

호기성매립지에서 드라이포그 주입에 의한 폐기물분해 촉진에 관한 연구

박진규, 이병선*, 윤석표**, 이남훈****

(주)에코윌플러스, (주)포스벨*, 세명대학교 바이오환경공학과**, 안양대학교 환경에너지공학과****

Effect of Dry Fog Injection on Waste Decomposition in an Aerobic Landfill

Jin-Kyu Park, Byung-Sun Lee*, Seok-Pyo Yoon**, Nam-Hoon Lee****

Ecowillplus Co. Ltd., FORCEBEL Co. Ltd.*

Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University**

Department of Environmental and Energy Engineering, Anyang University****

(Received: Apr. 9, 2018 / Revised: Jun. 6, 2018 / Accepted: Jun. 7, 2018)

ABSTRACT: The objective of this research was to assess the effect of moisture content and water injection method into the landfill on waste decomposition in an aerobic landfill. Firstly, respirometric experiments were performed in order to assess the effect of initial moisture content (20%, 30%, 40% and 50% respectively) on landfilled waste decomposition. The cumulative oxygen uptake and oxygen uptake rate were highly increased with the increase of initial moisture content. Secondly, lysimeter experiments showed that in comparison with the vertical injection method, dry fog system enhanced decomposition of organic wastes. Also, dry fog system provided uniform moisture distribution more than the vertical injection method within landfill.

Keywords: Solid Waste, Aerobic Landfill, Moisture Content, Water Injection, Dry fog

초록: 본 연구의 목적은 호기성 매립지에서 함수율 및 수분주입 방법이 폐기물 분해에 미치는 영향을 평가하는데 있다. 초기 함수율(20%, 30%, 40% 및 50%)이 매립 폐기물 분해에 미치는 영향을 평가하기 위해 호흡율 실험을 수행하였다. 그 결과 누적 산소소모량과 산소 소모율은 초기 함수율에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며, 초기 함수율이 증가할수록 증가하였다. 둘째, 매립지 내부 수분주입 방법으로서 드라이포그 시스템의 효율을 평가하기 위해 모의매립 실험을 수행하였다. 실험 결과 수분의 수직 주입방법과 비교하여 드라이포그 시스템이 유기성 폐기물의 분해를 촉진함을 보여 주었다. 또한 드라이포그 시스템은 수직 주입방식보다 매립지 내부에서 더욱 균일한 수분 분포를 나타내었다.

주제어: 폐기물, 호기성매립, 함수율, 수분주입, 드라이포그

1. 서론

폐기물매립지는 인간의 생활 또는 사업 활동에서

발생되는 각종 폐기물의 적정처리나 자원화가 불가능한 폐기물의 최종처분 방법으로 중요한 역할을 하고 있다. 그러나 폐기물매립지 운영 및 사후관리

† Corresponding author(e-mail : nhlee@anyang.ac.kr)

과정에서 상당량의 매립가스, 악취 및 침출수를 발생시켜 매립지 주변환경에 대한 오염 가능성을 높이는 것이 문제점으로 지적되고 있다¹⁾. 이러한 환경오염에 대한 부하 및 위험성을 감소시키기 위하여 일본에서는 Fukuoka method라는 준호기성 방법을 제안하여 오염물질을 조기안정화 시키기 위한 연구 등이 진행되었으며²⁾, 최근 유럽과 미국에서는 기존 매립지 내부에 공기를 주입하여 조기안정화 시키고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다^{3,4)}. 폐기물 매립지의 안정화는 유기물분해로 인한 지반침하가 주로 일어나는 지반공학적인 안정화 과정과 무기물과 중금속류가 원래의 토양조건과 유사한 환경이 되어가는 환경공학적 안정화 과정으로 구분할 수 있다. 따라서 폐기물 매립지의 안정화는 폐기물 매립지의 관리목적에 따라 안정화 평가 지표와 척도를 달리 할 수 있는데, 지금까지 침출수 재순환이나 호기성 매립 등 매립지 안정화를 촉진하기 위한 기술개발은 활발히 진행되어 온 반면 매립지의 안정화 평가 지표개발은 거의 이루어지지 않고 있다⁵⁾.

또한 폐기물매립지 내부로 공기를 주입하여 매립지 내부를 혐기성에서 호기성으로 전환할 경우 생물학적 활성도가 높아 유기물의 분해촉진은 물론 메탄가스 발생량이 감소되어 온실가스 저감에 상당히 기여하는 것으로 알려져 있다⁶⁻⁹⁾. 그러나 매립지 내부에서 최적의 호기성 분해를 유도하기 위해서는 산소, 내부온도, 적절한 수분 균등분포가 필요하다^{10,11)}. 특히 산소와 수분은 호기성매립지 내에서의 미생물 활성을 지배하는 중요한 인자이다¹²⁾.

