

# 바이오리액터 매립공법의 폐기물 매립지에 적용가능성 평가를 위한 침하특성 분석

## Analyses of Settlement Characteristics Evaluating the Applicability of Bioreactor Landfills on MSW Landfills

조 영 석<sup>1</sup> Jo, Young-Seok

장 연 수<sup>2</sup> Jang, Yeon-Soo

### Abstract

In order to analyze the effect of applying the bioreactor landfills on the waste landfill for acceleration of waste biocompression, a settlement experiment was performed. The secondary compression indices ( $C_a$ ) were analyzed, and compared with the results of experimental studies conducted in other countries. Analyses of  $C_a$  from the experiment showed that the recirculation method of mixing leachate and FWL could accelerate the waste settlement as much as 2.9 times and 2 times more than the leachate recirculation and the sanitary landfills due to additional biocompression generated by the organic matter in FWL. The  $C_a$  in this study was smaller than the  $C_a$  of the other studies due to the low organic content of the waste in accordance with domestic waste policies to reduce food waste. The relation between biodegradable waste content and  $C_a$  was analyzed. The  $C_a$  of the waste was shown to be sensitive to biodegradable waste content, and become higher as the content of the biodegradable waste increases.

### 요 지

폐기물 매립지에 바이오리액터 매립공법을 적용하는 것이 폐기물의 생물학적 압축 촉진에 미치는 영향을 분석하기 위하여 실내침하실험을 수행하고, 그 결과 구한 2차 압축지수( $C_a$ )를 국외연구결과와 비교하였다. 실내침하실험의 2차 압축지수들을 분석한 결과 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환하는 방법은 음폐수 내 유기물질이 추가적인 생물학적 압축을 유발하며 침출수 재순환과 위생매립공법보다 폐기물 침하를 각 2배, 2.81배 가속화할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서 사용한 폐기물의 2차 압축지수는 국외연구 폐기물의 2차 압축지수보다 작았는데 그 이유는 음식물 쓰레기를 감소시키기 위한 국내 폐기물 정책에 따라 폐기물 내 유기물 함량이 감소하였기 때문이다. 생분해성 폐기물 함량과 2차 압축지수의 관계를 분석한 결과 폐기물의 2차 압축지수는 생분해성 폐기물 함량에 민감하며 생분해성 폐기물 함량이 증가할수록 커지는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Biocompression, Bioreactor landfills, Secondary compression index ( $C_a$ ), Waste landfill

1 정회원, 동국대학교 건설환경공학과 박사후 과정 (Member, Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dongguk Univ.)

2 정회원, 동국대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dongguk Univ., Tel: +82-2-2260-3355, Fax: +82-2-2266-8753, [ysjang@dongguk.edu](mailto:ysjang@dongguk.edu), Corresponding author, 교신전자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

매립지 주변 토양오염과 악취와 같은 지반환경오염을 예방하기 위한 위생매립공법(sanitary landfills)은 매립지 내부로 수분침투를 최소화함에 따라 폐기물 매립지의 건조화를 가져온다. 이러한 건조화는 유기물질의 생물학적 압축을 지연시켜 매립지 운영종료 후(post-closure)에도 폐기물 침하가 장기간 발생하고 매립지의 안정성 확보도 늦어지게 된다(Marques et al., 2003; Hossain et al., 2009). 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위하여 매립지 내부로 침출수를 재순환하여 매립지 내 미생물 활동을 증대시킴으로써 폐기물의 생물학적 압축을 촉진하는 바이오리액터 공법에 관한 연구가 진행 중에 있다(Gabr and Varelo, 1995; Yuen and Style, 2000; Olivier and Gourc, 2007; Bareither et al., 2012).

바이오리액터 매립공법(bioreactor landfills)의 요건에는 폐기물의 적정수분유지, 미생물이 활동하기 좋은 적정 pH 값의 조절과 추가적인 영양분 공급 등이 있다(El-Fadel et al., 1999; Hossain et al., 2003; Swati and Joseph, 2008; Abichou et al., 2013; Bareither et al., 2013). 바이오리액터 매립공법의 적용은 폐기물에 침출수가 저장되는 효과와 매립지 침하속도의 증가로 인한 매립용량의 증가, 위생매립지보다 빠른 폐기물의 안정화, 낮은 사후 관리비용 등의 장점을 가져온다(Reinhart and Townsend, 1998; US EPA, 2020).

국내의 경우 대부분의 매립지가 위생매립공법으로 운영되고 있다. 바이오리액터 공법이 수도권 제2매립지 일부 폐기물 블록에 한하여 시험운영 되었지만(SLC, 2011), 해당 매립지 블록 폐기물은 유기물질이 기분해되어 바이오리액터 매립공법의 생물학적 분해 촉진에 위한 적용가능성을 평가하기에 제약이 있었다.

