

매립 연한이 서로 다른 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동

Long-Term Settlement Behavior of Refuse Landfills
with Different Fill Ages

박 현 일*¹

Park, Hyun-Il

이 승 래*²

Lee, Seung-Rae

고 광 훈*¹

Koh, Kwang-Hoon

ABSTRACT

The settlement characteristics of refuse landfills are peculiar because considerable amount of settlement occurs due to the decomposition of refuse organic solids for very long period. The total amount of compression that occurs due to the decomposition in refuse landfill is mainly dependent on the amount of biodegradable refuse solids and fill age of the refuse landfill, and the settlement stabilization speed is dependent on the decomposition condition. In order to figure out the settlement characteristics of refuse landfills, a proposed mathematical model is applied to settlement data of refuse landfills with different fill ages. A data bank of model parameters was obtained and the trends were analyzed. The long-term settlement behavior of refuse landfills can be estimated fairly well by the proposed model. The total remaining amount of settlement may be predicted on the basis of the fill age and appropriate two design parameters.

요 지

쓰레기 매립지는 쓰레기 고형물이 장기간에 걸쳐 생물학적으로 분해됨으로 말미암아 상당한 양의 침하가 유발되는 독특한 침하특성을 갖고 있다. 분해에 의한 총 압축량은 분해가능한 쓰레기의 고형물 함량 및 매립연한에 크게 의존하며, 매립지 침하의 안정화 속도는 분해조건에 의존한다. 쓰레기 매립지의 이러한 독특한 침하거동을 규명하기 위하여 제안되었던 침하모델을 매립 연한이 서로 다른 쓰레기 매립지 침하자료들에 대하여 적용하였다. 모델 변수 값들이 각각 구해졌으며, 그 경향들이 분석되었다. 쓰레기 매립지의 장기 침하 양상이 제안된 모델에 의해 잘 예측될 수 있으며, 매립연한 및 두께의 적합한 설계변수에 근거하여 잔존 침하량을 예측할 수 있다.

Keywords : Refuse, Settlement, Long-term settlement, Fill age, Landfill

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

1. 서론

쓰레기 매립지반은 일반적인 흙의 거동과는 달리 쓰레기 매립지에 포함된 유기성 고형물이 장기간에 걸쳐 생물학적으로 분해됨으로 말미암아 침하가 유발되는 특성을 갖는다(Sowers, 1973; Chen, 1974; Al-Khafaji와 Andersland, 1981; Wardwell과 Nelson, 1981; 박현일 등, 1997; 박현일 등, 1998). 그림 1에 나타난 바와 같이 쓰레기 매립지의 침하거동이 규명되지 않은 상황에서 압밀이론, Power creep law 등과 같은 기존에 제안된 모델들(Sowers, 1973; Yen과 Scanlon, 1975; Rao 등, 1977; Edil 등, 1990)로서는 독특한 쓰레기 매립지의 침하거동을 모사하기에는 상당한 어려움이 있다. 즉 쓰레기 매립지반에서 유기성 고형물의 분해로 인해 유발되는 침하 양상이 역학적으로는 표현하기 곤란한 생물학적 분해과정에 의해서 유발하게 된다. 이러한 침하 메카니즘을 쓰레기 매립지의 작용 응력과 쓰레기 밀도, 매립지 높이 등과 같은 인자들을 사용하여 모사하기는 사실상 어려운 것으로 사료된다.

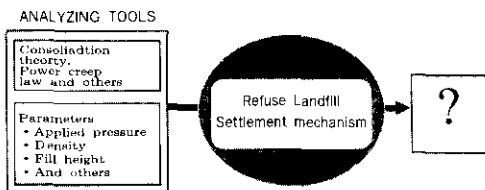


그림 1. 쓰레기 매립지 침하메카니즘 분석

쓰레기 매립지에서는 분해가능한 쓰레기 고형물이 가수분해과정을 통하여 매립지로부터 유출 가능한 액체상태의 중간단계 물질로 전환하게 되는데, 바로 이 분해 단계에서 쓰레기 고형물의 체적 감소가 발생하게 된다. 박현일 등(1998)은 쓰레기 매립지의 체적변형에 관련된 이 분해 단계(용액화 단계)에 근거하여 침하모델을 제안하였다. 본 연구에서는 제안된

침하모델을 근거로 하여 서로 다른 매립연한을 갖는 다섯 지역의 쓰레기 매립지 침하자료들을 분석하였다. 이로부터 쓰레기 매립지의 매립연한과 장기적인 침하특성에 대한 상관관계를 추론하고자 하였으며, 또한 분해조건이 침하양상에 어떠한 영향을 미치는 지를 규명하고자 하였다.

