

## 매립장의 발생가스특성을 이용한 매립장 침하예측

### Prediction of Landfill Settlement Using Gas Generation Characteristics

안 태 봉<sup>1</sup> Ahn, Tae-Bong

박 대 효<sup>2</sup> Park, Tae-Hyo

공 인 철<sup>3</sup> Going, In-Chul

#### Abstract

The prediction of landfill settlement is very important for managing land properly, especially in small national land like Korea. It is difficult to express settlement using the consolidation theory because biochemical decomposition is main reason of settlement, and organic materials in landfill are decomposed for long time. In this study, LFG (Landfill Gas) generation characteristics are studied to find long-term settlement analysing model landfills. Two lysimeters are made; one is leachate recycled, and the other is not leachate recycled. The relationship between gas generation and settlement is analysed as a function of time. A mathematical gas generation model is suggested to predict long-term settlement due to biodegradation, and correction coefficient is recommended for long term settlement through model tests. The leachate recirculation system is more effective to accelerate landfill settlement. The appropriate coefficients of gas correction for non-recycled leachate model are 1.4 and 1.7 for recycled system from tests showing 22% of acceleration.

#### 요 지

폐기물 매립지의 침하량을 예측하는 것은 우리나라와 같은 좁은 국토를 효율적으로 관리하기 위하여 매우 중요하다. 매립장내 유기물이 장기간에 걸쳐 생화학적으로 분해되기 때문에 압밀이론으로 해석하기 곤란하다. 본 연구에서는 실내모델실험을 통하여 매립가스의 발생특성을 분석하였다. 두개의 시험매립조를 만들었는데 하나는 침출수를 재순환한 것과 다른 하나는 재순환하지 않은 것이다. 시간의 변화에 따른 가스발생량과 매립조의 침하량과의 관계를 분석하였다. 수학적 침하량예측모델을 제안하여 장기침하량을 예측하여 실험계측치와 비교하고 수정계수를 사용하도록 제안하였다. 침출수 재순환이 침하를 촉진하는 효과가 있는 것으로 나타났는데 가스모델의 수정계수가 침출수순환을 하지 않은 경우는 1.4, 재순환한 경우는 1.7으로서 약 22%의 촉진효과가 있다.

**Keywords :** Biochemical decomposition, Landfill settlement, Leachate recirculation, LFG(Landfill Gas)

#### 1. 서 론

쓰레기를 매립지에 매립하는 것은 가장 전통적이며 쉬운 방법이지만 매립지는 매우 큰 면적을 차지하기 때문에 더 이상 적절한 매립장을 찾는 것이 매우 어려움

일이다. 따라서 도시 주변에 형성되었던 폐기물 매립지의 용량을 최대한 늘리고 침하를 촉진시켜 사용연한을 늘리고 매립장의 수요예측을 정확히 하여 유지관리를 효율적으로 운영하는 것이 매우 중요하다.

국내·외에서 폐기물 매립지의 침하나 변형 거동에

<sup>1</sup> 정회원, 우송대학교 토목환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Env. Engrg, Woosong Univ. tbahn@lion.woosong.ac.kr)

<sup>2</sup> 한양대학교 토목공학과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil. Engrg., Hanyang Univ.)

<sup>3</sup> 영남대학교 환경공학과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Environ. Engrg., Yeungnam Univ.)

대한 연구들이 지반공학적인 이론에 바탕을 두고 변형 거동 예측모델들이 개발되었다. 폐기물 매립지의 침하를 예측하는 방법은 첫째, 압밀이론을 이용하는 방법, 둘째, Gibson-Lo 모델(1961)과 Power Creep 모델(Edil *et al.*, 1990) 등 토질역학적 기법을 바탕으로 하는 경험적 방법, 셋째, 생분해특성을 고려한 방법(박현일과 이승래, 2000)이 있다. 생분해방법은 실험결과를 모델화시킨 것이며 여기에 필요한 매개변수를 실험을 통하여 구한 후 예측데이터와 비교한 것이다. 그러나 폐기물매립지의 성상이 매우 복잡하므로 토질역학적 접근과 생분해특성을 고려한 방법이 실제 폐기물 매립지에서의 장기 변형거동을 예측하기에는 재료의 다양성이라는 근본적 결함을 갖고 있다. 폐기물 매립장에서는 유기물질의 생분해로 매립가스가 발생하고 이로 인하여 매립지침하가 발생하게 된다. 따라서, 역학적 변형 또는 생분해과정의 메카니즘이라는 중간 과정을 분석하는 것보다 발생가스를 분석하는 것이 침하결과로서 해석하기 때문에 매립장침하의 오류가 발생할 수 있는 부분을 생략하여 오차를 줄일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 매립장에서 발생하는 매립가스의 특성이 침하와 어떠한 관계가 있는지 규명하고 동시에 침하를 촉진하기 위하여 발생 침출수의 재순환이 침하량에 어떤 영향을 미치는지 연구하였다. 또한, 가스발생모델을 제안하여 가스발생량을 예측하고 이로써 침하량에 대한 영향을 분석하였다.

## 2. 매립장 침하 예측기법

매립장의 침하메카니즘은 매우 복잡하여 전통적인 토질역학적 방법으로 해결하는 것은 적절하지 않다. 토질역학적인 방법은 흙입자, 물, 공기가 구성하는 삼상요소를 근거로 Terzaghi의 응력 및 압밀이론을 이용하지만 쓰레기의 구성물은 흙입자 뿐만 아니라 다른 요소들로 이루어져 있기 때문에 근본적으로 침하메카니즘이 일반 흙과는 다르다. 연약점토를 대상으로 침하를 예측하는 방법으로 일반적으로 Terzaghi의 압밀이론을 사용하지만 쓰레기는 포화상태가 아니며 재료특성이 매우 복잡하고 다양하므로 압밀이론의 적용이 불가능하다. 따라서 쓰레기의 조성 및 함수비 등 환경적 요인이 다른 매립장의 침하를 예측하는 것은 매우 어렵기 때문에 압밀이론 또는 레올로지 모델을 사용하는 토질역학적 기법과 계측을 통한 경험식의 이용방법이 사용되어 왔다.

