

분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동

Long-Term Settlement Behavior of Landfills
with Consideration of Refuse Decomposition

박 현 일*1

Park, Hyun-Il

이 승 래*2

Lee, Seung-Rae

고 광 훈*1

Koh, Kwang-Hoon

Abstract

In refuse landfill, long-term settlement is considerably dependent upon the biological decomposition of refuse which is distinguished from typical soil behavior. Two equations are combined in order to model long-term settlement behavior of refuse landfill caused by mechanical secondary compression and secondary compression caused by the decomposition of biodegradable refuse. It is suggested that mechanical secondary compression is linear with respect to the logarithm of time. In order to estimate the settlement that occurs due to the decomposition of biodegradable refuse, a mathematical model is used which theoretically considers the decomposition process related to the solubilization stage of biodegradable refuse solid. This model is based on hydrolysis process and expressed as first order kinetics. The proposed model is applied to Lysimeter compression data of an old refuse. This paper intends to propose the simplest mathematical model which effectively represents settlement caused by the solubilization stage of biodegradable refuse solid on decomposition process.

요 지

쓰레기 매립지의 장기 침하 메카니즘은 일반적인 흙의 거동과는 달리 생물학적인 분해에 의해서 크게 영향을 받는다. 본 논문에서는 쓰레기 매립지의 장기 침하량(역학적 이차침하량과 분해에 의한 이차침하량)을 예측하기 위하여 두 식이 사용되었다. 역학적 이차침하는 변형률-대수 시간에서 선형적인 관계를 갖는다고 가정하였다. 분해에 의한 침하를 평가하기 위하여, 분해 가능한 쓰레기 고형물의 용액화에 관련된 일차반응기작으로 묘사되는 가수분해 과정을 고려한 모델을 숙성된(aged) 쓰레기로 충전된 Lysimeter 침하자료에 적용하였다. 본 연구에서는 분해과정 가운데 쓰레

*1 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

기 고형물의 용액화로 말미암아 유발되는 침하를 효과적으로 모사할 수 있는 간단한 수학적 모델을 제안하고자 하였다.

Keywords : Decomposition, Refuse landfill, Settlement, Long-term settlement, Secondary compression

1. 서 론

가스 및 침출수 배출 시스템 혹은 라이너 시스템을 설계할 때나 기존 매립지의 사후 활용 방안을 검토하고자 할 경우에는 대상 쓰레기 매립지의 장기침하량에 대한 비교적 정확한 예측이 이루어져야 한다. 이를 위해서 많은 예측 침하모델들이 지반공학적인 근거하에서 제안되어 왔다(Sowers, 1973; Yen과 Scanlon, 1975; Rao et al., 1977; Edil et al., 1990; Morris와 Woods, 1990; Landva와 Clark, 1990; Bjarngard와 Edgers, 1990; 등). 그러나 쓰레기 매립지 침하거동은 현재까지 명확하게 규명되지 못한 상황이며, 토질역학적인 근거하에 제안된 일부 모델들은 신뢰성이 상당히 결여되어 있기도 하다.

쓰레기 매립지는 일반적인 흙의 거동과는 달리 유기성 고형물의 생물학적 분해에 의해서 상당한 장기적 침하가 발생한다고 알려져 있다(Sowers, 1973; Chen, 1974; Al-Khafaji와 Andersland, 1981; Wardwell과 Nelson, 1981; 등). 그러나 현재까지 생물학적 분해가 매립지 침하에 미치는 구체적인 지반공학적 메카니즘은 정확히 규명되지 않은 상황이다. 그러한 이유는 쓰레기 매립지 내부에서 유기성 고형물의 분해로 인해 유발되는 침하(the settlement that occurs due to decomposition of biodegradable refuse: SDBR)는 외면적인 측면에서 볼 때에는 토질역학에 근거한 역학적 양으로 구분될 수 있으나, 내면적으로 살펴보면 그 발생양상이 역학적으로 표현하기 곤란한 생물학적 분해과정에 의해서 유발되기 때문이다.

따라서 이러한 쓰레기 매립지의 독특한 침하거동을 모델링하기 위해서는 체적변형과 관련하여 비교적 중요한 요소인 분해과정에 관

한 토질역학적인 시각으로의 접근이 요구된다. 쓰레기 매립지반의 생물학적 분해과정에 대한 지반공학적인 측면에서의 주된 관심사는 분해과정 가운데 유기성 고형물의 용액화 과정이라 할 수 있다. 즉 분해가능한 쓰레기 고형물이 분해과정에서 매립지로부터의 유출이 가능한 액체상태의 중간단계 물질로 전환됨으로써 원래 갖고 있던 쓰레기 고형물의 체적은 감소하게 될 것이다. 따라서 이들 체적감소로 말미암아 쓰레기 매립지에서는 결국 침하가 유발될 것이다.