본 연구에서는 바이오리액터 공법을 폐기물 매립지에 적용하는 것이 폐기물의 생물학적 압축에 미치는 영향을 분석하기 위하여 국내 매립지 폐기물의 물리적 조성(SLC, 2015)을 반영한 실내침하실험을 모형매립조를 이용하여 514일간 수행하였다. 실험결과는 국외연구자들이 실내 또는 현장에서 수행한 연구결과와 비교하여 2차 압축지수에 영향을 미치는 요인을 분석하고 폐기물의 유기물질 함량 즉 생분해성 물질 함량(biodegradable waste content)에 따른 2차 압축지수( $C_a$ )의 변화를 검토하였다.

## 2. 폐기물의 침하메커니즘

폐기물의 침하거동은 크게 응력의존적(stress-dependant)으로 발생하는 침하와 시간의존적(time-dependant)으로 발생하는 침하로 구분할 수 있다. 응력의존적인 침하는 폐기물을 매립지에 포설한 후 다짐작업 과정에서 수 시간 내지 수 일내에 발생하는 반면 시간의존적인 침하거동은 폐기물 입자의 재배열, 큰 공극이 붕괴하는 물리역학적인 과정과 유기물질의 생물학적인 분해와 같은 생화학적인 과정이 장기적으로 발생하고 폐기물 매립지에서는 수 개월에서 수 십년동안 일어난다(Park and Lee, 1997; El-Fadel and Khoury, 2000; Marques et al., 2003; Gourc et al., 2010).

폐기물의 시간의존적인 침하거동, 즉 2차 침하의 척도인 2차 압축지수(secondary compression index,  $C_a$ )는 식 (1)을 이용하여 산정할 수 있고 폐기물의 생물학적 분해(biodegradation) 잠재력과 관계가 있다. Sharma and De(2007)와 Bareither and Kwak(2015)은 일반적으로 유기물의 함량이 높은 폐기물일수록 2차 압축지수( $C_a$ )의 값이 크게 나오는 경향을 보인다고 보고한 바 있다.

$$C_a = \frac{S_{TD} \times (1 + e_0)}{H \times \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $C_a$ 는 2차 압축지수,  $S_{TD}$ 는 시간의존적인 2차 침하량,  $e_0$ 는 초기간극비,  $H$ 는 폐기물 매립고,  $t_1$ 은 2차 침하가 시작된 시간(day),  $t_2$ 는 2차 침하가 발생한 이후의 경과한 시간(day)이다.

## 3. 실험 방법 및 내용

침출수 재순환 및 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환하는 바이오리액터 매립공법이 폐기물의 생물학적 분해촉진과 침하에 미치는 영향을 검토하기 위하여 모형매립조를 이용한 실내침하실험을 514일 동안 수행하였다. 모형매립조는 외경 20cm, 내경 19cm, 높이 86cm 크기로 제작되었다. 매립조는 하부부터 10cm 두께의 자갈층, 63cm 높이의 폐기물층, 7cm의 복토재층, 6cm의 자갈층 순으로 구성되었다. 여기서, 실제 수도권 제2매립지의 폐기물층과 복토재 설계높이는 각 4.5m, 0.5m이다. 이에 기반하여 모형매립조의 폐기물층과 복토재의

높이(각 63cm, 7cm)는 실제 현장의 비율인 9:1을 반영하여 제작하였다. 하부 자갈층은 침출수 배수목적, 상부 자갈층은 모형매립조로 주입하는 침출수를 고르게 분배하는 목적이 있다. 자갈은 골재 체가름 분석을 수행하여 3/8번체(10mm)와 4번체(4.76mm)사이의 자갈을 이용하였다. 복토재는 주문진 표준사를 이용하였다(Fig. 1).

모형매립조에 채워진 폐기물의 총 무게는 6,003g이었고 모형매립조별 폐기물의 초기 두께는 62.9cm, 62.8cm, 62.8cm이며 전체단위중량( $\gamma_t$ )은 336.8kg/m<sup>3</sup>, 337.3kg/m<sup>3</sup>, 337.3kg/m<sup>3</sup> 이었다. 모형매립조의 폐기물은 2002년도부터 2014년도까지 수도권 제 2매립지에 매립된 폐기물 종류와 비율을 고려하여 제작하였으며 폐기물 중 생분해성 물질은 음식물 3.1%, 종이 12.1%, 나무 20.5%, 섬유 2.0%이고 나머지는 플라스틱, 금속, 유리, 흙, 벽돌과 같은 난분해성 물질이다(Table 1). 폐기물 중 음식물, 종이, 나무, 섬유, 플라스틱은 직경 1~5mm, 벽돌은 직경 19~25mm 크기로 잘게 부수어 투입하였고, 금속과 유

리는 직경 10~30mm 크기의 것을 사용하였다. 흙은 화강풍화토를 사용하였고 체분석 결과 세립토 함량은 4%이고 균등계수( $C_u$ )는 7.14, 곡률계수( $C_g$ )는 0.78로 통일분류법 상 입도양호한 모래(SW)로 평가되었다.