### 2.1 토질역학적 방법

매립장침하문제는 오랜 기간이 소요되는 시간종속문제이며 매우 복잡한 현상에 의하여 발생한다(Sowers 1968, 1973). 쓰레기는 자중, 상재하중 및 다짐과 같은 외부하중에 의하여 간극이 줄어들어 압축되며 작은 입자가 큰 공간에 속채움을 하여 입자재배열의 경향이 크다. 이외에 쓰레기의 생분해침하는 쓰레기의 조성, 함수비, 온도 등에 큰 영향을 받는다. Sowers(1973)는 전통적인 토질역학적 방법인 변형률과 유효응력이 선형적인 관계를 가지는 일차압축에 의한 변형 거동과 변형률이 시간과 선형적인 관계를 갖는 이차압축에 의한 변형 거동으로 나누어 분석하고 각각 압축지수,  $C_c = 0.15 \sim 0.55e_o$ ,  $C_a = 0.03 \sim 0.09e_o$ 의 값을 15개월간의 계측자료를 바탕으로 침하량을 구하였다. 과거의 연구자들은 전통적인 Terzaghi의 압밀이론에 기초하여 매립지의 변형 거동을 예측하는 모델을 개발하였으며 (Morris and Woods, 1990; Fassett *et al.*, 1994; Rao *et al.*, 1977), Yen and Scanlon(1975)은 실제 매립지에서 실험을 통해 시간에 따른 침하율을 구할 수 있는 모델을 개발하여 임의의 시간의 총 침하량을 산정할 수 있었다. 그러나 매립지의 깊이가 작은 곳에서의 침하량은 과대평가 되고 매립지의 깊이가 큰 곳에서의 침하량은 과소평가되어 정확한 침하량을 예측하지 못하는 경향이 있다(El-Fadel and Khoury, 2000).

토질역학적인 방법은 쓰레기의 정확한 공학적 토질특성을 전제로 하기 때문에 쓰레기의 침하량을 구하는 것은 근본적으로 어려운 방법이다. 이론적인 연구에 의해 개발된 매립지의 변형거동 모델은 유동모델인 Gibson-Lo 모델이 매립지와 유사한 압축특성을 가지는 이탄과 같은 유기질토가 많이 함유된 지반의 변형 거동을 시간에 따라 예측하는데 적합한 모델이다. Zimmerman(1972)은 시간에 따른 간극비의 변화를 나타내는 함수와 크리프 개념을 이용하여 매립지의 고체부분의 변형 거동을 나타내는 유동학적 모델을 개발하기도 하였다.

### 2.2 경험식을 이용한 방법

토질역학적인 방법의 한계 때문에 실측데이터를 이용한 경험적인 방법이 개발되어 실무에서 사용하고 있는데 이에 는 로그함수법, 멱함수법과 쌍곡선법이 있다.

### 2.2.1 로그함수법

Yen 과 Scanlon(1975)은 LA에 있는 30m 높이의 매립지 3곳에 대하여 9년간 측정한 결과를 토대로 장기침하를 분석한 후 식 (1)과 같은 침하예측식을 제안하였다.

$$\rho = \frac{dS}{dt} = m - n \cdot \log t \quad (1)$$

여기서  $m = 0.0015H - 0.0093$ ,  $n = 0.0015H - 0.0093$ ,  $H$ 는 매립고이며 침하량은  $S = [m - n(\log t - 1)]t$ 로 표현하였다. 이 경험식을 이용하여 Yen and Scanlon(1975)은 대상 매립장에서 첫 6년 동안 한 달에 0.6cm씩 침하가 발생하고 침하는 매립성토높이에 비례한다고 보고하였다. 제안식에 따르면 침하율은 시간이 지남에 따라 감소하여야 하나, 일부 오래된 매립지의 침하량을 관측한 결과, 일정 시점이 지난 후에는 침하율이 감소하지 않고 일정한 값을 보였다. 본 모델식 역시 시간과 침하율의 관계를 지나치게 선형화시켜 다른 매립지에서 측정된 결과와는 잘 일치하지 않는 경우가 많다. 따라서 식 (1)은 매립지 침하의 정성적 파악만이 가능할 뿐 정확한 침하량을 예측하는 데는 한계가 많다. 또한 시간이 매우 커지면 침하량이 음의 값이 되는 본질적 문제점이 있으므로 실무에 이용하기 위해서는 적용범위 시간을 제한하여야 한다.

### 2.2.2 멱함수법

Edil et al(1990)은 유기질토에서 사용한 레올로지모델을 이용하여 매립지 침하량을 예측하고 멱함수법의 결과와 잘 일치하는 결과를 보여주었으며 이는 침하율과 시간과의 관계를 식 (2)와 같이 제안하였고 침하량은 식 (3)과 같다.

$$\rho = \frac{dS}{dt} = \frac{p}{t^q} \quad (2)$$

여기서,  $p$ =단위시간당 침하량,  $q$ =양의 경험상수이다. 로그함수법이나 멱함수법은 시간에 변형률을 시간의 함수로 표현하기 때문에 시간에 대하여 적분하여 침하량을 구한다. 총 침하량이 매립높이의 40%가 넘지 않도록 제한을 두어야 한다.

$$S = \frac{p}{1-q} t^{1-q} \quad (3)$$

### 2.2.3 쌍곡선법

Ling et al.(1998)는 매립지의 침하모델에 식 (4)과 같은 쌍곡선 모델을 사용하였다.

$$S = \frac{t}{1/\rho_o + t/S_{ult}} \quad (4)$$

여기서,  $\rho_o$  = 초기 침하율,  $S_{ult}$  = 극한 최종 침하량, 시간  $t$ 는 구하고자 하는 시간이다.

