

기존 침하모델들에 근거한 쓰레기 매립지 장기 침하 예측

Prediction of Long-term Settlement of Refuse Landfill by Several Proposed Models

박 현 일^{*1} Park, Hyun-Il

이 승 래^{*2} Lee, Seung-Rae

Abstract

In the present study, several settlement estimation methods were used to analyze the settlement data of nine refuse landfills which have different fill ages. In the application of the settlement estimation methods, the predicted long-term settlements considerably decreased with the increase of the fill age of refuse landfills. Each settlement estimation method showed considerable difference in prediction of long-term settlements for fresh refuse landfills. On the other hand, most settlement estimation methods represented similar prediction except power creep law for old refuse landfills.

요 지

본 연구에서는 여러 침하모델들을 매립경과기간이 다른 아홉 개 지역의 실제 쓰레기 매립지 침하자료들에 적용하였다. 침하모델들을 적용한 결과, 매립연한이 증가할수록 향후 발생가능한 장기침하량도 상당히 감소하는 경향을 보였다. 신선한 쓰레기 매립지에서는 침하모델들마다 예측정도에서 큰 차이를 보이지만, 매립연한이 오래된 매립지들에서는 Power creep law를 제외하고는 예측정도에 있어서 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있었다.

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

*1 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

1. 서론

도심지에 인접되어 있던 쓰레기 매립지의 사후활용에 대한 관심이 고조됨에 따라 쓰레기 매립지의 장기침하특성에 관한 연구들이 수행되기 시작하였다. 많은 연구자들은 다른 공학적인 재료의 장기 거동모사에 사용되었던 모델들을 쓰레기 매립지의 장기침하거동 예측에 적용하였다. Edil 등(1990)은 주로 이토(peat)의 이차압밀거동을 예측하는데 사용되는 Gibson & Lo 모델과 일반적인 재료의 크리프 거동 모사에 사용되었던 power creep law를 쓰레기 매립지 침하자료들에 적용하였다. Hoe 등(1998)은 주로 연약지반 성토시 침하량 산정에 주로 사용되어 온 쌍곡선 모델을 쓰레기 매립지의 장기침하량 산정에 사용하였다. Bjarngard와 Edgers(1990)는 매립지의 실측자료들에 근거한 침하모델을 제안하였으며, Yen과 Scallnon(1975)는 매립 후 경과기간이 대략 10년 미만인 매립지 침하자료들에 대한 분석을 통하여 침하율이 대수시간관계에서 선형이라는 관계를 도출하여 침하량을 산정하고자 하였다. 박현일 등(1998a; 1998b)은 쓰레기 매립지에서 유발하는 분해에 의한 장기적인 침하양상을 모사하기 위하여 분해과정을 고려한 장기침하모델을 제안하였으며, 여러 쓰레기 매립지들에 대한 사례연구를 수행하였다.

일반적으로 쓰레기 매립지에서는 분해로 말미암아 상당한 양의 침하가 장기적으로 발생되는 것으로 알려져 있다(Coduto와 Huitric 1990; Gordon 등 1986; 박현일 등 1997; 박현일과 이승래 1998c). 매립이 완료된 쓰레기 매립지에서는 일정기간이 경과된 이후부터 쓰레기에 포함되어 있던 분해가능한 유기물이 분해되기 시작하면서 상당한 양의 침하가 수십년 간에 걸쳐 유발하게 된다. 수십년이 경과된 이후에는 분해가 대부분 완료되며, 매립된 지 수십년 이상된 쓰레기 매립지의 경우 구성물질을 살펴보면 어두운 색의 모래질 혹은 실트질 흙과 금속류, 나무, 유리 등과 같은 분해가 어려운 물질들이 다량 함유되는 양상을 갖는다(Keene 1977, Lukas 1986, Richard 등 1995).

본 연구에서는 서로 다른 매립연한을 갖는 아홉 개 지역의 쓰레기 매립지 침하자료들에 대하여 기존 침하모델들을 적용하였다. 이로부터 쓰레기 매립지의 매립연한이 증가에 따른 쓰레기 매립지의 장기적인 침하특성을 살펴 보았으며, 침하모델들의 적용성을 함께 검토하고자 하였다.

2. 쓰레기 매립지의 장기 침하메카니즘

쓰레기 매립지는 하중증가에 따른 즉시침하가 수개월 이내에 완료되며 이후 수십 년에 걸쳐 상당량의 침하가 장기적으로 발생하게 되고, 이때 유발되는 장기침하량은 다음과 같이 크게 두 가지로 구분될 수 있다(Sower 1973; Gordon 등, 1986; Watts & Charles 1990).

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

여기서, $\Delta \epsilon_{mec}$ 은 쓰레기 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배열, 압축성이 큰 구성성분의 지체된(delayed) 압축 등에 의하여 장기적으로 발생하는 역학적인 이차압축량을 의미한다. 그리고, 분해(decomposition)에 의한 침하($\Delta \epsilon_{dec}$)는 매립이 완료된 이후 쓰레기에 포함된 분해가능한 유기성 고형물이 생물학적 반응기작을 따라 분해됨으로 말미암아 발생하는 장기적인 압축량을 의미한다.

