

LFG

Effects of Municipal LFG Characteristics on Settlement

¹⁾, Tea-Bong Ahn, ²⁾, Han-Kyu Jin, ³⁾, Tea-Hyo Park

¹⁾ , Assistant Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Woosong Univ.

²⁾ , Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Woosong Univ.

³⁾ , Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : The amount of CO_2 and CH_4 that were produced during biodegradation with were measured as function of time. Also, the settlements of landfill lysimeters were measured at the same time, and the relation with LFG(landfill gas) production was investigated. The effects of leachate recycle on the acceleration of settlement were studied by comparing two lysimeters. The gas production rate constant, k_{LFG} is obtained to predict future gas production and settlement. These will be key role factors to predict gas production patterns and residual long-term settlement.

Key words : landfill, settlement, biochemical decomposition, LFG(Landfill Gas), recirculation leachate

1. 서론

쓰레기를 매립지에 매립하는 것은 가장 경제적이면서 합리적인 쓰레기 처리방법이다. 그러나 매립지는 매우 큰 면적을 차지하며 새로운 매립지의 유치시 환경적 문제야기로 인한 인근주민의 반대 등으로 이제 더 이상 새로운 매립지를 얻기가 날로 어려워지고 있다. 따라서 도시 주변에 형성되었던 폐기물 매립지의 유지관리 뿐만 아니라 향후 매립지의 재활용에 대한 요구가 확대되는 실정이며 매립지의 침하량을 예측하는 것은 매립장의 유지관리를 위한 중요한 과제이다. 폐기물 매립지의 침하나 변형 거동에 대한 연구들이 지반공학적인 이론에 바탕을 두고 많은 변형거동 예측모델들이 개발되고 있으며 국내의 경우에도 폐기물 매립지들에 적용하기 위해 여러 가지 변형거동 예측방법에 대한 연구가 진행 되었다.

폐기물 매립지의 침하를 예측하는 방법은 토질역학적 기법을 이용하는 방법과 생분해 특성을 고려한 방법 및 경험식을 이용한 방법 등이 있다. 그러나 폐기물매립지의 성상은 매우 복잡하므로 토질역학적 접근과 생분해 특성을 고려한 방법이 실제 폐기물 매립지에서 장기 변형거동을 예측하기 위한 충분한 조건을 만족시키지 못하는 실정이다. 또한 폐기물 매립장에서 발생하는 침출수와 매립 가스의 복합적인 작용으로 매립지침하에 영향을 끼친다. 본 연구에서는 실내실험을 통해 매립지의 가스조성과 가스발생량을 측정하여 LFG특성이 매립장의 장기적인 침하와 어떠한 관계가 있는지 규명하고 발생침출수의 재순환이 매립자의 조기 안정화에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다. 그리고 차후 매립가스발생량을 추정함에 있어 중요한 인자인 가스발생속도상수(k_{LFG})를 구하여 차후 가스발생량(Q_{LFG})을 예측하였다.

이는 매립지에서 발생하는 가스발생패턴과 발생량을 추정하여 예상 잔존침하량을 예측할 수 있는 기초 자료가 될 것이다.

2. 쓰레기 매립장의 가스발생 및 침출수 재순환 시스템

2.1 매립가스 발생특성

그림 1은 시간에 따른 매립지 가스배출곡선으로서 이산화탄소는 시간이 지남에 따라 감소하고 메탄은 시간이 지남에 따라 증가하다 일정하게 유지 되는 것이 전형적인 경향이다. 매립 가스는 쓰레기가 생분해하면서 발생하고 이로 인하여 침하를 하게 되는 것이다.