2. 쓰레기 매립지 침하메카니즘

쓰레기 매립지에서는 하중증가에 따른 즉시 침하가 수개월 이내에 완료되며 이후 수십 년에 걸쳐서 상당량의 침하가 발생하게 되며, 이때 유발되는 장기침하량은 다음과 같이 크게 두 가지로 구분될 수 있다(Sower, 1973; Gordon 등, 1986).

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

여기서, $\Delta \epsilon(t)_{mec}$ 은 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배열, 쓰레기 구성성분의 지체된(delayed) 압축 등에 의하여 장기적으로 발생하는 역학적인 이차압축량을 나타낸다. 그리고 분해(decomposition)에 의한 침하($\Delta \epsilon_{dec}$)는 쓰레기에 포함된 분해 가능한 유기성 고형물이 생물학적 반응기작용 따라 분해됨으로 말미암아 발생하는 압축량을 의미한다.

쓰레기 매립지반의 장기침하특성에 관한 연구로 Grisolia와 Napoleoni(1995)는 쓰레기의 침하거동에 대하여 다음과 같은 침하 개념을 제안하였다(그림 2). 그들은 쓰레기를 구성하는 물질들을 다음과 같이 세가지 요소들로 구분하였다: (1) 유리, 금속 등과 같이 자체적으로 변형이 발생되지 않는 물질(stable inert solids), (2) 고무, 가죽, 종이 등과 같이 변형성이 큰 물질(highly deformable materials), (3) 음식물, 분해가능한 유기물 등과 같이 비교적 빠른 시간 내에 분해되는 물질(readily degradable materials). 하지만 이 중 세 번째 그룹의 물질들도 지반 내에서는 생물학적 반응이 비교적 느리게 일어난다.

이들 구성물질들을 기준으로 쓰레기 지반

침하메카니즘을 설명하면 다음과 같다. 쓰레기에 하중이 가해지면, 초기 침하는 매우 빠르게 완료된다. 이후에 위에서 설명한 바와 같은 형태의 역학적 이차 압축이 유발하게 되며, 일정 시간 이후 생물학적 분해가 시작됨에 따라 분해에 의한 이차 압축이 추가적으로 발생하게 된다. 특히 그림 2에서 나타난 바와 같이 분해 가능한 쓰레기 고형물의 분해로 인한 체적 감소는 쓰레기 매립지에서 상당량의 압축을 유발하는 것으로 알려져 있다. 분해에 의한 압축이 완료된 이후에는, 역학적 이차 침하만이 지속적으로 발생할 것이다.

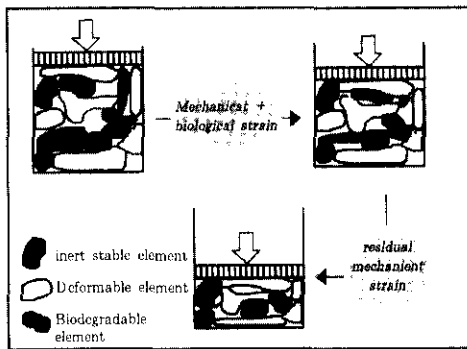


그림 2. 쓰레기 침하기작에 대한 개념도

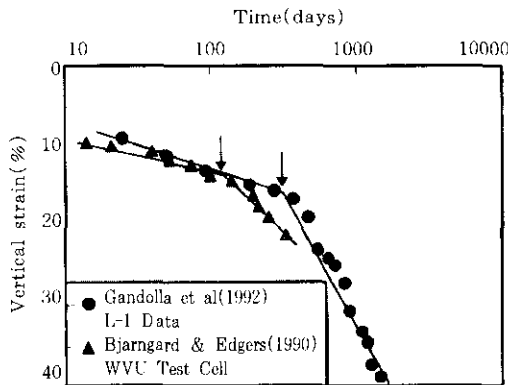


그림 3. 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동

쓰레기 매립지의 침하거동에 대한 연구(Bjarngard와 Edger, 1990)를 살펴보면, 대체로 초기 침하가 완료된 이후에는 침하변형율-대수시간 축에서 작은 값의 기울기를 갖는 선형적인 관계를 보이다가 일정시간 이후 급격한 변화를 나타내는 기울기의 침하양상을 보인다고 보고되었다(그림 3). 이러한 이유는 역학적 이차압축만이 유발되는 단계에서 쓰레기에 포함된 유기성 고형물이 분해되기 시작함에 따라 이로 인한 간극비변화로 압축율이 크게 증가되기 때문이다.

2.1 역학적 이차압축 메카니즘

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

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

$C_{\alpha, mec}$: 역학적 이차압축율 계수

분해가 포함되지 않는 경우 실제 매립지의 이차압축율 계수 $C_{\alpha, mec}$ 값과 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.