매립지 내부로 수분을 주입하기 위해서는 수직정과 수평트렌치를 통한 주입 방법이 주로 사용된다. 그러나 수직정의 경우 중력에 의해 수분의 분포가 매우 제한적이며, 수평트렌치의 경우 부등침하에 의해 손상되거나 다량의 수분을 매립지에 한꺼번에 주입함으로써 인해 수분이 매립층 사이에 정체하거나 포화되어 공기의 이동을 방해하는 문제점이 지적되어 왔다¹³⁾. 이에 대한 대안으로 평균 10 μ m 이하의 미세수분(dry fog, 이하 “드라이포그”라 한다)을 공기와 함께 매립지 내부로 주입하는 방식이 제안되었다¹³⁾. 드라이포그는 입자의 부피가 작아 액화가 쉽게 이루어지지 않고 공기의 흐름에 따라 폐기물

층 공극을 이동하게 되는데, 기존의 주입방식보다 먼 거리까지 이동이 가능한 것으로 알려져 있다.

이에 본 연구에서는 호기성 조건에서 초기 함수율이 폐기물 분해에 미치는 영향과 매립지 내부로의 수분주입을 위한 드라이포그 시스템의 적용이 매립지 내부 수분 분포와 폐기물 분해에 미치는 영향을 평가하고자 하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 드라이포그의 개요

Fig.1은 수분입자의 크기에 따른 분류를 나타낸 것으로, 직경이 평균 10 μ m 이하인 수분 입자를 드라이포그(dry fog)라 일컫는다. 직경이 10~100 μ m일 경우는 미세 분무 또는 얇은 안개(Fine mist) 정도이며, 100~300 μ m는 이슬비(Fine drizzle), 300~1,000 μ m는 약한 비(Light rain), 1,000 μ m는 폭우(Thunderstorm)에 해당한다.

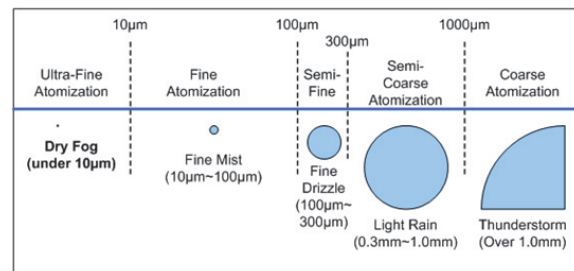


Fig. 1. Spray classification.¹³⁾

2.2. 초기함수율에 따른 산소소모율 평가

본 연구에서는 호기성 조건에서 매립폐기물의 분해속도에 초기 함수율이 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 실험에 사용된 시료는 춘천 G 비위생매립지(매립기간 '86.1~'97.12, 매립량 204,000 m^3 , 매립고 5.4m)에서 채취한 매립폐기물로 물리적 조성 및 성분은 Table 1에 나타내었다.

모의매립조는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 직경 20cm, 길이 50cm, 부피 15.7L인 PVC(Polyvinyl chloride) 재질로 제작하였으며, 총 4개조(Lys-1~Lys-4)였다. 충전폐기물의 물리적 조성은 Table 1과 동일하게 하였

Table 1. Physical Composition of landfilled waste

Item		Waste components	Wet weight base(%)
Waste composite	Combustible	Food	0.00
		Paper	1.3
		Textile	3.1
		Wood	0.8
		Rubber/Leather	0.1
		Vinyl/Plastic	14.3
		Sub-total	19.6
	Non- Combustible	Metal	2.2
		Glass	8.3
		Screened soil	64.7
		Gravel	5.2
Sub-total		80.4	
Total			100.0
3-components	Moisture		13.7
	Volatile solid		51.0
	Ash		35.3
	Total		100.0

Table 2. Operation conditions of the lysimeters

Item	Lys-1	Lys-2	Lys-3	Lys-4
Weight of filled waste (kg-dry base)	8.73			
Apparent density (kg-dry base/L)	0.55			
Air injection quantity (m ³ /day)	0.043			
Moisture content (%)	20	30	40	50

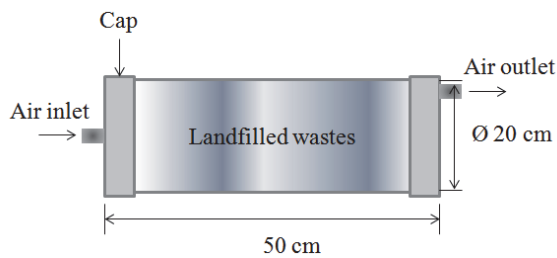


Fig. 2. Schematic diagram of lysimeter.