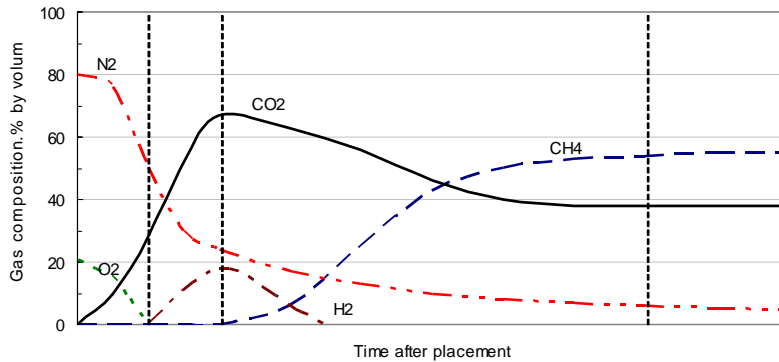


그림 1. 전형적인 시간과 매립가스배출량의 관계

매립가스의 발생량을 예측하기 위한 모델은 폐기물의 양 및 조성, 매립시기와 경과시간 등의 기초 자료를 비롯하여 여러 추정인자가 필요하다. 일차분해모델의 경우, 폐기물의 메탄발생최대량과 메탄발생속도상수의 추정인자를 사용하게 되며 이들 추정인자의 선정은 정확한 예측에 있어서 매우 중요하다. 그러나 발생한 매립가스는 여러 가지 이동경로를 통해 매립지에서 배출될 뿐만 아니라 매립지의 규모가 크기 때문에 매립가스의 발생량을 측정하여 추정인자의 대표값을 얻는 것은 현실적으로 매우 어렵다.

매립지에서 발생하는 가스는 매립지 내부에서 생물학적으로 폐기물의 탄소성분이 분해되어 가스로 전환된 것으로 가정하면 전체가스 발생량 식은 아래의 식 (1)로 나타낼 수 있다 (Stegmann *et al.* 2000).

$$G_{LFG} = 1.868 \cdot f \cdot OC \cdot R \cdot (1 - e^{-k_{LFG} \cdot t}) \quad (1)$$

여기서, G_{LFG} : 해당년도의 매립가스 발생량 (m^3/yr) f : 실제 매립지의 탄소분해정도

k_{LFG} : 매립가스 발생속도 상수 (yr^{-1}) C : 탄소함량 ($kg C/Mg MSW$)

R : 폐기물의 양 (Mg/yr) 1.868 : 탄소 1 kg 당 발생하는 이론가스량 ($m^3 LFG/Mg MSW$)

t : 경과년도 (yr) OC : 분해가능한 폐기물 조성의 유기탄소함량 ($kg C/Mg MSW$)

2.2 침출수 재순환 시스템

매립 현장에서는 여러 가지 조기 안정화 방법을 이용하여 침하를 빠른 기간 내에 일으키고자 한다.

본 실험에서는 침출수 순환살포방법을 채택하여 매립지 내부를 수분이 충분한 상태로 만들어 수분증가로 인해 혐기성 분해가 촉진되어 더 많은 양의 CH_4 , CO_2 가 발생하게 하였다. Wall and Zeiss(1995)과 신항식 등(1996)은 침출수 재순환이 매립지의 분해, 안정화 종료 시간과 침하 발생에 미치는 영향을 연구하였으며 침출수 재순환이 초기 CH_4 발생량의 증가에 미치는 영향도 확인을 하였다.

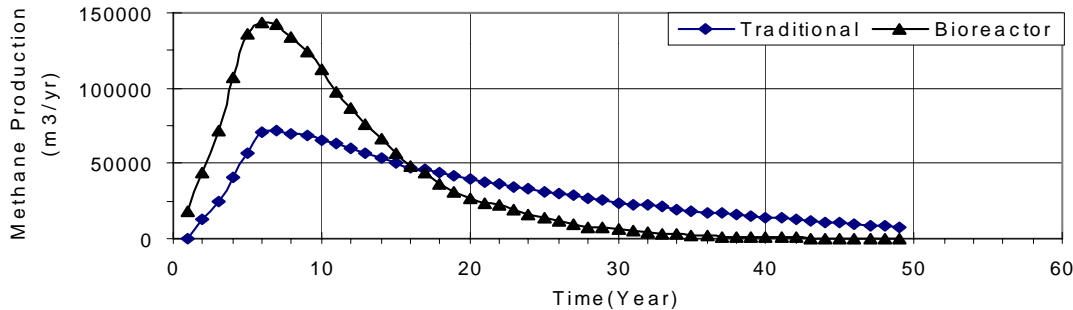


그림 2. 침출수 재순환에 의한 메탄 발생량 (Gabr *et al.*, 2000)