2. 쓰레기 매립지의 장기 침하 특성

일반적으로 쓰레기를 구성하는 물질은 흙과는 근본적인 차이점을 갖고 있다. Grisolia와 Nepoleoni(1995)는 쓰레기 매립지의 전체적인 침하양상을 규명하고자 쓰레기를 구성하는 물질들을 다음과 같이 세가지 요소들로 구분하였다: (1) 유리, 금속 등과 같이 자체적으로 변형이 발생되지 않는 물질(Class A), (2) 고무, 가죽, 종이 등과 같이 변형성이 큰 물질(Class B), (3) 음식물, 분해가능한 유기물 등과 같이 비교적 빠른 시간 내에 분해되는 물질(Class C). 그러나 Class C의 물질들도 지반내에서는 생물학적 반응이 비교적 느리게 일어난다.

쓰레기 매립지에서 침하를 유발하는 메카니즘은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다(Sowers, 1973; Gordon 등, 1986). 첫째로, 역학적 압축(mechanical compression)은 하중증가에 의해 유발되는 침하량으로 수개월 이내에 발생하는 일차압축과 오랜 기간 동안 지속적으로 발생하는 역학적 이차압축(mechanical secondary compression: Δc_{mc})으로 구분될 수 있다. 일차압축은 가스 혹은 공기로 채워진 간극의 압축, 느슨한 쓰레기의 압축, 입자의 미끄러짐 등에

의하여 유발된다. 반면 이차압축은 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배열, 쓰레기 구성성분의 지체된(delayed) 압축 등에 의하여 장기적으로 발생된다. 둘째로, 분해(decomposition)에 의한 침하($\Delta \epsilon_{dec}$)는 쓰레기에 포함된 분해가 능한 유기성 고형물이 생물학적 반응기작을 따라 분해됨으로 말미암아 발생하게 된다. 위에서 언급한 바와 같이 쓰레기 매립지의 장기 침하양상은 다음과 같이 두 성분으로 구분될 수 있다(Sower 1973; Gordon 등, 1986). 이를 식으로 표현하면 다음 식 (1)과 같으며

$$\Delta \epsilon(t)_{\text{long-term}} = \Delta \epsilon(t)_{\text{mec}} + \Delta \epsilon(t)_{\text{dec}} \quad (1)$$

쓰레기 매립지의 침하양상에 대한 연구결과에 따르면 생물학적 분해에 의해서 이차압축량이 크게 증가하는 것으로 알려져 있다(Sowers, 1973; Yen and Scanlon, 1975; Oweis and Khera, 1976). Sowers(1973)의 실대형 모형매립지 실험과 Yen 및 Scanlon (1975)의 실제매립지 자료분석에 따르면 생물학적인 분해조

건이 향상됨에 따라 이차압축량이 증가되었다. 또한 Al-Khafaji와 Andersland (1981)은 실내 실험을 통하여 유기물 함량이 증가함에 따라 발생하는 최종적인 압축량이 증가한다고 보고 하였다. 뿐만아니라 Wardwell과 Nelson (1981)의 연구에서도 유기물 함량이 증가함에 따라 분해에 의한 이차침하량 또한 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보였다.

한편 최근에 Grisolia와 Napoleoni(1995)는 쓰레기 매립지의 침하모델 제안에 기여할 수 있는 쓰레기의 분해 및 역학적인 압축특성을 고려한 이론적인 압축곡선의 형태를 그림 1과 같이 제안한 바 있다. 이들은 쓰레기 매립지의 침하메카니즘을 그림에서 보는 바와 같이 (1) 초기침하 단계, (2)초기 잔존침하 단계, (3)분해와 크립에 의한 이차침하 단계, (4)분해완료 단계, (5)최종 잔존침하 단계와 같이 다섯단계로 구분하여 설명하였다.

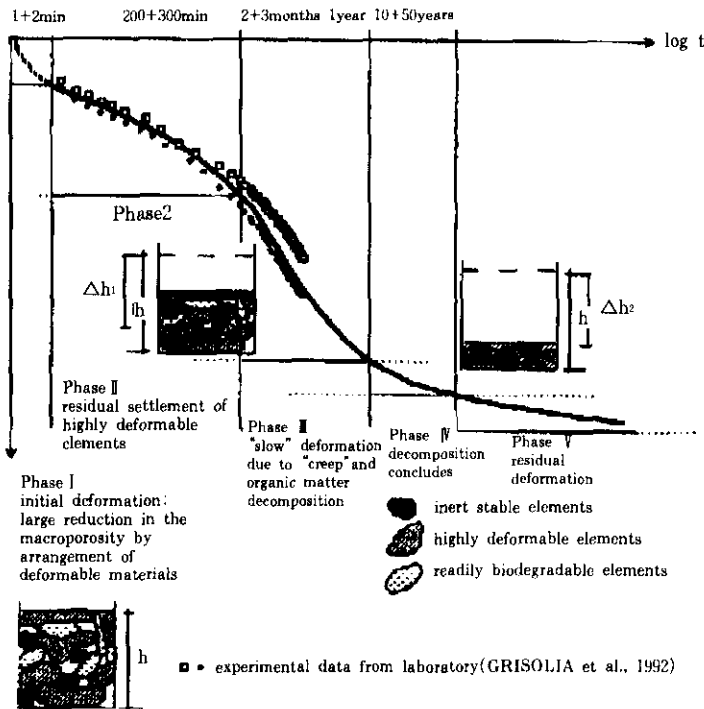


그림 1. 쓰레기 매립지반의 침하양상(Grisolia와 Napoleoni, 1995)

