

# 실험실 규모 폐기물 모의매립조 운전에 관한 고찰

윤석표<sup>†</sup>

## Reviews on the Operation of Lab-scale Waste Landfill Simulation Reactor

Seok-Pyo Yoon<sup>†</sup>

(Received: Mar. 4, 2019 / Revised: Mar. 8, 2019 / Accepted: Mar. 8, 2019)

**ABSTRACT:** In this study, a comprehensive review of the results of the research on the lab-scale waste lysimeter or landfill simulation reactor, which has been conducted in Korea and abroad for the last 20 years, were investigated for the type of operation parameters, the purpose of the research, and the size of the device. From the results, the contents and limitations of lab-scale lysimeter research were discussed, and this can be used as a reference for further research.

**Keywords:** landfill simulation reactor, lysimeter, operation parameters, waste landfill

**초 록:** 본 연구에서는 최근 20년간 국내외에서 연구가 진행되었던 실험실 규모 모의매립조에 관한 연구 결과를 종합적으로 검토하여 운전인자의 종류, 운전목적, 장치의 크기 등을 조사하였다. 이를 통해서 실험실 규모 폐기물 모의매립조를 활용하여 수행할 수 있는 연구 내용과 한계에 대하여 논의하였으며, 이는 추후 관련 연구를 수행하는데 있어서 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

**주제어:** 매립지 모사 반응조, 모의매립조, 운전인자, 폐기물 매립

### 1. 서 론

일상생활과 산업 활동에서 발생하는 폐기물은 재 활용과 에너지 회수 등의 과정을 거친 후에도 일정량은 매립이 불가피하다. 일단 폐기물을 매립하면 폐기물 매립시설 종료 후 30년 이상을 사후관리하여야 한다. 이때 폐기물 매립에 따른 매립지 내부에서의 분해과정과 오염물질의 거동 및 안정화 정도 등을 예측하거나, 모사할 수 있다면 보다 효율적이고 친환경적인 폐기물 관리를 도모할 수 있게 된다.

폐기물 모의매립조(lysimeter) 혹은 매립지 모사 반응조(landfill simulation reactor)란 인위적으로 연구 활동에 편리하게 만든 소규모 매립시설로서 실외에 설치하거나 실내에 설치하여 매립 대상 폐기물이나 매립조건, 매립지 운영인자 등을 달리하였을 때 매립된 폐기물의 분해 특성이 어떻게 되는지를 관찰하기 위한 시설을 말한다. 실외에 대규모로 셀(cell) 규모로 모의매립조를 제작하여 운전하면 가장 이상적이겠으나, 현실적인 여러 가지 어려움으로 인해서 대부분 실험실 규모로 실내에서 PVC나, 스테인리스 스틸 등을 이용하여 최소한 2개 조 이상을 설치하여

<sup>†</sup> 세명대학교 바이오환경공학과 정교수 (Professor, Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University)

<sup>†</sup> Corresponding author(e-mail: [yoonsp@semyung.ac.kr](mailto:yoonsp@semyung.ac.kr))

시간적인 변화에 따른 침출수 및 매립가스, 침하, 내부 온도 변화 등의 특성을 비교하고 있다.

본 연구에서는 최근 20년간 국내외에서 연구가 진행되었던 실험실 규모 모의매립조에 관한 연구 결과를 종합적으로 검토하여 운전인자의 종류, 운전 목적, 장치의 크기 등을 조사하였다<sup>1-26)</sup>. 본 연구에서 논의하는 「실험실 규모」란 일반적인 건축물의 한 층 높이를 감안할 때 모의매립조 높이가 2 m 이내이며, 외부환경(자연 강수, 외기 온도)에 직접적인 영향을 받지 않는 조건을 전제로 하고 있다. 이를 통해서 실험실 규모 폐기물 모의매립조를 활용하여 수행할 수 있는 연구 내용과 한계에 대하여 논의하였으며, 이는 추후 관련 연구를 수행하는데 있어서 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법

국내외에서 이루어진 실험실 규모 모의매립지 연구 논문의 목록을 ‘폐기물 매립지(waste landfill)’과 ‘모의매립조(lysimeter 혹은 landfill simulation reactor)’의 키워드를 이용하여 검색하고, 해당 파일을 학술 DB(전자저널)에서 다운받아 내용을 정리하였다. 동일 연구자가 같은 규격의 모의매립조에서 동일한 폐기물로 후속의 연구를 수행한 경우나, 동남아 지역 등 우리나라와는 관련이 다소 낮은 특정 기후에 초점을 맞춘 매립지 분해 특성에 관한 연구, 실내가 아닌 실외에 모의매립조를 설치한 경우 등에 대한 연구는 조사에서 제외하였다.

국내 학술지로는 한국폐기물자원순환학회지, 유기물자원화, 대한환경공학회지가 가장 많이 인용되었으며, 해외 학술지는 Waste Management가 가장 많이 인용되었으며, 그 외에 Bioresource Technology, Journal of Hazardous Materials, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste 등에서 일부 논문을 활용하였다.

폐기물 모의매립조 제작 및 운전과 관련한 조사한 주요 인자들은 다음과 같다.

