

현장계측을 통한 다층 폐기물 매립지의 장기침하거동분석

The Long-Term Settlement Behavior Analysis of Multi-layered Refuse Landfill by In-situ Measurement

천병식* · 최정훈**

Chun, Byung-Sik · Choi, Jung-Hoon

Abstract

This paper estimates the long-term settlement of Kimpo metropolitan landfill based on measured settlement data from 180 landfill monitors accumulated over a period of 12 years. Comparison of domestic and international settlement records indicate that the domestic compression rate is slightly lower due to greater portion of organic component. Several existing settlement models are used to compare with the observed behavior and also to estimate long-term settlement. The hyperbolic, Gibson & Lo, Bjarngard & Edgers and Power Creep Law models compare well with the measured settlement of the Kimpo metropolitan landfill. The settlement models are further used to estimate long-term settlement. Bjarngard & Edgers and Power Creep Law models result in higher estimates of the long-term settlement compared to the hyperbolic and Gibson & Lo models. Further comparisons indicate that other models, including Sowers and log models, are inappropriate for predicting the long-term settlement of the Kimpo metropolitan landfill.

Keywords : Landfill long-term settlement behavior, Settlement plate, Settlement model

요 지

본 연구에서는 수도권매립지의 신선한 쓰레기 매립층의 장기침하거동 특성을 규명하기 위해 매립시점부터 설치, 관리되어 온 180여개의 침하판을 대상으로 약 12년간에 걸쳐서 측정된 침하계측 결과에 대한 분석을 수행하였다. 국내 매립지의 침하계측자료와 외국매립지 침하자료들을 분석한 결과 외국 매립지의 압축률보다 다소 작게 측정되고 있으나, 상당히 근접하는 압축률을 보이고 있으며, 기존 장기침하 예측 모델을 적용하여 예측된 장기침하량 분석 결과 쌍곡선 모델, Gibson and Lo의 모델은 상당히 근접한 예측 결과를 나타내었으며, Bjarngard and Edgers 침하모델과 Power Creep Law 모델의 경우 침하계측 기간 동안은 침하자료와 잘 일치되는 경향을 보이거나 장기침하량을 예측할 경우 다른 침하모델들에 비해 과다 예측됨을 알 수 있었다. 이외의 다른 예측식(Sowers, 대수함수)은 본 현장에는 적합하지 않은 것으로 사료된다.

주요어 : 쓰레기 매립층 장기침하거동, 침하판, 침하모델

* 정회원 · 한양대학교 토목공학과 교수

** 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

1. 서론

폐기물매립지에 구조물을 축조할 때 공학적 우려사항은 폐기물 매립지역의 오염 및 가스 발생 등의 환경적 문제와 기초지반으로서의 지반공학적 문제이다. 일반적인 토질 기초지반과는 다른 거동을 보이는 폐기물 매립지의 지반공학 적 접근 방식에는 여러 문제점들이 산재해 있지만, 특히 매립이 종료된 폐기물 매립지의 부지로서의 활용과 향후 조성 되는 매립지의 폐기물 매립량 계획시 반드시 고려되는 것이 폐기물의 침하에 대한 문제이다.

외국에서는 장기간에 걸친 매립지의 침하계측과 실내시험을 통해 매립지의 침하양상을 이론적으로 해석하고 그 나라의 폐기물 성상에 맞는 침하식을 도출하여 매립지의 장기침하를 예측하고 있지만 국내에서는 폐기물의 물리적 특성과 조성비, 매립방법이 외국매립지와 차이가 있음에도 외국의 침하모델들과 연구데이터들을 그대로 적용하고 있는 실정이다. 국내에는 아직 침하에 대한 연구가 초기단계에 머무르고 있어 적극적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

본 연구를 통해 국내에서 유일하게 매립초기부터 매립종료시까지 침하계측이 실시되어온 수도권매립지 제1매립장의 침하계측을 통해 매립기간 중의 침하양상과 매립종료 후의 침하양상을 살펴보고, 매립종료 후 발생하게 될 침하에 대해서는 실측침하 데이터를 근거로 기존 침하모델식 중 가장 근접한 모델식을 찾아내어 예측하고, 각 단계별 침하특성과 거동경향을 살펴보고자 하였다. 또한 이러한 침하거동 분석을 통하여 향후 부지활용 계획수립과 차기 조성되는 동일한 조건의 매립지 설계에 활용하고자 하며, 지속적으로 침하를 측정하여 예측된 침하모델 검증과 향후 연구될 실내시험을 통한 폐기물의 물리적 특성이 침하에 미치는 영향 등을 고려한 새로운 모델식의 개발 및 안정화 지표수립을 목적으로 선행적인 실측자료 분석과 국내 폐기물매립장 침하경향을 기존모델식과의 비교를 통해 분석해 보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 쓰레기 매립지 침하 메커니즘

쓰레기 매립지에서 침하를 유발하는 메커니즘은 역학적 압축과 분해에 의한 침하로 나눌 수 있다. 첫째, 역학적 압축은 하중 증가에 의해 발생하는 침하량으로 수개월 이내에 발생하는 일차압축과 장기간에 걸쳐 지속적으로 발생하는 이차압축(secondary compression ; $\Delta\epsilon_{sec}$)으로 구분된

다. 일차압축은 가스 혹은 공기로 채워진 간극의 압축, 느슨한 쓰레기의 압축, 입자의 미끄러짐 등에 의하여 발생되고, 이차압축은 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배열, 쓰레기 구성성분의 지체된 압축 등에 의하여 장기적으로 발생된다.