이러한 쓰레기 매립지의 침하거동을 이해할 수 있는 일반적인 개념이 그림 1에 나타나 있다(Grisolia와 Nepoleoni, 1995). 쓰레기를 구성하는 물질들은 세가지 요소들로 구분될 수 있으며, 이 구성물질들을 기준으로 쓰레기 지반 침하 기작을 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 쓰레기에 가해진 상재 하중에 의하여 초기 침하는 빠르게 완료된다. 이후에 역학적 이차 압축이 지속적으로 유발되며, 일정기간이 경과한 이후부터 유기성 고형물의 생물학적 분해가 시작됨에 따라 분해에 의한 이차 압축이 추가적으로 발생하게 된다. 특히 신선한(fresh) 쓰레기에 포함된 다량의 유기성 고형물의 분해로 인한 체적 감소는 쓰레기 매립지에서 상당량의 압축을 유발한다. 그리고 어느 정도 분해된(media decomposed) 쓰레기 상태를 거치게 되며 분해에 의한 압축이 완료된 이후, 즉 더 이상 분해될 수 있는 유기성 고형물

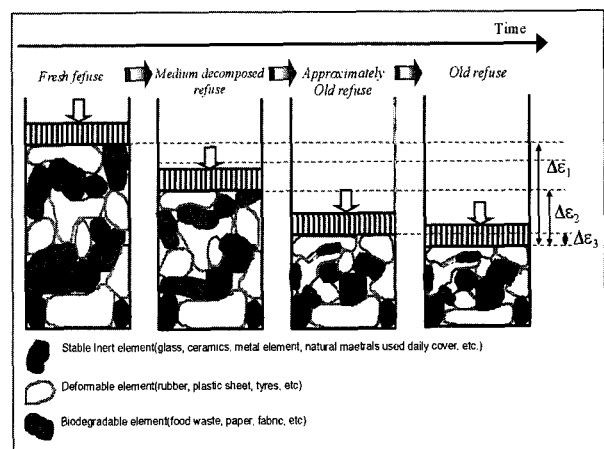
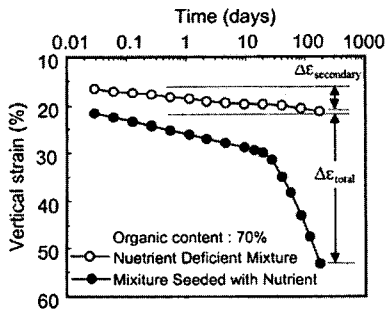
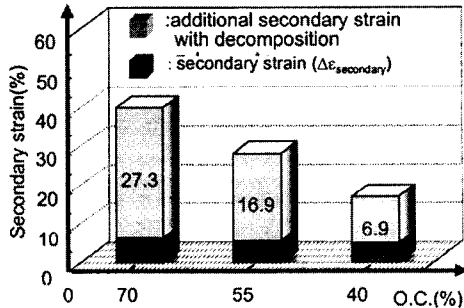


그림 1. 쓰레기 침하양상에 대한 개념도



(a)



(b)

그림 2. 유기물 분해가 장기침하양상에 미치는 영향

이 존재하지 않는 상태(Approximately old)에 도달될 경우 분해에 의한 침하는 더 이상 유발되지 않고 작은 양의 역학적 이차 침하만이 지속적으로 발생될 것이다.

Wardwell과 Nelson (1981)은 유기물 분해가 침하에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 유기물 함량이 각각 40%, 55%, 70%가 되도록 셀룰로오스 섬유와 카울린 점토를 혼합한 시료를 조성한 후 6개월 가량 압축 실험을 수행하였다. 이때 동일한 유기물함량을 갖는 시료를 각각 2 개씩 동일하게 성형한 후, 한 시료에만 생물학적 분해를 촉진할 수 있는 영양물질을 공급하였다. 그림 2(a)에는 유기물 함량이 70%인 경우에 대한 실험결과가 나타나 있다. 침하곡선을 대수시간관계로 나타낼 경우 영양물질이 공급되지 않은 시료는 하중이 가해진 직후 초기침하는 완료되고, 이후에 전체 계층 기간동안 매우 작은 기울기를 갖는 선형적인 관계를 보인다. 영양물질이 공급된 경우에는 초기에는 영양물질이 공급되지 않은 시료와 유사한 거동을 보이다가 일정시간 이후 유기물의 분해가 시작됨에 따라 급격한 기울기를 갖는 추가적인 침하양상을 보인다. 그림 2(b)에는 전체(total) 침하량에서 초기침하량을 제외한 이차침하량 값들이 유기물 함량 값들에 대하여 도시되어 있다. 시료에 포함된 유기물 함량이 감소함에 따라 실험기간동안 발생하는 분해에 의한 추가적인 이차침하량의 크기도 점차 감

소하는 양상을 보여주고 있다.

3. 적용된 기존 침하 모델

본 연구에서는 쓰레기 매립지의 장기침하량을 예측하기 위해 제안되었던 Gibson과 Lo 모델(Edil 등, 1990), 대수함수(Yen & Scanlon, 1975), 박현일 등의 모델(박현일 등 1998a; 1998b), 쌍곡선 모델(Hoe 등, 1998), Bjarngard와 Edgers의 모델(1990), Power Creep Law(Edil 등, 1990)가 적용되었다.

3.1 Gibson과 Lo의 모델

Gibson과 Lo 모델은 주로 지반의 이차압축거동을 모델하기 위해 제안된 방법으로 이토(peat) 등과 같은 유기물이 많이 함유된 지반의 침하량을 예측하는데 적합한 모델이며, 유동학적(rheological) 모델로부터 시간에 따른 침하량을 구할 수 있다. Edil 등(1990)은 이러한 유동학적 모델의 특성을 사용하여 지속적인 하중상태 하에서 장기간 발생하는 쓰레기 매립지의 이차압축 거동을 모사하고자 하였으며, 이때 임의의 시간에 대한 침하 변형율은 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \epsilon(t) &= \Delta\sigma(a + b[1 - \exp(-\lambda/bt)]) \\ &= \Delta\sigma \cdot a + \Delta\sigma \cdot b[1 - \exp(-\lambda/bt)] \end{aligned} \quad (2)$$

그림 3에 나타난 바와 같이 하중이 작용함에 따라 스프링 상수를 갖는 Hookean spring이 즉각적으로 압축된다. 이후에 Newtonian dashpot (λ/b)에 의하여 하중에 spring에 전달되는 것이 지체된다.