- 모의매립조 규격 등 사양 : 높이, 직경, 재질, 시료 채취용 point, 반응기의 일체식/연결식 여부, 침출수 집수 방법, 매립가스 발생량 측정방법 등

- 모의매립조 운전인자 : 인공우수의 종류, 인공우수 주입량, 주입빈도, 주입방법
- 실험기간
- 폐기물 충전방법
- 매립폐기물의 종류: 혼합폐기물, 단일폐기물, 전처리폐기물, 재굴착폐기물, 전자폐기물 등의 첨가
- 측정항목 : 침출수질, 매립가스 발생량 및 성분, 매립지 침하 등
- 실험종료 후 모의매립조 해체 및 매립폐기물에 대한 성분분석 등 물질수지 검토

이러한 각 인자별로 기존의 국내외 연구에서 사용된 수치를 비교하여 평균값과 중간값, 최소값과 최대값 등을 비교하였다. 또한 모의매립조 연구에서 가장 많이 분석된 분석항목들을 검토하고, 다른 연구에서는 많이 검토되지 않았으나 특이하게 다루어진 항목이나 결과가 있으면 아울러 제시하였다. 이를 통해서 실험실 규모 모의매립조 연구의 주된 연구목적과 이를 통해서 달성된 주요결과 및 한계 등을 종합적으로 고찰하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 모의매립조 연구의 목적

모의매립조 연구를 수행한 기존 연구에서 얻고자한 연구목적은 아래에 나열하였다.

#### 3.1.1. 침출수 재순환 등 매립지 운영에 따른 안정화 효과 비교

- 최종복토층 설치가 매립지 안정화에 미치는 영향<sup>3)</sup>
- 공기주입량을 달리하면서 운전하였을 때 발생하는 침출수의 특성 비교<sup>4)</sup>
- 혐기성 소화조의 슬러지 및 침출수를 재순환시킬 때의 거동 조사<sup>5)</sup>
- 질산화된 침출수 재순환 및 잔류유기물을 탄소원으로 이용한 탈질 가능성 평가<sup>3)</sup>
- 음식물 및 소화슬러지 존재여부가 매립가스 발생 특성에 미치는 영향 조사<sup>7)</sup>

- 혐기소화한 침출수의 재순환에 따른 매립가스 생산량 및 조기안정화에 미치는 영향 검토<sup>8)</sup>
- 적층매립시 최적 메탄균 활성 매립층을 얻기 위해 전체 매립층과 활성 매립층간의 적정 높이를 결정<sup>11)</sup>
- 매립연한이 오래된 쓰레기를 혐기성 및 준호기성으로 운영하여 안정화에 미치는 영향 파악<sup>9)</sup>
- 호기성/혐기성 조건에서 침출수 재순환 유무에 따른 침출수질 비교<sup>13)</sup>
- 호기성 미생물을 식중 후 호기성 운전(첫 14일간), 자갈과 혼합, 슬러지 주입, 중간복토, 침출수 재순환을 변화 등을 동시에 시도해서 메탄 생성 및 생물학적 안정화 시간의 단축<sup>14)</sup>
- 폐기물 다짐과 침출수 재순환이 메탄가스 생성에 미치는 영향조사<sup>15)</sup>
- 생활폐기물에 대하여 장기간에 걸친 호기성 매립에 따른 영향 평가<sup>26)</sup>

### 3.1.2. 매립지 굴착 후 재매립한 경우의 환경 영향 비교

- 비위생매립지 굴착폐기물을 충전하여 호기와 혐기성 조건으로 운전하면서 생물학적 안정화 효과 비교<sup>10)</sup>
- 굴착한 매립폐기물을 호기성, 혐기성, 침출수 재순환 등에 의해서 안정화 정도를 평가<sup>17)</sup>

### 3.1.3. 처리기능을 갖는 폐기물 매립지의 기능 평가

- 음폐수 처리수 주입 및 침출수 재순환에 따른 음폐수처리수의 육상처리 가능성 평가<sup>2)</sup>

### 3.1.4. 폐기물 종류에 따른 매립 후 환경영향 비교

- MBP(Mechanical-Biological Pretreatment) 매립전 처리에 의한 매립지 영향 비교<sup>1)</sup>

### 3.1.5. 건설폐기물, 중금속 함유 폐기물 등의 혼합 매립시의 환경영향

- 석고보드가 포함된 건설폐기물과 CCA 처리된

목재를 혼합 매립시 sulfide 농도가 비소의 용출과 중 특성에 미치는 영향 조사<sup>18)</sup>

- 생활폐기물과 함께 전자폐기물을 매립하는 경우의 중금속의 거동 평가<sup>22,25)</sup>
- 건전지를 생활폐기물과 함께 매립한 경우의 중금속 용출량 평가<sup>23)</sup>

## 3.2. 모의매립조의 제작

### 3.2.1. 모의매립조 직경

실험실 규모 모의매립조는 직경이 11~57.2 cm의 범위를 보였으며(n=25), 평균값은 29.5 cm, 중간값 30 cm이었다. 모의매립조의 직경은 매립 대상폐기물의 충전시 막힘 등의 문제가 발생하지 않고 다짐하면서 채워넣을 수 있을 정도로 통로가 확보되어야 하며, 침출수 발생 측면에서 강수량과 침출계수를 감안했을 때 침출수 분석에 필요한 최소한의 시료량을 확보할 수 있는 표면적을 제공할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 모의매립조의 직경이 결정된 것으로 판단된다. 직경이 너무 커지면 매립폐기물의 대표성은 커질 수 있으나, 충전해야할 폐기물의 양이 많아지고, 인공우수 공급시에 보다 많은 노력이 필요하며, 발생한 침출수의 처분 문제가 발생하는 단점이 발생한다.