2.1 역학적 이차압축 메카니즘

대형압축실험을 통한 쓰레기의 침하거동에 대한 연구들이 상당히 수행되었다(Rao 등, 1977; Bjarngard, 1989; Landva와 Clark, 1990; Jessberger와 Kockel, 1993; Gabr와 Valero, 1995). 대형압축실험결과에서 얻어진 대부분의 압축곡선은 변형률-대수시간 축에서 초기침하가 완료된 이후부터 지속적인 선형 관계를 보인다. 이들 실험은 비교적 짧은 실험기간으로 인하여 분해효과가 침하양상에 포함되지 않는 것으로 사료된다. 이들 실내실험결과들과 동일한 침하양상을 분해조건이 열악한 실제 매립지의 침하자료에서도 살펴볼 수 있다(Sowers, 1973).

$$\Delta \varepsilon(t)_{mec} = C_{z, mec} \text{Log}[(t + \Delta t) / t] \quad (2)$$

$C_{z, mec}$: 역학적 이차압축율 계수

분해가 포함되지 않는 경우 실제 매립지의 이차압축율 계수값과 실내실험 값들이 표 1에서 서로 비교되었다. 제한적인 자료들의 비교이기는 하지만, 분해에 의한 영향이 포함되지 않은 매립지 침하자료는 분해가 전혀 일어나지 않은 신선한 쓰레기에 대한 실내실험 값들과 매우 유사한 값을 보이고 있다.

지금까지 수행된 대형압축실험 결과들을 근거로 역학적 이차압축계수에 대해 여러 지반공학적인 인자들이 미치는 영향을 분석하였다. 그림 2에서 살펴보면 $C_{z, mec}$ 값이 응력 강도

(stress intensity) 및 단위 밀도와 같은 지반공학적인 인자들에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타난다(Rao 등, 1977; Jessberger와 Kockel, 1993). 그러나 신선한 쓰레기의 $C_{z, mec}$ 값은 매립된 지 대략 15년 가량된 쓰레기보다 약 3배가량 크게 나타났다. 이와 관련하여 Landva와 Clark (1990)도 이차압축계수 값이 유기물 함량이 증가함에 따라 증가한다고 보고하였다.

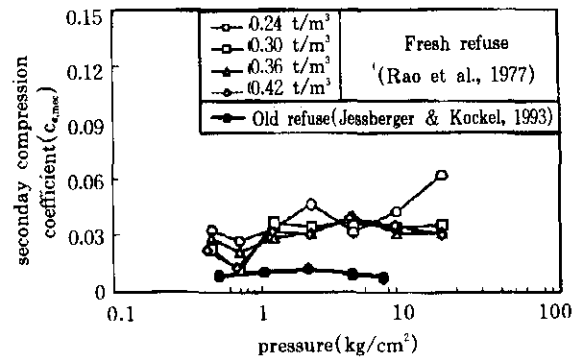


그림 2. 이차압축계수($C_{z, mec}$)값과 응력 및 밀도와의 상관관계

그림 3에는 매립 연한이 서로 다른 쓰레기에 대한 대형압축실험 결과가 나타나 있다. 위에서 설명한 바와 같이 매립 연한이 오래된 시료일 수록 역학적 이차압축 곡선의 기울기가 작게 나타나고 있다. 이와 같은 이유는 매립연한

표 1. 이차압축율 계수($C_{z, mec}$)에 대한 문헌 연구결과

Condition	$C_{z, mec}$ (strain/log time)	Reference	Aging level
Actual landfill data (decomposition effects not included)	0.024	Sowers(1973) ($e_0=4$)	Fresh
	0.037	Rao et al.(1977)	Fresh
	0.026	Bjarngard(1989)	Fresh
Laboratory data (Large compression test)	0.01	Jessberger & Kockel (1993)	15 years old
	0.005	Korea Geotech. Society(1994)	8 years old (approximately)
	0.008~0.009	Gabr & Valero(1995)	15~30 years old

이 오래된 쓰레기일 수록 역학적 이차압축 특성이 큰 음식물, 종이, 섬유류 등과 같은 유기성 고형물들의 함량이 분해로 인하여 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 결국 매립연한이 오래됨에 따라 감소하는 분해가능한 유기성 쓰레기 고형물의 함량이 쓰레기의 역학적 이차압축에 크게 영향을 미치는 인자인 것으로 사료된다.

