



폐기물매립지에 있어서 산소와 수분이 매립폐기물의 안정화에 미치는 영향

김혜진, 이남훈[†]

안양대학교 환경공학과

(2006년 2월 17일 접수, 2006년 3월 17일 채택)

Effect of Oxygen and Moisture on Stabilization of Municipal Solid Wastes in Landfill

Hye-Jin Kim, Nam-Hoon Lee[†]

Dept. of Environmental Engineering, Anyang University, Dept. of Fine Chemistry

ABSTRACT

Landfilling is one of the most widely used methods for the final disposal of solid wastes. Landfilled wastes are degraded by residing microorganisms and the microbial degradation is affected by many factors such as moisture, oxygen, pH, alkalinity, sulphate, nutrient, temperature, and so on. Especially among these factor, oxygen and moisture within aerobic landfill play a major role in microbial degradation. In this study, 1) the effects of oxygen on the velocity of waste degradation and 2) the effect of moisture on the degradation of municipal solids waste (MSW) in aerobic condition were investigated. It was found that the BOD and COD_{cr} concentration from the leachate of aerobic lysimeters dropped faster by 80 days after the start of the test compared to those from the anaerobic lysimeters. To see the effect of moisture, four aerobic lysimeters filled with MSW and four different levels of moisture (20, 30, 40, and 50%) were installed. From this test, higher moisture in MSW produced higher CO₂ concentration, meaning moisture was effective for the microbial degradation. thus, we concluded that higher moisture level in the aerobic landfill might help early-stabilization microbial degradation.

Keywords : Moisture content, Anaerobic landfill, Aerobic landfill, Lysimeters, Microbial degradation, MSW

[†]Corresponding author (nhlee@aycc.anyang.ac.kr)

초 록

매립은 폐기물의 최종처분방법으로 광범위하게 이용되며, 매립된 폐기물은 미생물의 활동에 의해 분해된다. 미생물에 의한 생분해는 수분, 산소, pH, 알칼이도, 그리고 온도 등에 의해 영향을 받는다. 특히, 산소와 수분은 호기성매립지 내에서의 미생물의 활성화에 주요한 인자이다. 본 연구에서는 산소의 유무가 매립폐기물의 분해속도에 미치는 영향에 대한 평가와 호기성 상태에서 수분이 고형폐기물(MSW)의 분해에 미치는 영향을 조사하여 분석하였다. 산소의 유무에 따른 매립폐기물의 분해특성을 연구하기 위하여, 혐기성 및 호기성 모형매립조를 설치하여 실험한 결과, 호기성 모형매립조의 침출수는 80일 경까지 BOD, CODcr 농도가 빠르게 감소하였으나 혐기성 모형매립조는 유기물의 농도가 초기에 비하여 크게 감소하지 않았다. 그리고 호기성 폐기물매립지에서의 수분의 영향을 평가하기 위하여 4기의 모형매립조에 고형폐기물을 충전하여 수분함량을 20, 30, 40, 50%로 하여 운전하였다. 그 결과 수분함량이 높을수록 CO₂의 농도가 높게 측정되었는데, 이는 수분함량이 높을수록 미생물 분해가 효과적임을 의미한다. 따라서 호기성폐기물매립지에서 수분함량이 높을수록 고형폐기물의 조기안정화에 도움을 주는 것으로 사료된다.

핵심용어 : 수분함량, 혐기성 매립지, 호기성 매립지, 모형매립조, 미생물분해, 고형폐기물

1. 서론

매립은 최근까지 저장(storage)과 차단(containment)을 목적으로 한 위생매립이 폐기물매립지의 기본개념으로 하였으나, 오늘날의 폐기물 매립지는 생물반응기(bioreactor) 개념을 접목하여 매립폐기물내의 유기물을 효율적으로 분해시키는 개념으로의 전환이 이루어지고 있다. 즉, 매립의 개념이 물리화학적, 생물학적 자정능력을 극대화하여 대체에너지 생산 및 조기안정화를 도모하는 적극적인 Bioreactor형 매립으로 변화하는 것이다. 이는 장기간 여러 단계로 진행되는 기존 매립지와는 달리 안정화기간을 단축시켜 조기안정화 함으로써 매립지의 주변 환경부하를 줄이고 매립지를 빠른 시일에 다른 용도로 활용이 가능하게 함을 목적으로 하고 있다¹⁾.

이러한 생물반응기 개념인 Bioreactor형 매립의 안정화는 여러 인자에 영향을 받으며, 그 중 산소와 수분함량은 미생물의 고형폐기물 분해에 많은 영향을 미친다^{2,3,4)}. 여러 연구에서 보고된 바에 따르면 호기성 조건에서는 현장수분보유함량(Field capacity)의 60~80%가 미생물 활성이 최대를 나타내며^{5,6)}, 함수율을 유지하기 위해 수분공급 또는

침출수의 재순환이 반드시 필요하다고 한다.