으며, 충전폐기물의 함수율은 Table 1에서 나타난 바와 같이 굴착폐기물의 함수율이 13.7%로 나타나 수분을 추가하여 함수율을 20%, 30%, 40%, 50%로 조절하였다. 충전 폐기물의 양은 건기준으로 8.73kg, 충전밀도는 현장조건과 유사한 0.55 kg/L로 조절하였다(Table 2 참조).

폐기물층내에서 수분의 균등분포를 유지하기 위하여 모의매립조를 눕혀 설치한 후 2일에 1회씩 회전시켜 상하를 바꾸어 주었으며, 균일한 공기의 주입 및 이동을 위하여 모의매립조 양쪽에 자갈을 충전하였다. 공기주입량은 기존 연구^{9,10,12}에서 최적 공기주입량으로 평가된 5 PV(Pore volume)인 0.043 m³/day로 하였으며, 총 4기의 모의매립조는 20±1℃로 유지되는 항온실에 설치 운영하였다.

모의매립조 운영 시 발생하는 가스는 GC(Younglin 6000M, Korea)를 이용하여 CH₄, CO₂, O₂, N₂를 측정하였으며, 아울러 각 모의매립조의 산소소모율을 평가하였다.

2.3. 수분공급 방법으로 드라이포그 시스템의 적용성 평가

수분공급방법으로 드라이포그 시스템의 적용성을 평가하기 위하여 가로 30cm, 세로 120cm, 높이 105cm의 PVC로 제작된 모의매립조 3개조를 제작하였다 (Fig. 3 참조). 일반적으로 매립실험에 사용되는 충전물은 실제 매립되는 폐기물을 이용하는 것이 바람직하지만 대표성을 확보할 수 있는 폐기물 물성 선정이 곤란하므로 연구목적에 부합하는 인공 폐기물을 사용하여 실험을 진행하였다. 인공 폐기물의 조성은 균질한 시료성상을 확보하기 위하여 생분해가 가능

한 유기물질인 퇴비(16.7%)와 개 사료(11.1%)를 충전하였으며, 공극확보를 위하여 벚짚(55.5%), 마사토(16.7%)를 충전하였다. 충전된 폐기물의 총무게는 165kg, 밀도는 약 0.57 t/m³, 초기 함수율은 30%를 유지하였다. 공기 주입량은 0.72 m³/day로 3개의 모의매립조 하부에 설치된 관을 통해 공기를 주입하였으며, 실험초기에 질소폐징을 실시한 후 13일경부터 공기를 주입하였다. 침출수의 저류로 인하여 공기주입관이 막히는 것을 방지하기 위해 모의매립조 바닥에 자갈을 설치하여 침출수의 집배수가 될 수 있도록 하였다(Table 3 참조).

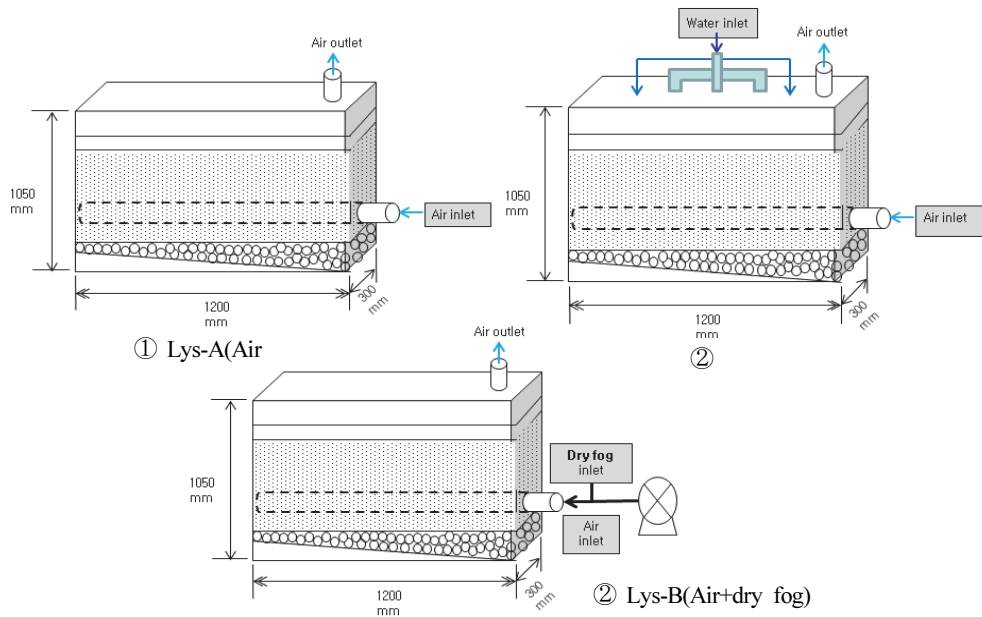


Fig. 3. Schematic diagram of each lysimeter.