그림 2와 같이 침출수 재순환을 실시한 매립지(Bioreactor)에서는 재순환을 실시하지 않은 일반 매립지(Traditional)보다 초기 10년 동안 CH_4 의 발생량이 약 2배정도 증가함을 확인하였다 (Gabr *et al.*, 2000). 이는 침출수재순환을 실시한 매립지(Bioreactor)에서 조기안정화가 이루어졌음을 알 수 있다.

3. 실험방법

3.1 모형 매립조내의 충전 시료

모의 매립조 실험에 사용한 쓰레기 시료는 대전, 경주, 동해, 수원, 서울, 수도권 등에서 발생하는 일반 쓰레기의 구성비를 참고하여 침출수를 재순환 시키지 않은 A(Leachate not recycled)매립조와 침출수를 재순환 시킨 B(Leachate recycled)매립조로 구분하여 같은 성분의 시료를 충전시켜 넣었다 (박현일과 이승래, 2000).

3.2 발생가스의 포집 및 구성요소 분석

발생가스 CH_4 , CO_2 , O_2 의 조성은 gas meter(LMSx, gas data ltd)를 이용하여 측정하였으며 이때의 발생가스량은 가스압에 의한 상방치환 방법을 이용하여 발생량을 구하였다.

3.3 침출수의 재순환 방법

인공 강우의 주입량은 Christensen과 Kjeldsen (1989)이 제시한 일반적인 복토재를 사용한 경우에 지하로 침투하는 양에 준하여 주입하였으며 국내의 10년간 평균 강우량 중 20%가 지하로 침수되는 양이라 가정하여 $1\text{ l}/\text{week}$ 로 결정하였으며 A, B매립조 모두 주입하였다 (한국수자원 공사, 1993).

B매립조의 침출수의 재순환량의 결정은 재순환량이 지나치게 많을 경우 매립조 내부의 온도를 하락시켜 가수분해 및 산 형성반응을 저해하며 매립조내 침출수의 짧은 체류시간으로 미생물의 고정 성장이 저해되고 미생물의 유실현상이 발생하므로 본 실험에서는 우수 주입율인 $1\text{ l}/\text{week}$ 을 기준으로 하여 5배에 해당하는 $5\text{ l}/\text{week}$ 로 주입하였다 (신항식 등, 1996). 침출수의 재순환 및 인공우수의 정기적인 주입은 매립지 내 미생물의 성장을 위하여 30일 이후에 하루에 한번씩 재순환이 이루어졌다.