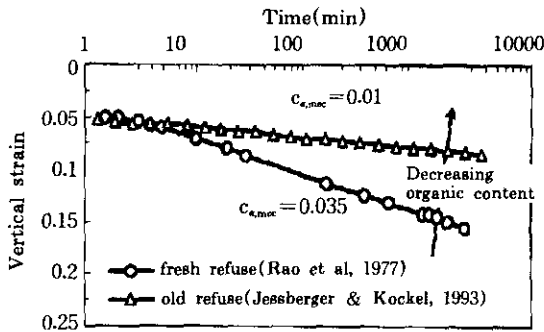


그림 3. 매립연한이 서로 다른 쓰레기의 대한 대형압축 실험결과

2.2 생물학적 분해에 의해 유발되는 이차침하량($\Delta \epsilon_{dec}$)

2.2.1 쓰레기 분해과정

쓰레기 매립지에서의 분해과정은 다양한 미생물 군에 의해서 복잡한 다단계 과정을 거친다. 유기성 고형물은 분해과정에서 먼저 용액상태의 중간단계 물질로 변환되며 결국에는 메탄 및 이산화 탄소의 가스형태로 변환하게 된다. 결국 쓰레기 매립지에서는 이러한 일련의 분해과정을 통한 고형물질의 체적감소로 인하여 침하가 유발될 것이다.

지반공학적인 측면에서 침하와 관련하여 주목해야 할 분해과정은 바로 유기성 쓰레기 고형물이 액체상태로 전환되는 단계, 즉 액체화(solubilization) 과정이라 할 수 있다. 쓰레기 매립지에서 분해 가능한 쓰레기 고형물은 대부분 cellulose와 hemicellulose의 형태로 구성되어 있는데 이들은 가수분해(hydrolysis) 과정을 통해 액체상태로 전환하게 된다(Barlaz 등, 1990). 실제 매립지에서 쉽게 용해되는 유기물

질의 분해가 이루어진 이후에는 이 가수분해단계가 전 분해과정을 지배하는 rate-limiting 과정이 된다(Leuschner, 1983; McInerney와 Bryant, 1983).

이러한 가수분해 과정은 일반적으로 일차 반응기작(first order kinetics)을 따른다고 보고되어 있으며(Chen, 1974; McGowan, et al., 1988; El-Fadel, et al., 1989; Young, 1989), 따라서 이와 같은 매립지의 분해과정은 다음과 같은 간단한 일차 반응식으로 묘사될 수 있다.

$$dS/dt = -\bar{k}S \quad (3)$$

여기서, $S(t)$: 시간 t 에서 분해가능한 쓰레기 고형물의 함량

\bar{k} : 일차분해율 계수(first order degradation rate constant) (t^{-1})

이때 $t=0$ 에서 이며, $S(0)=S_{tot-dec}$ 은 쓰레기에 포함된 분해가능한 고형물의 총합량을 의미한다. 또한 \bar{k} 는 분해속도를 나타내는 계수로서 분해조건에 의해 영향을 받는 값이다. 예로써 Hoeks (1983)와 Ham (1988)의 연구결과에 의하면 각각 다른 세단계(slow, moderate 및 rapid decomposable)의 분해조건에서 \bar{k} 값이 각각 0.046, 0.028~0.139 및 0.462~1.386정도로 증가하였다.

2.2.2 분해에 의한 이차침하량의 모델링(Modeling of SDBR)

생물학적 분해과정 가운데 분해 가능한 쓰레기 고형물의 용액화에 따른 체적감소 메커니즘을 이해하기 위해 그림 4에 나타나 있는 가상 모델의 거동을 살펴보았다. 가상 모델은 강성 결정과 얼음결정으로 이루어져 있으며 이들은 Grisolia와 Napoleoni(1995)가 제안한 압축거동에서 나타나 있는 Class A와 Class C에 각각 속하는 물질이라고 가정할 수 있다.

초기에 영하의 온도조건에 존재하던 모델에 온도를 상승시킬 경우 얼음 결정은 점차로 액화될 것이다. 일단 얼음 결정이 액화되기 시작하면 얼음 결정들이 갖고있던 체적이 감소하면서 용액화된 물의 배출과 함께 가상 모델은 점

차로 압축될 것이다. 이러한 과정 가운데 역학적 측면에서의 관심사는 바로 가상모델의 체적감소를 유발하는 얼음조각들의 용액화 과정이라 할 수 있다.

이와 같이 용액화로 말미암아 발생될 모델의 총 압축량은 얼음 결정의 총 함량에 의존하며, 압축속도는 시간에 따른 얼음조각의 용해화속도에 비례할 것이다. 이와 마찬가지로 SDBR의 총량은 분해 가능한 고형물의 총량에 의존하며, SDBR의 침하속도 또한 분해 가능한 유기물의 분해속도 즉 용액화 속도에 의존할 것이다. 온도조건을 상승시킬때 얼음조각들의 용해로 말미암는 모델의 압축이 가속화되는 것과 같이 쓰레기의 분해조건을 향상시킴으로써 SDBR의 발생은 가속화 될 것이다.