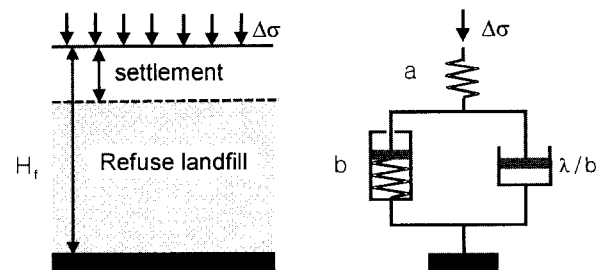


그림 3. Gibson과 Lo의 유동학적 모델

3.2 대수함수

Yen과 Scanlon (1975)은 매립이 완료된 위생 매립지를

의 9년 간의 실측결과로부터 침하율(=매립지(혹은 침하판)의 표고 변화(ΔH)/경과시간변화(Δt))과 평균 매립연한, 매립 완료시의 매립 높이, 매립기간과의 관계를 분석하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$m = a - b \cdot \log t_m \quad (3)$$

위 식에서 a 와 b 는 침하율 계수로서 침하자료로부터 경험적으로 산정되었으며, t_m 은 $(t - t_c)$ 로 정의되었다. 여기서, t_c 는 매립기간을 의미하고 t 는 매립이 시작된 이후 총 경과시간을 의미한다. 따라서 일정기간동안 발생되는 침하량은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$S = \int m dt_m = \int_{t_1}^{t_1 + \Delta t} (a - b \log t_m) dt_m \quad (4)$$

여기서, 식(3)에서 침하율이 영(zero)이 될 때가 바로 침하예측이 완료되는 시점이므로 t_m 값의 제한조건은 다음과 같다.

$$t_m \leq 10^{(a/b)} \quad (5)$$

3.3 박현일 등의 모델

박현일 등(1997; 1998)은 분해가능한 유기성 고형물의 용액화 즉 체적감소과정이 일차반응기작을 따르는 것처럼 분해를 통해 유발되는 쓰레기 매립지의 압축과정도 일차반응기작 형태를 따른다고 가정하여 다음과 같이 정리하였다.

$$\overline{\varepsilon}_{dec}(t_{bio}) = \varepsilon_{tot-dec} \cdot e^{-k t_{bio}}, \quad t_{bio} = t - t_c \quad (6)$$

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

t_c : 분해에 의한 침하가 시작되는 시점

여기서, $\overline{\varepsilon}_{dec}(t_{bio})$ 은 시간 t_{bio} 에서 존재하는 분해가능한 유기성 고형물의 분해로 인하여 추후 발생할 수 있는 장기 압축량을 의미하며, 변수 k 는 분해에 의한 압축율을 의미한다. 또한 t_{bio} 는 분해에 의한 압축이 시작하는 시점

로부터 경과된 기간을 나타낸다. 그리고 t_c 값에 대해서 신선한(fresh) 쓰레기 매립지의 경우 침하-대수시간관계에서 선형적인 침하양상을 보이다 급한 경사를 가지며 침하가 발생하는 시점으로 간주하였다. 매립된지 상당기간이 경과한 대부분의 매립지에서 침하계측이 시작되었을 때는 이미 분해에 의한 침하가 유발되고 있으므로, t_c 값은 침하가 계속되기 시작한 시점으로 결정하였다. 따라서 임의의 시간에 발생된 침하량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta S/H &= \Delta \varepsilon_{mec} + \Delta \varepsilon_{dec} \\ &= C_{a,mec} \log[(t + \Delta t)/t] + \varepsilon_{tot-dec} (1 - e^{-k t_{bio}}) \end{aligned} \quad (7)$$

3.4 쌍곡선 모델

연약지반 성토시 침하량 산정에 주로 사용되어온 예측 방법으로서 Hoe 등(1998)이 쓰레기 매립지 침하 예측에 처음 사용하였으며, 침하량은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S = \frac{t}{1/\rho_o + t/S_{ult}} \quad (8)$$

여기서, S_{ult} 는 최종침하량을 의미하며, 변수 ρ_o 와 S_{ult} 는 침하자료를 다음 식과 같이 t/S 와 t 의 관계로 표현한 후 선형회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{t}{1/\rho_o + t/S_{ult}} \quad (9)$$

3.5 Bjarngard와 Edgers의 모델

한편 최근에 Bjarngard와 Edgers(1990)는 매립지의 실측자료를 근거로 하여 매립지의 침하예측을 위한 새로운 모델을 제안하였으며, 식은 다음과 같다(그림 4 참고).

$$\begin{aligned} S/H &= CR \cdot \log \frac{\overline{P}_o + \Delta P}{\overline{P}_o} \\ &+ C_{\alpha(1)} \log \frac{t_{(2)}}{t_{(1)}} + C_{\alpha(2)} \log \frac{t_{(3)}}{t_{(2)}} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, S = 침하량, H = 매립지의 초기두께, \overline{P}_o = 초기 수직 유효응력, ΔP = 응력 증분, CR = 압축비,

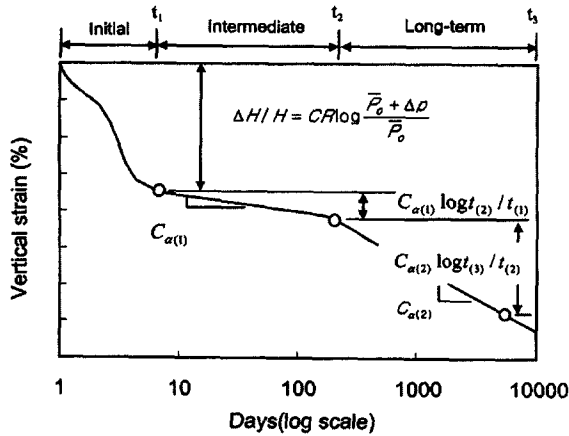


그림 4. Bjarngard와 Edgers(1990)의 침하모델

$C_{a(1)}$ = 중간단계(intermediate) 이차압축계수, $C_{a(2)}$ = 장기(long-term) 이차압축계수이다.