## 3. 생분해로 인한 침하와 가스발생을 이용한 방법의 제안

### 3.1 생분해로 인한 침하

Franklin et al.(1981)은 크리프에 의한 대변형과 생화학적 작용으로 인한 폐기물의 분해 등을 고려하여 폐기물 매립지의 시간에 따른 변형거동을 수학적으로 모델링하였으며 Ling et al.(1998)은 폐기물 매립지의 변형거동과 시간에 대한 관계를 비교·분석하고 매립지의 장기 변형거동을 예측하기 위하여 여러 가지 실험식들을 사용하였는데 장기 변형거동의 예측은 쌍곡선 함수에 의한 이론적 모델이 가장 유효하다고 제안하였다. Barlaz et al.(1989)은 다양한 미생물 그룹들이 관여하고 있고 주로 혐기성분해에 의해 발생될 유기물 생분해가 매립지의 시간에 따른 변형거동에 영향을 끼칠 뿐만 아니라 매립지의 안정화에 관여한다고 하였으며, Pfeffer(1992)는 매립지 변형거동예측을 위해 매립지내의 미생물의 활동, 특히 박테리아에 의한 생분해에 대한 정보가 필요하다고 제안하였다. 본 연구에서는 매립지의 침하가 초기의 탄성침하와 초기 1개월 정도기간의 압밀침하로 구할 수 있는 단기침하, 가스발생으로 구할 수 있는 생분해 장기 침하로 구분하여 총침하량을 평가하였다.

### 3.2 쓰레기 매립장의 가스발생 및 침출수 재순환

매립지에서 발생하는 가스는 이산화탄소와 메탄이 대부분이다. 이산화탄소는 시간이 지남에 따라 감소하고 메탄은 시간이 지남에 따라 증가하다 다시 감소하는 것이 전형적인 경향이다. 매립가스의 발생을 예측하기 위하여 발생모델을 이용하는데 가스발생모델은 폐기물의 양 및 조성, 매립시기와 매립경과시간 등의 변수에 따라 변한다. 일차분해모델의 경우, 폐기물의 메탄발생최대

량과 메탄발생속도상수가 주 변화요인이다.

매립 현장에서 사용하는 조기 안정화 방법 중 침출수 재순환법을 본 연구에 적용하여 침출수순환법이 침하에 어떤 영향을 미치는지 평가하였다. 기존 환경과학자들은 침출수재순환법을 침출수 수질개선과 수량제어 목적으로 연구하였다. 그러나 매립지 내부를 수분이 충분한 상태로 만들어 줄 경우, 수분증가로 혐기성 분해가 촉진되어 매립가스가 발생하고 이로 인해 침하도 촉진할 것으로 판단한다. Wall and Zeiss(1995)과 신항식 등(1996)은 침출수 재순환이 매립지의 분해, 안정화 종료 시간을 줄일 수 있다고 보고하였고 침하를 촉진가능성에 대해서도 언급하였다. 침출수 재순환이 초기 메탄가스발생량의 증가에 미치는 영향도 확인을 하였다. 본 연구에서는 매립시간이 지남에 따라 쓰레기가 생분해하여 가스가 발생하고 이에 따라 침하가 발생한다는 개념을 이용하였다. 이 방법을 사용하면 분석하기 어려운 침하과정보다는 가스발생이라는 결과를 이용함으로써 앞에서 언급한 여러 방법의 단점들을 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 모형 폐기물 매립조를 제작하여 생분해로 발생하는 가스의 발생특성과 발생량을 조사하고 침하경향과 상관관계를 비교·분석하였다. 가스발생모델을 제안하고 침하량을 예측함으로써 계측데이터와 비교·평가하였다. 또한 매립지에서 발생하는 침출수를 매립조에 재순환하여 침하촉진방법으로서의 가능성을 평가하였다.

#### 4. 실험

##### 4.1 실험장치

신선한 쓰레기 매립지반의 현장지반에서 관측된 초기 침하자료로는 분해를 고려한 적절한 장기침하 예측이 불가능하므로 분해조건이 좋은 상태에서 얻어진 실험 결과를 토대로 침하자료를 분석하기 위해 실내실험을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 매립조는 침하 및 분해과정을 육안으로 확인하기 위해 투명 아크릴판으로 제작하였으며 충전되는 쓰레기의 양을 크게 하여 정확한 결과를 얻고자 그림 1과 같이 두께 10mm, 폭 450mm×450mm로 제작하였으며 총 높이는 2270mm이다(그림 1).

매립조 상부에는 가스발생량, 성분 및 농도를 분석하기 위하여 직경 10mm의 가스유입관 및 유출관과 직경 12mm의 인공 우수 주입관을 설치하였고 매립조내로 대

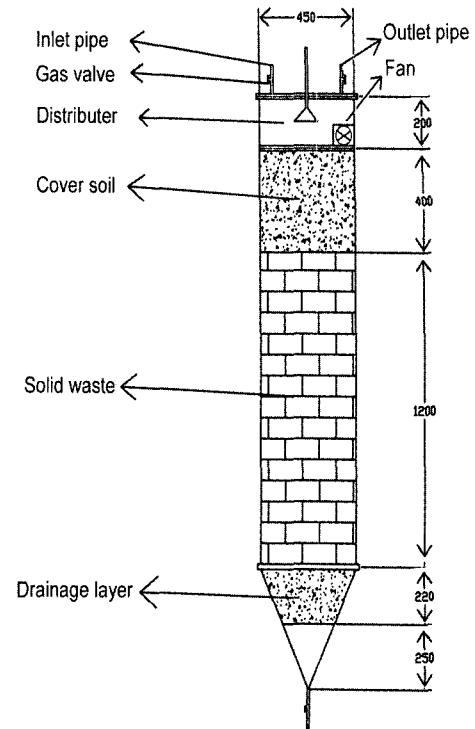


그림 1. 모의 매립조의 개념도

기가 유입되어 호기성상태로 분해가 되는 것을 막기 위해 가스밸브로 처리하였고 발생가스의 성분에 따른 밀도차에 의한 층상현상을 막기 위해 가스혼합장치(Fan)를 설치하였다. 침출수 재순환 및 인공강우가 매립조 표면을 따라 흐르는 channeling현상을 막고 쓰레기층에 골고루 분배될 수 있도록 중앙부에 침출수 분배장치를 설치하였다. 침출수 재분배시 복토층이 균일하게 유지되도록 다공질 아크릴판을 설치하였으며 매립조 저부에는 침출수 및 우수의 흐름을 용이하게 하기 위하여 No. 8~No.16 사이의 크기를 갖는 흠을 넣어 사각뿔모양의 배수층을 220mm 두께로 설치하였다.