쓰레기에 포함된 분해 가능한 유기성 고형물 (biodegradable organic solid)의 분해와 그에 따른 체적변화에 관한 관계가 그림 5에 나타나

타나 있다. 이때 지반공학적인 측면의 관심사는 분해 가능한 유기성 고형물(S)이 일차 반응기작(first order kinetics)으로 표현된 가수분해로 인하여 용액화되는 과정이라 할 수 있다. 즉 가수분해과정을 통하여 쓰레기에 포화된 유기성 고형물이 용액상태로 변하면 그로인해 쓰레기 매립지의 체적 또한 감소할 것이다. 이때 변수 $\epsilon_{tot-dec}$ 는 분해로 발생될 수 있는 총 침하량을 의미하며 그 양은 쓰레기에 포함된 분해 가능한 총 고형물함량($S_{tot-dec}$)의 총량에 의존할 것이다(Wardwell과 Nelson, 1981). 그러나 상당한 시간이 경과한 후에는 쓰레기에 포함된 분해 가능한 고형물이 거의 분해되며 이로 인해 발생하는 압축도 거의 완료될 것이다. 결국에는 분해되지 않는 쓰레기 구성 성분들에 의한 역학적인 이차침하만이 지속적으로 발생될 것이다.

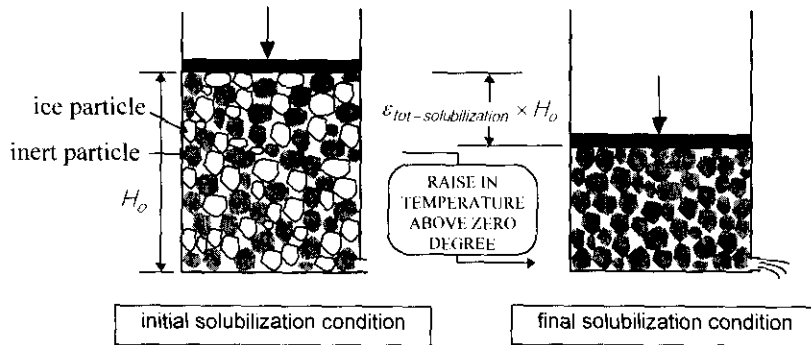


그림 4. 제안된 가상모델

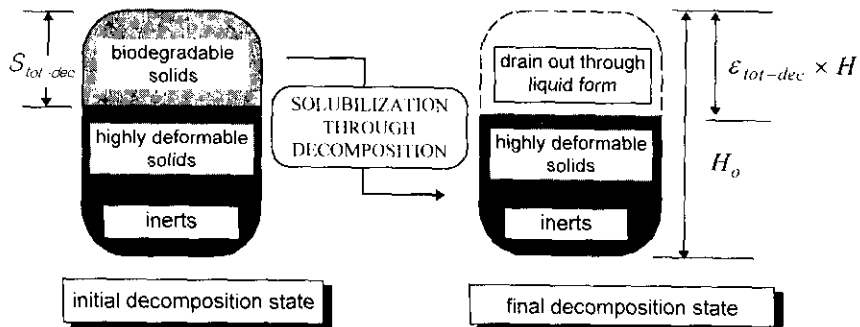


그림 5. 생물학적 분해와 그로 인해 유발되는 체적감소에 대한 관계

한편 Oweiss와 Khera(1986) 및 Fassett 등 (1994)에 의해 수행된 분해와 쓰레기 단위중량에 관한 연구결과에 따르면 신선한(fresh)쓰레기와 숙성된(old) 쓰레기의 건조단위중량이 거의 유사한 값을 갖는다고 보고되어 있다. 그러므로 쓰레기 매립지에서 유기성 고형물이 분해 과정을 통하여 용액화 되면, 분해되기 전 유기성 고형물이 차지하던 체적의 대부분이 매립지 체적감소로 나타난다고 유추할 수 있다. 따라서 분해로 인한 쓰레기 총 압축량($\epsilon_{tot-dec}$)과 압축속도 또한 각각 분해가능한 총 고형물 함량($S_{tot-dec}$)과 분해속도(\bar{k})에 직접적인 관련을 갖는다고 할 수 있다.