둘째, 분해에 의한 침하($\Delta\epsilon_{dec}$)는 쓰레기에 포함된 분해 가능한 유기성 고형물이 생물학적 반응기작을 따라 분해됨으로 발생하게 된다.

2.2 폐기물매립지 침하예측모델

2.2.1 Sowers의 제안식

Sowers(1973)는 쓰레기 매립지의 장기적인 침하양상이 대수시간과 변형률의 관계에서 비교적 선형적인 관계를 가지며, 이것은 흙의 이차압축과 유사하다는 것을 제시하였으며, 다음과 같은 관계식으로 나타내었다.

$$\begin{aligned} \frac{S}{H} &= \alpha \frac{1}{1 + e_o} \log\left(\frac{t + \Delta t}{t}\right) \\ &= (0.03 \sim 0.09) \frac{e_o}{1 + e_o} \log\left(\frac{t + \Delta t}{t}\right) \quad (1) \end{aligned}$$

여기서, S : 시간 Δt 동안 발생하는 침하량

α : 대수시간과 간극비 곡선에서의 기울기

활성화된 분해조건 : $\alpha = 0.09e_o$

열악한 분해조건 : $\alpha = 0.03e_o$

H : 간극비 e_o 상태에서의 매립두께

2.2.2 대수합수

Yen과 Scanlon(1975)은 쓰레기 매립지반의 침하율을 측정하기 위하여 미국 캘리포니아의 매립고 10~40m 범위인 3개의 매립지를 대상으로 매립이 완료된 후 9년 동안 매립지반의 침하량을 측정하여 그 계측결과를 분석하였으며, 이를 토대로 매립지반의 침하율을 산정할 수 있는 관계식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\begin{aligned} m &= \frac{\text{매립지의표고변화}}{\text{경과시간변화}} = - \frac{\Delta H}{\Delta t} \\ &= a - b \log t_m \quad (2) \end{aligned}$$

여기서, m : 침하율

a, b : 침하율계수

$$a = 0.0015H - 0.0093 \quad (ft/month)$$

$$b = 0.0006H - 0.0019 \quad (ft/month)$$

t_m : 매립중간시기

한편, Hoe et al.(1998)은 Yen과 Scalon의 제안식에서 침하율 매개변수 a, b 값을 현재계측치를 이용하여 침하율과 대수시간의 그래프를 도시하여 산정하는 방법을 제안하였다.

2.2.3 Bjarngard와 Edgers의 모델

Bjarngard와 Edgers(1990)는 폐기물 매립지반의 침하 모델과 침하량 산정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\Delta H}{H} = CR \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} + C_{a(1)} \log \frac{t_2}{t_1} + C_{a(2)} \frac{t_3}{t_2} \quad (3)$$

여기서, CR : 수정압축지수 혹은 압축률 ($= \frac{C_c}{1 + e_o}$)

H : 초기 매립고(m)

ΔH : 침하량(m)

P_o : 초기 평균유효수직응력(kN/m²)

ΔP : 증가된 평균 수직응력(kN/m²)

C_c : 일차압축지수

e_o : 초기간극비

C_{a(1)} : 중간단계 이차압축지수

C_{a(2)} : 장기이차압축지수

t₁ : 초기압축 종료 시점까지의 시간(day)

t₂ : 중간단계 압축진행시간(day)

t₃ : 침하예측 목표시점까지의 시간(day)

2.2.4 Morris와 Woods의 모델

Morris와 Woods(1990)는 Sowers(1973)의 일차압축 식과 이차압축식을 이용하여 쓰레기 매립지반내에서 유발되는 총 침하량을 산정하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$S = H \frac{C_c}{1 + e_o} \log \left(\frac{P_o + \Delta P}{P_o} \right) + H \frac{C_a}{1 + e_o} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (4)$$

여기서, S : 총 침하량(m)

H : 초기매립고(m)

C_c : 일차압축지수

C_a : 이차압축지수

P_o : 초기 평균유효상재하중(kN/m²)

ΔP : 증가된 평균상재하중(kN/m²)

e_o : 초기간극비

t₁ : 일차침하 완료시간

t₂ : 이차침하량을 구하고자 하는 시간

2.2.5 점탄성 모델식

Gibson과 Lo모델은 주로 재료의 이차압축 거동을 모델 하기 위해 제안되었으며, 이토 등의 유기물을 많이 함유한 지반의 침하량을 예측하는데 적합한 것으로 알려져 있다. 유동학적 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 하였다.

$$S(t) = H \cdot \varepsilon(t) = H \cdot \Delta \sigma [a + b(1 - \exp[-(\lambda/b)t])] \quad (5)$$

여기서, S : 침하량

H : 쓰레기 초기 높이

ε : 변형률(S/H)