기존에 수행된 대형압축실험을 통한 연구들을 근거로 역학적 이차압축계수에 대해 여러 지반 공학적 인자들이 미치는 영향을 분석하였다(박현일 등, 1998). $C_{\alpha, mec}$ 값이 응력강

표 1. 이차압축률 계수($C_{a, max}$)에 대한 문헌 연구결과

Condition	$C_{a, max}$ (strain/log time)	aging level	Reference
Actual landfill data (decomposition effects not included)	0.024	Fresh	Sowers(1973) ($e_0 = 4$)
Laboratory data (Large compression test)	0.037	Fresh	Rao 등(1977)
	0.026	Fresh	Bjarngard(1989)
	0.01	15years old	Jessberger와 Kockel(1993)
	0.005	8years old	한국지반공학회(1994)
	0.008 ~ 0.009	15 ~ 30years old	Gabr와 Valero(1995)

도(stress intensity) 및 단위 밀도에는 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타난다. 또한 매립 연한이 오래된 시료일수록 역학적 이차압축률이 작게 나타나고 있다. 이와 같은 이유는 역학적 이차압축특성에 큰 영향을 미칠 수 있는 압축특성이 큰 음식물, 종이, 섬유류 등과 같은 유기성 고형물들이 매립연한이 오래된 쓰레기 일수록 분해로 인하여 그 함량이 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서, 대형압축실험 결과에 따르면, 쓰레기 매립지에서 매립 연한이 오래될수록 쓰레기 고형물의 분해로 말미암아 역학적 이차압축 특성이 점차로 감소할 것으로 사료된다. 결국 쓰레기의 역학적 압축특성에 크게 영향을 미치는 인자는 바로 유기성 쓰레기 고형물의 함량이라 할 수 있으며, 그 값은 매립연한에 의존함을 알 수 있다.

2.2 분해에 의한 이차압축 메카니즘

Wardwell과 Nelson (1981)은 유기물 함량이 증가함에 따라 발생된 분해에 의한 이차압축률이 증가하는 양상을 보인다고 보고하였다. 또한 Al-Khafaji와 Andersland (1981)의 연구에서도 유기물 함량의 증가에 따라 최종 압축률이 상당히 증가하는 경향을 보인다고 보고되었다. 박현일 등 (1998)은 이러한 유기물의 분해로 인한 쓰레기의 압축 과정을 보다 이론적으로 고려하고자 다음과 같이 침하모델을 제안하였다.

분해가능한 유기성 고형물은 일차반응기작

(first order kinetics) 형태의 가수분해(hydrolysis) 과정을 통하여 액체상태(fluid condition)의 중간 단계 물질로 전환된다. 바로 이 분해 단계를 통하여 쓰레기 고형물의 체적은 감소하게 되며, 결국 이로 인해 침하가 유발될 것이다. 이러한 시간의존적인 침하는 분해가능한 고형물질에 따라 다음의 관계를 가지고 나타난다고 가정할 수 있다.

$$dS/dt = -kS \quad (3)$$

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

k : 일차분해율 계수(first order deg-radation rate constant) (t^{-1})

쓰레기에 포함된 분해 가능한 유기성 고형물(biodegradable organic solid)의 분해와 그에 따른 체적변화에 관한 관계는 그림 4에 나타나 있다. 이때 지반공학적인 측면의 관심사는 바로 분해 가능한 유기성 고형물(S)이 일차 반응기작(first order kinetics)으로 표현된 가수분해로 인해 용액화되는 과정이라 할 수 있다. 즉 S 가 분해과정을 통하여 용액상태로 변하면 그로 인해 쓰레기 매립지의 체적 또한 감소할 것이다. 이때 변수 $e_{tot-dec}$ 는 분해로 발생될 수 있는 총 압축량을 의미하며 그 양은 $S_{tot-dec}$ 의 총량에 의존할 것이다. 그러나 상당한 시간이 경과한 후에는 쓰레기에 포함된 분해 가능한 총 고형물 함량($S_{tot-dec}$)이 거의 분해되며 이로