본 연구에서는 혐기성 및 호기성 모형매립조를 각 1기씩 설치하여 산소의 유무가 매립폐기물의 분해 속도에 미치는 영향에 대한 평가를 하였다. 그리고 호기성 Bioreactor 폐기물매립지에서 수분이 미치는 영향을 평가하기 위하여 모형매립조의 도시고형폐기물의 수분함량을 각각 20, 30, 40, 50%로 조절하여 충전한 후 호기성 상태로 운전하였고, 운전 기간 동안 매립가스분석을 통해 대상물질의 생물학적 분해 정도, 유기물의 특성변화를 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 풍건한 후 충전하였다. 풍건한 시료는 모형매립조에 함수율을 조절하여 충전하였고, 이때 음식물은 풍건하지 아니하고, 자체 함수율을 구하여 충전 시 각각의 함수율에 따른 수분첨가량에서 그 수분의 양을 제하여 주었다.

2.2 모형매립조 장치 및 운전방법

2.2.1 실험장치

(1) 산소 유무에 따른 매립폐기물의 분해특성

[Fig. 1]과 같이 PVC관으로 D200mm×L1300mm 인 모형매립조 총 2기를 제작하였고, 균일하게 인공 강우를 주입하기 위해 우수주입 속도를 조절할 수 있는 장치를 만들었으며, 상부에 직경 4mm의 강우

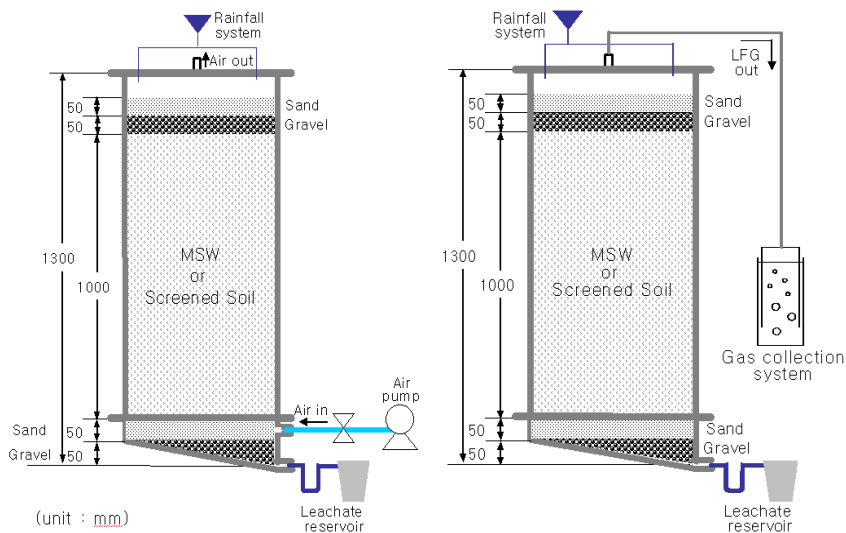
주입구 5개를 설치해 각각 튜브로 우수주입장치와 연결하였다. 침출수 배출부는 모형매립조 하부에 설치하였고 공기의 유입을 방지하기 위해 U자관을 두었다. 호기성 모형매립조의 경우 하부에 공기주입부를 설치하였으며, 혐기성 모형매립조는 포화식염수가 담긴 가스포집조를 설치하였다.

(2) 수분이 매립폐기물의 분해속도에 미치는 영향
호기성 Bioreactor 폐기물매립지에서 수분이 미

[Table 1] Physical Component of Refuse Filled in Lysimeter

(weight %, dry base)

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



[Fig.1] Schematic of anaerobic and aerobic lysimeters.

치는 영향을 연구하기 위해 [Fig. 2]에 나타난 바와 같이 PVC관으로 D200×L700인 모의매립조 총 4기를 제작하였다. 모의매립조의 상·하는 PVC관용 cap로 밀폐하였으며, PVC관과 cap의 접합부분은 실리콘을 발라 공기의 유입을 방지하였다. 그리고 수분의 균일한 분포를 위하여 모형매립조를 가로로 설치한 후 2일에 1회씩 상·하를 바꾸어 주었으며, 모의매립조의 공기주입구에 수분트랩을 설치하여 공기를 포화시킨 후 모형매립조에 공급함으로써 수분 손실을 방지하였다.