Δσ : 작용하중

a : 일차압축계수

b : 이차압축계수

λ/b : 이차압축율

t : 경과시간

2.2.6 Power Creep Law

Power Creep Law(Edil et al. 1990)는 일정한 하중하에서 나타나는 시간 의존적인 거동을 나타내는 가장 간단한 모델이며, 많은 공학적인 재료의 크리프 거동을 나타내기 위하여 사용되었다. 시간에 따른 침하량 S(t)는 다음과 같이 표현된다.

$$S(t) = H \cdot \varepsilon(t) = H \cdot \Delta \sigma \cdot m (t/t_r)^n \quad (6)$$

여기서, m : 기준 압축성

n : 압축률

t_r : 기준시간

t : 경과시간

$\Delta\sigma$: 작용하중

H : 쓰레기 지반의 초기 높이

ε : 변형률(S/H)

t_0 : 분해에 의한 침하가 시작되는 시점

3. 매립현황 및 침하계측

3.1 폐기물 매립현황

수도권매립지 제1매립장에 반입된 폐기물은 각 단별로 4.5m의 폐기물층과 0.5m의 복토층을 표준 단면으로 하여 총 8단 40m의 매립고로 매립되었으며, 폐기물 총 매립량은 64백만톤이 매립되었다.

2.2.7 쌍곡선법

쌍곡선 모델은 주로 연약지반 성토시 침하량 산정에 주로 사용되어 온 예측방법으로서 Hoe 등(1998)이 쓰레기 매립지의 장기침하 예측에 처음 사용하였으며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{t}{\frac{1}{\rho_o} + \frac{t}{S_{ult}}} \quad (7)$$

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

여기서 S : t시간 동안의 침하량(m)

t : 측정 시작시점부터 예측 목표시점까지 시간 (day)

S_{ult} : $t = \infty$ 에서 절대 최종침하량(m)

ρ_o : 침하율(m/day)

2.2.8 쓰레기의 분해 효과를 고려한 식

박현일 등(1998)은 분해 가능한 쓰레기의 압축과정이 일차분해 반응기작의 형태를 따른다고 가정하고, 쓰레기의 분해를 고려한 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\bar{\varepsilon}_{dec}(t_{bio}) = \varepsilon_{tot, dec} \cdot e^{-k \cdot t_{bio}} \quad (9)$$

$$t_{bio} = t - t_0$$

여기서, $\bar{\varepsilon}_{dec}(t_{bio})$: 시간 t_{bio} 에서 존재하는 분해 가능한 고형물의 분해로 인해 추후에 발생되는 압축량

k : 일차분해압축율 계수 (t^{-1})

t_{bio} : 분해로 인한 압축 시작시점부터 경과된 시간

표 1. 수도권매립지 제1매립장 폐기물 실내시험 결과 (이기중, 2000)

Test NO.	BLOCK	자연함수비 Wn(%)	비 중 Gs	단위중량 γ (t/m ³)	유기물함량 (%)	간극비 e
TP-1	L	29.3	2.342	0.74	34.4	3.089
TP-2	I	36.2	2.482	1.10	31.7	2.071
TP-3	M	23.5	2.449	0.96	28.4	2.152

3.2 원지반 및 폐기물의 물리적특성

원지반의 지층 구조는 해성점토층이 5~24m로 두텁게 형성되어 있고 밑으로는 풍화 잔류토층, 풍화암층, 연암층 순으로 구성되어있다. 해성점토층은 통일분류법상 CL로 분류되고 심도 5m까지는 실트질이 우세한 점토질이며, 상부 연약점토층이 5~10m정도로 분포하고 있으며 하부점토층은 오랜 시간의 압밀로 인해 단단한 점토층으로 구분된다. 지역적으로 층후차가 심하며 표준관입시험 결과는(N치) 1~40회까지로 하부로 내려 갈수록 굳은 상태를 나타낸다. 제1매립장의 매립된 폐기물의 물리적 특성을 파악하기 위해 I, L, M block 3개소에 시험굴 현장시험을 수행하여 현장밀도를 측정하였고, 채취된 시료에 대한 실내시험을 실시하였다. 그 결과는 다음 표 1과 같다. 전체폐기물의 평균 다짐밀도 값을 회귀분석을 통해 추정된 값이 1.13 t/m³인 것으로 분석되었다.

3.3 침하계측

3.3.1 침하계측기 설치현황

제1매립장의 매립기간은 1992년 2월부터 2000년 10월 까지이며, 총 123만평 중 실 매립면적은 84만평이고 17개

block으로 구분되어 매립되었다.

침하측정 계측기 종류는 일반적인 수동침하판(1.0m×1.0m)으로 block마다 바닥지반 침하판 1개와 단별 침하판(1~8단) 8개가 1조로 block 내부에 설치되었으며, 외곽제방하부에는 제방침하판을 설치하여 침하를 계측하였다. 침하계측기 설치 표준단면도와 블럭별 계측기 설치현황도는 그림 1과 같다.