배수층 하부에는 매립조를 통과한 침출수 및 우수를 집수 할 수 있도록 높이 250mm의 집수층을 두었고 직경 12mm의 침출수 배출관과 밸브를 설치하여 공기의 유입을 막고 침출수를 집수 및 배수를 용이하게 하였다.

##### 4.2 실험방법

###### 4.2.1 재료준비

실험에 사용한 쓰레기 시료는 대전, 경주, 동해, 수원, 서울, 수도권 등에서 발생하는 일반 쓰레기의 구성비를 참고하여 침출수를 재순환 시키지 않은 매립조(A)와 발

생 침출수를 재순환한 매립조(B)로 구분하여 같은 구성비의 시료를 충전하였다. 여기서 침출수는 인공으로 만든 매립조에서 나온 침출수이지만 현장의 조건과 같은 매립조이기 때문에 현장과 같은 성분의 침출수이다. 구성비는 표 1과 같이 젖은 상태와 건조후의 중량구성비로 나타냈다(박현일과 이승래, 2000).

쓰레기 구성비에 따라 함수비를 조절하여 쓰레기를 혼합하였으며 충전된 시료의 총 높이는 1200mm이고 전체 무게 150kg의 혼합시료의 단위중량은  $0.646t/m^3$ , 전체 초기 함수비는 96%로서 신항식 등(1996)이 제시한 도시 쓰레기의 특성과 유사하다.

복토시설의 기능은 지표수가 매립지내로 침투하는 것을 방지하고 비산방지, 매립가스와 같은 가스상태의 오염물질 유출방지이다. 가스포집을 위해 일정 장소에 가스 배출관을 두고 있다. 본 실험에서는 매립조내의 인공우수 및 침출수의 재순환과 발생가스의 포집을 위하여 쓰레기층 120cm 위에 모래질 흙으로 40cm를 복토하였으며 복토재는 SP의 흙이다. 흙의 균등계수는 2.77, 곡률계수는 0.91이다.

#### 4.2.2 발생가스의 포집 및 침출수 재순환

매립조내에서 분해도중 시간에 따라 발생하는 가스 성분 및 발생량은 일정시간 공기순환장치를 돌려 발생가스를 혼합한 후 하루에 일회 측정하였다. 발생가스  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ 의 측정은 상방치환 방법을 이용하여 가스의 발생시 그 가스압에 의하여 메스실린더안의 물이 내려가는 양을 측정하여 발생량을 구하였다.

매립조는 2기를 제작하였으며 침출수를 재순환 시키지 않고 인공강우만을 주입시킨 A매립조와 발생침출수를 재순환 시키며 인공강우를 주입시킨 B매립조로 구분하여 운전하였다. 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 l/week 결정하였으며 A, B 매립조에 모두 주입하였다(한국수자원공사, 1993).

B매립조의 침출수의 재순환량의 결정은 재순환량이 지나치게 많을 경우 매립조내부의 온도를 하락시켜 가스 분해 및 산형성 반응을 저해하며 매립조내 침출수의 짧은 체류시간으로 미생물의 고정 성장이 저해되고 미생물의 유실현상이 발생한다. 본 실험에서는 우수 주입률인 1 l/week을 기준으로 하여 5배에 해당하는 5 l/week로 주

입하였다(신항식 등, 1996).

침출수의 재순환 및 인공우수의 정기적인 주입은 시료의 충전 후 초기 30일 동안은 매립지 내 미생물의 성장을 위하여 실시하지 않았으며 30일 이후에 하루에 한 번씩 재순환을 하였다. 이때의 양은 표 2에 나타난 바와 같이 A 매립조에 인공우수 0.143 l/day, B 매립조에 침출수 0.715 l/day, 인공우수 0.143 l/day씩 주입하였다.

매립지내의 쓰레기 성분 중 분해가능한 유기물질의 분해에 의한 가스량의 발생 및 성분은 온도와 밀접한 관계를 갖는다. 체류시간이 긴 경우 가스의 발생이 가장 활성화 되는 이상적인 온도는 35도이지만 실험실 여건에 맞지 않아 1.8m×2.5m, 높이 3.3m의 향온실을 철재로 제작하여 실내온도를 28도로 유지하여 쓰레기의 분해조건을 조절하였다.

## 5. 실험결과

### 5.1 발생가스 및 발생량

매립조내의 발생가스량은 그림 2와 같이 매립조 A와 B 모두 비슷한 양상을 보인다. 가스의 양은  $CO_2$ ,  $CH_4$  등이 대부분을 차지하지만 그림 2에 나타난 바와 같이 가스의 총량을 나타내었다.

가스의 발생량은 그림 2에서 나타난 바와 같이 시간이 지남에 따라 유기물의 분해에 의해 증가하였다. A 매립조에서 초기에는 많은 가스가 발생하지만 약 200일 이후부터는 침출수를 재순환 시킨 B 매립조의 가스가 더 많이 발생하였다. 이것은 A매립조가 수분의 증가에 의해 분해가 빨리 일어나고 B 매립조는 가스발생이 시간이 지난 후에 더 발생하였다.