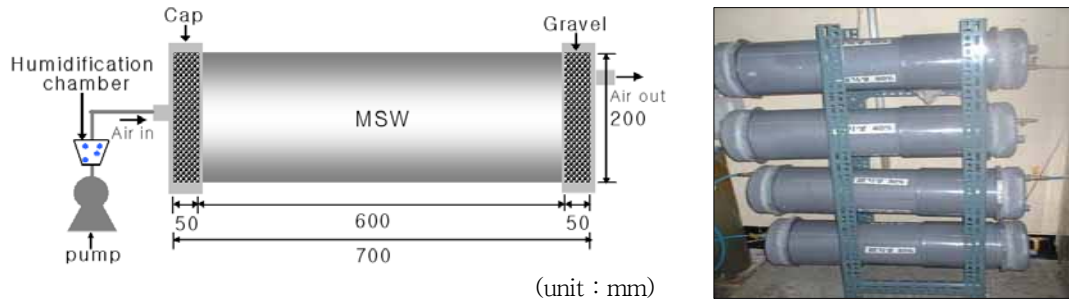
2.1.2 운전방법

본 연구에서는 [Table 2]의 조건하에 총 6기의 모형매립조를 운영하였고, 모형매립조는 30±2℃로 유지되는 항온실에 설치하였다. 수분의 함량에 따른 매립폐기물의 분해 속도에 관한 실험에 있어

모형매립조에 충전된 폐기물의 현장수분보유함량은 59%로 측정되었다. 따라서 미생물의 활성이 최대 범위인 현장수분보유함량의 60~80%는 35.4~47.2%로 나타났다. 따라서 이 범위를 포함할 수 있도록 함수율을 20~50%로 하여 모형매립조에 폐기물을 충전하였다.

2.3 분석방법

침출수는 주 1회 분석을 행하였으며, 분석항목으로는 침출수 발생량, BOD, CODcr, NH⁺₄-N, NO₃⁻-N, T-N이며, 모든 분석은 수질오염공정시험법⁷⁾에 준하여 실시하였다. 그리고 모형매립조 운영 시 발생하는 가스조성은 [Table 3]의 분석조건으로 CO₂, O₂, N₂ 항목을 분석하였다. 그러나 호기성 상태에서의 수분이 미치는 영향을 평가하는 연구에서의 침출수 분석은 모형 매립조의 함수



[Fig.2] Schematic of anaerobic lysimeters.

[Table2] Operation Conditions in the Lysimeters

Item \ Lysimeter	L1(aer-MSW)	L3(an-MSW)	AE-20	AE-30	AE-40	AE-50
Operation condition	aerobic	anaerobic	aerobic			
Filling amount (dry-kg)	22		9.42			
Filling height (mm)	1000		600			
Density (ton/m ³)	0.7		0.6	0.65	0.7	0.75
Moisture (%)	32		20	30	40	50
Air injection volume (ℓ/m ² /min)	1.75		3.5			
Water injection intensity	220ml/week		-			

을 유지할 위해 반응조 내의 침출수를 채취하지 않은 관계로 분석하지 않았다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 산소 유무에 따른 매립폐기물의 분해 특성

3.1.1 매립가스 조성 및 발생량

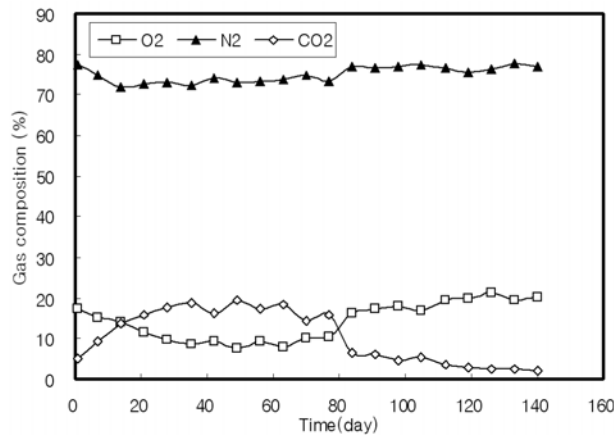
혐기성매립조의 가스조성변화를 [Fig. 3]에 나타내었다. 실험초기 O₂는 17.27%에서 점차 감소하여, 49일 경에는 7.49%로 최저 산소농도를 보인 뒤 다시 증가하여 140일 경에는 20.10%를 나타내었다. CO₂는 초기 5.08%에서 O₂와 반대로 증가하며 49일 경에는 최고농도인 19.54%를 보이

다 감소하여 종료 시에는 2.07%를 나타내었다. 이는 대기 중의 CO₂가 0.03%의 매우 낮은 농도임에도 불구하고 모형매립조 내의 CO₂농도가 최고 19% 가량을 나타낸 것은 미생물의 활성화에 의한 생성물로 판단되어지므로 매립조 내부에서 활발한 분해가 일어났다고 할 수 있다. 그 후 CO₂농도가 감소하고 O₂농도가 증가한 것은 이분해성 유기물의 생물학적 분해가 어느 정도 완료된 것으로 보여진다.

그리고 130일 간의 실험기간동안 혐기성 모형매립조에서 발생한 누적가스발생량과 가스조성변화를 [Fig. 4]~[Fig. 5]에 나타내었다. 초기부터 가스가 활발히 발생하여 최종 140일 경에는 총 267.4L의 매립가스가 발생되었고 평균발생률은 1.91L/day이었다. 혐기성 모형매립조의 가스조성

[Table3] Analytical Condition for Gas Chromatography(TCD)

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



[Fig.3] Profiles of gas composition from L1(ae-MSW).