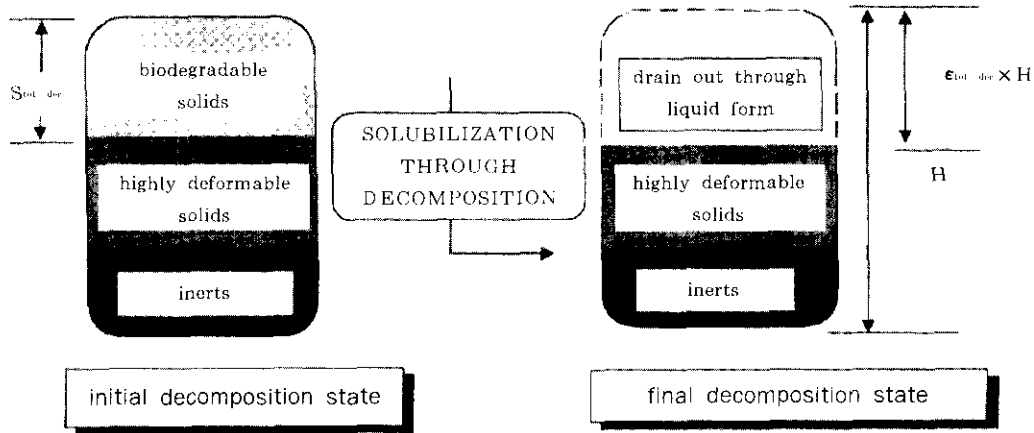


그림 4. 생물학적 분해와 그로 인해 유발되는 체적감소에 대한 관계

인해 발생하는 압축도 거의 완료될 것이다. 결국에는 분해되지 않는 쓰레기 구성 성분들에 의한 역학적인 이차 침하만이 지속적으로 발생될 것이다.

분해가능한 유기성 고형물(S)의 용액화 즉 체적감소과정이 일차반응기작을 따르는 것처럼 분해를 통해 유발되는 쓰레기 매립지의 압축과정도 일차반응기작 형태를 따른다고 가정하여 다음과 같이 정리하였다.

$$\epsilon_{dec}(t_{bio}) = \epsilon_{tot-dec} \cdot e^{-k \cdot t_{bio}}; t_{bio} = t - t_0 \quad (4)$$

k : 일차 분해압축률 계수(first order biological strain rate constant (t^{-1}))

t_0 : 분해에 의한 침하가 시작되는 시점

여기서, $\epsilon_{dec}(t_{bio})$ 은 시간 t_{bio} 에서 존재하는 분해가능한 유기성 고형물의 분해로 인해 추후 발생할 수 있는 압축량을 의미하며, 변수 k는 분해에 의한 압축율을 의미한다. 또한 t_{bio} 는 분해에 의한 압축이 시작하는 시점으로부터 경과된 시간을 나타낸다. 그리고 t 값에 대해서 신선한(fresh) 쓰레기 매립지의 경우 침하-대수 시간관계에서 선형적인 침하양상을 보이다 급한 경사를 가지며 침하가 발생하는 시점으로부터 간주하였다. 매립된 지 상당 기간이 경과한 대부분의 매립지에서 침하계측이 시작되었을 때

는 이미 분해에 의한 침하가 유발되고 있으므로, t_0 값을 결정할 필요는 없는 것으로 사료된다.

시간 t_{bio} 에서 분해로 인해 발생한 침하량은 식 (4)에 근거하여 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\epsilon_{dec}(t_{bio}) = \epsilon_{tot-dec} - \epsilon_{dec}(t_{bio}) = \epsilon_{tot-dec}(1 - e^{-k \cdot t_{bio}}) \quad (5)$$

여기서, $\epsilon_{dec}(t_{bio})$: 시간 t_{bio} 에서 분해된 유기성 고형물에 의해 유발된 변형량

3. 실제 매립지 침하 자료

본 연구에서는 기존자료로부터 얻어진 쓰레기 매립지 침하자료들을 다음과 같이 분석하였다. 먼저 분해정도에 따라서 매립연한이 수년 미만인 Site A와 Site B를 Very Fresh(혹은 Young)로 구분하였고, 대략 10년 가량된 Site C와 D를 Approximately old로, 또한 40년 가량된 Site E를 Old(혹은 Mature)로서 구분함으로써 총 세 등급으로 구분하였다. 여기서 사용된 매립연한(fill age)은 매립이 시작되어 완료된 때 사이의 중간 시점으로부터 침하계측이 시작된 때까지의 시간을 나타낸다.

3.1 Site A(Fresh)

신선한(Fresh) 도시쓰레기가 중량비로 6.8%인 슬러지와 함께 콘크리트로 제작된 3개의 원형 Lysimeter(직경:1m, 높이:3m)에 각각 매립되었다. 실험이 83년 5월경 부터 시작된 이후 89년 11월 말까지 대략 6년동안 침하가 계속되었다. 실험조건으로 함수비는 55%이며, 유기물 함량비는 60% 이다(Gandolla 등, 1992). 시료가 Lysimeter에 충전된 직후부터 침하가 계속되었으므로 매립연한은 0년으로 산정되었다. 또한 침하양상은 변형율 대 대수시간 관계에서 매립이후 대략 300일이 지난 이후부터 급속한 침하양상을 보였다.