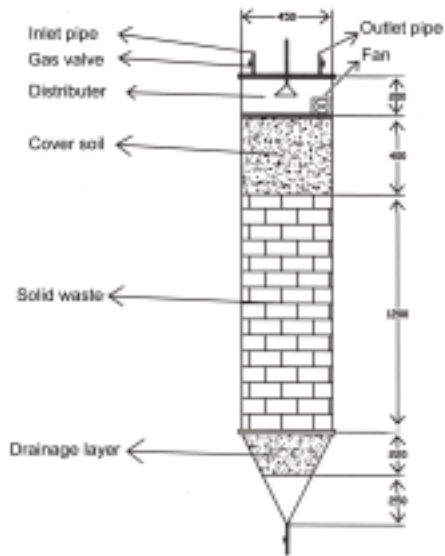


그림 3. 모의 매립조의 개념도

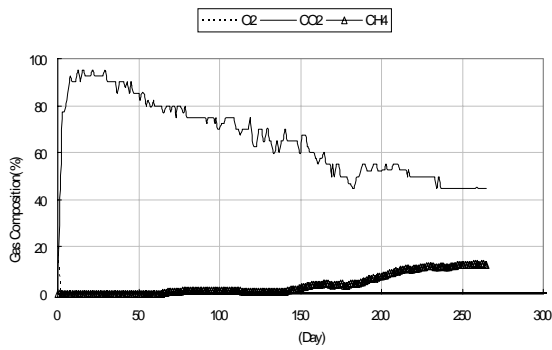


A(Leachate not recycled) B(Leachate recycled)
그림 4. 모의 매립조

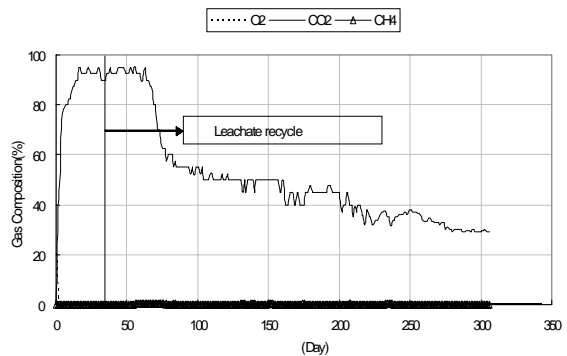
4. 실험결과

4.1 매립조내의 일일가스성분-침하량

매립조내의 발생가스성분의 성상은 그림 5와 같이 A, B매립조 모두 비슷한 양상을 보인다. 가스의 구성비와 침하량과의 관계를 유추해 보기 위해 그림 6과 같이 침하량-매립조내 일일가스성분의 관계를 알아보았다. 이는 실험 중 매일 배출되는 가스의 성분변화를 측정하기 위한 것이다.



(a) A(Leachate not recycled)



(b) B(Leachate recycled)

그림 5. 매립조내의 발생가스성분

O_2 의 경우 A, B매립조 모두 운행초기 호기성 상태에서 실험 2~3일 이내로 유기물과 반응하여 빠르게 소멸되었으며 CO_2 의 경우 A매립조는 O_2 가 감소함에 따라 95%까지 급속하게 증가하여 240일 이후에는 45%정도에서 일정하게 유지하고 있다. B매립조의 경우에도 A매립조와 유사하게 초기 CO_2 가 빠르게 증가 270일 이후 30%~35%를 유지하고 있다. CH_4 는 A매립조는 65일 이후 발생하여 현재 13%까지 증가하고 있는 추세를 보이고 있으며 B매립조는 혐기성 상태가 유지되고는 있지만 아직 혐기성 미생물이 쓰레기시료에 정착되지 않아 아직 발생하지 않는 것으로 사료된다. 차후 시간이 경과하여 혐기

성 분해로 인해 CH_4 가 발생하는 구성비로 침하관계를 유추해 보기로 하였다.