### 3.2.2. 모의매립조 높이

모의매립조 높이는 실내에 모의매립조를 설치하므로 건물의 층고에 의해 제한된다. 따라서 대부분 2 m 이내로 제한받게 된다(최대값 200 cm, 중간값 135 cm, 최소값 24 cm, n=26). 또한 모의매립조 상단의 인공강우 주입부와 하단의 침출수 채취 부위 등의 높이를 감안하면 실제 폐기물 충전 높이는 165 cm가 최대였다<sup>1)</sup>(최대값 165 cm, 평균값 137.5 cm, 중간값 145 cm, n=17).

Fig. 1은 모의매립조의 직경과 높이 간의 상관관계를 표시하였는데, 둘 간의 상관성은 높지 않은 것으로 나타났다. 이는 직경의 경우 폐기물의 종류, 언고자 하는 침출수 발생량 등을 감안하여 결정하는 반면, 모의매립조 높이는 실내 실험이므로 2 m 이내로 제한되는 조건에서 호기성 방식으로 운전하는

경우는 상대적으로 짧은 높이가 적용되므로, 여러 가지 복합적인 요인에 의해 모의매립조의 높이와 직경이 연구자에 의해 결정됨을 알 수 있다.

3.2.3. 폐기물 충전량 및 충전밀도

폐기물 충전량은 매립폐기물의 성상에 따라 달라진다. 즉, 우리나라에서 음식물류 폐기물 직매립이 허용되던 2005년 이전의 경우에는 매립폐기물에 음식물류 폐기물이 포함된 관계로 겉보기 비중이 높았으며, 이에 따라 매립폐기물 양도 많았으나, 이후 종이와 비닐류가 주된 매립 대상 폐기물이 된 이후에는 겉보기 비중이 작아져서 매립폐기물의 양도 작아졌다. 중국과 동남아시아 지역의 경우에는 현재도 음식물류 폐기물의 비중이 높은 편이다<sup>14,15,19,24</sup>. 폐기물 충전량의 최대값은 175 kg, 평균 53.7 kg, 중간값 24.3 kg, 최소값 3.8 kg이었다(n=19).

생활폐기물의 겉보기 밀도를 125 kg/m<sup>3</sup>로 가정하는 경우 중간값인 24.3 kg의 생활폐기물을 충전하기 위해서는 20 L 종량제 봉투가 10개가 필요하며, 평균값의 경우 22개의 20 L 종량제 봉투가 필요하다. 통계학적으로 t분포에서 시료의 자유도를 무한대로 간주하는 수치가 30인 것을 감안할 때, 20 L 종량제 봉투의 경우 최소한 30개 이상을 시료채취하여 파봉 후 혼합한 것을 충전하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

폐기물의 충전밀도 범위는 최대값 1,000 kg/m<sup>3</sup>, 중간값 595 kg/m<sup>3</sup>, 최소값 191 kg/m<sup>3</sup>이었다(n=20).

3.2.4. 모의매립조의 재질 및 구성

Fig. 2는 모의매립조의 구성을 개략적으로 나타내었다.

모의매립조의 재질은 PVC로 제작된 것이 55%이었으며, 이외에 스테인리스 스틸<sup>15,17,22</sup>, plexiglas<sup>16,19,26</sup>, 아크릴<sup>10,14</sup>, HDPE<sup>25</sup>, 폴리프로필렌<sup>13</sup> 등을 이용한 것으로 조사되었다.

모의매립조는 1단으로 제작하거나<sup>13-17</sup>, 3단으로 조립하여 제작하였다<sup>5</sup>. 3단으로 조립하는 경우 폐기물의 충전시 보다 다짐을 잘 할 수 있다는 점에서 유리하나, 연결부위에서 가스의 누출 등의 우려가 있다.

모의매립조 상단에는 인공강우를 주입하고, 골고

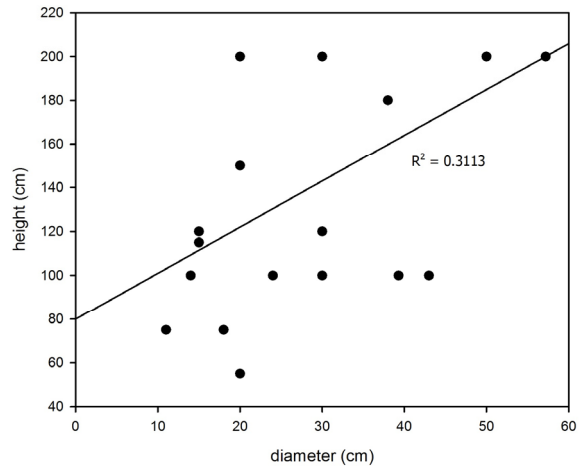


Fig. 1. Correlation between the diameter and height of lab-scale lysimeter.