Table 3. Operation conditions of the lysimeters

Item	Components	Lys-A	Lys-B	Lys-C
Composition (%)	Compost		16.7	
	Dog food		11.1	
	Rice straw		55.5	
	Soil		16.7	
	Total		100.0	
Air injection quantity (m ³ /day)			0.72	
Moisture (%)			30.0	
Apparent density (t/m ³)			0.57	
Weight of filled waste (kg)			165	
Water injection intensity (L/week)		0.0	3.5	3.5
Water injection methods		Control (No water addition)	Vertical water injection	Dry fog

모의매립조의 실험조건은 첫 번째 모의매립조 (Lys-A)는 단순히 공기만 주입하였으며, 두 번째 모의매립조(Lys-B)에서는 공기주입과 매립조 상부에서 수분을 2.0 L/week로 주입하였다. 세 번째 모의매립조(Lys-C)에서는 공기주입관으로 드라이포그를 같이 주입하였으며, 드라이포그의 주입량은 Lys-B와 동일하게 2.0L/week로 주입하였다. 드라이포그의 생성은 초음파식 가습기를 이용하여 생성시켰으며, 초음파식 가습기에서 생성된 수분입자 평균 직경은 약 10 μ m이하(평균 7.58 μ m)로 알려져 있다¹⁴⁾.

폐기물매립지에서 비닐/플라스틱과 같은 필름층이 존재할 경우 폐기물매립지 내부에서 수분 이동의 channeling 현상이 발생하고 부등침하 및 안정화 저해현상이 발생하게 된다. 따라서 수분을 수직으로 주입하는 것과 드라이포그로 주입하는 방법에 따라 필름층의 상·하 함수율 변화를 살펴보기 위하여 각 모의매립조의 상부로부터 30cm 3지점과 60cm 3지점의 총 6지점에 가로 30cm, 세로 20cm의 플라스틱막을 설치하여 실험 종료 후 플라스틱막 상·하의 함수율을 측정하였다.

가스성상의 분석은 모의매립조 상부에 설치된 가스배출관을 통해 나오는 가스를 테트라백을 이용하여 포집하여 GC(Younglin 6000M, Korea)로 CH₄, CO₂, O₂, N₂ 항목을 1회/일로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 초기 함수율에 따른 산소소모율 평가

Fig. 4는 함수율에 따른 폐기물의 산소소모율을 나타낸 것으로, 산소소모율은 다음 식과 같이 나타내었다.

$$OUR = \left(\frac{O_{1t} - O_{2t}}{O_{1t}} \right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, OUR : 시간 t일 때 산소소모율(%)
 O_{1t} : 시간 t일 때 산소주입농도(%)
 O_{2t} : 시간 t일 때 산소배출농도(%)
 t : 시간(day)

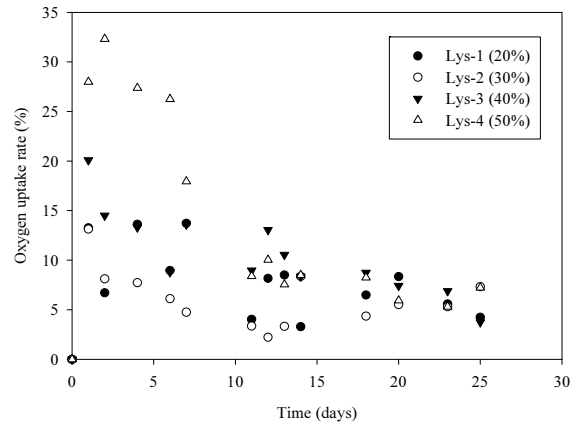


Fig. 4. Oxygen uptake rate at different moisture levels.