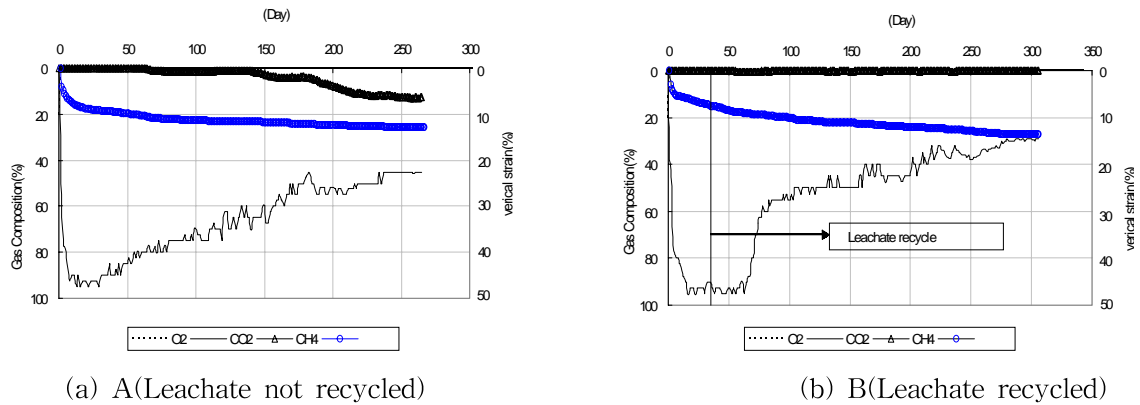


그림 6. 매립조의 침하량-일일발생가스성분의 시간에 따른 변화

4.2 매립조내의 가스발생량

발생가스의 발생량은 그림 7과 같이 유기물의 분해에 의해 증가하고 있지만 초기 A매립조가 B매립조보다 같은 경과시간에 대해 더 많은 가스가 발생하였다. 이는 A매립조가 운행초기에 투수가 불량하여 발생한 침출수가 쉽게 배출되지 않고 정체시간이 길어져 수분의 증가에 의해 분해가 빨리 일어난 것으로 보인다. B매립조의 경우 103일(5월5일)부터 온도의 상승으로 인하여 분해가 가속화되어 220일 이후에는 A매립조보다 더 많은 가스가 발생하였다. 이는 순환방식으로 침출수 재순환시킨 B매립조에서 A매립조에 비해 수분의 함량이 상대적으로 많아 분해가 활발히 일어난 것으로 보인다.

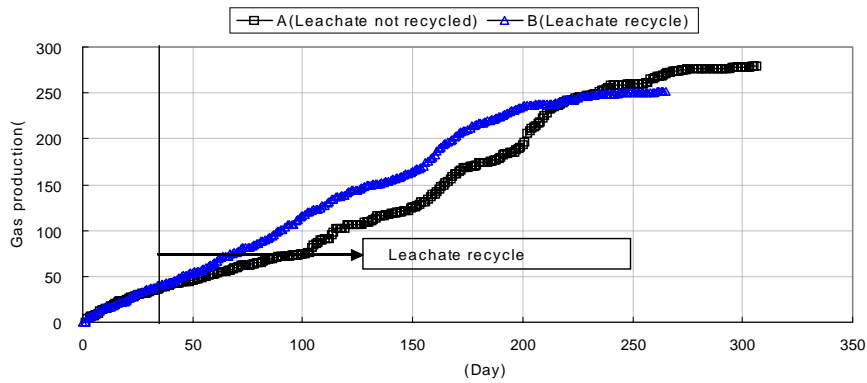
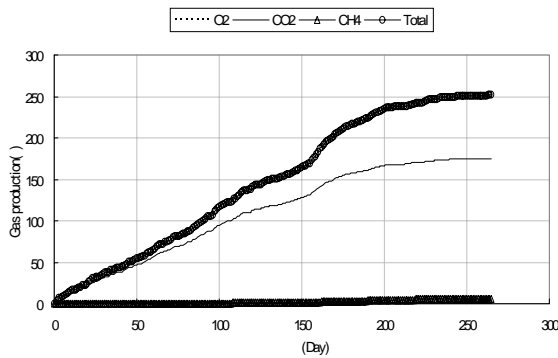