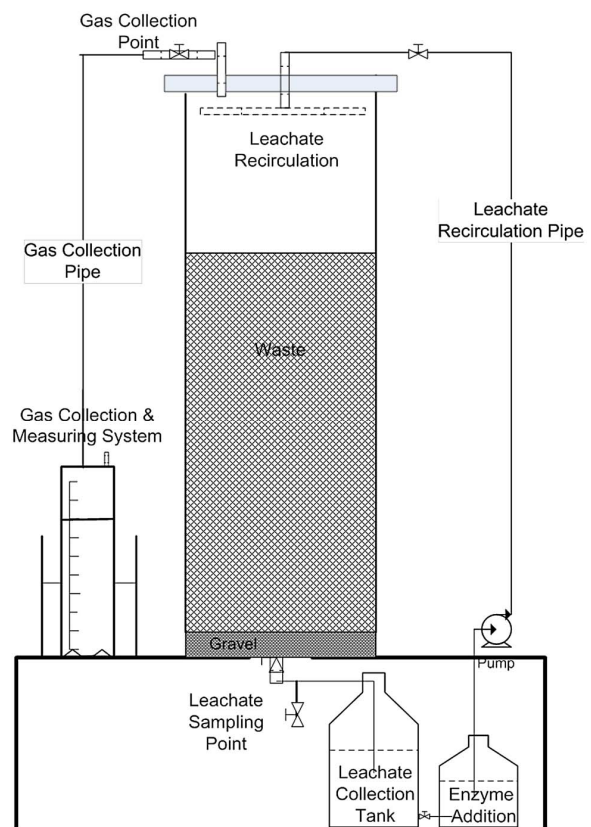


Fig. 2. Example of lab-scale lysimeter.<sup>21)</sup>

Source) Jayasinghe *et al.*, Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 17(4), (2013)

루 분포시킬 수 있는 분배장치가 설치되며, 침하량을 측정하고자 하는 경우에는 매립폐기물층 상단에 모의매립조 내경보다 약간 작은 크기의 철재로 된

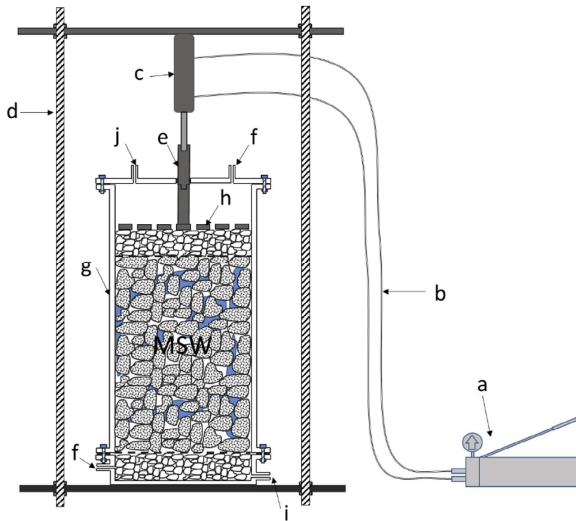


Fig. 3. Lab-scale lysimeter with hydraulic cylinder to apply pressure load on the MSW.<sup>15)</sup>

Source) Ko *et al.*, *Bioresource Technology*, 211, (2016)

원형 고리를 두고, 외부에 자석으로 철제 고리의 위치를 파악하는 방법을 많이 사용하고 있다<sup>1)</sup>.

모의매립조 하단에는 침출수를 집수할 수 있는 배출구를 설치하는데, 혐기성 상태를 유지하기 위해서는 U자 트랩 형태로 물이 잠기는 부분이 있어서 하부에서 공기의 침투가 되지 않는 구조로 설치하여야 한다<sup>9)</sup>.

기타 목적에 따라 모의매립조 상단 혹은 중간부위에서 매립가스를 채취할 수 있는 시료채취공을 설치하기도 한다.

호기성 매립지 운영을 위해서는 모의매립조 하부에 공기 주입을 위한 공기주입부를 설치하거나<sup>4)</sup>, 수직정을 설치하여 상부에서 공기를 주입하여 폐기물 층에 공기가 전달되도록 하였다<sup>26)</sup>.

특이사항으로 매립폐기물의 다짐 효과가 메탄가스 생성에 미치는 영향을 평가하기 위해 모의매립조에 수압을 이용한 수동식 압축장치를 설치한 사례(Fig. 3)가 있었다<sup>15)</sup>.

### 3.3. 모의매립조 운전

#### 3.3.1. 모의매립조의 수와 충전 폐기물의 종류

모의매립조의 수는 연구목적에 따라 달라지는데, 통상적으로 2~4개조가 운영되었으며, 평균은 3.8개,

중간값은 3이었다(n=25). 1개조는 대조군으로 활용되며(혐기성 조건), 나머지 2~3개조는 연구목적에 따라 매립폐기물의 종류가 다르거나 운전방식을 다르게 운영하였다. 경우에 따라서는 같은 조건의 실험을 한 쌍(duplicate)으로 하며, 이 경우 모의매립조의 숫자는 2배로 증가하게 되어 최대 8개의 모의매립조가 사용된 경우가 있었다<sup>16)</sup>.