위의 결과로부터 본 연구에서는 분해 가능한 유기성 고형물(S)의 용액화 과정이 일차 반응기작을 따르는 것처럼 분해를 통해 유발되는 쓰레기 매립지의 압축과정도 일차 반응기작 형태를 따른다고 가정하였다. 따라서, SDBR에 대한 역학적인 기본식은 다음과 같은 일차 반응식으로 표현될 수 있다.

$$d\bar{\epsilon}_{dec}/dt = -k\bar{\epsilon}_{dec} \quad (3)$$

여기서,

$\bar{\epsilon}(t)_{dec}$: 시간 t에서 남아있는 분해 가능한 유기성 고형물에 의해 유발될 수 있는 변형량

k : 분해에 의한 일차 변형률계수(t^{-1})

이때 $t=0$ 에서 $\bar{\epsilon}(0)_{dec} = \epsilon_{tot-dec}$ 이며 $t=\infty$ 에서 $\bar{\epsilon}(\infty)_{dec} = 0$ 이다. 그리고 식 (3)을 시간 t에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\bar{\epsilon}(t)_{dec} = \epsilon_{tot-dec} - \bar{\epsilon}(t)_{dec} = \epsilon_{tot-dec} (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

여기서, $\bar{\epsilon}(t)_{dec}$: 시간 t에서 분해된 유기성 고형물에 의해 유발된 변형량

식 (4)에서 변수 k는 식 (2)의 분해율 계수 \bar{k} 값이 분해조건의 향상에 따라 증가한 것처럼 분해조건에 관련된 값이다.

3. 숙성된 쓰레기 침하거동에 대한 제안된 침하모델의 적용

서울시에 위치한 난지도 매립지는 서울시에

서 발생된 도시 쓰레기를 대략 1978년부터 1993년 3월까지 단순 매립함으로써 형성되었다. 따라서 매립된 쓰레기는 상당히 분해가 진행된 상태이며, 토사성분을 많이 함유하고 있다. 본 연구에서 제안된 모델을 적용하기 위해 난지도 매립지반에 대해 수행된 Lysimeter 실험결과를 이용하였으며(서울대학교 환경안전연구소, 1994), 실험과정은 다음과 같다.

2개의 Lysimeter(높이:1.9m, 직경:0.4m)를 제작한 후 유기물 함량과 함수비를 각각 13%와 29%로 동일하게 충전시켰으며, 단위 밀도는 $0.98t/m^3$ 이다. 그 중 한 Lysimeter에는 침출수를 재순환 시킴으로써 분해조건에 의한 영향 또한 살펴보고자 하였다. 실험기간 동안 $37^\circ C$ 의 온도를 유지시켰으며, 침하량, 가스 및 침출수에 관한 자료, pH 등이 1년간량 측정되었다. 발생하는 CH_4 와 CO_2 의 함량 성분 분석에서 Lysimeter의 분해조건은 실험 시작 10일 후부터 안정적인 메탄 형성단계에 다달았음을 보여주었다. 그림 6에는 Lysimeter실험결과 얻어진 침하자료가 나타나 있다.

또한 난지도 쓰레기의 역학적 침하양상을 살펴보기 위한 대형 압축실험(높이:0.4m, 직경:0.25m)이 수행되었다(한국지반공학회, 1994). 그 결과들은 Rao(1977)와 Landva(1990) 등의 실험결과와 유사하게 변형률-대수 시간곡선에서 선형적인 관계를 보였다. 유기물의 함량은 13%로서 Lysimeter에 사용된 시료와 동일하며, 낮은 유기물 함량을 갖는 숙성된 쓰레기이기 때문에 구해진 이차변형률계수(C_c)값은 대략 0.005와 같이 작은 값으로 구해졌다. 본 연구에서는 대형 압밀실험에서 구해진 C_c 값에 근거하여 $0.005 \cdot \log[(t+\Delta t)/t]$ 값을 역학적인 이차침하량으로 가정하였다.

SDBR을 모델링하기 위해 제안된 식 (4)를 Lysimeter 침하자료에 적용하였다. 대수변형률 대 시간 관계에 근거하여 구해진 모델 변수 값들은 S-1 및 S-2에 대하여 ϵ_{dec} 값이 각각 7.2%와 6.1%이며, k값은 각각 0.0065 day^{-1} 와 0.0048 day^{-1} 로 구해졌다. 이들 침하자료에 대하

여 적용된 모델의 예측결과가 그림 7에 나타나 있다. 예측된 침하양상을 살펴보면 대략 3~5년 정도 경과할 경우 분해에 의한 침하는 대체로 완료되는 양상을 보이고 있다. 이와 같이 수년 만에 분해에 의한 침하가 완료되는 양상으로 예측되는데, 이는 Lysimeter실험에 사용된 시료가 분해가 이미 상당히 진행된 숙성된 쓰레기이기 때문인 것으로 사료된다.

분해 및 역학적 침하성분을 모두 고려하여 예측된 총 침하 양상을 그림 8에 나타내었다. 해석된 침하 양상을 살펴보면 대략 다음의 3단계 과정으로 구분될 수 있다. (1) 초기 역학적 침하단계(initial mechanical stage), (2) 분해 침하단계(decomposition stage), (3) 장기적인

역학적 침하단계(long-term mechanical stage). 이용된 S-1 침하자료에 대하여 예측된 침하양상은 대략 3~5년 정도 경과한 후 분해에 의한 침하는 서서히 완료되며 장기적인 역학적 침하단계에 도달되는 양상을 보였다.