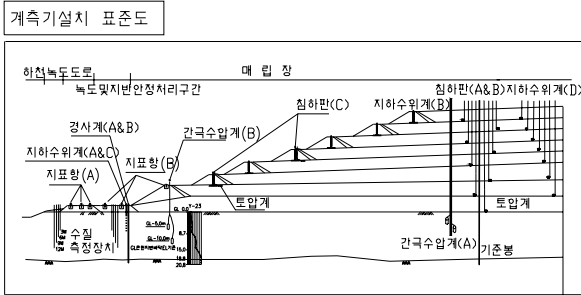


그림 1. 계측기 설치 표준 단면도

4. 현장계측에 의한 침하특성

4.1 매립기간 중 침하특성

A~Q 블록까지 17개소의 블록에 대한 침하계측 데이터 중 산발적인 계측치를 보인 A, O 블록을 제외한 15개소 블록에 대한 내부침하판 경사변화도를 살펴보았으며, 제1매립장에 설치된 침하계측기들은 단별 복토검측과정을 거친 후 통상 3~5개월 후에 설치되었으므로 계측데이터에는 즉시 침하량이 모두 제외되었다.

매립되는 폐기물의 특성에 따른 외부의 하중에 의한 물리적이며 화학적인 부패 및 생물학적인 분해에 의해 각 단별 압축량은 현저한 차이가 발생할 수 있다. 그러나 수도권 제1매립장의 계측결과를 이용하여 각 단별 발생하는 압축량 및 압축률을 파악해 본 결과 매립기간이 6~9년이 지난 1~4단 매립층에서는 약 22~26%의 압축률을 보이며 어느 정도 침하수렴안정화 단계에 들어선 것으로 보이며, 1~5년의 매립기간이 지난 5~8단 매립층은 아직 수렴·안정화되지 못한 것으로 보인다. 2001년 2월까지의 단별 압축량 및 압축률은 표 2와 같았다.

표 2. 단별 압축량 및 압축률

단	매립고(m)	매립기간(년)	압축량(m)	압축률(%)
1	5.88	7.8	-1.560	-26.53
2	5.73	7.1	-1.430	-24.96
3	6.42	5.6	-1.420	-22.12
4	5.24	4.8	-1.413	-26.97
5	6.74	4.0	-0.768	-11.39
6	7.83	2.9	-0.834	-10.65
7	6.59	1.7	-0.549	-8.33
계	44.43	-	-7.97	-18.71*

주)* 값은 압축률 평균값임

4.2 매립종료 후 침하특성

현재 매립종료 후 침하특성은 중간단계의 역학적 이차압밀보다는 장기적 부패침하 경향이 전반적으로 더 두드러지게 진행되고 있는 상태이다. 침하판은 매립블럭 내에 설치되어 있는 최상부 침하판 11개소에 대해서 측정을 실시하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. 매립종료후 최상단8단 침하 현황

블록	관리번호	매립종료일자	2004년 7월		
			침하량누계(cm)	압축률(%)	매립종료후 경과일
B블록	SP8D	2000.05.26	-482.8	12.5	1526
C블록	SP11D	2000.04.26	-491.3	11.8	1556
E블록	SP9D	2000.04.02	-406.6	10.1	1580
G블록	SP12D	2000.03.20	-523.9	14.2	1625
H블록	SP13D	2000.04.27	-396.6	11.0	1587
I블록	SP16D	2000.07.01	-536.0	12.3	1522
J블록	SP17D	2000.09.20	-483.5	13.2	1441
K블록	SP20D	2000.09.22	-438.7	12.0	1407
L블록	SP19D	2000.08.11	-463.7	12.7	1449
M블록	SP15D	1999.12.17	-654.4	17.9	1687
평균	-	-	-487.8	12.8	1538.0

5. 장기침하거동 예측

5.1 매립기간 중 침하특성과 최종단 상부 침하특성 비교

압축률-대수시간에 대한 이차 압축지수를 외곽부 3, 4단 제방하부에 설치된 총 21개의 침하판을 대상으로 측정하여 분석된 결과를 통해 나타내면 그림 2와 같고(이기중, 2000), 8단 최종단 상부에 설치된 총 10개의 침하판을 대상으로 측정하여 분석한 결과를 통해 나타내면 그림 3과 같다.

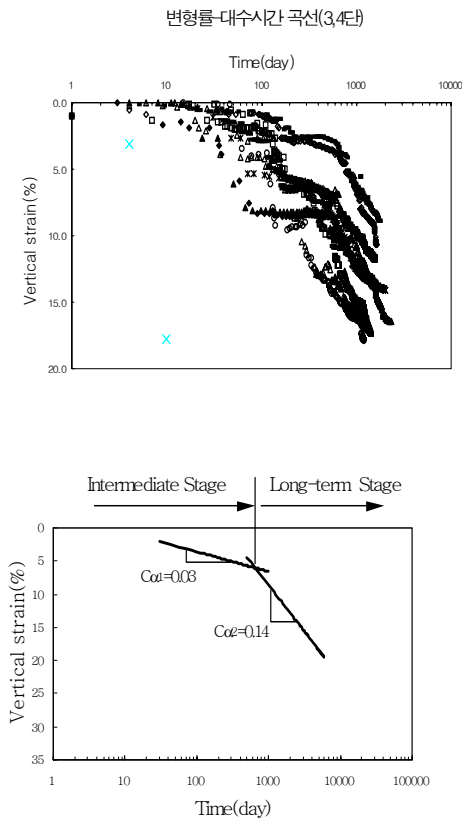
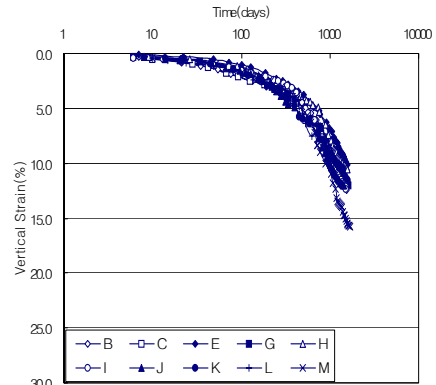


