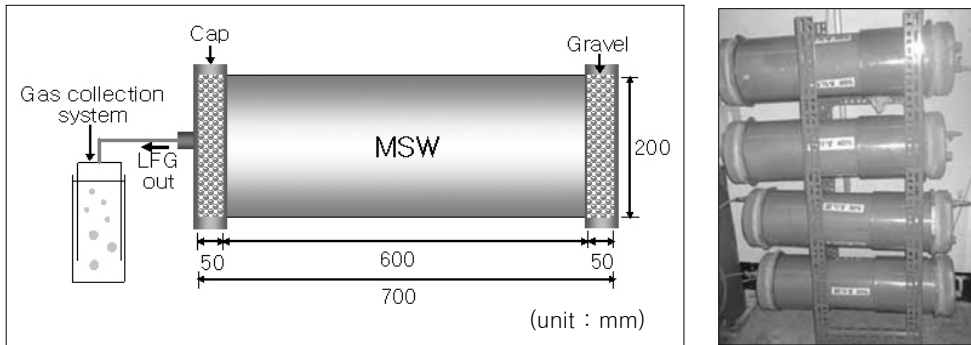
혐기성 bioreactor 폐기물매립지에서 수분이 미치는 영향을 연구하기 위해 [Fig. 1]에 나타낸 바와 같이 PVC관으로 D200 × L700mm인 모의매립조 총 4기를 제작하였다. 모의매립조의 상하는 PVC관용 cap으로 밀폐하였으며, PVC관과 cap의 접합부분은 실리콘을 발라 공기의 유입을 방지하였다. 그리고 수분의 균일한 분포를 위하여 모의매립조를 가로로 설치한 후 2일에 1회씩 상하를 바꾸어 주었으며, 모의매립조의 가스발생량을 측정하기 위하여 모의매립조에 가스포집조를 설치하였다.

### 2.1.2 운전방법

수분함량은 미생물의 활성화에 지대한 영향을 미치는 인자로 60~80%에서 분해가 가장 활발한 것으로 보고되어지고 있다.<sup>(6,7)</sup> 본 연구에서는 충전시료의 현장수분보유함량(field capacity)이 52%로 측정되었으며, 이를 기준으로 함수율을 20, 30, 40, 50% 분포로 조절하여 [Table 2]의 조건하에 총 4기의 모의매립조를 운영하였다. 그리고 모의매립조는 30±2°C로 유지되는 항온실에 설치하였다.

## 2.3 분석방법

모의매립조에 충전한 폐기물의 경우 삼성분 및 원소분석(Vario-EL)을 하였고, 모의 매립조 운영 시 발생하는 가스조성은 GC(Younglin 6000M, Korea)로 CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> 4항목을 위의 [Table 3]과 같이 분석하였다. 또한 가스포집조를 이용하여 가스발생량을 측정하였고, 침출수 분석은



[Fig. 1] Schematic of anaerobic lysimeters.

[Table 2] Operation Conditions in the Lysimeters

Item \ Lysimeter	AN-20	AN-30	AN-40	AN-50
Operation condition	anaerobic			
Filling amount	9.42kg (dry-kg)			
Filling height	600mm			
Density (ton/m <sup>3</sup> )	0.6	0.65	0.7	0.75
Moisture (%)	20	30	40	50

모의 매립조의 함수율 유지를 위해 반응조 내의 침출수를 채취하지 않은 관계로 분석하지 않았다.

루어지지 않은 것으로 판단된다. 그리고 폐기물 원소분석 결과를 보면 C/N비가 59로 안정화되는데 소요기간이 상당히 걸릴 것으로 사료된다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 충전 시료의 물리화학적 특성

적환장에서 채취한 폐기물의 삼성분과 원소 분석 결과는 [Table 4]에 나타난 바와 같이 함수율 20.9%, 가연분 61.0%, 회분 18.2%로 측정되었으며, 음식물 외에는 물성별 함수율이 4.0~8.9%로 비교적 낮게 측정되었는데 이는 쓰레기 분리수거와 적환장으로 운반 시 외부에서의 수분유입이 이