위의 결과들을 Grisolia와 Napoleoni(1995)에 의해 제안된 쓰레기 매립지 침하 양상과 비교하여 보면 Lysimeter에서는 분해를 촉진하기 위한 이상적인 분해조건이 제공됨으로 인하여 실제 매립지에 비해서 분해가 조속히 유발된 것을 알 수 있다. 따라서 Lysimeter에서의 침하 양상은 초기 침하단계에서의 역학적 이차 침하단계를 거치지 않고 바로 분해 침하단계로 넘어가는 양상을 보이는 것으로 사료된다.

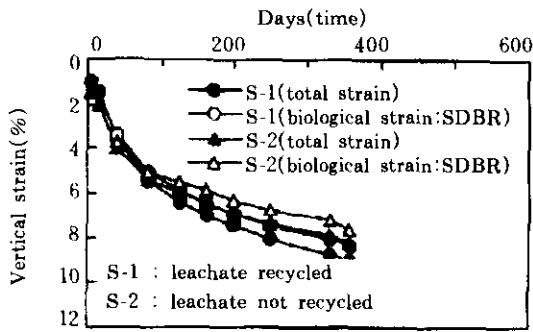


그림 6. Lysimeter 침하결과

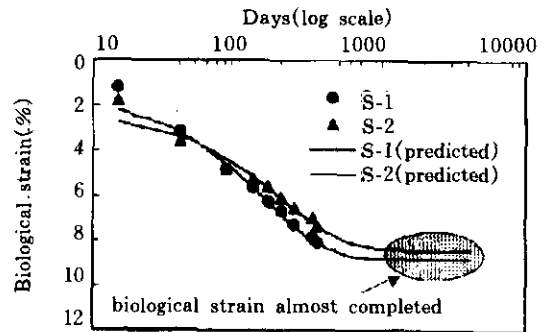


그림 7. SDBR에 대한 침하예측곡선

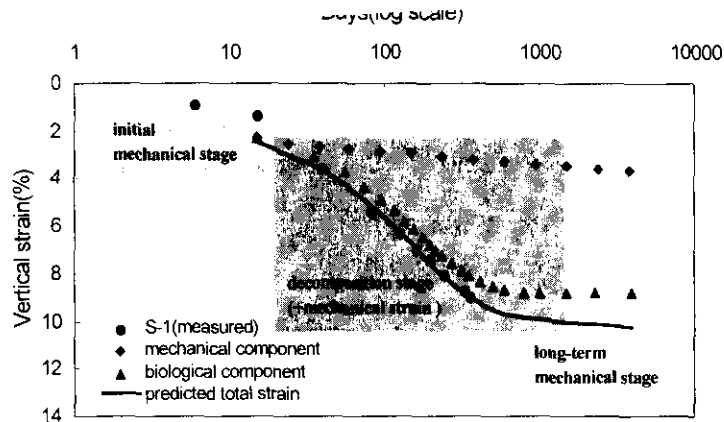


그림 8. 예측된 총 침하 곡선

4. 결 론

분해에 의한 매립지반 침하 메카니즘이 정확히 규명되지 않은 상황에서, 본 연구에서는 역학적 관점에서 분해과정에 의한 침하메카니즘을 고찰하고자 하였다. 쓰레기 매립지의 장기 침하량(역학적 이차침하량과 분해에 의한 이차침하량)을 예측하기 위하여 각각 제안된 두 식이 사용되었다. 역학적 이차침하는 변형률-대수 시간에서 선형적인 관계를 갖는다고 가정하였다. 쓰레기의 분해에 의한 침하를 평가하기 위하여, 분해 가능한 쓰레기 고형물의 용액화 단계에 관련된 일차반응기작으로 묘사되는 가수분해 과정을 고려한 모델이 제안되었다. 제안된 모델이 숙성된(aged) 쓰레기로 충전된 Lysimeter 침하자료에 적용된 결과, 대략 3~5년 정도 경과한 후 분해에 의한 침하는 완료되는 양상으로 예측되며, 그 후 장기적인 역학적 침하단계에 도달되는 양상을 보였다. 이와 같이 분해에 의한 침하가 조속히 완료되는 이유는 사용된 쓰레기 시료가 분해가 상당히 진행된 숙성된(Old) 상태이며, 또한 효율적인 분해조건이 적용되어 분해를 촉진하였기 때문인 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 서울대학교 환경안전연구소 (1994), Lysimeter를 이용한 폐기물 매립지 안정화 연구
2. 한국지반공학회 (1994), (난지도 매립지 안정화 기본설계) 장기침하 특성분석 보고서
3. Al-Khafaji, A.W.N., and Andersland, O.B. (1981). "Compressibility and Strength of Decomposing Fibre-Clay Soils," *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, pp 497~508.
4. Bjarngard, A., and Edgers, L. (1990). "Settlement of Municipal Solid Waste Landfills," *The Thirteenth Annual Madison Waste Conference*, September, pp 192~205.
5. Bjarngard, A. (1989). "The Compressibility Characteristics of Landfills" Thesis Submitted in Partial Fulfillment of M.S. in C.E., Tuft University, Medford, MA, May 1989.
6. Barlaz, M.A. and Ham, R.K. and Schaefer, D.M. (1990). "Methane Production from Municipal Refuse: a Review of Enhancement Techniques and Microbial Dynamics," *Critical Reviews in Environmental Control*. Vol. 19, No. 6, pp 557~584.
7. Chen, W.H.(1974). "Time-Settlement Behavior of Milled Refuse," PhD dissertation, Dept. of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston, III.
8. Edil, T.B., Ranguette, V.J., and Wuellner, W. (1990). "Settlement of Municipal Refuse," *Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice: ASTM STP 1070*, ASTM, Philadelphia, 225~239.
9. El-Fadel, M. and Findikakis, A.N. and Lechie, J.O. (1989). "A Numerical Model for Methane Production in Managed Sanitary Landfills," *Waste Management and Research*. Vol. 7, pp 31-42.
10. Fasset, J.B., Leonards, G.A., and Repetto, C., "Geotechnical Properties of Municipal Solid Wastes and Their Use in Landfill Design", *Proceedings of WasteTech Conference*, Charleston, SC, January 1994.
11. Gordon, D.L., Lord, J.A., and Twine, D. (1986). "The Stockley Park Project", *Proc., Building on Marginal and Derelict Land: An Institution of Civil Engineers Conf.*, Glasgow, U.K., pp. 359-381.