충전 폐기물의 종류는 매립지 운영조건을 달리하는 경우에는 폐기물 매립지에서 채취한 생활폐기물이 가장 많이 이용되며, 그 이외에 매립되어 매립경과년수가 수년 경과된 폐기물을 굴착하여 사용하거나<sup>9,10,17,20,21)</sup>, 퇴비등 매립전처리된 폐기물을 이용하는 경우도 있었다<sup>1)</sup>.

또한 특수한 매립조건을 모사하기 위한 연구로는 다음과 같은 것들이 있었다.

- 생활폐기물에 전자폐기물을 함께 매립하여 중금속 용출특성 연구<sup>22,26)</sup>
- 생활폐기물에 건전지를 함께 매립한 경우의 중금속 용출량 평가<sup>23)</sup>
- 생활폐기물에 나노 산화아연을 소량 첨가하여 바이오 가스 생산에 미치는 영향 평가<sup>19)</sup>
- 건설폐기물과 석고보드, CCA(Chromated copper arsenate) 목재를 함께 매립하여 비소의 용출 특성 연구<sup>18)</sup>

#### 3.3.2. 인공강우 주입

인공강우 주입 빈도는 주 1회가 가장 많았으며<sup>1-4,8,10)</sup>, 주 2회<sup>5-6)</sup>, 매일<sup>18,23)</sup> 등의 빈도로 주입하였다.

경우에 따라서는 폐기물 충전 초기에 field capacity 수준으로 수분을 주입하고, 이후에는 추가적인 인공강우의 주입은 안하고, 침출수를 재순환하면서 침출수 분석을 위해 사용되는 양 만큼만 탈이온수(deionized water)나 증류수를 보충하기도 하였다<sup>26)</sup>.

이때 주입하는 형태는 년평균 강수량에 기초하여 동일한 양을 주입하는 경우<sup>3,4,25)</sup>와 월평균 강수량에 기초하여 월별로 주입량을 달리하는 경우<sup>1)</sup>로 나눌 수 있다. 월평균 강수량에 기초하면 보다 계절적 요인을 많이 반영할 수 있는 장점이 있지만, 폐기물 충전 및 인공강우 주입 개시시기에 따라 폐기물 충전 후 최초로 침출수가 발생하는 시점까지의 시간

차가 달라질 수 있으며, 겨울철과 같이 인공강우 주입량이 작은 시기에는 발생하는 침출수 양도 작아져서 분석에 필요한 침출수의 확보가 어려울 수가 있다.

인공강우는 증류수, 탈이온수, 수돗물 등이 연구 목적에 따라 사용되었으며, 특별한 목적이 있는 경우에는 음식물류 폐기물 폐수(음폐수)를 주입한 사례<sup>2)</sup>도 있다.

실제 매립지로 침투되는 비율을 나타내는 침출계수의 범위는 최소 0.3, 최대 0.5의 값이 이용되었고, 중간값은 0.35가 적용되었다(n=11). 침출계수를 적용하여 인공강우를 주입하는 경우 폐기물 충전시기와 침출수 발생시기 사이의 시간 간격이 지나치게 길어지므로, 침출수 발생 전까지는 인공강우의 주입량이나 빈도를 자주해서 침출수 발생시기를 앞당기기도 한다. 또한 짧은 운영시간에 장기적인 오염물질 용출 특성을 파악하기 위해 실제 우수 침투량보다 많은 양(3배)의 인공강우를 주입하기도 한다<sup>3,4)</sup>.

인공강우 주입량은 모의매립조 직경, 연간강수량, 침출계수 등에 따라 달라지나 문헌상에 보고되고 있는 주당 주입량은 최대 7,700 mL<sup>25)</sup>, 최소 220 mL<sup>10)</sup>, 중간값은 823 mL였다(n=13).

### 3.3.3. 운전상의 특이점 및 침출수 재순환 여부

충전되는 폐기물의 종류가 다른 경우에는 인공강우 주입량이 일정한 반면, 폐기물이 동일한 경우에는 침출수 재순환 등 운전상의 조건을 달리하여 비교하였다. 인공강우 이외에 모의매립조로 주입하는 액체의 형태로는 다음과 같은 것이 있었다.

- 음폐수 주입과 발생한 침출수의 재순환 및 침출수를 질산화한 후 재순환<sup>2)</sup>
- 처음에는 동일한 인공강우량을 주입하고, 일정 시간 경과 후(매립폐기물의 안정화 후) 인공강우량을 다르게 주입 (복도 조건이 다른 상황 가정)<sup>3)</sup>
- 호기성 조건에서 공기주입량을 달리 운전<sup>4)</sup>
- 침출수를 혐기성 처리 및 질산화한 후 재순환<sup>6)</sup>
- 적층매립으로 1단계에서 안정화된 하부 폐기물층을 조성한 후, 2단계에서 추가로 그 위에 폐기물을 매립하여 운전하며, 상부층 높이가 긴 경우는 모의매립조 2개를 활용해서 앞단의 침출수

를 펌프로 뒷단에 이송하는 방식으로 실내실험에서의 충고의 한계를 극복함<sup>11)</sup>

- 침출수 재순환시 효소를 첨가하여 매립가스 발생에 미치는 영향 평가<sup>20,21)</sup>

### 3.3.4. 모의매립조 운전시간 및 침출수 발생까지 걸린 시간

모의매립조 운전시간은 최소 70일<sup>10)</sup>, 최대 1270일<sup>6,7)</sup>을 운전하였으며, 중간값은 290일이었다(n=26). 운전시간이 길면 보다 매립폐기물의 분해특성 변화를 보다 세밀히 파악할 수 있는 장점이 있으나, 장기간 운전에는 따른 인력 소요 및 비용의 발생으로 부담이 될 수 있다. 유기성 폐기물의 분해는 대략 2년 정도의 시간이면 분해특성을 파악하고, 서로 비교하는데는 충분한 시간으로 판단된다.