#### 3.2 매립가스 발생특성

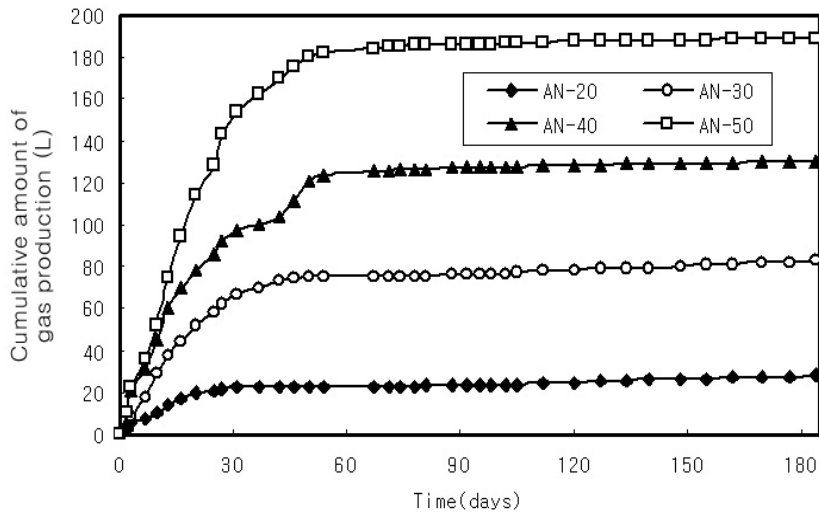
[Fig. 2]는 실험기간동안 발생한 가스의 누적발생량을 시간 경과에 따라 나타내었다. AN-20은 초기에 가스가 미량 발생하였으나 20일 경과 후 발생하지 아니하였고, AN-40과 AN-50은 초기 10일까지 가스발생량이 유사하였으나 이후에는 약 2배 이상 AN-50가 많이 발생하고 있으며, 184일까지의 누적발생량은 AN-40과 AN-50가

[Table3] Analytical Condition for Gas Chromaography (TCD)

Parameter	Condition
GC	6000M(Young/Korea)
Column	6'×1/4" outer 6'×1/8" inner SS(CTR 1 Column)
Detector	TCD(Thermal Conductivity Detector)
Carrier gas	He gas / 50ml/min
Injector temp.	35℃
Detector temp.	120℃
Oven temp.	120℃

[Table4] Physical Composition and Elemental Analysis of MSW

Item	Component	Moisture(%)	Combustible(%)	Ash(%)		
Combustible	Food waste	60.9	35.2	3.9		
	Paper	8.9	82.3	8.8		
	Textile	4.1	89.5	6.5		
	Wood	4.0	92.3	3.7		
	Rubber/Leather	0.0	64.3	35.7		
	Vinyl/Plastic	6.5	71.6	8.9		
Non-combustible	Metals	0	0	100		
	Glass/Ceramic	0	0	100		
Total		20.9	61.0	18.2		
Element (weight %, dry base)						
C	H	O	N	S	Ash	C/N
47.2	6.4	24.5	0.8	0.7	20.3	



[Fig.2] Cumulative gas production with lysimeter operation time.

31%정도 차이가 나타난다. 그리고 약 20일 전후로 모든 모의매립조에서 가스발생량이 점차 감소되고 있음을 볼 수 있다. 단, AN-20과 AN-30은 각각 20일, 30일경부터 가스가 발생하지 않았으나, 약 75일 경부터 가스발생이 시작되어 122일부터 AN-40과 AN-50보다 일평균 가스발생량이 높게 측정되었다. 하지만 전체 가스누적 발생량에는 AN-40과 AN-50에 크게 미치지 못하는 것으로 나타나며, 수분함량이 높을수록 그 누적량이 크게 증가함을 알 수 있다.

각 혐기성 매립조에서의 시간 경과에 따른 가스 조성은 [Fig. 3]~[Fig. 6]에 나타내었다. 1일후 각 모의 매립조의 가스를 채취하여 분석하였으며, 이때 모두 CO<sub>2</sub>가 다량 검출되었다. AN-20의 CH<sub>4</sub> 발생은 88일경 0.48%로 미량 검출되었으나 140일까지 검출되지 아니하였고, 이후 1% 미만으로 검출되었으며, 161일경 2.65% 검출되었으나 증가하는 경향을 볼 수는 없었다. AN-30의 경우 CH<sub>4</sub>는 55일경 0.05% 검출된 이후 147일까지 미량 검출되었고, 154일부터 서서히 증가하여 182일 현재 5.35% 농도를 나타내고 있다. AN-20과 AN-30의 CO<sub>2</sub>는 약 50%에서 최대 약 90%까지 유지하고 있다. 단, AN-20에서 98일경 CO<sub>2</sub>의 농도가 29.90%로 낮아졌는데 이는 시료 채취과정에