12. Ham, R.K. (1988). "Biological and Chemical Processes in Landfills," *Sanitary Landfill Design Manual*, Department of Engineering Professional Department, University of Wisconsin-Madison.
13. Hoeks, J. (1983). "Significance of Biogas Production in Waste Tips," *Waste Management and Research*. Vol. 1, pp 323~335.
14. Gabr, M. A. and Valero, S. N.(1995). "Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste", *Geotechnical Testing Journal*, 18(2).
15. Grisolia M. and Napoleoni Q. (1995). "Deformability of Waste and Settlements of Sanitary Landfills," *ISWA '95 World Congress*

- on Waste Management Wien October.
16. Jessberger, H. L. and Kockel, R. (1993). "Determination and Assessment of the Mechanical Properties of Waste Material", Proc. Int. Symp. Green '93, Bolton, UK, A.A. Balkema, Rotterdam.
 17. Landva, A. O. and Clark, J. I. (1990). "Geotechnics of Waste Fill," Geotechnics of Waste Fill~Theory and Practice, ASTM STP 1070. ASTM. Philadelphia, Pa., pp. 86~106.
 18. Leushner, A.P. (1983). "Feasibility Study for Recovering Methane Gas from the Greenwood Street Sanitary Landfill, Worcester, Mass", Vol. I., Task 1-Laboratory Feasibility, Dynatech R & D Co., Cambridge, Mass, USA
 19. McGowan, K.C. and Pohland, F.G. and Saunders, F.M. and Williams, N.D. (1988). "A Microbial Model of Landfill Stabilization," Proceedings of the 1988 Joint CSCE-ASCE National Conference. Vancouver, B.C., pp 704~711
 20. McInerney, M.J. and Mryant, M.P. (1983). "Review of Methane Fermentation Fundamentals", Fuel Gas Production from Biomass, Wise, D.L.(ed), CRC Press, Boca Raton, Florida.
 21. Morris, D.V., and Woods, C.E. (1990). "Settlement and Engineering Considerations in Landfill Final Cover Design," Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice: ASTM STP 1070, ASTM, Philadelphia, Pa., 9~21.
 22. Owies, I.S. and Khera, R.P. (1986). "Criteria for Geotechnical Construction of Sanitary Landfills", International Symposium on Environmental Geotechnology.
 23. Rao, S.K., Moulton, L.K., and Seals, R.K. (1977). "Settlement of Refuse Landfills," Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials, Ann Arbor, Mich., 574~599
 24. Sowers, G.F. (1973). "Settlement of Waste Disposal Fills," Proceedings, The Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, 1973, 207~210.
 25. Wardwell, R.E., Nelson, J.D. (1981). "Settlement of Sludge Landfills with Fiber Decomposition," Proceedings, Tenth International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Stockholm, Sweden, 397~401.
 26. Yen, B.C., and Scanlon, B. (1975). "Sanitary Landfill Settlement Rates," Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105, No. 5, 475~487.
 27. Young, A. (1989). "Mathematical Modelling of Landfill Degradation," Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Vol. 46, pp 189~208.

(접수일자 1997. 8. 25)