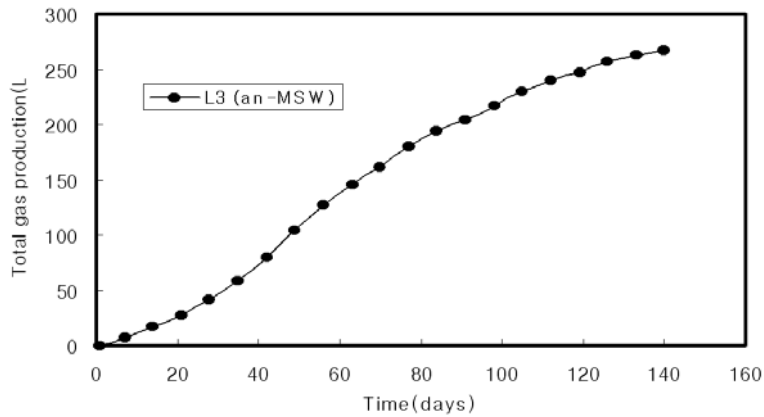
변화를 살펴보면 CO₂는 초기에 7.24%에서 42일 경에 최고치인 76.50%까지 증가한 후 감소하여 종료 시엔 23.40%를 나타내었다. 그리고 CO₂ 감소 시점에서 CH₄는 점차적으로 증가하여 140일 경에는 54.98%를 나타내었다. 이는 초기에 분해도가 높은 유기물의 산화가 일어났으며 42일경 이후에는 CO₂농도 감소에 이은 CH₄의 발생과 정상적인 메탄화 반응이 일어났음을 보여준다.

3.1.2 침출수 수질 및 발생량

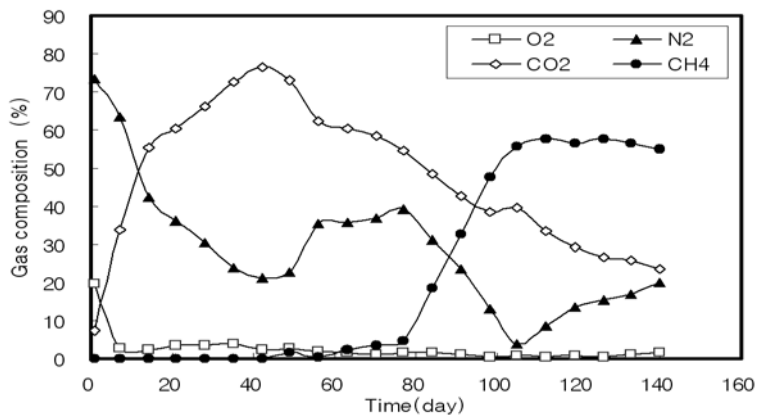
[Fig. 6]에 인공강우 주입량과 침출수 발생량을

나타내었다. 시간이 경과하면서 L3(an-MSW)의 경우 60일 침출수의 누적발생량이 강우주입량을 초과하기 시작하여 1265ml의 차이가 났고, L1(ae-MSW)가 100일 이후 총 235ml 초과하였다. L1의 차이가 적은 이유는 L1의 공기 주입으로 인한 수분의 증발로 사료된다.

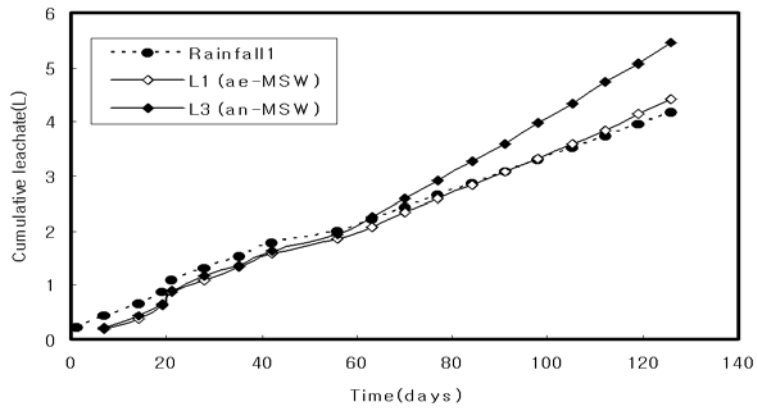
[Fig. 7]과 [Fig. 8]은 침출수의 BOD 및 COD_{Cr}의 시간에 따른 변화를 나타내었다. L1(aer-MSW)와 L3(an-MSW)의 경우 초기 BOD농도가 각각 2600mg/L에서 3030mg/L로, 3200mg/L에서 3800mg/L으로 증가하는 것을 볼