매립폐기물 초기 함수율에 따라 10일 이내의 실험초기에 산소소모율 차이가 발생하였으며, 시간이 경과함에 따른 산소소모율은 5% 내외로 유사하게 나타났다. 실험초기 산소소모율은 함수율 20%에서 5~15%, 함수율 30%에서 5~15%, 함수율 40%에서 10~20%, 50%일 때는 15~30%로 나타나 함수율이 증가할수록 산소소모율이 증가하였다. 기존 연구¹⁵⁾에 따르면 폐기물 중 생분해성 물질의 경우 초기 함수율이 증가함에 따라 생분해성 물질의 분해효율은 증가하였지만 시간이 경과함에 따라 생분해율은 증가하지 않았는데, 본 연구에서도 동일한 현상이 나타났다. 초기 함수율에 따라 생분해도의 차이가 발생한 것은 폐기물의 수분보유력(water holding capacity)보다 함수율이 낮으면 충분한 물이 건조한 유기물 주변으로 확산되지 않기 때문이다. 또한 함수율이 충분함에도 불구하고 시간이 경과함에 따라 산소이용률이 증가하지 않고 감소하는 것은 첫 번째는 생분해성 물질 중 이분해성 물질의 분해가 완료되어 산소 이용률이 감소하는 것이며, 두 번째는 매립층 내의 공극사이에 부분적으로 수분이 포화되어 산소의 이동이 저해되면서 미생물의 증식 또는 이동이 감소하기 때문으로 판단된다¹⁶⁾. 따라서 초기 함수율은 호기성 조건에서 공기주입 초기에만 매립폐기물의 분해에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이를 실제 매립지에 적용하면 일반적으로 매립폐기물의 함수율이 낮아 호기성 조건에서 매립폐기물의 분해효율은 낮을 것으로 사료되기 때문에 호기성

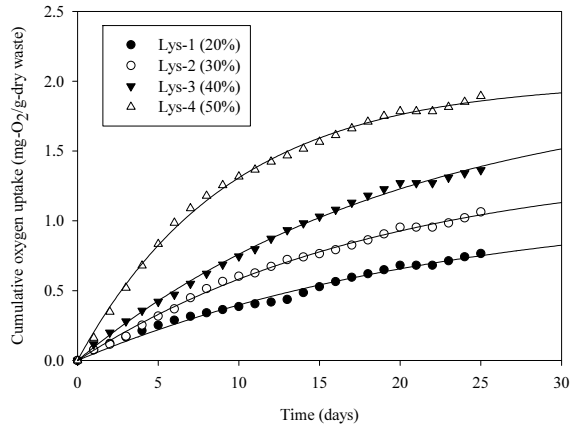


Fig. 5. Cumulative oxygen uptake at different moisture contents.

분해의 효율을 증대시키기 위해서 추가적인 수분 공급 후 공기를 주입하는 것이 적절할 것이다. 단, 수분 주입 시 channeling 현상으로 매립층 일부가 수분으로 포화되거나 수분이 부족할 경우 산소의 이동이 저해되거나 산소 이용률이 저감하기 때문에 매립층에서 수분의 균등 분포도 매우 중요할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 함수율에 따른 누적 산소소모량을 1차 반응으로 평가한 것으로 1차 반응식은 다음과 같이 나타내었다¹⁶⁾.

$$M = M_0(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

여기서, M: 시간 t 일때 누적 산소소모량 (O₂·mg/g-dry waste)

M₀: 최대 누적 산소소모량 (O₂ mg/g-dry waste)

k: 일차반응속도상수 (d⁻¹)

t: 시간 (day)

Table 4와 Fig. 6은 함수율에 따른 일차반응속도상수를 나타낸 것으로 Lys-1(20%)은 0.043 d⁻¹로 산정되었으며 Lys-4(50%)는 0.106 d⁻¹로 산정되어 함수율이 증가할수록 분해속도도 지수함수 형태 ($k = 0.0178 \cdot \exp^{0.0345x}$)로 증가하는 경향을 나타내었다. 호기성 퇴비화의 경우에는 함수율 70%까지 반응속도상수가 증가하는 것으로 보고되고 있다^{17,18)}. 따라서 초기 함수율이 높을수록 폐기물의 분해속도도 증가하기 때문에 폐기물매립지에서 호기성 분해를 실

Table 4. Reaction rate constant at different moisture contents

Lysimeters	Lys-1 (20%)	Lys-2 (30%)	Lys-3 (40%)	Lys-4 (50%)
Reaction rate constant				
k (d ⁻¹)	0.043	0.053	0.056	0.106
R ²	0.99	0.99	0.99	0.99

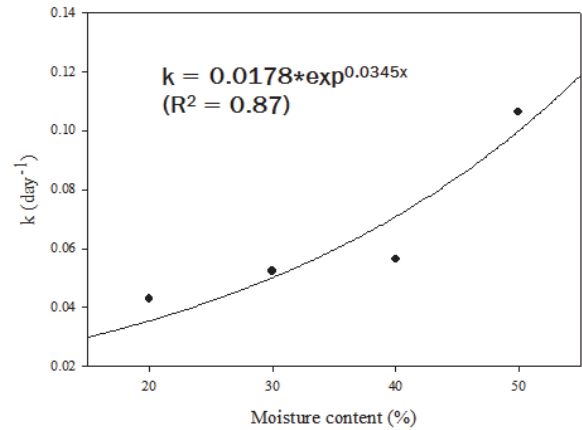


Fig. 6. Regression analysis for relationship between moisture content and reaction rate constant.