폐기물 충전 후 침출수가 발생하는 시간까지는 마치 미생물 분해시 지체시간(lag time)과 같이 별다른 데이터를 확보하지 못하면서 소비해야 하는 시간이 된다. 즉, 총 운전시간에는 포함되지만, 실제 침출수 발생데이터는 침출수가 발생한 이후에야 얻을 수 있다는 점에서 가급적 이 시간을 단축시키는 것이 모의매립조 운영에 효과적이다. 최초 침출수 발생시기는 매립폐기물의 초기 함수율, field capacity, 모의매립조의 충전높이 등에 영향을 받게 되는데, 충전높이가 길수록 침출수 발생시기는 길어지게 된다. 과거 수행연구에 있어서 최초 침출수 발생시기는 최소가 22일, 최대가 57일이었으며, 중간값은 45일이 소요되었다(n=5). 초기에 field capacity에 해당하는 만큼의 충분한 수분을 집중적으로 투입하면 최초 침출수 발생시기를 단축시킬 수 있다.

### 3.3.5. 모의매립조 운전온도

실내에서 수행하는 모의매립조의 경우 대체로 항온실에 두거나<sup>2,4,5)</sup>, 반응조 외곽에 단열장치와 열선을 감아서<sup>17)</sup> 일정한 온도조건을 유지하게 되는데, 최대 38 °C, 최소 22 °C, 중간값은 32.5 °C에서 운전되었다(n=14). 35 °C가 중온 미생물의 최적 온도에 보다 가까우나, 우리나라에서 항온실의 크기가 다소 큰 경우에는 히터로 동절기에 35 °C 온도 조건을 맞추기가 쉽지 않을 수 있으므로 항온실의 크기 및 히

터 용량 등을 감안하여 운전온도가 결정되어야 할 것이다.

### 3.4. 측정항목

#### 3.4.1. 침출수

발생하는 침출수는 대체로 인공강우 주입시기와 맞추어 주 1회 시료를 채취하여 침출수 발생량과 침출수질을 분석하는 경우가 가장 많았으며, 측정빈도가 높은 순으로 측정항목을 정리하면 Table 1과 같다. 모의매립조 연구에서 많이 측정된 수질항목은 pH, COD, TKN, 유기산, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, 알칼리도, 중금속류의 순서였다.

Table 1. Leachate Quality Measurement Items in Lab-scale Lysimeter Researches

Item	% measurement frequency
pH	85
COD	77
TKN	38
Volatile fatty acid	31
Ammonium	31
Alkalinity	31
Heavy Metals	31
Chloride	27
BOD	23
Nitrate	19
ORP	19
Nitrite	12
TOC	12
Total Phosphorus	8
conductivity	8
Total Nitrogen	4

#### 3.4.2. 매립지 가스

모의매립조는 크기가 비교적 작고, 외부에서 공기가 침투하여 혐기성 조건을 완벽히 이루기가 어려운 관계로 매립지 가스 발생량을 분석하는 것이 용이하지 않다. 하지만, 매립폐기물에서 유기물의 안정화를 평가하고, 침출수와 매립가스로 변환된 물질수지를 평가하기 위해서는 매립지 가스의 분석이 필요하다.

매립가스의 분석은 Gas chromatograph(TCD detector)를 이용하거나, 휴대용 매립가스 분석기로 측정하였다. 한편, 가스발생량 측정은 습식가스미터 혹은 NaCl로 포화시킨 물을 이용한 가스포집조, 가스샘플링백 등을 이용하였다.

Brandstatter *et al.*는 호기성 운전시 공기의 유량을 유입구에서 측정하고, 모의매립조 출구에서 배가스의 농도를 측정해야 한다고 주장하였다. 이는 유량계가 건조 공기에 대해 보정되어 있으므로, 측정유량이 습윤가스에 대해 보정되지 않으면, 탄소 배출량은 과소평가되기 때문이라고 한다. 하지만, 공기의 주입이 없는 혐기성 운전의 경우 배출구에서 바로 측정하므로 보정이 필요없다<sup>17)</sup>.

#### 3.4.3. 모의매립조 해체 후 조사

모의매립조 운전을 마무리하고, 해체한 다음 매립폐기물의 성상변화를 조사한 사례는 다음과 같았다.

- 매립폐기물의 수분보유량 측정 : 모의매립조에서의 물수지 분석<sup>3,4)</sup>
- 매립폐기물의 원소분석 : 매립전후의 폐기물의 안정화 정도 파악<sup>10)</sup>
- 매립폐기물 중 수분 속의 휘발성 유기산 농도 측정<sup>15)</sup>
- 매립 시작과 모의매립조 운전 종료 후 RI (respirometric index), TC, TOC, TS, VS 조사<sup>16)</sup>

이상에서 논의한 모의매립조 설치 및 운전과 관련한 인자들을 표로 정리하면 Table 2와 같다.