서 외부공기의 유입에 의한 것으로 판단된다. 반면 AN-40과 AN-50은 CO<sub>2</sub>가 초기에 각각 85%, 95%로 매우 높게 검출되었으나 20일까지 그 농도가 감소하였고, 이후 약 60%~90%의 농도를 유지하고 있다. 그리고 AN-40에서 92일경 CO<sub>2</sub>의 농도가 떨어진 것을 볼 수 있는데 이는 AN-20과 같은 이유로 판단된다. CH<sub>4</sub>의 경우 AN-40, AN-50 각각 125일, 112일 이전에는 1% 미만으로 불규칙하게 검출되었으나 이후 서서히 증가하여 최대 22.3%, 25.32%까지 검출되었다.

이것으로 보아 AN-20은 아직 메탄균의 활성이 이루어지지 않은 것으로 보이며, AN-30은 AN-20에 비하여 안정화가 이루어지고 있으나 아직 메탄생성단계에 안정적으로 도달하지는 않고 있는 것으로 사료된다. 반면 AN-40과 AN-50은 메탄생성이 증가하는 경향을 뚜렷이 나타내며, AN-40에 비하여 AN-50이 메탄발생 시기 빠르고, 그 농도가 높은 것으로 보아 수분함유량이 높을수록 안정화가 빨리 진행된다고 판단되어 진다.

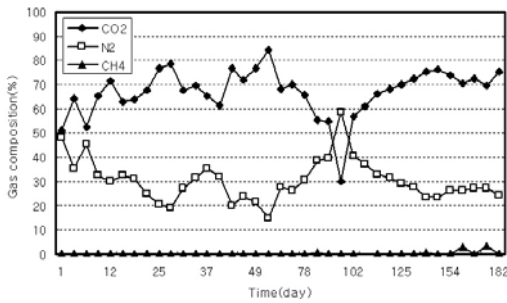
### 3.3 유기탄소의 물질수지

[Table 5]는 폐기물 내 유기탄소의 변화를 알아보기 위하여 초기 유기탄소와 시간경과에 따라 발생된 유기탄소의 양을 보여주고 있다. 초기 유기

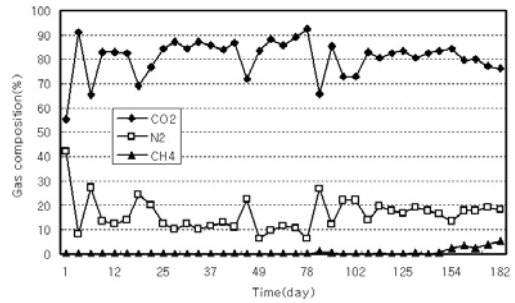
탄소의 경우 원소분석을 통한 전체 폐기물의 이론적 유기탄소 양과 매립폐기물의 물질별 생분해율<sup>8)</sup>을 적용하여 분해 가능한 유기탄소의 양으로 나타내었다. 그 결과 초기 폐기물 내 총유기탄소의 양은 각각 4,450g, 1,120g으로 생분해 가능한 유기탄소는 이론적 유기탄소의 25%를 차지하고 있었다. 시간경과별 유기탄소 발생량은 매립가스 중

CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>의 총발생량으로 유추하였고, 아래에 주어진 바와 같이 AN-20, AN-30, AN-40, AN-50에서 180일 까지 폐기물 내 유기탄소가 가스로 유출된 유기탄소는 각각 8.73g, 31.84g, 47.12g, 62.59g으로 수분함량이 클수록 그 양이 많았다.

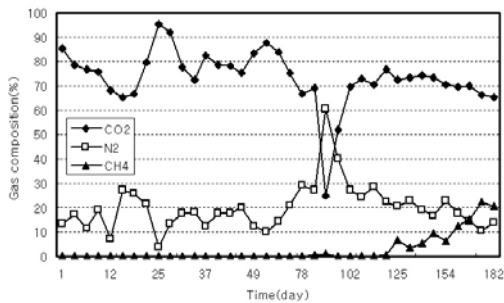
그리고 생분해 가능한 유기탄소를 기준으로 180



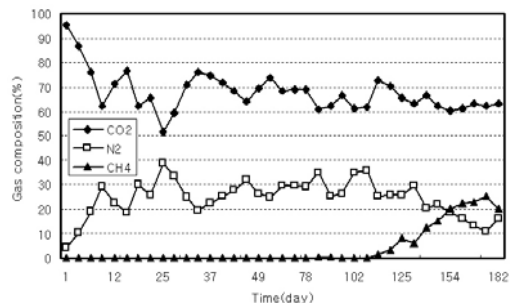
[Fig. 3] Profiles of gas composition from AN-20.