시할 경우 공기 주입 전에 매립지 내부에 수분을 주입하여 초기함수율을 증가시킨 후 공기를 주입하는 것도 유기물의 분해효율을 증가시키는 하나의 방안으로 판단된다.

3.2. 수분공급 방법으로 드라이포그 적용성 평가

수분공급방법으로서 드라이포그의 적용성을 모의 매립조를 이용하여 실험하였으며, Fig. 7은 각 모의 매립조의 산소농도 변화를 나타낸 것이다.

실험초기에 공기를 주입하면서 산소농도는 점차 증가하여 약 40일 경에 18~20%의 최고 산소농도를 나타낸 후 산소농도가 다시 감소하였다가 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 초기의 낮은 농도는 이 분해성 물질의 분해 때문이며 최고 산소농도 후 다시 감소한 것은 지체기 후 중분해성 물질의 분해가 진행되기 때문으로 보인다. 이는 미생물의 성장이 하나의 기질이 분해된 후 정체되었다가 다른 기질을 분해하면서 미생물이 다시 성장하는 현상으로, 중간 지체기 diauxic lag로 일컬어지고 있다²⁰⁾. 이러한 현상은 복합기질 분해를 위한 미생물의 최적화

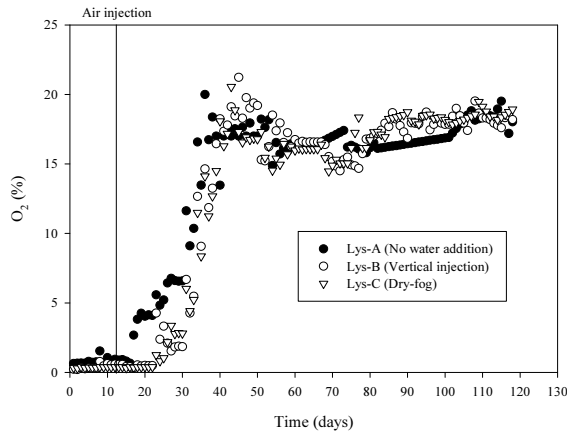


Fig. 7. O₂ concentration profile.

과정에서 나타나는 것으로 혐기성 분해뿐만 아니라 호기성 분해에서도 나타났다고 한다^{19,20}. 따라서 이러한 산소의 이용특성을 활용하면 순환형매립지의 사전 호기성 안정화 공법 적용 시 이분해성 물질의 분해를 위한 적정 산소 주입량을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 누적 산소소모량을 나타낸 것이다. 수분을 주입하지 않은 경우(Lys-A)도 초기에는 산소소모량이 수분을 주입하는 다른 모의매립조들과 유사하였으나 점차 감소하는 경향을 나타내어 수분이 폐기물의 분해에 영향을 미치는 인자인 것을 다시 확인할 수 있었다. 수분을 수직으로 주입하는 방법(Lys-B)과 드라이포그로 주입하는 경우(Lys-C) 산소 주입 후 약 20일이 경과하면서 누적 산소소모량에 차이가 발생하였다. 이는 수분을 수직으로 주입하는 경우 필름층으로 인한 channeling 현상이 발생하여

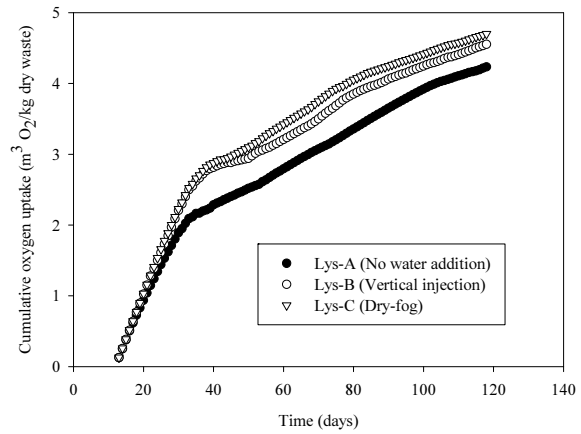


Fig. 8. Cumulative oxygen uptake according to water injection methods.