3.6 Power creep law

Edil 등(1990)은 일정하중이 작용하는 상태에서 유발되는 시간의존적인 변형거동을 나타내는 가장 간단한 방법 중의 하나이며 많은 공학적 재료의 크리프 거동 모사에 사용되는 Power Creep Law를 사용하여 쓰레기 매립지 침하 거동을 예측하고자 하였으며, 침하량 $S(t)$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S(t) = H\epsilon(t) = H dP m (t/t_r)^n \quad (11)$$

여기서, m 은 기준압축성(reference compressibility), n 은 압축율(rate of compression), t_r 은 기준시간(reference time), dP 는 작용하중이다.

4. 실제 매립지 침하 자료

본 연구에서는 기존자료로부터 얻어진 쓰레기 매립지 침하자료들을 다음과 같이 분석하였다. 먼저 분해정도에 따라서 매립후 경과기간이 0년인 Site A1 - A4를 Very Fresh(혹은 Very Young)로, 매립 후 경과기간이 2년인 Site B를 Fresh(혹은 Young)로 구분하였으며, 대략 10년 가량 된 Site C와 D는 Approximately old로, 또한 20년 이상된 Site E와 F를 Old(혹은 Mature)로서 구분함으로써 총 네 등급으로 구분하였다. 여기서 사용된 매립후 경과기간(fill

age)은 매립이 시작되어 완료된 기간 사이의 중간 시점으로부터 침하계측이 시작된 때까지의 기간을 나타낸다. 또한 Site A1 - A4 및 B와 같은 비교적 신선한 쓰레기 매립지 침하자료들의 경우 박현일 등(1998c)의 연구에서 언급된 바와 같이 침하율과 대수시간의 관계에 있어서 분해에 의한 급격한 침하양상을 보이는 대상자료들을 선정하였다.

4.1 Site A1(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 변형을 대 대수시간 관계에서 매립이후 대략 300일이 지난 이후부터 급속한 침하양상을 보였다.

4.2 Site A2(Fresh)

이복수 등(1995)은 도시쓰레기의 주성분인 아파트와 일반 가정용 쓰레기를 수거하여 직경 1.4m, 높이 1.2m로 제작된 대형 모형탱크에 투기하여 2년여 동안 침하를 관측하였다. 매립연한은 0년으로 산정되었으며, 침하양상은 변형을 대 대수시간 관계에서 매립이후 대략 80여일이 지난 이후부터 급속한 침하양상을 보였다.

4.3 Site A3(Fresh)

Rao 등(1977)은 모형 매립조(가로 및 세로: 3m, 높이 1.5m)를 조성하여 도시쓰레기를 충전한 후 0.5 m가량 복토하였다. 침하계측은 대략 3년가량 수행되었다. 침하양상은 변형을 대 대수시간 관계에서 매립이후 대략 400여일이 지난 이후부터 급속한 침하양상을 보였다.

4.4 Site A4(Fresh)

Bjarngard와 Edgers(1990)의 사례연구에서 사용된 침하자료는 매립 두께가 3m이며, 침하계측은 대략 1년가량 수행되었다. 침하양상은 변형을 대 대수시간 관계에서 매립

이후 대략 100여일이 지난 이후부터 급속한 침하양상을 보였다.

4.5 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 침하곡선에 근거하여 수행되었다(Cheney, 1983). 매립연한은 대략 2년이다. 또한 침하자료는 침하대 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.

4.6 Site C(Approximately old)

서울시에서 발생한 도시 쓰레기를 대략 1978년부터 1993년 3월까지 단순매립함으로써 형성되었으며, 매립후 경과기간은 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 함량비 및 함수비는 각각 13%와 29%이며, 침하량, 가스 및 침출수에 관한 자료, pH 등이 1년간량 계측되었다.

4.7 Site D(Approximately Old)

1969년부터 매립이 시작되었으며, 매립지 상부에 침하판이 6개가량 설치되어 1985년 1월부터 1986년 5월까지 침하가 계측되었으며, 침하지점 S-1 ~ S-5의 침하자료에 대한 분석이 수행되었다(Dodt 등, 1987). 매립후 경과기간은 대략 8년 가량이다

4.8 Site E(Old)

미국 Western Connecticut에 위치하고 있으며, 대략 40~50년 전부터 매립이 시작되었으며, 이송매립된 이후 대략 5년간량 침하계측을 수행하였다(Keene, 1977). 매립후 경과기간은 대략 23년 정도이다.

4.9 Site F(Old)

미국 Massachusetts에 위치하고 있는 매립지로서 1954년 경부터 도시쓰레기가 투입되기 시작되었으며, 쓰레기층의 두께는 대략 30ft 정도이다. 계측된 당시 쓰레기 매립지의 환경공학적 상태는 생물학적인 분해가 상당히 완료된, 즉 상당히 숙성된(mature) 매립지로 구분된다고 보고하였다. 매립후 경과기간은 대략 25년 가량이다

5. 침하 모델의 적용

총 9개의 대상 자료들에 대하여 기존의 침하모델들이 적용되었으며, 구해진 모델변수 값들이 표 1에 나타나 있다.