그림 7. 매립조내의 가스발생량

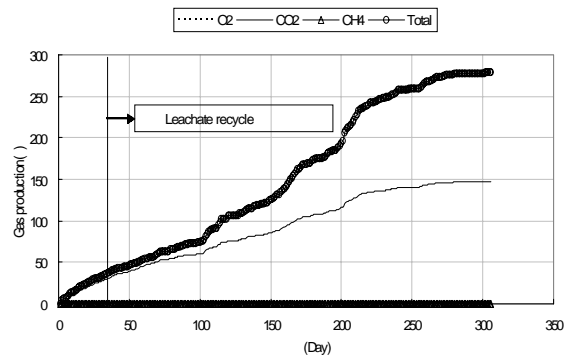
4.3 매립조내 성분별 누적가스량-침하량

그림 8과 같이 A, B매립조 모두 가스발생량에 비례하여 CO_2 발생량도 증가하는 추세를 보인다. 매립조 운행초기 호기성 상태를 거쳐 혐기성 상태로 분해하는 과정에서 CO_2 발생이 대부분을 차지하기 때문이다. CO_2 의 증가는 A매립조의 경우 55일 이후, B의 경우 60일 이후에 빠르게 감소하여 점차 증가비가 줄어들고 N_2 및 혐기성 상태 초기에 발생하는 H_2 가 CO_2 가 있던 공간을 차지하고 있는 것으로 사료된다. CH_4 의 경우 A매립조에서는 미량이 발생되어 증가하고 있으며, B매립조에서는 혐기성 미생

물이 정착되지 않아 발생되지 않고 있다.



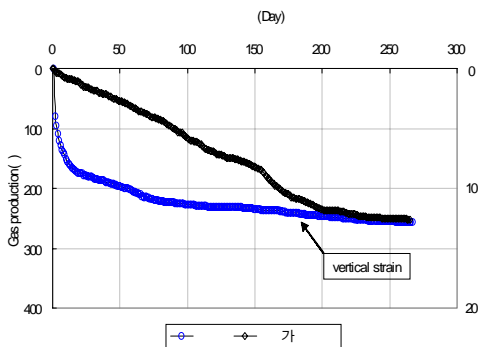
(a) A(Leachate not recycled)



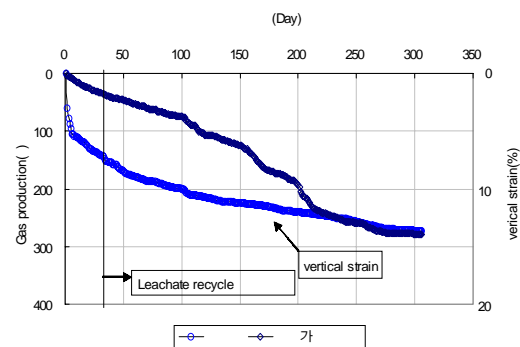
(b) B(Leachate recycled)

그림 8. 매립조내의 성분별 가스발생량

매립조내에서 분해에 의한 침하가 일어남에 따라 누적가스발생량과 침하경향을 분석하기 위해 그림 9와 같이 침하량-누적가스발생량을 그래프로 나타내었다. 여기서 A, B매립조 모두 가스발생이 증가하면서 침하량 또한 함께 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 현재 진행된 운전과정은 분해에 의한 침하 초기 단계이고 혐기성분해에 의한 CH_4 의 발생이 미비한 상태이므로 차후 장기간 매립조운전이 이루어져야 할 것이다.



(a) A(Leachate not recycled)



(b) B(Leachate recycled)

그림 9. 매립조내의 침하량-누적가스발생량

4.4 매립조의 침하량

침하량의 측정은 그림 10과 같이 초기침하과정에서 시료충진 20일 경과 후 A와 B매립조는 수직변형이 최대 2.5%로 실제 매립조 높이 4 cm 차이를 나타내었다. 이는 매립조내에 외부하중이 작용함으로써 초기 충진된 쓰레기 시료의 느슨한 입자의 압축 및 구성물질의 재배열에 의한 차이로 인하여 발생한 것이다. 초기 침하량이 작게 측정된 B매립조에서 침출수를 재순환 시킨 30일 이후부터 시간에 따라 수직변형(Vertical strain)이 증가하여 A매립조와의 차이가 점차 감소하여 240일 이후에는 B매립조에서 더 큰 침하가 발생하였다. 또한, 이시기가 B매립조가 A매립조보다 가스량이 더 많이 발생한 시점이라는 것을 알 수 있었다 (그림 7. 매립조내의 가스발생량).