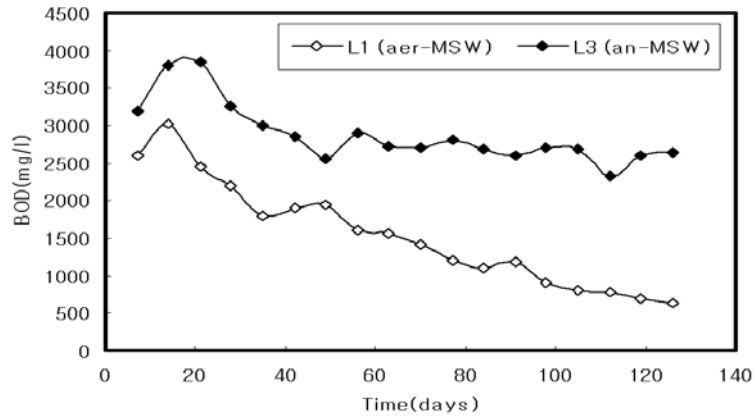
[Fig.4] Cumulative gas production.



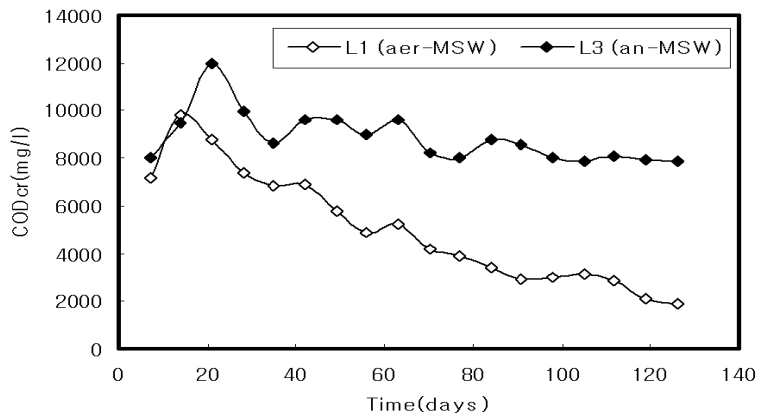
[Fig.5] Profiles of gas composition from L3(an-MSW).



[Fig.6] Cumulative leachate production.



[Fig.7] BOD concentration of the leachates.



[Fig.8] CODcr concentration of the leachates.

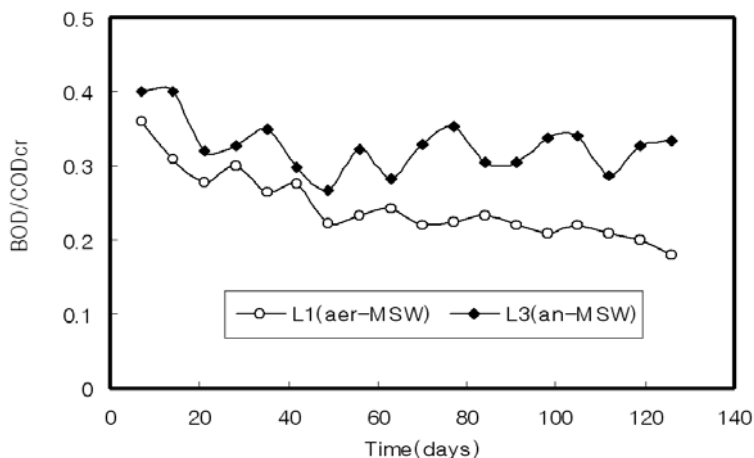
수 있는데 이는 폐기물 내 유기물질이 용출되기 때문이다. 이후 L1의 경우 BOD는 625mg/L까지 급격히 감소되나 L3는 실험 종료 시 2640mg/L로 초기 3200mg/L와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 호기성매립조에서 미생물의 유기물 분해효율이 월등하게 뛰어나다는 것을 알 수 있다. L1과 L3의 CODcr 농도 또한 BOD와 유사한 경향을 보이고 있다. 선별토사를 충전한 L2(aer-SS)와 L4(an-SS)는 L1, L3에 비하여 그 농도는 작으나 감소하는 경향은 혐기성 조건과 호기성 조건의 특징을 그대로 가지고 있다.

[Fig. 9]는 L1(aer-MSW)와 L3(an-MSW)의 BOD₅/CODcr비를 나타내었다. BOD₅/CODcr비는 침출수의 안정도를 평가하는 일반적인 지표로 그 값이 0.1이하 시 안정되었다고 평가한다. 초기 L1, L3의 BOD₅/CODcr비는 약 4.0으로 침출수내 생분해 가능한 물질이 많이 포함되어 있다. 생물분해가 진행되며 L3의 경우 BOD₅/CODcr비가 0.30에서 0.34사이를 주기적으로 변화하였다. 반면에, L1은 점차적으로 그 값이 감소되어 0.18까지 낮아졌으며, 이는 시간이 경과함에 따라 미생물에 의한 유기물분해가 이루어져 침출수 중의 유기물분율이 감소하기 때문이다.