폐기물의 비중( $G_s$ )은 Table 1의 모형매립조에 채운 폐기물 구성비율과 실내비중시험을 수행하여 결정한 구성물별 비중값을 이용하였고  $G_s=2.008$ 로 계산되었다. 실험초기 폐기물의 함수율(moisture content)을 폐기물의 생물학적 분해에 최적 함수율인 포장용수량에 도달시키기 위하여 모형매립조에 증류수를 가득 채운 후 3일 동안 중력배수 시켰고 그 결과 함수율은 43.40~44.74%의 범위(평균 43.93%)로 측정되었다. 매립조별 폐기물의 초기함수율을 함수비와 함수율의 관계인 식 (2)를 이용하여 함수비(water content)로 변환한 결과 76.68~80.96%(평균 78.36%)로 산정되었다. 폐기물의 초기간극비( $e_0$ )는 앞서 결정한 폐기물의 비중, 함수비, 전체단위중량을 식 (3)에 대입하여 계산하였고  $e_0=9.789, 9.562, 9.517$ 로 산정되었다(Table 2).

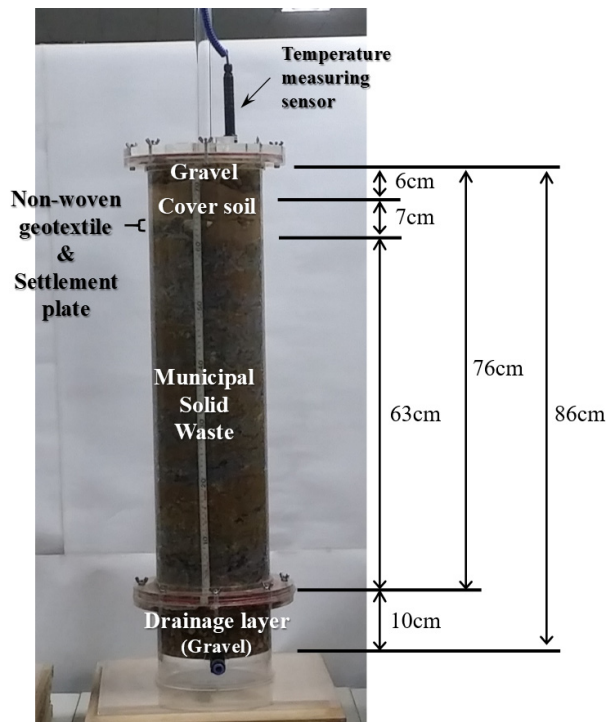


Fig. 1. The lysimeter used in the experiment

$$\omega = \frac{\omega'}{1 - \omega'} \quad (2)$$

$$e_0 = \frac{(1 + w) G_s \gamma_w}{\gamma_t} - 1 \quad (3)$$

여기서,  $\omega$ 는 함수비(%),  $\omega'$ 는 함수율(%),  $e_0$ 는 폐기물의 초기간극비,  $G_s$ 는 폐기물 비중,  $\gamma_w$ 는 물의 단위중량,  $\gamma_t$ 는 폐기물의 전체단위중량이다.

실험에서 수분공급조건(liquid management)은 위생매립조건 모사, 침출수 재순환, 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환하는 3가지로 구분하였다. 수분공급 및 재순환은 각 매립조별 폐기물을 포장용수량에 도달시킨 후 511일간 수행하였고 모형매립조에 공급 또는 재순환한 전체 수분량과 음폐수 주입량, 수분공급방법을 Table 2에 나타내었다.

실험결과 측정된 각 모형매립조별 폐기물 침하량을 Table 2에 나타내었고 경과시간에 따른 침하율(vertical

Table 1. Contents, weight, percentage, and specific gravity of waste used in this experiment

Contents	Food	Paper	Wood	Textile	Plastics	Metal	Glass	Soil	Brick	Sum
Weight (g)	186	728	1,230	118	916	94	116	1,401	1,105	6,003
Percentage (%)	3.1	12.1	20.5	2.0	15.3	1.6	1.9	23.3	18.4	100.0
Specific gravity ( $G_s$ )	1.050	1.595	1.492	1.455	1.244	8.811	2.430	2.552	2.593	-

Table 2. Weight, thickness, total unit weight, specific gravity, water content, initial void ratio of waste, total liquid & total FWL in the lysimeters, and the conditions of supplying liquid