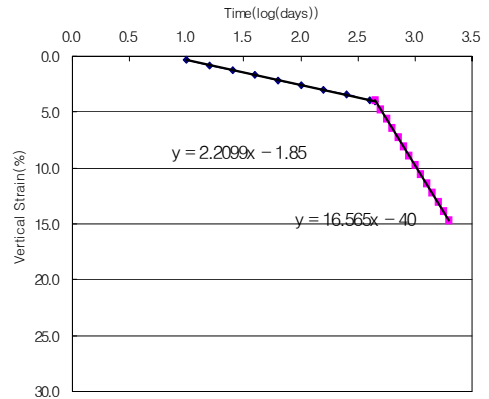
그림 2. 3, 4단 외곽제방 하부의 이차침하 압축지수 (이기중, 2000)

이기중(2000)이 3~4단 외곽제방 하부의 침하데이터를 분석한 결과 중간단계 및 장기적인 이차압축계수($C_{a(1)}$, $C_{a(2)}$)값은 각각 0.03, 0.14 정도로 나타났다. 매립종료 후 최상단 침하값을 침하율-대수시간의 그래프로 나타내어 검토한 결과 중간단계 및 장기적인 이차압축계수($C_{a(1)}$, $C_{a(2)}$)값은 그림 3과 같이 각각 0.022, 0.165 정도로 3, 4단 제방부의 침하와 다소 차이를 보였다. 그 이유는 폐기물 매립층 8단 상부는 3~4단 외곽제방 매립 이후 3~4년의 시간이 더 경과한 상태이므로, 하부 매립층에서는 중간단계의 역학적 이차압밀보다는 장기적 부패침하 경향이 전반적으로 더 두드러지게 진행되고 있는 상태이다. 그러므로 이러한 하부 매립층의 단별 침하경향이 반영되어 최종단 매립층에서의

중간단계 이차압축계수($C_{a(1)}$)값은 3~4단 외곽제방보다 작은 값을, 장기적인 이차압축계수($C_{a(2)}$)값은 보다 큰 값을 보이는 것으로 판단된다.



(a) 침하율-대수시간 곡선



(b) 이차압축지수

그림 3. 8단 최상단 침하율-대수시간 곡선과 이차압축지수

수도권 매립지의 경우 대부분의 침하 형태는 그림 4의 난지도 매립지에 대한 대표적인 침하곡선과 그림 5의 국외 24개 쓰레기 매립지에 대한 침하곡선과 압축률의 크기에서는 차이를 보이고 있으나 유사한 침하양상을 보이고 있다. 이러한 압축률의 차는 이차침하와 관련되어 분해되는 종이류, 목재류 등과 같은 유기물질 함량의 차에서 비롯되는데, 국외 쓰레기 매립장의 경우 유기물질의 함량이 높은 반면, 난지도 매립지의 경우 연탄재를 포함한 무기물질 함량이 상대적으로 높기때문에 압축률에서 있어서 상호 매우 큰 차이를 보이고 있는 것으로 사료된다.

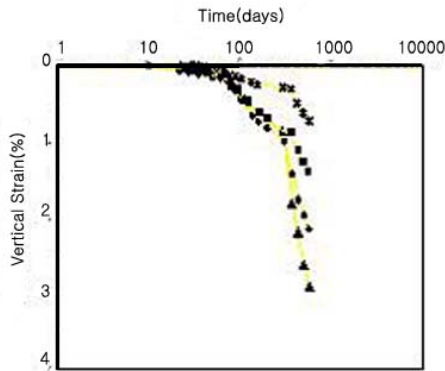


그림 4. 난지도 매립지에 대한 대표적인 침하량-대수시간 관계곡선(박현일 등, 1997)

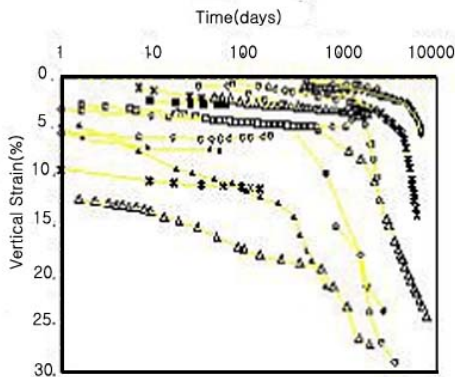


그림 5. 24개 쓰레기 매립지에 대한 침하곡선(Bjarngard와 Edgers, 1990)

5.2 타매립지와 수도권매립지의 이차압축지수 비교 분석

국내 및 국외 쓰레기 매립지의 침하계측자료, Lysimeter 실험, 실내시험결과들로부터 얻어진 이차압축계수(C_a)값들을 정리하였으며, 그 결과는 표 4와 같다. 수도권매립지의 중간단계 및 장기적인 이차압축계수($C_{a(1)}$, $C_{a(2)}$)값은 각각 0.022, 0.165 정도으로써 난지도 매립지의 이차압축계수와는 유기물함량 차이로 인해 상당한 차이를 보이고 있으나, 국외자료의 평균적인 이차압축계수($C_{a(1)(ave)} = 0.035$, $C_{a(2)(ave)} = 0.17$)값과는 매우 유사한 결과를 나타내고 있다.