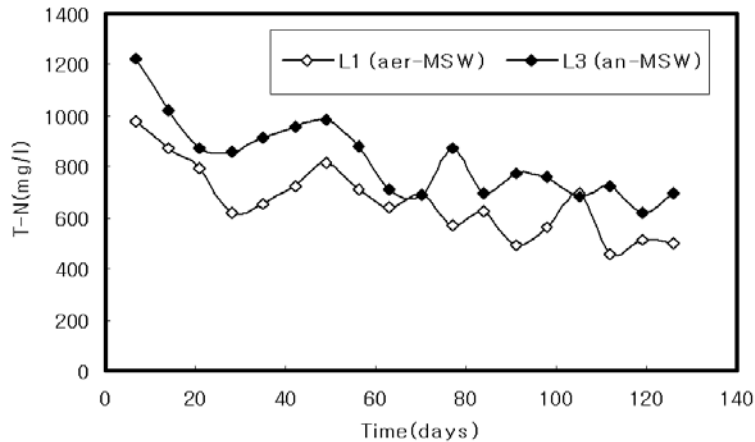
T-N의 농도변화를 [Fig. 10]에서 보면 L1(aer-MSW)의 경우 798.23mg/L에서 298.25

mg/L로 점차 감소하고 있으며 L3(an-MSW) 또한 1225mg/L에서 697.5mg/L로 감소하는 경향을 보인다. 호기성 모의매립조인 L1은 20일 경부터 NO₃⁻-N의 농도가 65.5mg/L에서 93.24mg/L으로 증가하며, 동시에 NH₄-N농도는 783.32mg/L에서 449.74mg/L로 감소하는 하고 있는데 이는 질산화로 인한 것으로 판단된다. 또한 NO₃⁻-N농도가 증가하는 시점이 CODcr 및 BOD 농도가 큰 폭으로 감소한 시기와 일치하기 때문에 호기성 매립조의 질산화는 유기물이 제거된 후부터 진행된다는 것을 알 수 있다. 그리고 혐기성 모형매립조인 L3(an-MSW)의 NH₄-N 농도는 감소와 증가를 반복하며 실험후기엔 초기농도와 유사한 649mg/L의 농도를 보여주고 있으며, 이는 침출수에 용해된 NH₄-N이 그대로 유출됨을 나타내어 준다. 한편, NO₃⁻-N 농도는 매립조의 특성상 감소하다 점차 안정화 되어 82mg/L의 낮은 농도를 유지하였다.

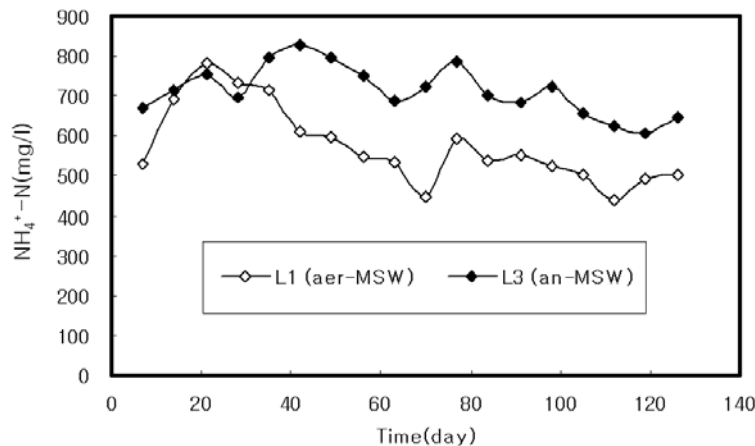
[Fig. 13]은 침출수로 유출된 총 질소의 Mass balance를 나타내었다. 충전된 시료에 상관없이 호기성보다 혐기성에서 유출된 질소의 양이 많다는 것을 알 수 있는데 이는 L1(aer-MSW)에서 질산화된 NO₂⁻-N, NO₃⁻-N이 충전된 폐기물의 잔류유기물을 탄소원으로 탈질되었기 때문이라고 사료된다.



[Fig.9] BOD₅/CODcr ratio of the leachates.



[Fig.10] T-N concentration of the leachates.

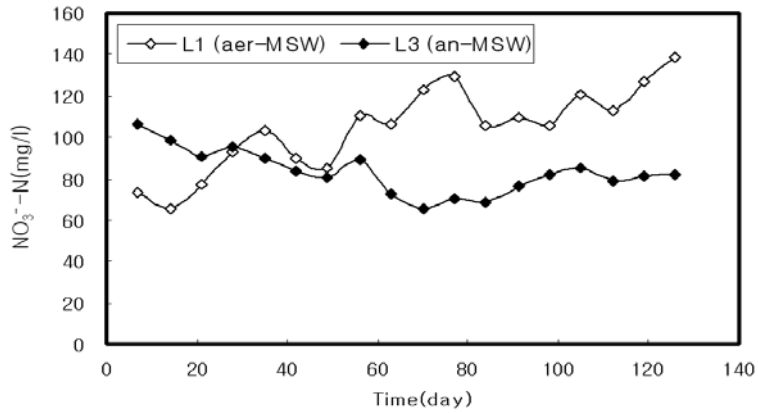


[Fig.11] NH₄⁺-N concentration of the leachates.