### 5.2 가스발생량과 침하특성

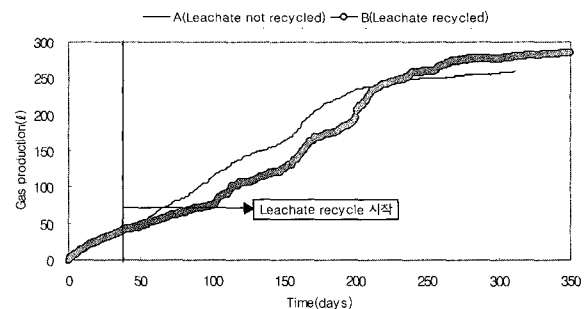


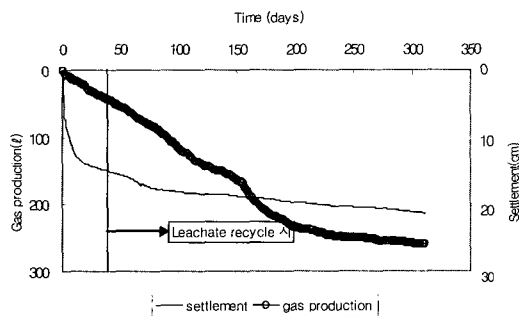
그림 2. 매립조 A와 B의 가스발생량 비교

$$S = \frac{\Delta q H_0}{E_s} \quad (5)$$

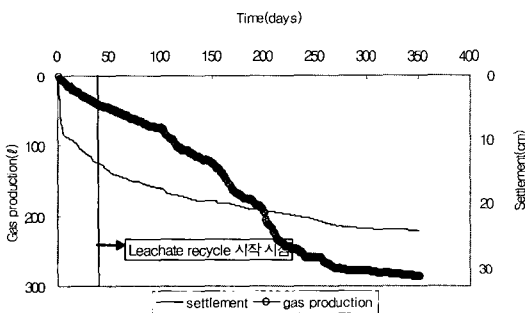
침하량의 측정은 매립조 둘레의 침하량을 측정하여 평균침하를 나타내었다. 매립조내에서 생분해가 발생함에 따라 가스가 발생하며 동시에 생분해로 인한 침하가 발생한다. 그림 3에 나타난 바와 같이 가스발생량이 증가할 수록 침하량이 증가하는 것을 알 수 있다. 침하량은 300일이 지난 후에 20cm 이상이며 변형률은 약 17%이다. 가스발생량과 침하량은 초기에 다른 모습을 나타내는데 이는 침하계측 값이 초기에는 탄성침하인 초기침하가 급속히 발생한 것이며 쓰레기 시료의 느슨한 입자의 압축 및 구성물질의 재배열로 인하여 발생된 것이다. 또한 복토재의 하중으로 인한 압밀침하가 발생하였기 때문으로 판단된다. 생분해로 인한 침하는 가스의 발생과 비슷한 결과를 나타내는 것으로 사료된다. 초기침하량을 산정하는데 사용한 쓰레기의 침하량식은 식 (5)와 같으며 쓰레기의 역학적 특성은 단위중량,  $r_t = 6.30\text{kN/m}^3$ ,  $E_s = 191.6\text{kN/m}^2$ , 이고 구한 초기침하량은 3.8cm이다. 탄성계수는 실험에서 구한 값으로 초기 24시간동안의 변형률을 이용하여 구하였다.

여기서,  $S$ 는 침하량,  $E_s$ 는 쓰레기의 탄성계수  $\Delta q$ 는 작용하중,  $H_0$ 는 초기두께를 나타낸다. 일차압밀침하는 일반적으로 매립이 완료된 매립지에서 대개 1개월 이내에 발생하는데, 이는 매립지 내부의 간극을 채우고 있는 공기와 물이 압력에 의해 제거되면서 발생한다(Sowers, 1973). 일차침하는 Terzaghi가 제안한 전통적인 압밀침하식을 사용하였다. Sowers는 일차압축지수  $C_c$ 가 초기 간극률과 매립지의 유기물 함량에 따라 선형으로 증가한다고 제안하였고, 이를 이용하여 일차압축지수를 추정하였다.  $C_c$ 는 [0.15(유기물함량이 낮은 경우)~0.55(유기물함량이 높은 경우)]  $e_0$ 의 식을 사용하는데 본 실험에 사용한 매립조에서 구한 일차침하는 15.71cm이며 이때의  $C_c$ 는 0.4  $e_0$ 이다.

초기 침하량이 작게 측정된 B 매립조에서 침출수를 재순환 시킨 30일 이후부터 시간이 경과함에 따라 수직변형이 증가하여 A매립조보다 발생가스의 양이 약간 증가하며 침하량도 약간 더 큰 것을 알 수 있다(그림 4). 본 실험에서 비교한 바에 의하면 침출수재순환이 침하를 소폭 증가시키는 것을 알 수 있다. 초기에 A 매립조가 B매립조보다 침하량이 큰 것은 다짐상태의 차이 때문인 것으로 보인다.



(a) A(Leachate not recycled)



(b) B(Leachate recycled)

그림 3. 침하량과 가스발생량

## 6. 생분해로 인한 장기침하

본 연구에서는 매립지에서 발생하는 침하를 초기침하, 1개월 정도의 단기간에 발생하는 압밀침하, 장기간에 발생하는 생분해 침하로 분리하여 생분해침하를 구하였다. 생분해에 의한 침하는 가스발생량을 추정하는 모델을 제

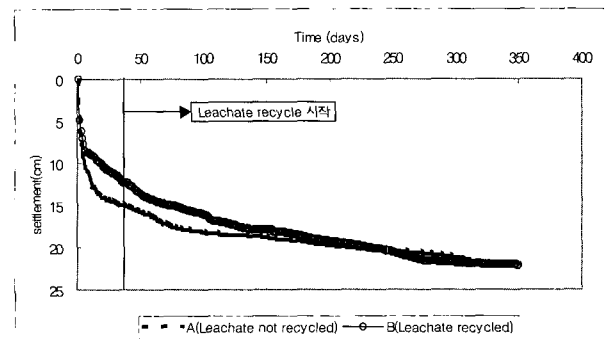
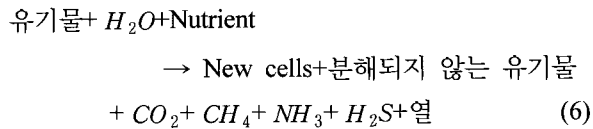


그림 4. 매립조내의 침하량 비교

안하고 제안한 모델과 침하량과의 관계를 분석하였다.