Characteristic	Lysimeter 1	Lysimeter 2	Lysimeter 3
Waste weight (g)	6003		
Waste thickness (cm)	62.9	62.8	62.8
Total unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	336.8	337.3	337.3
Waste specific gravity ( $G_s$ )	2.008		
Water content (% weight basis)	80.96	77.43	76.68
Initial void ratio ( $e_0$ )	9.789	9.562	9.517
Total liquid added (L)*	48.6	30.84 <sup>a</sup>	33.04 <sup>b</sup>
Total FWL added (L)	–	–	6.6
Settlement (cm)	0.7	1.0	2.0
Vertical strain (%)	1.11	1.59	3.18
Liquid management	Sanitary landfills	Leachate recirculation	Leachate+FWL recirculation

<sup>a</sup>Total amount of leachate recirculation; <sup>b</sup>Total recirculation amount of leachate mixing FWL

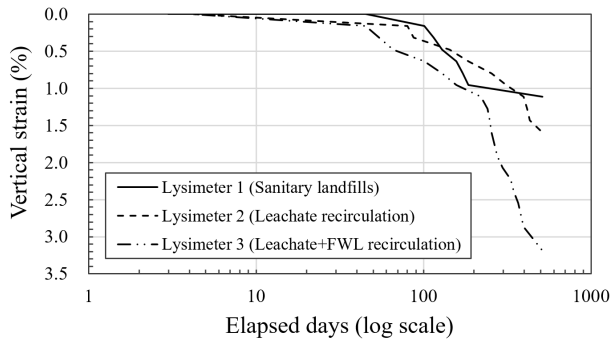


Fig. 2. Waste settlement curves over 514 days based on the liquid management

strain)은 Fig. 2에 보였다. 폐기물 침하량과 초기간극비를 식 (1)에 대입하여 2차 압축지수( $C_a$ )를 산정하였고, 2차 침하가 발생한 시간( $t_1$ )은 2차 침하가 폐기물의 포장용수량에 도달시키기 위하여 중력배수를 실시한 3일의 절반인 1.5일로 설정하였다. 그 결과 모형매립조 운영방법별로 위생매립공법인 경우  $C_a=0.047$ , 침출수를 재순환한 경우  $C_a=0.066$ , 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환한 경우는  $C_a=0.132$ 로 산정되었다(Table 3). 2차 압축지수( $C_a$ )를 비교해보았을 때 침출수에 음폐수를 혼

Table 3. Size & operation condition of lysimeters, moisture content of waste, content of biodegradable waste, initial void ratio & secondary compression index of waste used in this experimentation and the experimental studies performed in other countries

References	Lysimeter		Moisture content (%)	Operation condition <sup>a</sup>	Content of biodegradable waste (%)					Initial void ratio ( $e_0$ )	Secondary compression index ( $C_a$ )	
	Diameter (cm)	Height (cm)			Easily	Moderate			Total (%)			
						Papers	Textiles	Wood				Subtotal
This study	19	86	44.74	S	3.1 <sup>b</sup>	12.1	2.0	20.5	34.6	37.7	9.789	0.047
			43.64	B (Leachate)							9.562	0.066
			43.40	B (F.W.L+ Leachate)							9.517	0.132
Gabr and Valero (1995)	7.1~7.6	15.2~30.5	30~130	S	0.0	2.0	23.0	9.0	34.0	34.0	1.036~2.597	0.040~0.073
Olivier and Gourc (2007)	1m×1m×1m		16.3	S	27.5 <sup>c</sup>	27.5	0.0	0.0	27.5	55.0	0.92	0.070
			42.9	B							1.04	0.394
Bareither et al. (2012)	61	90	37.9	S (dry)	11.8 <sup>b</sup>	56.8	2.3	–	59.1	70.9	7.645	0.303
			63.5	B (biotic)							7.688	2.259
Yuen and Style (2000)	Field test (180m×75m×8m)		20~165	S	23.0 <sup>b</sup>	12.0	5.0	–	17.0	40.0	1.22	0.062
				B								0.084
												0.120

<sup>a</sup> S and B denote sanitary landfills and bioreactor landfills, respectively; <sup>b</sup> Food; <sup>c</sup> Consist of grass 5.5%, leaves 5.5%, vegetables & fruits 8.8%, uncooked rice 4.4%, and raw-meat 3.3%

합하여 재순환하는 것은 침출수를 재순환하는 경우와 위생매립공법을 사용하는 것보다 각 2배, 2.81배 폐기물 침하를 가속화할 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 비교·분석

국외연구자들이 수행한 실내침하실험 또는 파일럿 규모 현장침하실험 중 모형매립조의 크기와 운영방법, 폐기물의 함수율, 생분해성 폐기물 함량, 2차 압축지수를 Table 3에 나타내었고 본 절에 해당 연구를 개략적으로 소개한 후 본 연구에서 수행한 실험결과와 비교·분석하였다.