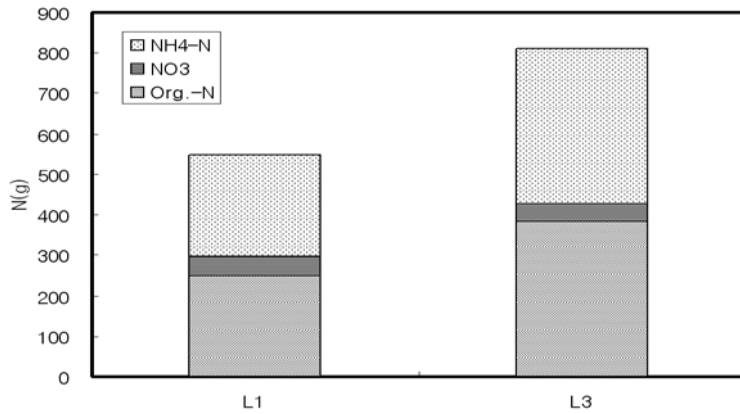
3.2 수분이 매립폐기물의 분해속도에 미치는 영향

[Fig. 14]~[Fig 17]는 수분함량을 조절한 호기성 모형매립조에서 발생된 가스의 분석 결과이다. 모형매립조를 운전한 후 55일 경까지 AE-20와 AE-30의 경우 CO₂와 O₂의 농도가 항온실 내의 공기 조성과의 유사한 경향을 나타내고 있다. 다만 CO₂의 농도가 1.4~4.25%로 항온실내의 대기 중 CO₂ 농도인 약 0.03% 보다 높으며, O₂ 또한 16.9%인 것으로 보아 호기성 미생물에 의한 유기

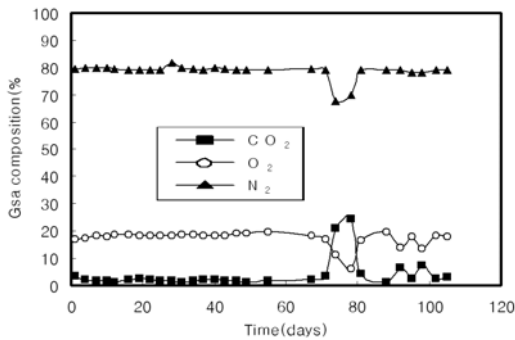
물 분해가 이루어지고 있음을 알 수 있다. AE-40과 AE-50의 경우 유기물 분해로 인한 CO₂농도가 최고 10.9%로 AE-20, 30에 비해 약 3배 높으며, O₂ 또한 최고 2.5배 이상 소모되고 있다. 그리고 AE-40은 충전 후 10일까지 5.4~10.41%, AE-50은 19일까지 CO₂조성이 5.21~10.87%로 AE-50의 CO₂ 발생량이 많은 것으로 보아 함수율이 50%인 AE-50의 미생물활성이 높은 것으로 사료된다. 55일 이후 미생물의 활성을 명확히 보기 위하여 초기 조건의 1/10로 공기 주입량을 줄여주



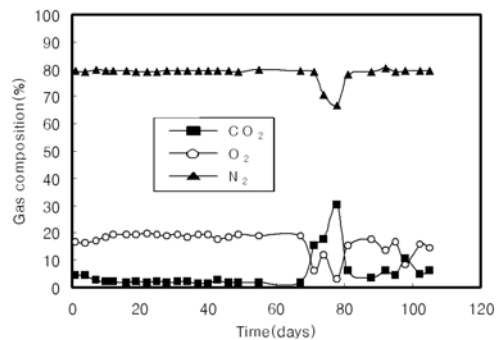
[Fig. 12] NO₃⁻-N concentration of the leachates.



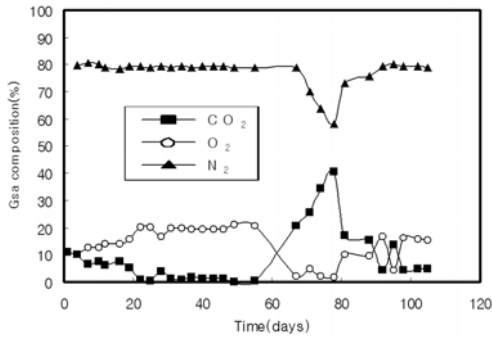
[Fig. 13] Nitrogen mass balance for lysimeter.