3.2 Site B(Fresh)

1976년부터 매립되었으며, 거의 대부분이 주방(domestic) 쓰레기로 이루어져 있다. 침하계측은 1980년 12월 이후 대략 2년 동안 이루어졌다. 분석은 참고문헌에 나타나 있는 계측 지점 22, 27 및 33에 대한 침하 곡선에 근거하여 수행되었다(Cheney, 1983). 매립연한은 대략 2년이다. 또한 침하자료는 침하 대 대수시간 관계에서 작은 값의 기울기를 갖는 선형적인 관계를 보이지 않고 큰 기울기만을 갖는 침하양상을 나타내며, 이는 침하계측 시점이 분해에 의한 침하가 발생되고 있는 상황에서 이루어졌기 때문인 것으로 사료된다.

3.3 Site C(Approximately old)

서울시에서 발생된 도시 쓰레기를 대략 1978년부터 1993년 3월까지 단순매립함으로써 형성되었으며, 매립 연한은 대략 8년 가량이다. 따라서 매립된 쓰레기는 상당히 분해가 진행된 상태이며, 토사성분을 많이 함유하고 있다. 난지도 매립지에서 채취된 시료에 대하여 Lysimeter 실험(높이:1.9m, 직경:0.4m)이 수행되었다(서울대학교 환경안전연구소, 1994). 충전된 시료의 유기물 함량과 함수비는 각각 13%와 29%

이며, 침하량, 가스 및 침출수에 관한 자료, pH 등이 1년간량 계측되었다.

3.4 Site D(Approximately Old)

1969년부터 매립이 시작되었으며, 매립지 상부에 침하판이 6개가량 설치되어 1985년 1월부터 1986년 5월까지 침하가 계속되었으며, 침하지점 S-1~S-5의 침하자료에 대한 분석이 수행되었다(Dodt 등, 1987).

3.5 Site E(Old)

미국 Massachusetts에 위치하고 있는 매립지로서 매립고는 대략 80ft정도에 다다르며, 매립고의 1/3 정도는 30~50년 전에 매립되었고, 매립층 상부 2/3 정도는 13~30년 전에 매립되었다(Keene, 1977). 매립연한은 대략 30년 정도이다.

4. 침하 모델의 적용

박현일 등 (1998)에 의해 제안된 모델이 침하자료들에 적용되었으며, 구해진 변수 ϵ_{int-dm} 와 k 값 들이 표 2에 나타나 있다. 역학적 이차압축량을 제외시킨 분해에 의한 침하자료는 대수 변형율 대 시간($\text{Log}[\Delta \epsilon_{dec}(t_{bio})/\Delta t_{bio}]$ 대 t_{bio}) 관계에서 선형적인 관계로 나타나며, 식 (5)를 대수 변형율관계($\text{Log}[d\epsilon_{dec}(t_{bio})/dt_{bio}]$)로 나타낸 후 대수변형율 대 시간 관계로 표현된 침하자료에 적용함으로써 모델 변수값들을 구할 수 있다. 또한 분석에서 필요한 역학적 이차압축량을 나타내는 이차압축계수 값은 표 1에 나타난 계수값들을 근거로 하여 매립연한 별로 가정되었다. 쓰레기 매립지에서 분해에 의한 침하가 역학적인 이차압축량에 비해서는 상당히 크므로, 역학적 이차압축계수에 대한 가정이 침하 양상 해석에 미치는 영향은 미소하다고 사료된다.

구해진 해석결과를 살펴보면 매립연한이 짧은 매립지(Site A와 B)일수록 ϵ_{int-dm} 값이 상당

표 2. 모델 변수값

stage of landfill	Field site	Fill age(yr)	$\epsilon_{tot-dec, ave}$ (%)	k_{ave} (yr ⁻¹)
Very fresh ($C_{s, nec}^* = 0.035$)	Site A	0	27.2	0.36
	Site B	2	25.7	0.42
Approximately lod ($C_{s, nec} = 0.01$)	Site C	8	6.7	2.06
	Site D	8	1.4	0.96
Old ($C_{s, nec} = 0.005$)	Site E	40	3.0	0.76

* $C_{s, nec}$ 는 역학적 이차압축계수값을 의미.

히 크게 산정되었다. 이는 신선한(Fresh) 매립지 일수록 분해가능한 쓰레기 고형물 함량을 클 것이지만, 숙성된(Old) 매립지의 경우에는 매립 당시에 존재하던 분해가능한 쓰레기 고형물들이 거의 분해된 상황이므로, $\epsilon_{tot-dec}$ 값도 당연히 작게 산정되었을 것으로 사료된다.