##### 4.1 국외에서 수행된 실내침하실험 또는 파일럿 규모 현장침하실험

Gabr and Valero(1995)는 미국 펜실베이니아주 Exeter Township, Berks County에 위치한 Pioneer Crossing 매립지에서 채취한 폐기물을 이용한 실내 1-D 압밀시험을 수행하여 폐기물의 침하특성을 파악하였다. 폐기물은 매립된 지 15~30년이 경과하였고 구성물 중 음식물, 가정용 폐기물, 종이류는 이미 분해되고 플라스틱, 고무, 섬유, 나무, 유리류 등만 남아 있었다. 폐기물의 함수율은 매립지 표면부터 심도가 깊어짐에 따라 30%에서 최대 약 130%까지 측정되었다. 시험기에 주입한 폐기물 샘플의 초기간극비는  $e_0=1.036\sim 2.597$ 이고, 압밀 시험결과 폐기물의 2차 압축지수는  $C_a=0.040\sim 0.073$ 로 산정되었다.

Olivier and Gourc(2007)는 침출수 재순환이 폐기물의 생물학적 분해에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모형매립조를 이용한 실내침하실험을 수행하였다. 매립조는 침출수를 재순환하는 바이오리액터 매립공법과 위생매립공법으로 운영되었다. 매립조에 주입된 폐기물은 낱고기, 야채, 과일 등 생분해성 폐기물(biodegradable waste) 55%와 자갈, 플라스틱 등 불활성 폐기물(inert waste) 45%로 구성되었다. 함수율은 침출수 재순환을 수행한 결과 42.9%로 산정되었다. 실험결과 바이오리액터 매립공법을 적용한 매립조 폐기물의 2차 압축지수는  $C_a=0.394$ , 위생매립공법이 적용된 매립조 폐기물의 2차 압축지수는  $C_a=0.07$ 로 산정되었다.

Bareither et al.(2012)는 미생물의 활동이 폐기물 분해에 미치는 영향을 규명하기 위하여 미국 노스캐롤라이나

주 Wake County의 환적장(transfer station)에서 수집한 폐기물과 모형매립조를 이용한 실내침하실험을 수행하였다. 실험은 별도로 수분을 공급하지 않는 조건(dry)과 침출수를 재순환하는 조건(Biotic)으로 구분하여 수행되었다. 실험결과 침출수를 재순환한 모형매립조 폐기물(biotic)의 2차 압축지수는  $C_a=2.259$ , 수분을 공급하지 않는 경우(dry)의 2차 압축지수는  $C_a=0.303$ 로 나타났다.

Yuen and Style(2000) 호주 멜버른(Melbourne)에서 남동쪽으로 35km 떨어진 곳에 위치한 Lyndhurst 위생매립지에서 현장규모(full-scale)의 폐기물 침하실험을 수행하여 침출수 재순환이 폐기물의 생물학적 분해에 미치는 영향을 분석하였다. 실험은 위생매립공법으로 운영되는 2개의 폐기물 셀과 침출수를 재순환하는 바이오리액터 매립공법으로 운영되는 1개의 셀에서 수행되었다. 셀 1개의 크기는 가로 180m, 세로 75m, 높이 8m로 4개 폐기물 단으로 구성되었다. 실험결과 침출수를 재순환하는 경우 2차 압축지수는  $C_a=0.120$ , 위생매립공법의 경우 2차 압축지수는 평균  $C_a=0.073$ 으로 산정되었다.

##### 4.2 생분해성 폐기물 함량과 2차 압축지수 간의 관계 분석

매립폐기물은 생물학적 분해 용이성에 따라 주방쓰레기, 잡초류 등과 같이 분해가 용이한 성분(easily biodegradable), 종이, 섬유류 목재 등의 중위급 분해성분(moderately biodegradable), 플라스틱 등과 같은 난분해성분(hardly degradable)으로 나눌 수 있다(Jang and Lee, 2000). 폐기물의 2차 침하는 분해가 용이한 성분과 중위급 분해성분인 유기물질의 생물학적 분해가 지배하므로(Park and Lee, 1997; Hossain et al., 2003; Swati and Joseph, 2008) 본 절에서는 폐기물 중 분해가 용이한 성분함량과 중위급 분해성분 함량을 생분해성 폐기물 함량(content of biodegradable waste, % $_{EB+MB}$ )으로 정의하고 2차 압축지수( $C_a$ )와의 관계를 분석하였다(Fig. 3).

본 연구에서 수행한 침하실험 결과(Fig. 3의 This study 참조)를 보면 침출수 또는 침출수에 음폐수를 혼합하여 폐기물에 재순환하는 것은 위생매립공법을 적용할 때보다 폐기물 침하를 각각 1.4배, 2.81배 가속시킬 수 있는 것으로 평가되었다. 또한, 침출수에 음폐수를 혼합하여 폐기물에 재순환하는 것은 침출수를 재순환하는 경우보다 폐기물 분해를 2배 가속화할 수 있는 것으로 평