### 6.1 생분해과정

쓰레기가 어느 정도 분해가 가능한 지는 생분해가 가능한 탄소함유량, 분해속도, 그리고 없어진 쓰레기의 무게와 침하의 관계를 고려하면 정확히 알 수 있다(Wall and Zeiss, 1995). 쓰레기를 건조시키면 일반적으로 셀룰로오스 40~50%, 리그닌 10~55%, 헤미셀룰로오스 12%, 단백질 4%를 함유하고 있는데 셀룰로오스나 헤미셀룰로오스의 함유량이 많을수록 분해가 많이 된다(Barlez *et al.*, 1989). 쓰레기 속의 유기물질은 혐기성상태에서 미생물에 의해 식 (6)과 같은 과정을 거쳐 가스를 배출하며 변환된다(Tchobanoglous *et al.*, 1993).



Tchobanoglous *et al.*(1993)에 따르면 쓰레기의 약 80%가 유기물질이라고 하였으며 쓰레기의 약 20%가 가스로 변환되며, 매립지는 40년 동안 약 90%의 생분해가 된다고 하였다(Disbrow, 1988).

### 6.2 생분해로 인한 가스발생모델

Armtz(1993)는 매립장에서의 침하는 가스 발생이 식 (7)과 식 (8)과 같은 두 단계의 관계식을 갖는다고 제안하였다.

$$\frac{dV}{dt} = at \quad (0 \leq t \leq t_1) \quad (7)$$

여기서,  $V$  = 단위시간당 단위 면적에 발생한 가스량 ( $L^3/m^3/T$ )  
 $a$  =  $t_1$  동안 평균 가스발생량 ( $L^3$ )  
 $t_1$  = 매립 완료된 시간 ( $T$ )

$$\frac{dV}{dt} = at_1 e^{-k(t-t_1)} \quad (8)$$

여기서,  $k$  = 분해속도상수  
 $t$  = 총가스 발생시간

매립가스 생성의 주된 메카니즘인 쓰레기의 생물학적 분해와 이에 따른 매립가스의 발생은 보통 일차반응으로 가정되어 모델링되며 미국의 경우  $a$ 값은  $140m^3/wet\ ton$  정도가 보통이다. 또한  $k$ 값은  $0.003 \sim 0.211(1/yr)$  정도이며 이는 반감기로 3년 정도에서 230년 정도의 범위를 가지나 빨리 썩는 음식물 쓰레기의 경우는 반감기를 2~3년 정도, 그리고 종이 종류들은 10년, 목재, 섬유, 피혁 종류는 40에서 50년 정도가 사용되고 있다. 수도권매립지의 경우  $k$ 값은 급속분해가능한 쓰레기에 대해서는  $0.30\ 1/yr$ , 중속분해가능한 쓰레기는  $0.06\ 1/yr$ , 완속분해가능한 쓰레기에 대해서는  $0.015\ 1/yr$ 가 각각 사용되었다(김지형, 2000).

### 6.3 생분해로 인한 가스발생과 장기침하량 산정

매립장에서 발생하는 총 가스량은 식 (7)과 식 (8)의 합을 시간에 대하여 적분하면 식 (9)와 같이 얻을 수 있다.

$$V = at^2/2 + (at/k)(1 - e^{-k(t-t_1)}) \quad (9)$$

여기서,  $V$  = 총 가스발생량 ( $m^3/day$ ), 2단계 종료시 가스 배출비율이 1단계 종료시의 10%로 정의할 때  $k$ 는 0.076753로 하였다. 쓰레기 총 가스발생량은 매립지의 배출장치의 확실한 설치와 정확한 측정에 의해 결정된다. Disbrow(1988)는 매립 후 40년 동안에 발생하는 가스가 전체의 양의 90%라고 하였지만, 본 연구에서는 95%로 하여 가스모델을 적용하였을 때 실험과 비슷한 결과를 얻었다. Guasconi(1995)도 95%의 값을 사용하였다. 실험에 사용한 쓰레기의 구성은 표 1과 같으며 매립조의 부피는  $0.232\ m^3$ , 단위중량은  $6.3kN/m^3$  이다. 실험에서 사용한 쓰레기의 화학구성비와 쓰레기의 양, 종류, 수분함양, 온도, 유기물 함량에 따라 가스발생량이 변화한다. 실험온도는  $28^\circ C$ 로 유지하였으며 쓰레기의 구성요소별로 유기물질과 무기물로 구분하여 표 3에 나타난 바와 같으며 유기물의 건조무게는 표 4과 같다. 화학성분의 무게는 표 5와 같으며 쓰레기에 포함된 유기 물질의 물비는 표 6과 같다. 물비는 질소를 기준으로  $C_{36.03}H_{55.71}O_{20.64}N_1$ 이다(표 6). 분해 후의 건조무게는 표 7과 같다. 총 가스발생량은 Tchobanoglous, et al(1993). 이 제안한 방법으로 식 (10)과 식 (11)과 같이 구하였다.

표 1. 쓰레기 구성 특성

Component	Food	Paper	Textile	Plastic	Wood	Metal	Glass and Ceramic	Others	Total
Wet Weight (Percent)	45	23	10	7	2	4	6	3	100
Wet Weight (kg)	67.5	34.5	15	10.5	3	6	9	4.5	150

표 2. 모의 매립조의 우수 및 침출수 재순환양

	인공우수 주입량	침출수의 재순환양
A(Leachate not recycled)	0.143 ℓ / day	재순환 안함
B(Leachate recycled)	0.143 ℓ / day	0.715 ℓ / day

표 3. 쓰레기의 화학적구성비 (Tchobanoglous et al., 1993)

Organic	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfur	Ash
Food waste(%)	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
Paper(%)	43.5	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
Cardboard(%)	44.0	5.9	44.6	0.3	0.2	5.0
Plastic(%)	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
Textile(%)	55.0	6.6	31.2	4.6	0.15	2.5
Rubber(%)	78.0	10.0	-	2.0	-	10.0
Leather(%)	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
Yard waste(%)	47.8	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
Wood(%)	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
<b>Inorganic</b>						
Glass(%)	0.5	0.1	0.4	-	-	98.9
Metals(%)	4.5	0.6	4.3	-	-	90.5
Dirt, Ash Etc(%)	26.3	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0