[Fig. 4] Profiles of gas composition from AN-30.



[Fig. 5] Profiles of gas composition from AN-40.



[Fig. 6] Profiles of gas composition from AN-50.

[Table 5] Initial organic carbon and organic carbon changed during 180 days (unit : g)

Time		Lysimeter			
		AN-20	AN-30	AN-40	AN-50
Initial organic carbon	Theoretical C	4,450			
	Biodegradable C	1,120			
60 day		7.10	28.79	45.14	60.77
120 day		7.62	30.10	46.26	61.97
180 day		8.73	31.84	47.12	62.59
Decomposition rate (%)		0.78	2.84	4.21	5.59

일까지의 분해율을 계산해 본 결과 0.78%, 2.84%, 4.21%, 5.59%로 수분함량이 많을수록 생분해정도는 높으나, 4개의 모의매립조 모두 분해율이 저조한 것으로 나타났다. 이는 일반 매립지의 경우 안정화 기간을 30~100년으로 보고 있는 것을 감안할 때, 모의매립조의 폐기물이 안정화되기에는 장기간이 소요될 것으로 사료된다. 따라서 향후 모의매립조에 대한 지속적인 모니터링을 실시하여 폐기물의 매립과정에서 수분이 미치는 영향을 정량적으로 평가할 계획이다.

#### 4. 결론

본 연구는 폐기물매립지의 안정화에 미치는 수분의 영향을 평가하기 위해 고품폐기물을 충전한 모의매립조에 수분을 각각 20, 30, 40, 50%로 조절하여 장기간 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 혐기성 Bioreactor 조건의 매립조에서 미생물의 고품폐기물 분해로 인한 매립가스 발생량은 수분함량이 높을수록 많이 발생되었다. 그리고 모든 매립조에서 초기에는 CO<sub>2</sub> 생성이 활발하였으며, CH<sub>4</sub> 발생은 AN-20과 AN-30, AN-40과 AN-50의 경향이 유사하게 나타났으나, 수분이 높을수록 CH<sub>4</sub>의 발생시기가 빠르고 그 농도에 높았다. 즉, 함수율이 20%, 30%, 40%, 50%로 증가할수록 메탄생성 박테리아균의 활성화가 빠르고 크게 증가하는 것으로 보아 매립지 내 미생물의 활성에 수분이 많은 영향을 미친다고 판단된다.

2. 분해 가능한 유기탄소는 이론적 유기탄소의 25%를 차지하고 있으며, AN-20, AN-30, AN-40, AN-50의 180일까지 분해율은 각각 0.78%, 2.84%, 4.21%, 5.59%로 수분함량이 많을수록 분해정도는 높으나, 안정화까지는 오랜 기간이 소요될 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. M. Hudgins and A. Read, "Sustainable Landfill Management Via the Use of Aerobic Bioreactors" Eighth International Waste Management and Landfill Symposium in Sardinia 2001, Vol. 1 283-292 (2001).
2. Christensen, T. H. and Kjeldsen, P. "Basic biochemical processes in landfills, Sanitary landfilling : process", technology and environmental impact, Academic press, 29-49 (1989).
3. Lynch, J. M. and Poole, N. J. "Microbial Ecology: A Conceptual Approach", John Wiley & Sons, New York (1979).
4. Rees, J. F. "The Fate of Carbon Compounds in the landfill Disposal of Organic Matter" J. of Chemical Technology and Biotechnology 30, 161-175 (1980).
5. 수도권매립지관리공사, "폐기물 매립지에 있어서 Bioreactor형 매립공법 (침출수 재순환시스템 등) 도입에 관한 타당성 연구 보고서" (2003).
6. 한국과학기술연구원, "환경복원 및 재생기술 - 불량매립지 복원기술" (1999).
7. Dong Lu, Wang Qi, Li Heng, "Initial Study on Acceleration Stabilization of Landfill", Proceedings of the Asian Pacific Landfill Symposium Fukuoka 2000, 297-302 (2000).
8. 수도권매립지관리공사, "폐기물 잠재가스 발생량 조사 연구" (2004). 