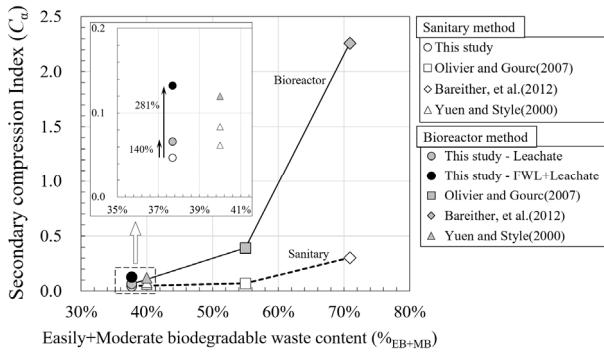


Fig. 3. Comparison of secondary compression indices,  $C_a$ , with the content of biodegradable waste,  $\%_{EB+MB}$

가되었는데 이는 음폐수 내 유기물질이 분해 미생물 활동에 필요한 추가 영양분으로 작용했기 때문으로 판단된다.

모든 연구결과에서 바이오리액터 매립공법을 적용하는 것이 위생매립공법보다 동일한 생분해성 폐기물 함량( $\%_{EB+MB}$ ) 기준 하 2차 압축지수( $C_a$ )가 높게 나타났고, 생분해성 폐기물 함량이 증가할수록 폐기물의 2차 압축지수는 민감하게 반응하며 증가하는 추세를 나타냈다 (Fig. 3).

#### 4.3 폐기물의 2차 압축지수에 대한 영향요인 분석

폐기물의 2차 침하를 Sowers(1973)는 Terzaghi의 압밀이론에 기반을 두고 2차 압축지수( $C_a$ )로 표현한 바 있다. 이 후 Bjarngard and Edger(1990)는 2차 침하를 역학적인 크리프에 의한 압축( $C_{aM}$ )과 생물학적 압축( $C_{aB}$ )으로 구분하였다. 하지만 다단계 폐기물 매립지의 경우 상단부의 매립과정에 따른 응력의존적인 1차 침하가 하단부의 2차 침하에 영향을 끼치며 각 단별 2차 침하를 세분화하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 전 세계 지반공학자들은 Sowers 모델을 이용하여 폐기물의 침하특성인 2차 압축지수를 이용하여 폐기물 매립지의 침하거동을 분석하고 있다. 본 절에서는 Table 3에 나타난 연구들의 초기간극비( $e_0$ )와 2차 압축지수( $C_a$ )를 Sowers(1973)가 제안한  $e_0$ - $C_a$ 관계 그래프(Fig. 4)에 도시하고 분석하였다.

본 연구에서 수행한 실험결과 폐기물의 초기간극비는  $e_0=9.562\sim 9.789$ 로 Bareither et al.(2012)이 실험에 사용한 폐기물의 초기간극비( $e_0=7.357\sim 7.688$ )보다 크지만 2차 압축지수( $C_a$ )는 상대적으로 낮게 산정되었는데 이러한 차이는 연구에 사용된 폐기물의 생분해성 물

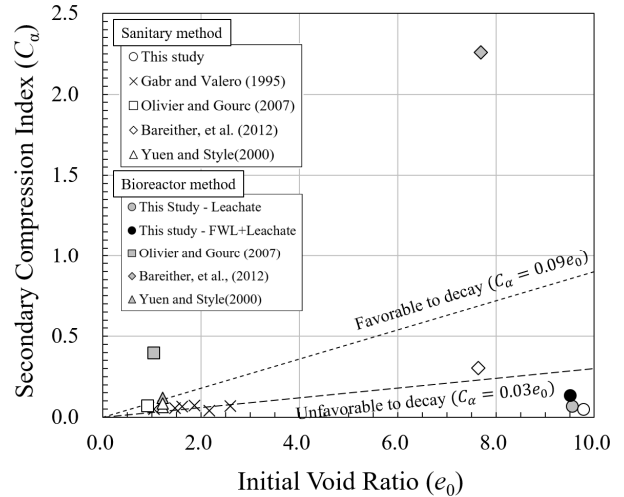


Fig. 4. Comparison of secondary compression indices,  $C_a$ , with initial void ratio,  $e_0$

질함량( $\%_{EB+MB}$ ) 차이에 기인한다. 본 실험에 사용된 폐기물은 분해가 용이한 성분인 음식물이 3.1%, 중위급 분해성분 중 종이 12.1%, 생물학적 분해능이 낮은 목재가 20.5% 포함된 반면 Bareither et al.(2012)의 폐기물 구성물질 중 음식물은 11.8%, 종이는 56.8%로 본 연구 조건보다 각각 약 4배, 5.5배 더 많이 포함되며(Table 3 참조) 폐기물의 생물학적 압축이 발생할 수 있는 유리한 조건을 가지고 있다.