4.1 침하 자료 분석

일반적으로 쓰레기 매립지의 사후활용을 위해 동다짐 공법과 같은 보강공법을 적용하고자 할 때, 분해가 비교적 완료된 이후에 적용하는 것이 효과적인 것을 알려져 있다(Lukas, 1986). 따라서 분해에 의한 압축되는 양상을 규명하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 그림 5에서 역학적 이차압축량을 제외시킨 분해에 의한 침하자료(Site B)에 대하여 분해로 인해 발생가능한 총압축량($\epsilon_{tot-dec}$)과 일차 분해 압축율 계수(k)값은 각각 26.7%와 0.252yr⁻¹로 구해졌다. 매립지 두께의 27%에 다다른 침하가 분해로 인하여 발생되며, 이후 분해에 의한 압축이 발생된 시점($t \approx 0.8yr$)으로부터 10년이 경과되었을 경우 분해에 의해 발생될 수 있는 압축은 거의 완료되는 것으로 예측되었다.

그림 6에는 매립연한이 서로 다른 침하자료에 대하여 분해에 따른 침하양상이 분석되어 있다. 매립연한이 오래될수록 분해에 의해 발생하는 침하 양상의 폭은 작아짐을 알 수 있다. 매립 연한의 증가가 초기에는 분해에 의한

매립지 침하양상에 큰 영향을 미치는 것으로 나타나지만, 매립연한이 8년인 Site C와 40년인 Site E에 대하여서는 큰 차이를 보이지 않는다.

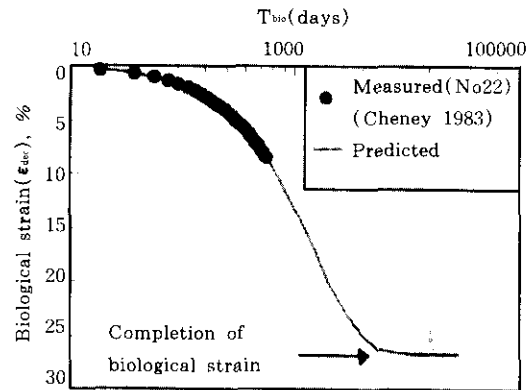


그림 5. 분해에 의한 침하 예측 곡선

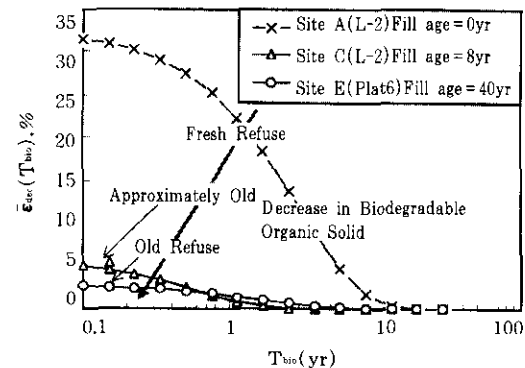


그림 6. 매립연한이 서로 다른 매립지의 분해에 의한 침하 예측 곡선

신선한(Fresh) 쓰레기 매립지 침하자료들에 대하여 향후 발생될 분해에 의한 침하양상이 그림 7에 나타나 있다. 분해로 인해 발생가능한 총압축량($\epsilon_{tot-dec}$)은 17~32%로 구해졌다. 분해에 의한 침하는 발생된 지 10년 이내에 거의 90%정도에 다다른 침하량이 발생되는 것으로 예측되었다. 또한 10~20년이 경과한 이후에는 분해에 의해 발생가능한 압축량이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 이와 같이 본 연구에서 분석된 신선한 쓰레기 매립지들의 경우에는 매립 연한이 10~15년이 경과한 이후에 분해에 의한 압축은 거의 완료될 것으로 예측할 수 있다. 따라서 분석된 이 경우에는 지반공학적인 측면에서 침하에 영향을 미치는 분해는 대략 15년을 전후해서 완료되는 것으로 사료된다.

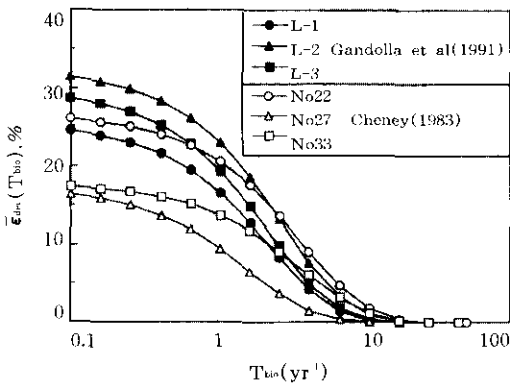


그림 7. 신선한 매립지 침하자료 분석

그림 8에는 침하자료로부터 산정된 분해에 의해 발생가능한 총 압축량($\epsilon_{tot-dec}$)과 매립연한(fill age)과의 관계가 나타나 있다. 매립 초기에 해당하는 신선한 매립지를 나타내는 Site A와 Site B의 경우에는 큰 값을 갖지만 매립연한이 대략 10년 이상인 Site C, Site D 및 Site E의 경우에는 $\epsilon_{tot-dec}$ 의 값이 상당히 작은 값을 보이고 있다. 실제로 매립연한이 오래된 쓰레기 매립지들에 대하여 매립 초기의 $\epsilon_{tot-dec}$ 값이 어느정도 인지 유추하는 것은 사실 불가능하