5.3 장기침하거동 예측

쓰레기 매립지반의 신뢰성 있는 장기침하량을 예측하기 위해서 여러 침하 모델식이 제안되었다. 이들 중 본 논문에서는 수도권매립지(1공구)의 침하자료들에 대하여 Sower 침하모델, 대수함수 모델(Yen and Scalon, 1975; Hoe et al., 1998), 쌍곡선 모델, Bjarngard & Edgers 침하 모델(1990), Gibson과 Lo 모델 및 Power Creep Law를 적용하여 장기침하 특성을 예측하였다.

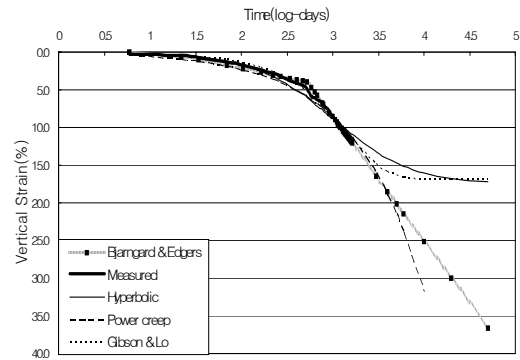
박현일 등(1998)은 외국 쓰레기 매립지의 기존 자료를 토대로 매립연한이 서로 다른 쓰레기 매립지의 장기침하거동에 대해서 연구하였으며, 연구 결과 수도권 매립지와 같이

표 4. 쓰레기 침하곡선의 대표적인 이차압축계수 비교(이기중, 2000)

구분	이차압축지수(C_a)		계측기간	
	$C_{a(1)}$	$C_{a(2)}$		
국외	24개의 매립지 사례연구 (Bjarngard, 1989)	0.019	0.125	35~6205일
	Lysimeter 시험결과 (Gandola 등, 1992)	0.063	0.34	2370일
국내	Sowers(1973), $e_o=4$	0.02	0.09	-
	Lysimeter (Rao 등, 1977)	-	0.13	300~900일
	실내시험 (Rao 등, 1977)	0.037	-	10~3000분
국내	난지도 매립지(1997)	0.008	0.033	648일
	Lysimeter 시험결과 (서울대 환경안전연구소, 1994)	-	0.05	359일
	실내시험(지반공학회, 1994)	0.006	-	약 3000분
	Lysimeter (이복수 등, 1995)	0.061	0.149	-
	수도권매립지(이기중, 1999)	0.03	0.14	매립 중 1693일
수도권매립지(2004)	0.022	0.165	매립종료 후 1538일	

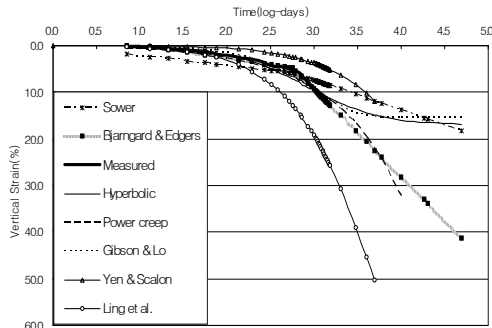
매립연한이 짧은 신선한 매립지의 경우 매립기간이 10~15년이 경과한 이후에 분해에 의한 압축은 거의 완료될 것으로 예측하였다. 그러나 이러한 분해에 의한 침하양상은 매립기간중의 환경 요인에 따른 분해속도에 크게 영향을 받으므로 매립지별 환경 인자를 고려한 독립적인 장기침하기간을 검토해야 할 것으로 사료된다. 수도권 매립지의 환경 인자에 관한 연구는 본 연구에서 수행하지 못한 관계로, 본 논문에서의 장기침하 발생기간은 매립지가 구조물의 기초지반으로 활용될 경우를 고려하여 약 50년을 적용하였다.

그림 6은 각 블록별로 상기 침하모델을 이용하여 구해진 예측곡선을 보여주고 있으며, 표 5는 이러한 침하모델을 통해 매립 종료 후 50년이 경과한 장기침하량을 산정한 것이다.