또한, Olivier and Gourc(2007)이 실험에 사용한 폐기물의 초기간극비는  $e_0=0.92\sim 1.04$ 로 본 연구 폐기물 초기간극비( $e_0=9.562\sim 9.789$ ) 보다 1/9 수준이지만 2차 압축지수는 1.49~5.97배 높았다. 이러한 이유는 Olivier and Gourc(2007)이 사용한 폐기물에는 초지, 나뭇잎, 야채 및 과일, 생쌀, 날고기와 같은 분해가 용이한 성분이 27.5%, 종이 27.5% 포함하고 있어 본 실험에서 사용한 폐기물보다 분해가 용이한 성분은 8.87배, 종이는 2.3배 많이 포함하였기 때문이다.

본 실험에 사용한 폐기물 내 음식물 및 종이와 같은 유기물질 비율이 낮고 플라스틱과 같이 난분해성 폐기물 비율이 높은 이유는 실험에 사용한 폐기물이 2002년도부터 2014년도까지 수도권 제 2매립지에 매립된 폐기물의 물리적 조성(SLC, 2015)을 고려하여 제작되었고, 실제 제 2매립지에 반입된 폐기물 내 생물학적 압축성이 큰 음식물 함량은 2005년 음식물 직매립 금지, 2013년 음식물 쓰레기 종량제가 실시됨에 따라 급감하였기 때문이다.

Fig. 3의 결과를 기반으로 볼 때 만약 국내 폐기물 매

립지 내 음식물 함량이 Bareither et al.(2012)의 폐기물과 동일한 수준이고 음폐수를 침출수에 혼합하여 재순환하는 기법을 적용한다면 2차 압축지수는 Bareither et al.(2012)이 보고한 2차 압축지수보다 더 크게 산정될 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 바이오리액터 매립공법을 폐기물 매립지에 적용하는 것이 폐기물의 생물학적 압축 촉진에 미치는 영향을 분석하기 위하여 모형매립조를 이용한 실내침하실험을 수행하고 국외에서 수행된 연구결과들과 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내침하실험결과 폐기물의 침하특성인 2차 압축지수( $C_u$ )는 모형매립조 운영방법별로 위생매립공법인 경우  $C_u=0.047$ , 침출수를 재순환한 경우  $C_u=0.066$ , 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환한 경우는  $C_u=0.132$ 로 산정되었고 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환하는 것은 침출수를 재순환하는 경우와 위생매립공법을 사용하는 것보다 폐기물 침하를 각 2배, 2.81배 가속화할 수 있는 것으로 나타났다. 침출수에 음폐수를 혼합하여 폐기물에 재순환하는 것이 다른 조건들에 비하여 폐기물의 생물학적 압축이 가장 높은 것은 음폐수 내 유기물질이 폐기물을 분해하는 미생물 활동에 필요한 추가 영양분으로 작용했기 때문으로 판단된다.
- (2) 폐기물의 생분해성 폐기물 함량( $\%_{EB+MB}$ )과 2차 압축지수( $C_u$ )의 관계를 분석한 결과 동일한 생분해성 폐기물 함량기준 위생매립공법보다 바이오리액터 매립공법을 사용할 때 2차 압축지수가 높았다. 또한, 생분해성 폐기물 함량이 증가할수록 폐기물의 2차 압축지수는 민감하게 반응하며 증가하는 추세를 나타냈다
- (3) 본 실험에서 사용한 폐기물의 초기간극비는  $e_0=9.562 \sim 9.789$ 로 국외연구에서 사용한 폐기물의 초기간극비보다 상대적으로 큰 반면 실험결과 2차 압축지수는 오히려 낮게 산정되었다. 이는 사용한 폐기물이 국내 수도권 제 2매립지의 폐기물 물리적 조성을 고려하여 제작된 바 국외연구자들이 사용한 폐기물보다 유기물질 함량이 적어 상대적으로 생물학적 압축이 발생하기에 불리한 조건을 가졌기 때문이다. 즉,

- 국내 폐기물 정책이 2005년 음식물 직매립이 금지되고 2013년 음식물 쓰레기 종량제가 실시되어 매립지 폐기물 내 유기물 성분이 급감하였기 때문이다.
- (4) 국내 폐기물 매립지 내 음식물 함량이 국외연구 사례와 동일한 수준이고 본 연구에서 실험한 음폐수를 침출수에 혼합하여 재순환하는 기법을 사용한다면 2차 압축지수는 국외연구에서 보고한 2차 압축지수보다 더 크게 산정될 것으로 사료된다.
  - (5) 본 연구결과와 같이 침출수에 음폐수를 혼합하여 재순환하는 바이오리액터 매립공법을 폐기물 매립지에 도입하는 것은 폐기물의 생물학적 압축을 촉진하여 추가 매립공간 확보, 매립지 조기안정화, 음폐수로 인한 지반환경오염 방지측면에 긍정적인 영향을 끼칠 수 있을 것이다. 또한, 일반적인 바이오리액터 방식으로 사용되는 침출수 재순환법 보다 폐기물 침하가속 측면에서는 더 효율적일 것으로 판단된다.