표 4. 유기물질의 건조무게

Component	Weight(kg)	Moisture Content(Percent)	Dry Weight(kg)
Food waste	67.50	70	20.25
Paper	34.50	6	32.43
Plastic	10.50	2	10.29
Textiles	15.00	10	13.50
Wood	3.00	20	2.40

표 5. 유기물의 화학성분 무게

Organic	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfur	Ash
Food waste	9.72	1.29	7.61	0.52	0.08	1.01
Paper	14.10	1.94	14.27	0.097	0.06	1.94
Plastic	6.17	0.74	2.34	0.00	0.00	1.02
Textile	7.42	0.89	4.21	0.62	0.02	0.33
Wood	1.18	0.14	1.02	0.05	0.01	0.04
Total(kg)	38.61	5.01	29.46	1.25	0.16	4.36

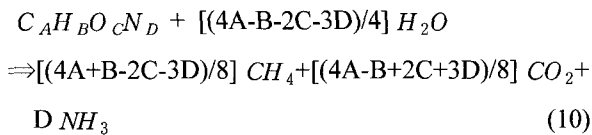


표 6. 화학적 성분의 몰비

Component	Weight(kg)	Atomic Weight	Number of Moles	Mole Ratio(N=1)
Carbon	38.61	12.01	3214.82	36.03
Hydrogen	5.02	1.01	4970.30	55.71
Oxygen	29.47	16.00	1841.86	20.64
Nitrogen	1.25	14.01	89.22	1.00
Sulfur	0.17	32.07	5.30	0.06
Ash	4.36	-	-	-

표 7. 분해에 의한 쓰레기 건조무게

Component	Weight(kg)	Moisture Content(Percent)	Dry Weight(kg)
Food waste	67.50	70	2.48
Paper	34.50	6	3.96
Plastic	15.00	2	1.80
Textiles	10.50	10	1.17
Wood	3.00	20	0.30
Metal	6.00	3	0.71
Glass and Ceramic	9.00	2	1.08
Others	4.500	8	0.51
Total Weight	150.00		9.82



여기에서, A=36.03, B=55.71, C=20.64, D=1

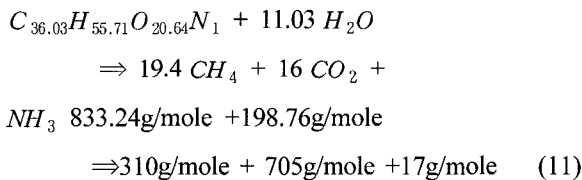


그림 3과 그림 4에서 분석한 가스의 양이 발생한 총 가스양인데 반하여 그림 5는 가스가 시간이 지남에 따라 어떻게 발생하는지 그 추이를 알 수 있다. 침출수를 재순환한 B매립조는 초반보다 매립 후반에 가스발생을 촉진하는 효과가 있는 것으로 보이며 본 실험에서는 400일 정도 지난 후에는 가스의 양이 현저히 줄었다. 본 연구에서 사용한 실험은 크기가 작은 모형매립조이기 때문에 가스의 배출량이 많지 않고 실내에서 실행한 것이기 때문에 현장보다 분해가 촉진된 것으로 판단하며 모델을 현장에 적용할 경우 그림 6과 같이 많은 양이 40여 년간 발생하는 것으로 나타났다. 이것은 가스발생모델 결과와 본 연구의 실험 결과의 가스발생추이가 비슷하다는 것을 보여주는 것이다.

본 연구에서 제안한 가스발생모델로 구한 생분해 침하량과 실험치의 비교는 그림 7과 같다. 이 모델은 실험치

와 비교적 잘 일치한다. 여기서의 생분해침하량은 순수하게 분해에 의한 침하량으로 즉시침하와 복토 등 외부 하중에 의한 침하를 뺀 침하량이다.

침출수 재순환 하지 않은 매립조 A와 가스발생모델 결과의 경향은 비슷한 반면 침출수재순환을 시킨 매립조 B는 더 많은 침하가 발생하였다. 재순환을 하지 않은 매립조 A는 가스발생모델의 약 1.4배, 침출수재순환한 매립조 B는 약 1.7배 침하가 발생하여 침출수재순환이 침하를 촉진하는 효과가 좋은 것으로 나타났다. 또한 가스발생모델로 예측한 모델은 침하량의 보정계수를 필요하며 본 실험에서는 1.4내지 1.7의 보정이 필요하다. 일반

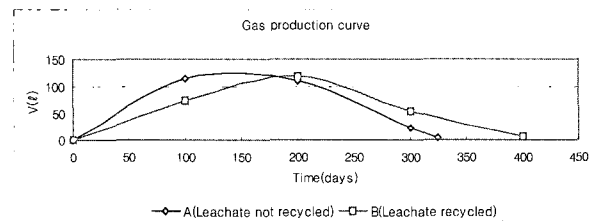


그림 5. 매립조에서 발생한 가스발생량

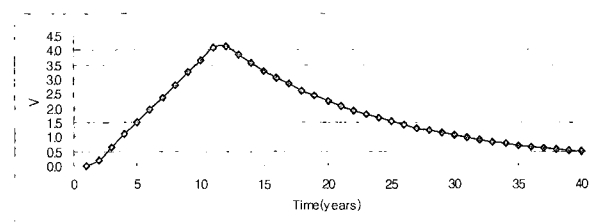


그림 6. 제안가스모델의 가스발생량

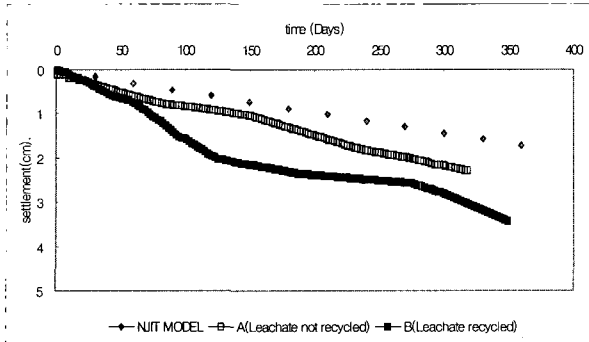


그림 7. 생분해에 의한 장기 침하량의 실험치와 제안모델의 비교

적으로는 구성화학생분에 따라 변하므로 보정계수의 조절이 필요하다.