그림 5(a) - (g)에는 구해진 모델변수 값들에 근거한 각각의 침하모델들의 예측양상들이 나타나 있다. 먼저 신선한 쓰레기 매립지(Site A1, A2, A3, A4, B)의 경우 각각의 모델들의 예측정도를 살펴보면 다음과 같다, Gibson & Lo 모델과 대수함수는 다른 침하모델들 보다 과소평가하며 계측기간 동안에 발생된 실측값보다도 작게 예측하는 양상을 보이고 있다. 쌍곡선 함수는 신선한 쓰레기 매립지 가운데 Site A1와 B에서는 상당히 과다예측하고 있지만, 다른 Site에 대해서는 어느 정도 발생 가능한 침하량 예측을 수행하고 있다. Bangard와 Edgers 모델의 경우 비교적 과다예측하고 있으며, Power creep law는 신선한 쓰레기 매립지의 장기침하량 예측에 적용하기에는 무리가 있을 정도로 과다예측함을 알 수 있다. 박현일 등의 모델은 대체로 다른 침하모델들의 평균적인 정도의 침하량을 예측하고 있다. 즉 신선한 쓰레기 매립지에서는 침하모델들의 예측정도는 서로 상당한 차이를 보이기 때문에 수십년 이후 발생될 장기침하량의 예측하기 위한 침하모델 선정에 상당한 주의가 필요함을 알 수 있다. 어느 정도 오래된 쓰레기 매립지(Site C와 D)의 경우 Gibson & Lo 모델과 대수함수는 계측기간 동안에 발생된 최종적인 실측값보다도 비교적 작게 예측하고, Bangard와 Edgers 모델과 Power creep law은 어느정도 과다예측하지만, 다른 모델들은 비교적 예측정도에서 서로 큰 차이를 보이지 않고 있다. 오래된 쓰레기 매립지(Site E와 F)의 경우 Power creep law를 제외한 대부분의 모델들의 예측정도는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.

그림 6(a) - (g)에는 각각의 침하자료에 대하여 침하계측이 시작된 시점으로부터 30년 경과되었을 때까지 예측된 침하량과 매립연한(fill age)과의 관계가 나타나 있다. 여기

표 1 구해진 모델변수 값들

Site	Gibson & Lo		Hyperbolic function		Park et al.			Yen & Scanlon			Bjarngard & Edgers		Power creep law		
	$\Delta\sigma \cdot b$	$\lambda/b \times 10^3$	S_{ult}/H	$\rho_o/H \times 10^3$	$\epsilon_{tot-dec} \times 10^2$	$k(d^{-1}) \times 10^3$	C_a	$a \times 10^3$	$b \times 10^3$	$10^{a/b}(yr)$	C_{a1}	C_{a2}	n	$Ln(\Delta pm)$	
A1	L-1	0.341	0.83	0.787	0.27	19.5	1.1	0.06	15.8	7.7	9.39	0.060	0.361	0.408	-3.980
	L-3	0.586	0.30	1.111	0.23	35.8	0.46	0.05	16.4	8.0	9.35	0.051	0.4048	0.458	-4.431
A2	Apt.	0.185	4.60	0.270	1.1	7.9	4.4	0.06	28.6	21.8	1.71	0.058	0.1667	0.380	-3.772
	Dom.	0.168	4.80	0.213	1.4	7.8	4.7	0.06	35.4	30.6	1.20	0.061	0.1309	0.247	-2.821
A3		0.170	3.2	0.152	1.3	13.5	1.9	0.02	33.1	21.6	2.83	0.016	0.0801	0.469	-5.089
A4		0.187	3.7	0.208	6.7	-	-	-	23.6	19	1.46	0.045	0.1764	0.235	-3.020
B	#22	0.330	0.85	0.457	22.8	27.3	0.67	0.03	27.4	13.6	8.62	0.2050		0.603	-5.635
	#27	0.272	1.60	0.370	27.4	15.6	1.50	0.03	47.3	25.6	5.87	0.2204		0.594	-5.478
	#33	0.220	0.90	0.345	16.0	17.0	0.71	0.03	20.8	10.5	7.98	0.1480		0.461	-4.840
C	L-1	7.86	6.5	11.36	114.4	7.2	6.5	0.005	793.0	392	8.81	0.0480		0.742	-2.037
	L-2	7.06	5.8	9.38	145.6	6.1	4.8	0.005	736.8	364	8.81	0.0394		0.630	-1.624
D	S-1	-	-	0.034	2.53	-	-	-	23.7	11.4	9.99	0.0093		1.396	-13.22
	S-2	-	-	0.012	2.20	-	-	-	35.0	17.1	9.28	0.0063		1.283	-12.97
	S-3	-	-	0.017	3.70	-	-	-	26.0	12.6	9.65	0.0082		1.113	-11.50
	S-4	-	-	0.082	1.33	-	-	-	19.0	9.1	10.2	0.0062		1.230	-12.74
	S-5	-	-	0.030	5.22	-	-	-	22.3	10.6	10.6	0.0134		1.613	-13.92
E	No 4	0.023	27	0.026	0.96	1.1	0.32	0.01	13027	5251	25.2	0.0167		0.341	-5.088
	No 5	0.047	40	0.044	1.74	1.8	0.48	0.01	38417	15488	25.2	0.0283		0.295	-4.230
	No 6	0.033	33	0.035	1.59	1.2	0.41	0.01	26521	10691	25.2	0.0238		0.359	-4.795
	No 7	0.050	35	0.051	2.50	2.7	0.45	0.01	45801	18465	25.2	0.0318		0.806	-4.171
F	# 6	0.036	23	0.037	9.1	2.0	1.5	0.01	87.7	35.1	26.3	0.0192		0.201	-4.311
	# 7	0.029	23	0.031	13	2.4	2.1	0.01	87.6	35.0	26.5	0.0160		0.207	-4.578
	# 9	20.010	21	0.008	2.5	-	-	-	26.2	10.5	26.1	0.0043		0.137	-5.062