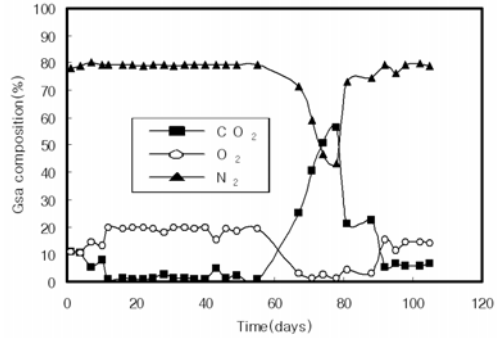
[Fig. 14] Profiles of gas composition from AE-20.



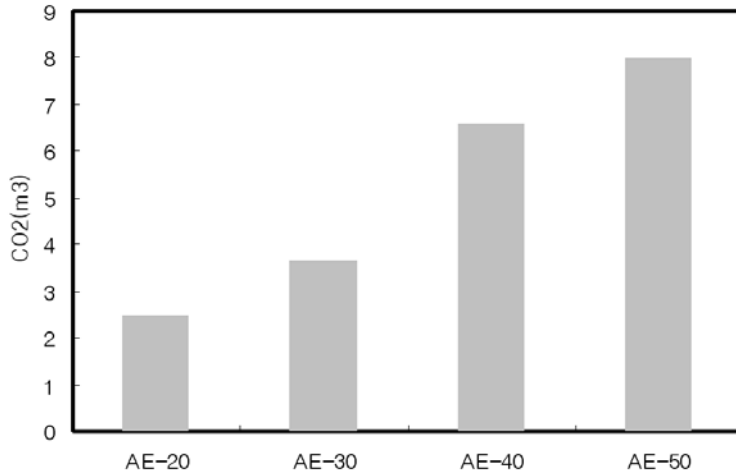
[Fig. 15] Profiles of gas composition from AE-30.



[Fig. 16] Profiles of gas composition from AE-40.



[Fig. 17] Profiles of gas composition from AE-50.



[Fig.18] Cumulative CO2 from lysimeters.

었고, 그 결과 AE-40과 AE-50에서 CO₂의 농도가 40%이상 증가며 O₂의 농도가 2%이하를 나타내었다. 이는 혐기성 단계로 전환되고 있다고 판단하여 공기의 주입량을 78일 이후 5PV로 전환하였다. 현재 100일경까지 모든 모형매립조는 호기성 조건을 유지하며 미생물의 분해가 이루어짐을 볼 수 있다.

그리고 [Fig. 13]에 100일 동안 각 모형매립조에서 발생한 CO₂가스의 양을 나타내었다. AE-20, AE-30이 각각 2.47m³, 3.65m³, AE-40, AE-50은 각각 6.6m³, 7.99m³으로 함수

율이 높을 수록 CO₂가 많이 발생한 것으로 나타나, 호기성 조건하에서 함수율이 증가할수록 미생물분해가 활발히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 폐기물매립지의 안정화에 미치는 산소와 수분의 영향을 평가하기 위해 고품폐기물을 충전한 모형매립조를 장기간 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

4.1 산소의 유무에 따른 분해정도에 관한 연구

- 1) 호기성 모형매립조의 경우 CO₂ 발생량이 80 일경까지 지속적으로 발생되었다 이는 폐기물 내 유기물이 미생물에 의해 활발히 분해되고 있음을 나타내는 것이며, 이때 침출수의 BOD, COD_{Cr} 농도도 빠르게 감소하였다. 반면, 혐기성 모형매립조의 경우 실험 종료 시점까지 침출수의 BOD, COD_{Cr}은 초기농도에 비하여 크게 저감되지 않았다. 이것으로 보아 호기성 Bioreactor 매립이 혐기성 Bioreactor 매립 일 때 보다 미생물의 유기물 분해가 현저히 빠르게 나타났다.
- 2) 침출수로 유출된 총 질소의 Mass balance는 충전된 시료에 상관없이 호기성보다 혐기성에서 유출된 질소의 양이 많다는 것을 알 수 있는데, 이는 L1(aer-MSW)과 L2(aer-SS)에서 질산화된 NO₂⁻-N, NO₃⁻-N가 충전된 폐기물의 잔류유기물을 탄소원으로 탈질되었기 때문이라고 사료된다.

4.2 수분함량에 따른 분해정도에 관한 연구

- 1) 함수율이 20%, 30%, 40%, 50%로 증가할 수록 CO₂의 총발생량이 각각 2.42m³, 3.65 m³, 6.6m³, 7.99m³로 증가하는 것으로 보아 미생물의 활성에 수분함량이 많은 영향을 미친다고 판단된다.

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. 한국과학기술연구원 환경복원 및 재생기술 "불량매립지 복원기술" (1999).
6. 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).
7. 환경부, 2002, "수질공정시험법" 