매립층 일부는 수분으로 포화되어 공기의 이동이 저해되거나, 필름층 하부에는 수분이 공급되지 않아 산소소모율이 드라이포그 보다 감소되어 누적산소소모량의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

이러한 수분 주입방식에 따른 수분의 공급차이를 평가하기 위하여 모의매립조에 설치한 플라스틱막의 상·하 각 지점별 함수율을 측정하였으며 이에 대한 결과를 Table 5에 정리하였다. 수분을 주입하지 않은 Lys-A의 경우 상부의 함수율은 평균 26.63%, 하부의 함수율은 26.25%로 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 수분을 수직으로 주입한 Lys-B의 경우 상부함수율은 30.59%, 하부 함수율은 28.59%로 상부의 함수율이 약간 높게 나타났고, 이는 중력에 의한 수분의 이동으로 플라스틱막이 수분의 이동을 차단하여 하부의 함수율이 낮아진 것으로 판단된다.

Table 5. Results of moisture content according to water injection methods

	Lys-A		Lys-B		Lys-C	
	Upper moisture (%)	Lower moisture (%)	Upper moisture (%)	Lower moisture (%)	Upper moisture (%)	Lower moisture (%)
p-1	26.54	25.81	32.84	30.42	28.33	29.84
p-2	27.12	27.64	31.18	28.35	29.62	28.14
p-3	27.52	26.34	31.34	29.72	28.06	29.40
p-4	26.89	27.54	29.84	27.63	30.12	31.64
p-5	26.41	24.04	30.12	28.22	29.66	31.17
p-6	25.30	26.12	28.24	27.20	30.45	30.94
Ave.	26.63	26.25	30.59	28.59	29.37	30.19
Ave.	26.44		29.59		29.78	

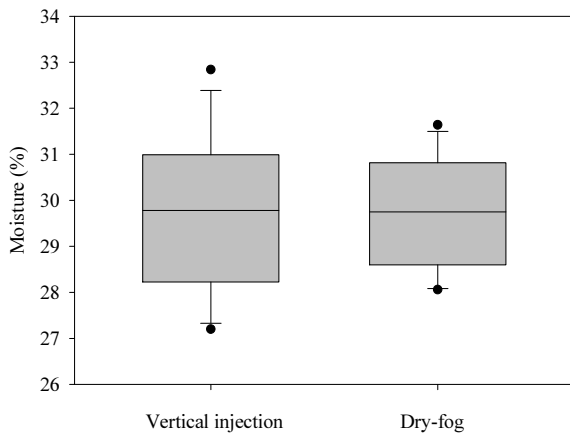


Fig. 9. Comparison of vertical water injection and dry fog system moisture content.

드라이포그를 주입한 Lys-C는 상부 29.37%, 하부 30.19%로 상·하부의 함수율 차이가 Lys-B에 비하여 적었고, 이는 공기와 같이 수분이 미세입자로 이동하기 때문인 것 같다. Fig. 9는 수직 수분주입방식과 드라이포그 방식에 따른 함수율의 분산을 나타낸 것으로 중간값은 유사하나 수직 수분주입방식이 드라이포그 방식보다 함수율의 편차가 컸다. 따라서 필름층인 비닐/플라스틱과 같은 폐기물이 매립층 내부에 다량 존재할 경우 드라이포그 방식이 동일한 수분량을 공급하여도 기존 중력을 이용한 수분 공급방식보다 매립지 내부의 수분을 균등하게 분포시키기에 더 효과적인 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 호기성 조건에서 초기함수율이 폐기물 분해에 미치는 영향과 매립지 내부로의 드라이포그상 미세수분 주입이 매립지 내부 수분 분포와 폐기물 분해에 미치는 영향을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매립폐기물의 초기 함수율은 공기주입 초기에만 산소소모율에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 초기 함수율이 증가함에 따라 일차반응 속도상수도 지수함수 형태로 증가하였다. 따라서 실제 매립지에는 일반적으로 매립폐기물의

함수율이 낮아 추가적인 수분 공급이 필요한 것으로 판단된다.

2. 호기성 조건에서의 산소농도 변화를 살펴보면 산소농도는 점차 증가하여 최고 산소농도를 나타낸 후 산소농도가 다시 감소하였다가 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 초기에는 이분해성 물질의 분해가 어느 정도 이루어진 시점에서 최고 산소농도를 나타낸 후 중분해성 물질의 분해가 진행되는 시점에서 다시 산소를 이용하기 때문일 것이다.
3. 드라이포그와 중력을 이용한 수분 주입방식을 비교한 결과 드라이포그의 경우 미세수분 입자가 공기의 흐름과 같이 폐기물층 공극을 이동하여 비닐/플라스틱과 같은 필름층이 존재하여도 기존의 수분 주입방식보다 더욱 수분을 균등하게 분포하였으며, 이러한 수분의 균등 분포는 폐기물의 분해효율을 더욱 높일 수 있는 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부 차세대에코이노베이션기술개발사업인 “이동식 매립지 정비 및 선별 가연물 연료화 기술 실증”과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