## 참고문헌 (References)

1. Jang, Y.S. and Lee, G.Y. (2000), "Geoenvironmental engineering", Goomibook.
2. SLC (2011), "A field study of the leachate recirculation in the landfills (Final report)", Sudokwon Landfill Site Management Corp.
3. SLC (2015), "Sudokwon landfill statistics yearbook, 2014", Sudokwon Landfill Site Management Corp.
4. Abichou, T., Barlaz, M.A., Green, R., and Hater, G. (2013), "The Outer Loop Bioreactor: A Case Study of Settlement Monitoring and Solids Decomposition", *Waste Management*, Vol.33, No.10, pp.2035-2047.
5. Bareither CA, Benson CH, Edil TB, and Barlaz MA (2012), "Abiotic and Biotic Compression of Municipal Solid Waste", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.138, No.8, pp.877-888.
6. Bareither, C.A., Benson, C.H., and Edil, T.B. (2013), "Compression of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfills: Mechanical Creep and Biocompression", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.139, No.7, pp.1007-1021.
7. Bareither, C.A. and Kwak, S.B. (2015), "Assessment of Municipal Solid Waste Settlement Models based on Field-scale Data Analysis", *Waste management*, Vol.42, pp.101-117.
8. Bjarngard, A. and Edgers, L. (1990), "Settlement of municipal solid waste landfills", *Proceedings 13th Annual Madison Waste Conference University of Wisconsin, Madison, Wisconsin*, pp. 192-205.
9. El-Fadel, M., Shazbak, S., Saliby, E., and Leckie, J. (1999), "Comparative Assessment of Settlement Models for Municipal Solid Waste Landfill Applications", *Waste management &*

- research, Vol.17, No.5, pp.347-368.
10. El-Fadel, M. and Khoury, R. (2000), "Modeling Settlement in MSW Landfills: A Critical Review", *Critical Reviews Environmental Science Technology*, Vol.30, No.3, pp.327-361.
  11. Gabr, M.A. and Valero, S.N. (1995), "Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.2, pp.241-251.
  12. Gourc, J.P., Staub, M.J., and Conte, M. (2010), "Decoupling MSW Settlements into Mechanical and Biochemical Processes-modeling and Validation on Large Scale Setups", *Waste Management*, Vol.30, No.8-9, pp.1556-1568.
  13. Hossain, M.S., Gabr, M.A., and Barlaz, M.A. (2003), "Relationship of Compressibility Parameters to Municipal Solid Waste Decomposition", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.12, pp.1151-1158.
  14. Hossain, S.M. and Gabr, M.A. (2005), "Prediction of Municipal solid Waste Landfill Settlement with Leachate Recirculation", *GSP 142 Waste Containment and Remediation*, Geo-Frontiers Congress 2005, January 24-26, Austin, Texas, USA.
  15. Hossain, M.S., Penmethsa, K.K., and Hoyos, L. (2009), "Permeability of Municipal Solid Waste in Bioreactor Landfill with Degradation", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.27, No.1, pp.43-51.
  16. Marques, A.C.M., Filz, G.M., and Vilar, O.M. (2003), "Composite Compressibility Model for Municipal Solid Waste", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.4, pp.372-378.
  17. Olivier, F. and Gourc, J.P. (2007), "Hydro-mechanical behavior of Municipal Solid Waste Subject to Leachate Recirculation in a Large-scale Compression Reactor Cell", *Waste Management*, Vol.27, No.1, pp.44-58.
  18. Park, H.I. and Lee, S.R. (1997), "Long-term Settlement behavior of Landfills with Refuse Decomposition", *J. of Resource Management and Technology*, Vol.24, No.4, pp.159-165.
  19. Reinhart, D.R. and Townsend, T.G. (1998), "Landfill Bioreactor design and operation", CRC Press.
  20. Sharma, H.D. and De Anirban (2007), "Municipal Solid Waste Landfill Settlement: Postclosure Perspectives", *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.6, pp.619-629.
  21. Sowers, G.F. (1973), "Settlement of Waste Disposal Fills", *Proceedings 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, Vol.22, pp.207-210.
  22. Swati, M. and Joseph, K. (2008), "Settlement Analysis of Fresh and Partially Stabilised Municipal Solid Waste in Simulated Controlled Dumps and Bioreactor Landfills", *Waste Management*, Vol.28, No.8, pp.1355-1363.
  23. US EPA (2020), "Bioreactors landfill\_What is a Bioreactor Landfill", US EPA, <https://www.epa.gov/landfills/bioreactor-landfills>.
  24. Yuen, S.T. and Styles, J.R. (2000), "Settlement and characteristics of waste at a municipal solid waste landfill in Melbourne", *In ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics.

Received : March 30<sup>th</sup>, 2020

Revised : April 30<sup>th</sup>, 2020

Accepted : May 4<sup>th</sup>, 2020