### 3.5. 모의매립조 연구의 한계

폐기물 모의매립조 연구는 매립환경을 모사해서 혐기성 조건에서 운전되는 대조군과 함께, 비교하고자 하는 매립조건(매립지 운영방식, 매립폐기물의 종류 등)을 비교함으로써 매립폐기물의 거동을 예측하고자 하는 목적으로 수행된다. 하지만, 실제 폐기물 매립지는 30년 이상 오랜 기간 동안 사후관리되면서 오염물질이 거동하는 반면, 모의매립조 연구는 통상 2년 내외의 짧은 시간에 종료되므로 오염물질의 거동 패턴을 유추할 수는 있으나, 완벽히 시간적으로 재현하는 것은 한계가 있다. 특히, 생분해가 잘되는

Table 2. Factors Related to the Installation and Operation of Lab-scale Waste Lysimeter

stage	item	minimum	median	maximum	no. of data
installation	diameter (cm)	11	30	57.2	25
	height (cm)	24	135	200	26
	filling weight (kg)	3.8	24.3	175	19
	bulk density (kg/m <sup>3</sup> )	191	595	1,000	20
	no. of lysimeter	2	3	8	25
operation	percolation coefficient	0.3	0.35	0.5	11
	artificial rainfall (mL/wk)	220	823	7,700	13
	operation period (days)	70	290	1,270	26
	leachate generation from the waste filling (days)	22	45	57	5
	operation temperature (°C)	22	32.5	38	14

유기오염물질의 경우 매립조건에 따른 분해거동의 차이가 명확한 반면, 중금속 물질의 경우 혐기성 매립환경에서는 침출수 형태로 용출되지 않고, 매립폐기물 내에 잔류하게 되므로, 비교적 단기간에 명확한 거동을 실험적으로 확인하거나 예측하는 데는 한계가 있다.

또한 모의매립조는 1차원 형태의 상대적으로 균질한 조건이나, 실제 폐기물 매립지는 3차원에 불균질한(투수성, 생분해성, 유해성 등) 폐기물이 분포하므로, 강수의 침투와 침출수 및 매립가스의 이동 형태도 구역별로 상이할 수 있다.

따라서 모의매립조 연구결과는 매립조건이나 매립폐기물 특성에 따른 오염물질의 거동을 정성적으로 예측하는 데는 유용할 수 있으나, 시간에 따라 정량적으로 예측하는 데는 한계가 있다.

#### 4. 결론

폐기물 모의매립조는 실제 매립환경을 모사하여 매립된 폐기물 중의 오염물질의 분해와 변환을 예측하고, 침출수나 매립가스 형태로 배출되는 시간적 추세를 파악함으로써 보다 바람직한 폐기물 매립지 관리를 도모하는데 활용할 수 있다.

2000년대 초반 유기성 폐기물의 매립비중이 높고, 매립지의 복토층 설치로 강수의 침투량이 낮아진 위생매립지에서는 침출수 재순환을 통한 매립폐기

물의 조기안정화에 대한 연구(bioreactor landfill)가 활발하였으나, 최근에는 생활폐기물 처리에서 소각의 비중이 높아지고, 매립처분 대상 폐기물이 무기성 물질 위주로 바뀔에 따라 전자폐기물이나 건설폐기물 중 석고보드 등을 혼합매립한 경우의 환경영향에 대한 관심이 높아지고 있는 추세이다.

폐기물 매립지는 폐기물의 최종처분지로서 앞으로 최소한의 수요는 불가피하며, 이 경우 예상되는 환경문제를 예측하기 위해서 모의매립조를 이용한 연구는 계속 이루어질 것이다. 이 경우 실제 환경을 잘 모사하면서도, 비교적 짧은 시간(2년 내외)에 장기간에 걸친 환경영향을 예측할 수 있는 기법을 개발하는 것이 필요하다.

아울러 매립지 사후관리기간(30년)이 종료되는 폐기물 매립지들이 조만간 다수 나타날 것인데, 과연 더 이상의 사후관리가 필요없는 수준으로 안정화되었는지에 대한 논란과, 만약 추가적인 안정화 기간이 필요하다면 얼마나 더 안정화하여야 하는지에 대한 논의에도 모의매립조 연구가 활용될 수 있을 것이다.

#### 사 사

이 논문은 2018학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.