1. Heyer, K.-U., Hupe, K., Ritzkowski, M. and Stegmann, R., “Pollutant Release and Pollutant Reduction - Impact of the Aeration of Landfills”, *Waste Management*, 25(4), pp. 353-359. (2005).
2. Lee, N., Kusuda, T., Shimaoka, T., Matsufuji, Y. and Hanashima, M., “Pollutant Transformations in Landfill Layers”, *Waste Management and Research*, 12(1), pp. 33-48. (1994).
3. Prantl, R., Tesar, M., Huber-Humer, M. and Lechner, P., “Changes in Carbon and Nitrogen Pool during In-situ Aeration of Old Landfills under Varying

- Conditions”, *Waste Management*, 26(4), pp. 373~380. (2006).
4. Rich, C., Gronow, J. and Voulvoulis, N., “The Potential for Aeration of MSW Landfills to Accelerate Completion”, *Waste Management*, 28(6), pp. 1039~1048. (2008).
 5. Lee, N. H., “Improvement of Post-care System for Solid Waste Landfills”, *Korea Environment Resources Corporation*, pp. 98~103 (2008).
 6. Ritzkowski, M., Heyer, K.-U. and Stegmann, R., “Fundamental Processes and Implications during In Situ Aeration of Old Landfills”, *Waste Management*, 26(4), pp. 356~372. (2006).
 7. Ritzkowski, M. and Stegmann, R., “Generating CO₂-credits through Landfill In Situ Aeration”, *Waste Management*, 30(4), pp. 702~706. (2010)
 8. Park, J. K., Lee, N. H. and Yoon, S. P., “Change in Biodegradability of Landfilled Waste by Field-Scale Aerobic Landfill Stabilization”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 28(3), pp. 242~248. (2011).
 9. Yoon, S. P., Kim, H. W., Lee, N. H., Kim, K. and Lee, B. S., “Change of Leachate Characteristics at Aerobic Landfill Lysimeter with Different Air Flow-rate”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 29(3), pp. 275~280. (2012).
 10. Park, J. K., Lee, N. H. and Kim, N. J., “The Effect of Air Injection Quantity on Stabilization of Screened Soil in Aerobic Bioreactor Landfill”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 12(1), pp. 104~109. (2004).
 11. Yoon, S. P., Zhao, X., Lee, N. H., Jeon, Y. H., Byun, Y. D., Ahn, Y. M. and Min, J. H., “A Field Study on Early Stabilization of Waste Landfill Using Air Injection and Leachate Recirculation”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 18(2), pp. 45~54. (2010).
 12. Kim, H. J. and Lee, N. H., “Effect of Oxygen and Moisture on Stabilization of Municipal Solid Wastes in Landfill”, *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association*, 14(1), pp. 139~150. (2006).
 13. Kim, K., Jeong, S. R., Yoon, S. P., Lee, B. S. and Lee, N. H., “The Suggestion of a Pre-stabilization Technology for Sustainable Solid Waste Landfill”, *Proceedings of the 2011 Autumn Conference of the Korea Society of Waste Management*, pp. 489~491. (2011).
 14. Kim, Y. H., Park, H. S. and Choi, Y. H., “Mean Size of Droplets Ejected from Humidifier and Distributions of Relative Humidity as Affected by Different Humidifying Methods in Graft-taking Enhancement System”, *Journal of Bio-Environment Control*, 12(1), pp. 12~16. (2003).
 15. Pommier, S., Chenu, D., Quintard, M. and Lefebvre, X., “Modelling of Moisture-dependent Aerobic Degradation of Solid Waste”, *Waste Management*, 28(7), pp. 1188~1200. (2008).
 16. Kallel, A., Matsuto, T. and Tanaka, N., “Determination of Oxygen Consumption for Landfilled Municipal Solid Wastes”, *Waste Management and Research*, 21(4), pp. 346~355. (2003).
 17. Haug, R., “The Practical Handbook of Compost Engineering”, *Lewis Publishers, Boca Raton*, pp. 385~436. (1993).
 18. Petric, I. and Selimbašić, “Development and validation of mathematical model for aerobic composting process”, *Chemical Engineering Journal*, 139(2), pp. 304~317. (2008).
 19. Křivan, V., “The ideal free distribution and bacterial growth on two substrates”, *Theoretical Population Biology*, 69(2), pp. 181~191. (2006).
 20. Kim, H. J., Jung, S. R., Park, J. K. and Lee, N. H., “Evaluation of Anaerobic Biodegradability of Organic Waste Considering Diauxic Growth”, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 25(7), pp. 652~658. (2008).