서 매립연한은 쓰레기 매립이 시작 및 완료된 평균적인 시점으로부터 침하계측이 시작된 시점까지의 기간을 의미한다. 매립연한이 대략 0년인 신선한 쓰레기 매립지(Site A1, A2, A3, A4) 침하자료들로부터 예측된 향후 30년 동안 발생될 수 있는 장기침하량의 값들을 살펴보면, Power creep law를 제외한 모든 침하모델들에서 대략 매립지 두께의 20- 60%에 해당하는 큰 값을 보인다. 매립연한이 2년인 매립지(Site B) 침하자료에서 예측된 장기침하량은 매립된 지 2년이 경과된 침하계측 시작 시점으로부터 30년 기간동안에 발생가능한 침하량을 의미하며, 약간 감소한 대략 15- 40% 정도의 범위를 보이고 있다. 매립연한이 8년인 쓰레기 매립지 침하자료(Site C와 D)의 경우 매립된 지 8년 가량 경과된 침하계측 시작시점으로부터 향후 30년 동안 발생될 수 있는 장기침하량 값으로서 대략 10% 이내로 급격히 감소되어 있음을 알 수 있다. 이는 침하계측이 시작되기 이전 매립되어 있던 8년 가량의 기간 동안에 매립된 쓰레기에 포함된 유기물의 분해로 인한 침하가 이미 상당히 완료되었기 때문인 것으로 사료된다. 매립된 지 대

략 25년 가량 경과된 시점으로부터 계측이 시작된 침하자료들(Site E와 F)에서 예측된 침하계측 시점 이후 향후 30년동안 발생가능한 장기침하량은 대략 5% 미만의 매우 작은 값으로 예측되었다. 매립된 지 20년 이상 경과된 쓰레기 매립지의 경우 분해로 인한 침하가 유발되기 시작하는 신선한 쓰레기 매립지보다 장기침하는 상당히 미소하게 유발된다고 볼 수 있다. 이는 매립된 지 오래된 쓰레기 매립지에서는 분해로 인한 침하는 상당히 완료되고 압축성이 큰 쓰레기의 역학적 이차압축에 의한 침하만 미소하게 유발되기 때문이다. 따라서, 이러한 미소한 침하양상을 갖는 오래된 쓰레기 매립지에서 계측된 침하자료에 침하모델을 적용할 경우 예측되는 장기침하량 또한 작게 산정되는 것은 당연하다고 사료된다.

그림 6에서 구해진 매립연한별로 예측된 장기침하량 평균값들이 그림 7에서 서로 비교되고 있다. 매립 연한이 작은 신선한 쓰레기 매립지일수록 침하모델들의 장기침하량 예측 정도에 큰 차이를 보이고 있다. 특히 Power creep law는 매립지 두께의 100%에 가까운 침하량을 예측하는 오류