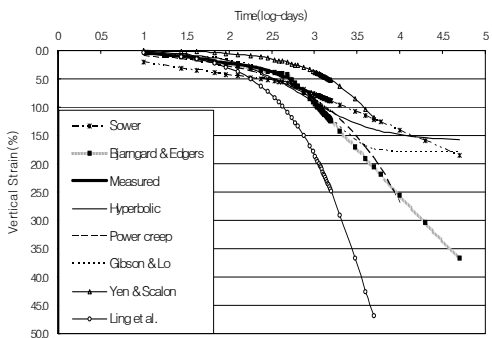


(d) G블럭 장기침하거동 예측

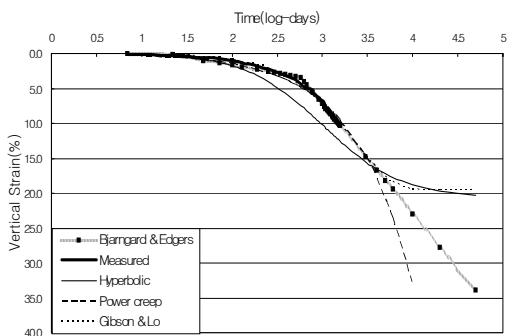
그림 6. 각 블록별 장기침하거동 예측



(a) B블럭 장기침하거동 예측



(b) C블럭 장기침하거동 예측



(c) E블럭 장기침하거동 예측

매립지 원바닥이 점토지반이므로 매립기간 중에는 상당한 침하가 발생하여 폐기물층의 순수한 침하량을 분석하기 위해 모든 침하데이터에 원지반 침하량값을 감한 수치로 검토되었으나 매립이 종료된 2001년 2월 시점에서 원지반 압밀도를 Terzaghi 압밀이론(전 블럭 체적압축계수의 평균값을 사용한 m_v 법 및 평균압축지수를 적용한 C_c 법)과 쌍곡선법으로 분석한 결과 전 블럭에 걸쳐 압밀도가 95% 이상이며 실제 침하도 거의 없어 차후 예측에서는 고려하지 않았다.

Sower식은 현장의 초기 간극비 산정이 매우 어렵다는 점과 유기물 함량에 따른 계수들의 정량화가 지나치게 개략적인 단점을 가지고 있어서, 매립지 침하의 경향 분석은 가능하나 실제적으로 적용하기에는 적합하지 않은 것으로 사료되고 본 현장의 경우 침하량을 과소평가하는 경향을 보였다.

대수함수식(Yen and Scalton, 1975; Hoe et al., 1998)은 시간과 침하율의 관계를 지나치게 선형화시켜 예측된 결과와는 잘 일치하지 않았다. 따라서 본 식 역시 매립지 침하의 정성적 파악만이 가능할 뿐 정확한 침하량을 예측하는데는 한계가 많은 것으로 사료된다.

Bjarngard와 Edgers의 침하모델식은 이차압축 부분을 두 부분으로 나누어 이차압축 영역을 단순화시켜 발생할 수 있었던 오차를 줄일 수 있고, 모델 계수를 정확하게 산정한다면 장기침하거동을 실측치와 매우 근사하게 예측하는 것으로 나타났다. 그러나 매립 경과시간에 따른 모델 계수(t_1 , t_2 , $C_{\alpha(1)}$, $C_{\alpha(2)}$) 산정치의 변동이 크고, 정확한 계수치를 결정하기 위해서는 장기간의 현장 예측 데이터가 필요하므로 적용시 어려움이 있다. 또한 장기침하량을 예측할 경우 그 값이 수렴하지 않으므로 다른 침하모델들에 비해 상당히 과다 예측됨을 알 수 있었다.

Power Creep Law 모델 역시 모델 계수(m, n)의 결정이 어려우며, 일반적으로 이차압축의 영향을 과대평가한다고 알려져 있는데, 본 연구에서도 침하계측 기간 동안은 침하자료와 잘 일치되는 경향을 보이거나 Bjarngard와 Edgers의 침하모델식과 마찬가지로 장기침하량을 예측할 경우 다른 침하모델들에 비해 상당히 과다 예측됨을 알 수 있었다.

Gibson and Lo 모델과 전 블록에서 실측치에 상당히 근접한 예측 결과를 보였다. 그리고 다른 모델과 달리 장기침하 예측시 그 침하량이 수렴하는 안정적인 경향을 나타내었다. 그러나 Gibson and Lo 모델에서 계수 산정시 데이터 분산이 심하여 계수 산정치에 대한 신뢰도가 낮았다.

쌍곡선법 역시 Gibson and Lo 모델과 함께 전 블록에 걸쳐 실측치에 상당히 근사한 예측 결과를 나타내고 예측치도 수렴하는 안정적인 경향을 보였으나, 장기적인 이차압축 거동은 Gibson and Lo 모델에 비해 다소 과소 평가하는 것으로 나타났다.