다. 하지만 Site C, Site D 및 Site E의 경우 매립 이후 대략 10년 동안에 분해에 의한 침하가 상당히 발생되었기 때문에 계속된 침하양상에서 구해진 $\epsilon_{tot-dec}$ 값도 작게 산정되는 것으로 사료된다. 이러한 매립연한과 $\epsilon_{tot-dec}$ 관계는 그림 7에서 나타난 바와 같이 신선한 매립지(Site A와 Site B)에서 분해에 의한 침하가 발생된 이후로부터 약 10년 이내에 거의 90%정도가 발생되는 것으로 예측된 침하양상과 비교적 일치되는 경향을 갖고 있음을 알 수 있다.

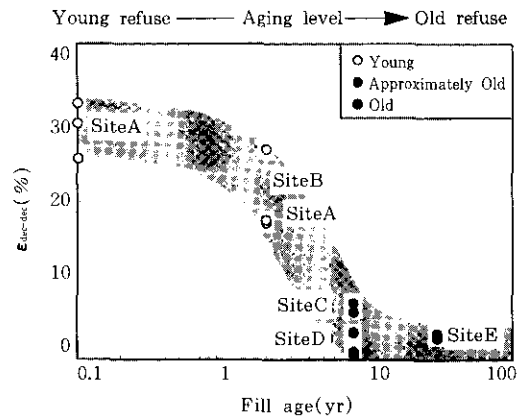


그림 8. 분해에 의한 총 압축량($\epsilon_{tot-dec}$)과 매립연한과의 관계

4.2 분해조건에 의한 영향 분석

일반적으로 쓰레기 매립지에서 유기물이 분해되는 속도는 분해조건에 따라 상당한 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 환경공학에서는 침출수 재순환, pH 조절, 영양물질 공급 등과 같은 방법을 통하여 분해조건을 향상시킴으로써 매립지를 조기에 안정화시키는 방안에 대한 연구가 상당히 수행되고 있다(Yuen 등, 1995). Hoeks (1983)와 Ham (1988)은 각각 다른 세 단계(slow, moderate 및 rapid decomposable)의 분해조건에서 식 (4)에서 사용된 유기물의 분해율 속도를 나타내는 k 값이 각각 0.046, 0.028~0.139 및 0.462~1.386으로 증가한다고

보고하였다. 그림 9에서는 분해조건이 분해에 의한 압축양상에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 그림에서 분해에 의한 압축율 계수(k)가 0.34yr^{-1} 인 경우는 Site A(L-2) 침하자료에 대해 분석된 곡선이다. 분해조건이 더 열악한 경우와 향상된 경우에 값은 각각 0.1와 0.5로 산정되었다고 가정하였다. 일반적으로 동다짐 공법과 같은 보강공법은 분해가 비교적 완료된 이후에 적용하는 것으로 알려져 있다. 따라서 분해에 의한 압축량이 5% 미만으로 존재할 때 이와 같은 보강공법을 적용하고자 계획하였다면, k값이 각각 0.1, 0.34, 0.5일 때 매립완료 이후의 보강공법이 적용하기 위해 필요한 시간은 각각 3.7, 5.5, 18.7년으로 산정되었다. 그림에 나타난 바와 같이 k값의 변화에 따라 분해에 의한 침하가 안정화되는데 요구되는 시간은 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 또한 표 1에 나타난 바와 같이 Site C의 값은 다른 Site보다 두배 이상 큰 값을 보이는데, 이는 규칙적인 물의 공급과 상온에서의 온도 유지와 같이 다른 Site보다 분해조건이 향상되었기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