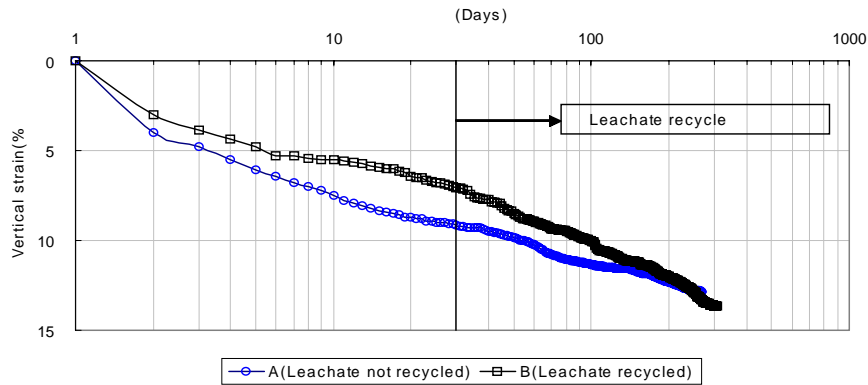


그림 10. 모의 매립조내의 장기 침하양상

4.5 매립가스 발생량(Q_{LFG})의 추정결과

추후 매립가스발생량 (Q_{LFG})을 예측하는 일차 분해모델에서 가스발생속도상수 (k_{LFG})는 매립지가 위치한 환경조건에 기초한 값으로 매립가스가 발생하는 속도를 결정하는 매우 중요한 추정인자이다. 식 (1)에 필요한 인자들 (f, C, R, OC)을 실내 매립조실험을 통하여 구하였으며, A(Leachate not recycled) 매립조 $0.1561(\text{yr}^{-1})$, B(Leachate recycle)매립조 $0.1701(\text{yr}^{-1})$ 의 가스발생속도상수(k_{LFG})를 얻었다. 여기서 제시한 가스발생속도상수(k_{LFG})를 사용하여 앞으로 2년이 경과한 추후 매립가스발생량은 A매립조 : 1.6448m^3 , B매립조 : 1.7688m^3 로 현장실험과 이론식의 중간적인 값을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 폐기물 모형 매립조를 제작하여 분해조건이 좋은 상태에서의 실내실험을 수행하였으며 조기안정화 방법 중 침출수 재순환을 실시하였을 경우와 비교하였다. 매립지내에서 유기물이 분해하면서 발생하는 이산화탄소와 메탄가스가 시간이 경과함에 따라 변화하는 가스발생속도상수 (k_{LFG}) 및 가스조성 및 가스발생량을 측정하였고 침하경향과의 관계를 얻고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현재까지 운전결과 폐기물 모형 매립조의 침하양상은 선형으로 증가하였으며 A매립조가 B매립조보다 초기수직변형(Vertical strain)이 느슨한 입자의 압축 및 구성물질의 재배열에 의해 크게 나타났으나, 침출수 재순환을 시킨 이후 시간이 경과함에 따라 분해에 의한 침하효과는 작게 나타났지만 그 차이가 감소하여 오히려 B매립조에서 더 많은 침하가 일어났다. 이는 침출수 재순환이 매립지내의 침하향상에 효과가 있는 것으로 판단되며 유기성고형물이 분해에 의한 가스발생량이 많을수록 침하량 또한 이에 비례하여 증가하는 것을 확인하였다.
2. 매립조내의 발생가스의 성분은 A, B매립조 모두 비슷한 양상을 보였다. CO_2 는 산소에 의한 유기물의 분해에 의해 초기 호기성 상태에서 95%까지 급격히 증가하였고 A매립조는 240일 이후 50~45%, B매립조에서는 270일 이후 35~30%를 유지하고 있다. CH_4 는 A, B매립조 모두 혐기성 상태를 유지하고 있으며 A매립조는 140일 이후부터 발생하여 현재 12%~13%로 점차 증가하고 있는 경향을 보이고 있으나 B매립조는 아직 미생물의 미정착으로 인해 CH_4 가 발생하진 않았다.
3. 매립조내의 가스발생량은 유기물의 분해에 의해 증가하며 온도가 상승할 경우 A매립조보다 상대적으로 수분의 함량이 높은 B매립조에서 가스의 발생이 많았다. 이는 온도가 분해에 크게 영향을 미치며

수분의 함량이 높을 경우 미생물의 성장에 적합한 환경이 조성되는 것을 알 수 있었다.