수도권매립지(1공구)의 장기적인 침하예측 모델에 대한 분석결과 쌍곡선 모델, Gibson and Lo의 모델은 상당히 근접한 예측 결과를 나타내었으며, Bjarngard and Edgers 침하모델과 Power Creep Law 모델의 경우 침하계측기간 동안은 침하자료와 잘 일치되는 경향을 보이거나 장기침하량을 예측할 경우 다른 침하모델들에 비해 과다 예측됨을 알 수 있었다. 이외의 다른 예측식은 본 현장에는 적합하지 않은 것으로 사료된다. 따라서 수도권매립지의 장기적인 침하량 예측시 Bjarngard and Edgers 침하모델과 쌍곡선 모델, Gibson and Lo의 모델에 의한 예측이 적합한 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는 수도권매립지(1공구)의 신선한 쓰레기 매립층의 장기침하거동 특성을 규명하기 위해 매립시점부터 설치, 관리되어 온 180여개의 침하판을 대상으로 약 12년간에 걸쳐서 측정된 침하계측 결과에 대한 분석을 수행하였다. 쓰레기 매립지의 장기침하량을 예측하기 위하여 제안되었던 기존의 침하모델들 중 Sower 침하모델, 대수함수 모델(Yen and Scalon, Hoe et al.), 쌍곡선 모델, Bjarngard and Edgers 침하모델, Gibson and Lo 모델 및 Power Creep Law를 적용하여 예측하였으며, 장기침하량 예측에 필요한 계수 산정 및 기존 침하모델에 의한 장기침하 예측결과를 상호비교·분석하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 매립기간을 고려하여 각 단 매립고별 침하량 및 압축률을 분석한 결과 하부 매립층은 침하가 수렴안정화되어 가는 것으로 보이고, 상부 매립층은 아직 침하가 활발히 진행중인 것으로 사료된다.
- (2) 매립종료 후 최상단 침하데이터를 검토한 결과 중간단 계 및 장기적인 이차압축계수($C_{a(1)}$, $C_{a(2)}$)값은 각각 0.022, 0.165 정도로 3, 4단 제방부의 침하($C_{a(1)}$, $C_{a(2)}$)값이 각각 0.03, 0.14 - 이기중, 2000)와 다소 차이를 보였다. 이는 각기 다른 단별 침하특성이 복합적으로 최상부 침하판에 작용하였는데 기인하는 것으로 판단된다.

표 5. 침하모델들로부터 예측된 장기침하량(매립 종료 후 50년)

구 분	매립두께 (m)	Sower (cm)	Bjarngard & Edgers(cm)	쌍곡선법 (cm)	Power Creep Law(cm)	Gibson & Lo(cm)	대수함수(cm)	
							Yen & Scalon	Hoe et al.
B블럭	38.4	599.79	1278.58	639.26	1736.03	594.90	903.12	1895.45
C블럭	41.8	610.95	1149.97	594.54	1399.09	695.17	910.97	1534.33
E블럭	40.1	599.41	1049.16	762.77	1922.30	757.67	906.72	3604.75
G'블럭	43.8	605.70	1139.63	646.26	1724.16	655.81	915.65	2132.11
H블럭	37.7	581.52	1042.49	682.49	1493.14	766.22	900.03	2373.81
I블럭	43.5	621.40	1209.40	823.44	1613.16	1581.24	914.95	1629.93
J블럭	40.1	624.90	1108.41	707.13	1996.69	615.05	906.85	1948.02
K블럭	41.7	637.17	886.10	596.16	1795.26	450.50	910.75	1374.76
L블럭	41.3	628.76	1521.14	600.71	1520.77	755.12	909.87	1924.56
M블럭	41.3	610.95	1171.48	1370.80	2287.00	1072.53	909.94	4132.96
평균	40.9	612.05	1155.63	742.35	1748.76	794.42	908.88	2255.06

(3) 수도권매립지의 침하양상은 국내·외 매립지의 침하양상과 유사한 침하거동을 보이지만, 난지도 매립지의 이차압축계수와는 상당한 차이를 보이고 있으나, 국외자료의 평균 이차압축계수와는 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 이는 최근 국내쓰레기 구성성분 중 유기물 함량의 증가로 인한 것으로 판단된다.

(4) 수도권매립지의 장기적인 침하예측 모델에 대한 분석결과 쌍곡선 모델, Gibson and Lo의 모델은 상당히 근접한 예측 결과를 나타내었으며, Bjarngard and Edgers 침하모델과 Power Creep Law 모델의 경우

침하계측 기간 동안은 침하자료와 잘 일치되는 경향을 보이나 장기침하량을 예측할 경우 다른 침하모델들에 비해 과다 예측됨을 알 수 있었다. 이외의 다른 예측식(Sowers, 대수함수)은 본 현장에는 적합하지 않은 것으로 사료된다.

(5) 향후 동적하중단계인 매립기간 중의 침하모델의 완성과 침하부패정도와 잔여 성분시험을 통해 부패침하에 대해 정확한 분석이 가능하게 된다면 국내 폐기물 매립장의 특성에 맞는 침하식의 도출도 가능할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2004년 12월 31일)

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), 매립연한이 서로 다른 쓰레기 매립지의 장기 침하거동, 한국지반공학회지, 제 14권, 제 2호, pp. 21~30.
3. 이기중(2000), 현장계측에 의한 쓰레기 매립지의 장기침하거동, 연세대학교 산업대학원 석사학위논문, pp. 15~55.
4. 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.
5. Bjarngard, A., Edgers, L.(1990), Settlement of Municipal Solid Waste Landfills, The thirteenth Annual Madison Waste Conference, September, pp. 192~205.
6. Edil, T.B., Ranguette, V.J., Wuellner, W.W.(1990), Settlement of Municipal Refuse, Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice: ASTM STP 1070 ASTM, Philadelphia, pp. 225~239.
7. Hoe, I.L., Dov Leshchinsky, Yoshiyuki Mohri, Toshiniri Kawabata(1998), Estimation of Municipal Solid Waste Landfill Settlement, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 1, pp. 21~28.
8. Morris, D.V., 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, pp. 9~21.
9. Sowers, G.F.(1973), Settlement of Waste Disposal Fills, Proceedings, The Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, pp. 207~210.
10. Yen, B.C. and Scanlon, B.(1975), Sanitary Landfill Settlement Rates, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT5, pp. 475~487.