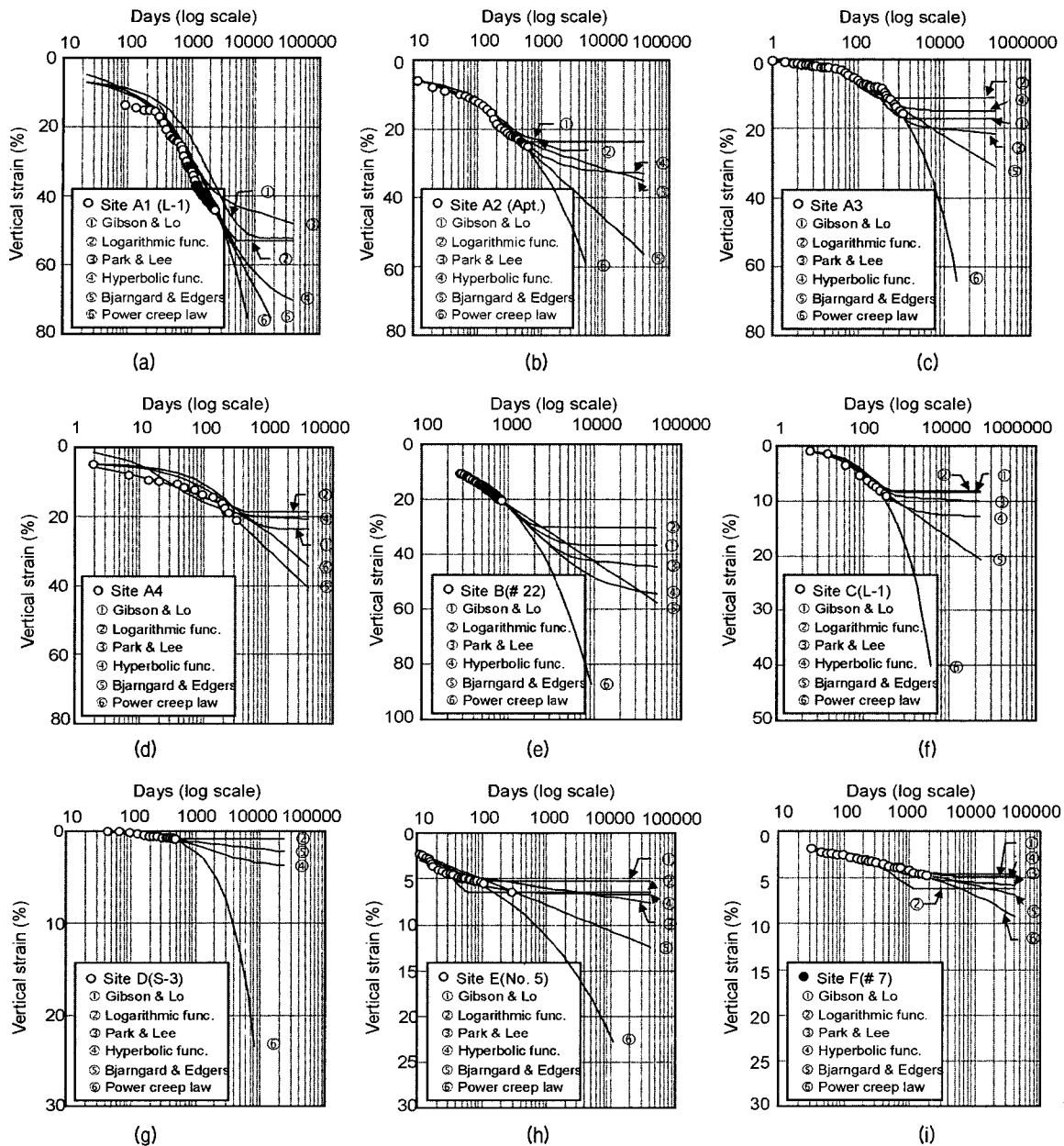


그림 5. 쓰레기 매립지에 대한 침하 예측 곡선

를 보이고 있다. 매립경과기간이 오래된 매립지들의 예측된 장기침하량 값들을 살펴보면 Power creep law를 제외하고는 서로 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 대부분의 모델들이 매립연한이 증가함에 따라 예측된 장기침하량은 서로 큰 차이를 보이지 않는다.

6. 결론

본 논문에서는 여러 침하모델들을 매립연한이 서로 다른 실제 쓰레기 매립지 침하자료들에 대하여 적용하였다. 모든 침하모델들의 예측결과, 매립경과기간이 작은 신선

한(fresh) 매립지(Site A1-A4, 와 B)의 경우 향후 발생가능한 장기침하량의 값들이 매우 크게 산정되었으며, 매립경과기간이 8년인 Site C와 D에서는 상당히 감소된 값을 보이고, 매립연한이 대략 20년 이상인 상당히 오래된(old) 매립지(Site E와 F)의 경우 향후 발생할 수 있는 침하량이 거의 미미하게 예측되므로, 향후 발생가능한 장기침하의 거의 완료된 것으로 나타나 있다.

침하예측에 사용된 모델들의 적용성을 검토하면 다음과 같다. Gibson & Lo 모델은 다른 침하모델들 보다 상당히 과소평가하며, 대체로 예측된 침하량보다도 작게 예측하는 양상을 보이고 있다. Yen & Scanlon 모델의 경우 대