## References

1. Yoon, S. P., Lee, N. H., and Kim, J. Y., "Landfill decomposition characteristics of mechanical-biological pretreated waste", *J. of Korea Society of Waste Management*, 21(6), pp. 618~626. (2004).
2. Kim, H. W., Wang, F., Yoon, S. P., and Park, H. S., "A lysimeter study on the waste landfill injection of anaerobically digested food wastewater", *J. of Korea Society of Waste Management*, 31(2), pp. 228~234. (2014).
3. Yoon, S. P., Jung, J. M., and Wei, J., "The effect of final cover installation on the waste landfill stabilization", *J. of KORRA*, 25(2), pp. 33~40. (2017).
4. 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", *J. of Korea Society of Waste Management*, 29(3), pp. 275~280. (2012).
5. Bum, B. S., Bae, J. H., and Cho, K. M., "Effect of anaerobic digester sludge and leachate recycle on methane production from solid wastes in lysimeters", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 24(8), pp. 1365~1377. (2002).
6. Bum, B. S., Bae, J. H., and Cho, K. M., "Nitrogen removal of leachate using the landfill", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 25(3), pp. 370~378. (2003).
7. Cho, H. S., Kim, J. Y., Cho, E. K., Song, S. S., and Bae, Y. S., "Assessment of the characteristics of landfill gas production depending on existence specific organic waste component using column tests", *J. of Korea Society of Waste Management*, 24(4), pp. 303~309. (2007).
8. Kim, H. J., Park, J. K., Jeong, M. K., and Lee, N. H., "An experimental study to develop operation technique of solid waste landfill for utilization of biomass", *J. of KORRA*, 15(1), pp. 171~177. (2007).
9. Bum, B. S., Bae, J. H., and Cho, K. M., "Comparative study on the operational characteristics of anaerobic and semi-aerobic lab-scale lysimeters", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 23(11), pp. 1899~1907. (2001).
10. Park, J. K., Oh, D. I., Lee, N. H., "Characteristics of stabilization of excavated solid wastes by aerobic and anaerobic landfilling", *J. of KORRA*, 12(3), pp. 76~85. (2004).
11. Bum, B. S., Bae, J. H., Cho, K. M., "Determination of the optimum height ratio between total landfill lift and active methanogens lift at the multi-bed landfill", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 25(1), pp. 39~48. (2003).
12. Slezak, R., Krzystek, L., and Ledakowicz, S., "Degradation of municipal solid waste in simulated landfill bioreactors under aerobic conditions", *Waste Management*, 43(9), pp. 293~299. (2015).
13. Bilgili, M. S., Demir, A., and Özkaya, B., "Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes", *Journal of Hazardous Materials*, 143(1-2), pp. 177~183. (2007).
14. Sandip, M., Kanchan, K., and Ashok, B., "Enhancement of methane production and bio-stabilisation of municipal solid waste in anaerobic bioreactor landfill", *Bioresource Technology*, 110, pp. 10~17. (2012).
15. Ko, J. H., Yang, F., and Xu, Q., "The impact of compaction and leachate recirculation on waste degradation in simulated landfills", *Bioresource Technology*, 211, pp. 72~79. (2016).
16. Lavagnolo, M. C., Grossule, V., and Raga, R., "Innovative dual-step management of semi-aerobic landfill in a tropical climate", *Waste Management*, 74, pp. 302~311. (2018).
17. Brandstätter, C., Laner, D., and Fellner, J., "Carbon pools and flows during lab-scale degradation of old landfilled waste under different oxygen and water regimes", *Waste Management*, 40, pp. 100~111. (2015).
18. Zhang, J., Kim, H., Dubey, B., and Townsend, T., "Arsenic leaching and speciation in C&D debris

- landfills and the relationship with gypsum drywall content”, *Waste Management*, 59, pp. 324~329. (2017).
19. Temizel, İ., Emadian, S. M., Addario, M. D., Onay, T. T., Demirel, B., Copty, N. K., and Karanfi, T., “Effect of nano-ZnO on biogas generation from simulated landfills”, *Waste Management*, 63, pp. 18~26. (2017).
20. Frank, R. R., Davies, S., Wagland, S. T., Villa, R., Trois, C., and Coulon, F., “Evaluating leachate recirculation with cellulase addition to enhance waste biostabilisation and landfill gas production”, *Waste Management*, 55, pp. 61~70. (2016).
21. Jayasinghe, P. A., Hettiaratchi, J. P. A., Mehrotra, A. K., and Steele, M. A., “Enhancing Gas Production in Landfill Bioreactors: Flow-Through Column Study on Leachate Augmentation with Enzyme”, *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 17(4), (2012).
22. Visvanthan, C., Yin, N. H., and Karthikeyan, O. P., “Co-disposal of electronic waste with municipal solid waste in bioreactor landfills”, *Waste Management*, 30, pp. 2608~2614. (2010).
23. Karnchanawong, S., and Limpiteeprakan P., “Evaluation of heavy metal leaching from spent household batteries disposed in municipal solid waste”, *Waste Management*, 29(2), pp. 550~558. (2009).
24. Long, Y., Liu, D., Xu, J., Fang, Y., Du, Y., and Shen, D., “Release behavior of chloride from MSW landfill simulation reactors with different operation modes”, *Waste Management*, 77, July, pp. 350~355. (2018).
25. Li, Y., Richardson, J. B., Bricka, R. M., Niu, X., Yang, H., Li, L., and Jimenez, A., “Leaching of heavy metals from E-waste in simulated landfill columns”, *Waste Management*, 29(7), pp. 2147~2150. (2009).
26. Giannis, A., Makripodis, G., Simantiraki, F., Somara, M., and Gidarakos, E., “Monitoring operational and leachate characteristics of an aerobic simulated landfill bioreactor”, *Waste Management*, 28(8), pp. 1346~1354. (2008).