따라서, 식 (9)는 식 (12)와 같이 보정계수,  $\alpha$ 가 필요하다.

$$V = \alpha \{ aT^2/2 + (aT/k)(1 - e^{-k(t-T)}) \} \quad (12)$$

## 7. 결론

본 연구에서는 폐기물 모형 매립조를 제작하여 가스발생량을 측정하는 실험을 실시하였다. A(Leachate not recycled)매립조와 B(Leachate recycled)매립조의 두 가지로 구분하여 침출수순환효과를 분석하였다. 매립조내에서 유기물의 양에 따라 달리 발생하는 가스의 양을 예측할 수 있는 가스발생모델을 제안하였다. 실험결과 가스의 양은 시간이 지남에 따라 크게 증가하다 오랜 시간이 지난 후에는 점차 감소하는 특성을 나타낸다. 쓰레기내의 유기물이 분해되면서 발생하는 가스발생특성을 분석하여 침하특성과 상관관계를 분석하였는데 가스발생모델의 결과와 실험계측치를 비교하였다. 그 결과 가스의 양과 생분해로 인한 침하는 가스의 양과 매우 밀접한 관계가 있으며 가스의 양을 예측할 수 있는 가스발생모델로 생분해침하를 예측할 수 있다. 본 실험에서 제안한 모델은 1.4~1.7의 보정계수가 필요하다. 또한 침출수를 재순환하는 것은 침출수를 재순환하지 않는 방법에 비하여 장기적 분해를 더욱 촉진시켜 가스의 발생을 늘리며 결과적으로 장기침하량을 약 25%정도 촉진하는 것으로 나타났다. 국내에서는 음식 쓰레기의 매립지내 반입이 금지된 후에는 생분해에 의한 장기침하가 줄어들 것으로 판단되며 이후 매립지내의 구성성분의 재조사와 함께 침하량예측에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

- 김지형 (2000), "폐기물 매립지에서의 유해가스 유출 현황", 고려대학교 토목환경공학과.
- 박현일, 이승래 (2000), "기존 침하모델들을 근거한 쓰레기 매립지 장기 침하 예측", 한국지반공학회, 제16권, 제2호, pp.41-50.
- 신항식, 강석태, 이채영, 이남훈 (1996), "침출수 재순환을 이용한 유기물 분해항상이 매립지 침하에 미치는 영향", 한국폐기물학회논문집, 제16권, 제6호, pp.191-201.
- 한국수자원공사 (1993), "21세기를 바라보는 수자원 전망", 연구보고서 IPD-93-2.
- Arntz, C. (1993), "A Model for Estimating Landfill Settlement Due to Biodegradation", Project in Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, New Jersey.
- Barlaz, M. A., Schaefer, D. M. and Ham, R. K. (1989), "Bacterial Population Development and Chemical Characteristics of Refuse Decomposition in a Simulated Sanitary Landfill", Applied and Environmental Microbiology, 55, pp.55-65.
- Christensen T. H. and Kjeldsen P. (1989), "Basic Biochemical Process in Landfills. Sanitary Landfilling", Process, Technology and Environmental Impact, Academic Press.
- Disbrow, T. (1988), "Gas Production and Settlement Rates at Landfills", Term Paper submitted for CE 640, Department of Civil and Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, New Jersey.
- Edil, T. B., Ranguette, V. J., and Wuellner, W. W. (1990), "Settlement of Municipal Refuse, Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice" ASTM STP 1070, ASTM, Philadelphia, pp.225-239.
- El-Fadel, M. and Khoury, R. (2000), "Modeling Settlement in MSW Landfills: A Critical Review", Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 30(3): pp.327-361
- Fasset, J. B., Leonards, G. A., and Repetto, P. C. (1994), "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Landfill Design", Proceedings of Waste Tech. Conference, Charleston, SC, January.
- Franklin, A. G., Chen, W. H. and Quon, J. E. (1981), "Time-settlement Behavior of Processed Refuse. Consolidation of Milled Refuse", NTIS Report, PB81-228587, v1-2 (363)
- Gibson, R. E., and Lo, K. Y. (1961), "A Theory of Soils Exhibiting Secondary Compression", Acta Polytechnica, C110296, pp.1-15.
- Ling, I., Leshchinsky, D., Yoshiyuki, M. and Toshinori, K. (1998), "Estimation of municipal solid waste landfill settlement", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(1), pp.21-28.
- Morris, D. V., and Woods, C. E. (1990), "Settlement and Engineering Considerations in Land Final Cover Design. Geotechnics

- of Waste Fills-Theory and Practice*", ASTM STP 1070. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.9-21.
16. Guasconi M. T. (1995), "A Study of Settlement in Landfill due to Biodegradation", Department of Environmental Engineering, New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ
  17. Pfeffer, J. T. (1992), "Solid Wasted Management Engineering", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J.
  18. Rao, S. K., Moulton, L. K., and Seals, R. K (1977), "Settlement of Refuse Landfills" Geotechnical Practice for Disposal of Soild Waste Materials, Ann Arbor, Mich., pp.574-599.
  19. Sowers, G. F. (1968), "Foundation Problems in Sanitary Landfills", *Journal of San. Engineering. Div.*, ASCE, 94(SA1)
  20. Sowers, G. F. (1973), "Settlement of Waste Disposal Fills. Proceedings", The Eight International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973, pp.207-210.
  21. Tchobanoglous, G., H. Theisen., and S. Vigil. (1993), "Integrated Solid Waste Management", McGraw Hill Book Co., New York.
  22. Wall, D. K., and Zeiss, C. (1995), "Municipal Landfill Biodegradation and Settlement", *Journal of Environmental Engineering*, ASCE, 121(3), pp.214-224.
  23. Yen, B. C., and Scanlon, B. (1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.105, No.5, pp.475-487.
  24. Zimmerman, E. R. (1972), "A Mathematical Model for Solid Wasted Settlement", Ph. D. Dissertation, Northwestern University, Evanston, Illinois.

(접수일자 2004. 3. 20, 심사완료일 2004. 9. 16)