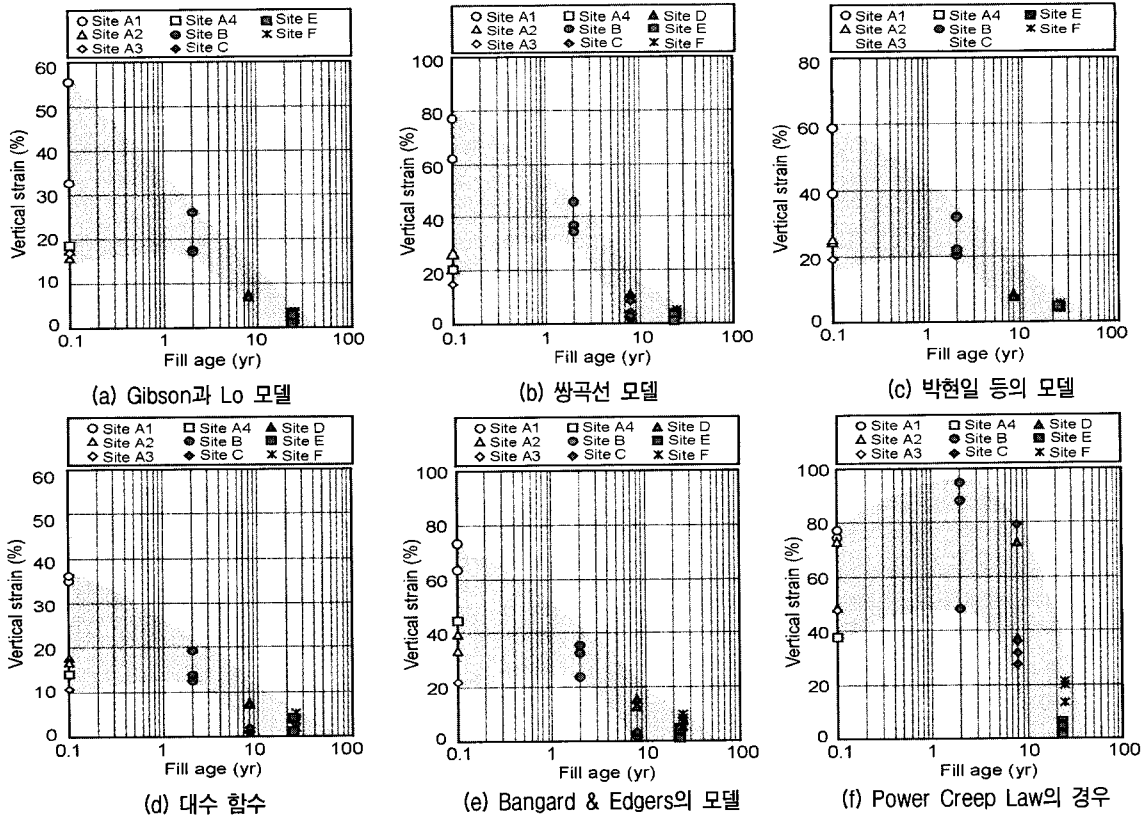


그림 6. 침하계측 시작시점으로부터 30년 경과시 예측된 장기침하량

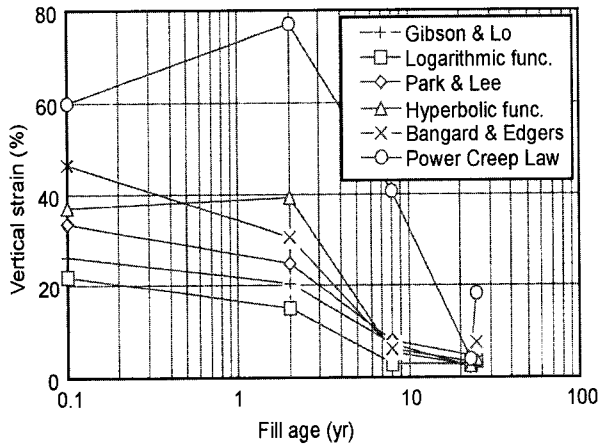


그림 7. 매립연한의 변화에 따라 예측된 평균 장기침하량 값

부분의 모든 Site들에 대하여 침하계측기간 도중에 침하가 완료되는 양상으로 예측하고 있다. 쌍곡선 함수는 비교적 과다예측하고 있지만, 다른 Site에 대해서는 발생 가능한 정도의 침하 예측을 수행하고 있다. Bangard & Edgers 모델은 특히 신선한 쓰레기 매립지에서 상당한 과다예측을 수행하고 있으며, Power creep law는 모든 site들에 대한 침하예측에 적용한 결과 쓰레기 매립지의 장기침하량 예측에 적용하기에는 무리가 있음을 보여주고 있다. 박현일 등의 모델은 모든 Site들에 대하여 대체로 다른 침하모델

들의 평균적인 정도의 침하량을 예측하고 있다.

신선한 쓰레기 매립지들의 경우 침하모델들의 예측 정도는 서로 상당한 차이를 보이므로 예측에 있어서 상당한 주의를 필요로 하지만, 매립연한이 상당히 오래된 매립지에서는 Power creep와 Bangard & Edgers 모델을 제외하고는 거의 비슷한 정도의 장기침하량 예측을 수행함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 서울대학교 환경안전연구소(1994), Lysimeter를 이용한 폐기물 매립지 안정화 연구
2. 박현일, 이승래, 라일용, 성상열(1997). "난지도 쓰레기 매립지의 침하 특성," 한국지반공학회지, 제 13권, 제 2호, pp. 65-75.
3. 박현일, 이승래, 고광훈(1998a). "분해가 고려된 쓰레기 매립지의 장기침하거동," 한국지반공학회지, 제 14권, 제 1호, pp. 5-14.
4. 박현일, 이승래, 고광훈(1998b). "매립연한이 서로 다른 쓰레기 매립지의 장기 침하 거동," 한국지반공학회지, 제 14권, 제 2호, pp.21-30.
5. 박현일, 이승래(1998c). "신선한 쓰레기 매립지의 장기 침하 예측에 대한 분해효과 평가," 한국지반공학회지, 제 14권, 제 6호, pp.127-138.
6. 이복수, 황규호, 이광열, 이송(1995). "도시쓰레기의 침하특성," 대한토목학회논문집, 제 15권 제 6호, pp. 1773-1782.
7. Bjarngard, A., and Edgers, L. (1990). "Settlement of Municipal Solid Waste Landfills," The thirteenth Annual Madison Waste Conference, September, pp. 192 - 205.
8. Cheney, L.(1983), "Settlement of Landfill," Third Harwell Waste

- Management Symposium, pp.13~29.
9. Coduto, D.P. and Huitric, R. (1990). "Monitoring Landfill Movements Using Precise Instruments," *Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice*, ASTM STP 1070. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 358-370.
 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, 225 - 239.
 12. Gandolla, M., L. Dugnani, G. Bressi and C. Acaia (1992). "The Determination of Subsidence Effects at Municipal Solid Waste", *Proc. 6th Int. Solid Wastes Congress*, Madrid, pp. 1-17.
 13. Gordon, D.L., Lord. J.A. and Twine, D. (1986). "The Stockley Park Project," *Bulding on Marginal and Derelict Land: An Institution of Civil Engineer Conference*. Glasgow. Pp. 359-381.
 14. Grisolia M. and Napoleoni Q.(1995), "Deformability of Waste and Settlements of Sanitary Landfills," *ISWA '95 World Congress on Waste Management*, Wien October.
 15. Hoe I. Ling, Dov Leshchinsky, Yoshiyuki Mohri, and Toshinori Kawabata (1998). "Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement," *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engrg.* Vol. 124, No. 1, January, pp. 21-28.
 16. Keene, P.(1977), "Sanitary Landfill Treatment," *Interstate Highway 84. Proc. Geotechnical Practice for the Disposal of Solid Waste Material*, ASCE, pp.632~644.
 17. Lukas, R.G. (1986). "Dynamic Compaction for Highway Construction, Vol 1, Design and Construction Guidelines," *Federal Highway Administration Report FHWA/RD-86/133*, July.
 18. Richard P.Stulgis, Cetin Soydemir, Richard J. Telgener (1995). "Predinting landfill settlement," *Geoenvironment 2000*, *Geotechnical Special Publication No. 46*. ASCE, Vol.2-1, pp. 980-994.
 19. 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.
 20. 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, Sktockholm, Sweden, 397 - 401.
 21. Watts, K.S. and Charles, J.A. (1990). "Settlement of recently placed domestic refuse landfill," *Proc. Instn. Civ. Engrs, Part 1*, 88, Dec., pp. 971-993.
 22. Yen, B. C. and Scanlon, B.(1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates," *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 105, No. 5, pp.475~487.

(접수일자 1999. 9. 2)