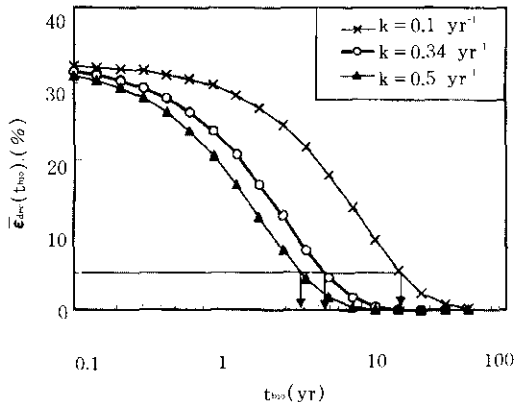


그림 9. 분해에 의한 압축율 계수(k)가 침하양상에 미치는 영향

본 논문에서는 제안된 침하모델을 실제 쓰레기 매립지 침하자료들에 대하여 적용하였다. 서로 다른 매립연한의 침하자료에 대한 분석에서 신선한(fresh) 매립지인 Site A와 Site B의 경우 분해에 의해 발생될 압축량($\epsilon_{tot-dec}$)은 17~31%로서 매우 크게 산정되었으며, 분해에 의한 이차압축은 대부분이 10 ~ 15년 사이에 거의 완료되는 양상을 보였다. 또한 매립연한이 8년 이상인 Site C, Site D 및 Site E의 경우에는 발생가능한 분해에 의한 총압축량($\epsilon_{tot-dec}$)이 Site A와 Site B에 비해 매우 작은 값인 0.7~7% 정도의 값을 보였다. 이로부터 제한된 쓰레기 매립지 사례에 대한 연구결과이기는 하지만 매립이 완료된 지 10년 이상된 경우(즉 매립연한이 10년 이상인 경우) 향후 분해에 의해 발생가능한 침하는 상당히 미소한 것으로 사료된다. 또한 Site C의 분해에 의한 압축율 계수 값은 다른 Site보다 비교적 큰 값을 보이는데, 이는 규칙적인 물의 공급과 상온에서의 온도 유지와 같은 분해조건이 향상 때문인 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 박현일, 이승래, 라일웅, 성상열(1997), "난지도 쓰레기 매립지의 침하특성," 한국지반공학회지, 제 13권, 제 2호, pp.65~75.
2. 박현일, 이승래, 고평훈(1998), "분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기침하거동," 한국지반공학회지, 제 14권, 제 1호, pp.5~14.
3. 서울대학교 환경안전연구소(1994), *Lysimeter를 이용한 폐기물 매립지 안정화 연구*
4. 한국지반공학회(1994), (난지도 매립지 안정화 기본설계) 장기침하 특성분석 보고서
5. 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.
6. Bjarngard, A.(1989), "The Compressibility Characteristics of Landfills" Thesis submitted in partial fulfillment of M. S. in C. E., Tuft University, Medford, MA.

7. Bjarngard, A. and Edgers, L.(1990), "Settlement of Municipal Solid Waste Landfills," The thirteenth Annual Madison Waste Conference. September. pp.192~205.
8. Chen, W. H.(1974), "Time - Settlement Behavior of Milled Refuse," PhD thesis, Dept. of Civil Engineering, Northwestern University, Evanston. iii.
9. Cheney, L.(1983), "Settlement of Landfill," *Third Harwell Waste Management Symposium*, pp.13~29.
10. Dodt, M. E., Sweatman, M. B., and Bergstorm, W. R.(1987), "Field Measurements of Landfill Surface Settlement", *Geotechnical Practice for Waste Disposal '87*, Ann Arbor, MI., 13, pp.406~418.
11. 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.
12. Gabr, M. A. and Valero, S. N.(1995), "Geotechnical Properties of Municipal Solid Waste", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, No. 2.
13. Gandolla, M., L. Dugnani, G. Bressi and C. Acaia(1992), "The Determination of Subsidence Effects at Municipal Solid Waste", *Proc. Sixth Int. Solid Wastes Congress*, Madrid, pp.1~17.
14. 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.
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. Ham, R. K.(1988), "Biological and Chemical Processes in Landfills," *Sanitary Landfill Design Manual*, Department of Engineering Professional Department, University of Wisconsin-Madison.
17. Hoeks, J.(1983), "Significance of Biogas Production in Waste Tips," *Waste Management and Research*, Vol. 1, pp.323~335.
18. 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.
19. Keene, P.(1977), "Sanitary Landfill Treatment," Interstate Highway 84, *Proc. Geotechnical Practice for the Disposal of Solid Waste Material*, ASCE, pp.632~644.
20. 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.
21. 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, MI., pp.574~599
22. Sowers, G. F.(1973), "Settlement of Waste Disposal Fills," *Proceedings, The Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Moscow, 1973, pp.207~210.
23. Wardwell, R. E. and Nelson, J. D.(1981), "Settlement of Sludge Landfills with Fiber Decomposition," *Proceedings, Tenth International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, Sktstockholm, Sweden, pp.397~401.
24. Yen, B. C. and Scanlon, B.(1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. 5, pp.475~487.
25. Yuen, S. T. S., Styles, J. R. and McMahon, T. A.(1995), "An Active Landfill Management by Leachate Recirculation: A Review and an Outline of a Full-scale Project", *Proceedings Sardinia 95 Fifth International landfill Symposium*, pp.403~418.

(접수일자 1997. 12. 5)