- 매립조의 가스발생량과 가스조성이 침하에 어떠한 영향을 미치는지 연구해 보기 위해 침하량-가스발생량과 침하량-일일가스성분을 알아보았다. 가스발생량이 증가하면서 침하도 함께 증가하며 A, B매립조 모두 운행 후 200일이 지난시점에서 침하량보다 증가하는 것을 알 수 있었으나 아직 혐기성 미생물에 의한 분해가 활발히 일어나지 않아 미량의 CH_4 만이 발생하여 가스발생곡선을 예측하기에는 무리가 있었다.
- 차후 매립가스발생량(Q_{LFG})을 예측하는 일차분해모델에서 가스발생속도상수(k_{LFG})를 구하기 위해 매립지실험에 사용된 매립폐기물량(R), 폐기물의 유기탄소함량(OC), 매립지탄소분해정도(f)등의 추정인자들을 사용하여 A매립조 $0.1561(\text{yr}^{-1})$, B매립조 $0.1701(\text{yr}^{-1})$ 의 가스발생속도상수(k_{LFG})를 얻었다. 가스발생속도상수(k_{LFG})를 사용하여 앞으로 2년이 경과한 추후 매립가스발생량은 A매립조 0.822m^3 , B매립조 0.8839m^3 의 발생량을 예측하였다. 이는 분해조건이 좋은 실내실험으로 수행하였으므로 실제 매립장에 비해 높은 값을 나타내고 있으며 침출수의 재순환을 시킨 경우가 매립지를 안정화 시키는 데 효과가 있었다.
- 폐기물 모형 매립조를 제작하여 실내실험으로 실제 매립지보다 좋은 분해조건에서 실험을 수행하여 여러 가지 결론을 얻었으나 유기성 고형물의 실제 분해기간은 매우 길게 소요되며 이에 비하여 매립조의 운전시간이 현재까지 그리 길지 않았기 때문에 침출수 재순환에 의한 유기물의 분해량의 차이 또한 그리 크지 않았다. 이에 따라 혐기성 분해에 의한 CH_4 의 발생도 미량만이 검출되었다. CO_2 와 CH_4 발생곡선을 예측하여 매립장의 잔존침하량과의 연관성을 알기에는 차후 장기간의 매립조운전이 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R01-2002-000-00063-0(2002))지원으로 수행된 연구성과임을 밝히며, 이에 깊은 감사드립니다.

참고문헌

- 박현일, 이승래(2000) “기존 침하모델들을 근거한 쓰레기 매립지 장기 침하 예측”, **한국지반공학회**, 제 16권, 제 2호, pp. 41-50.
- 신항식, 강석태, 이채영, 이남훈(1996), “침출수 재순환을 이용한 유기물 분해향상이 매립지 침하에 미치는 영향”, **한국폐기물학회지**, 제 16권, 제 6호, pp. 191-201.
- 한국수자원공사(1993), “21세기를 바라보는 수자원 전망”, 연구보고서 IPD-93-2.
- Christensen T.H. and Kjeldsen P.(1989), “Basic Biochemical Process in Landfills”, Sanitary Landfilling: Process, *Technology and Environmental Impact*, Academic Press. Christensen T.H. et al., ed.
- Gabr, M. A., Hossain, M. S., and Barlaz, M. A.(2000), “Soild Waste Settlement with Leachate Recirculation”, *Geotechnical News*, June, pp. 50-55.
- Stegmann R., Earig, H.J., and Rettenberger, G.(2000), “Landfill Gas Formation, -Quality and Prediction”, *Soilde Waste Landfill Symposium* in Korea, pp.17~40
- Wall, D. K., and Zeiss, C.(1995), “Municipal landfill Biodegradation and Settlement”. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 121(3), pp. 214-224.