

난지도 쓰레기 매립지의 침하 특성

Settlement Characteristics of Nanji-Island Refuse Landfill

박 현 일*1	이 승 래*2
Park, Hyun-Il	Lee, Seung-Rae
라 일 웅*3	성 상 열*4
Ra, Il-Woong	Sung, Sang-Yuel

Abstract

It has been a growing concern how to use Nanji-Island landfill and other refuse landfills located around metropolitan areas. In this paper, settlement characteristics of Nanji-Island landfill were studied by analyzing the data collected over the period of two years. The settlement characteristics were similar to the analyzed settlement characteristics of 24 refuse landfills in the United States. The model proposed by Bjarngard and Edger(1990) model is considered to be suitable for the long-term prediction of Nanji-Island landfill. The ten-year-period prediction value of Bjarngard and Edger(1990) model is considerably different from that of Power Creep Model. If existing settlement models used for long-term prediction of the settlement characteristics of landfill are not analyzed thoroughly there remains the possibility of including considerable prediction errors.

요 지

난지도 쓰레기 매립지 뿐만 아니라 대도시 주변 매립지의 사후활용 방안에 대한 관심이 점차로 고조되고 있다. 본 논문에서는 난지도 쓰레기 매립지에서 2년여간 측정된 침하자료들을 분석하여 침하양상을 규명하고자 하였다. 침하분석결과 난지도 쓰레기 매립지의 침하양상은 미국내 24개 매립지에 대해 분석된 침하경향과 유사함을 알 수 있었다. 측정된 침하자료에 대한 해석을 근거로 할 경우, Bjarngard와 Edgers의 침하모델이 난지도 매립지의 장기침하량 예측에 적합한 것으로 사료된다. 10년 후 장기침하량을 예측할 때 Bjarngard와 Edgers의 침하모델은 Power Creep Model과 상당한 예측의 차이를 보였다. 난지도 쓰레기 매립지 침하양상에 대한 분석이 이루어지지 않은 상황에서 단지 기존의 침하모델만을 사용하는 것은 장기침하량 예측시 상당한

-
- *1 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
 - *2 정희원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수
 - *3 정희원, (주)삼성건설 토목 ENG팀 대리
 - *4 정희원, (주)삼성건설 토목 ENG팀 과장

오류를 범할 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Decomposition, Long-term compression, Settlement model, Organic contents, Refuse landfill, Settlement, Secondary compression

1. 서론

최근들어 도시 주변에 주로 형성되었던 쓰레기 매립지에 대한 관리뿐만 아니라 향후 생활부지로서의 재활용방안에 대한 요구가 점차로 확대되는 실정이며, 이를 위해서는 쓰레기 매립지의 침하특성, 강도특성 등에 관련된 지반공학적인 접근이 필요하다. 외국의 경우 실제 쓰레기 매립지의 계측침하자료 및 실내실험들을 근거로 매립지의 안정화 속도 및 장기 침하량 산정에 관한 상당한 연구가 수행되어 왔다. 쓰레기 매립지의 침하양상은 수십년에 걸쳐서 발생되므로 이에 대한 거동특성을 파악하는 것뿐만아니라 장기침하량을 비교적 정확하게 예측하는 데에는 상당한 어려움이 따르는 것으로 알려져 있다.

국내에서도 난지도 매립지에 대한 재활용방안이 심각하게 대두되고 있으며, 김포 매립지에서 대형 쓰레기 매립이 진행되고 있는 상황에서 국내 쓰레기 매립지에 대한 침하특성 연구는 시급하다고 할 수 있다. 그러나 과거 조성되었던 대부분의 국내 매립지에 대한 침하계측이 이루어지지 않았으며, 쓰레기 매립지 침하양상에 대한 연구 또한 국내에서 이제 서서히 진행되는 단계이다(한국과학기술원, 1992; 이복수 등, 1994; 라일용 등, 1995; 등등). 그러므로 국내 매립지 침하양상에 대한 평가가 현재로서는 매우 어려운 실정이다.

난지도 매립지는 1978년부터 매립되어 1993년에 폐쇄될 때 까지 서울에서 배출되는 대부분의 쓰레기가 매립되었으며 대략 90m에 이르는 매립고를 갖는 초대형 쓰레기 매립지이다. 이와같은 대형 쓰레기 매립지의 침하양상을 분석하기 위해 약 40여개의 침하판이 설치되었으며, 1993년 10월부터 계속적으로 계측되고 있

다. 본 연구에서는 2년여간에 걸쳐 계측된 침하결과를 분석하여 난지도 쓰레기 매립지에 대한 침하양상을 규명하고자 하였으며, 이를 근거로 장기침하량을 추정하는데 그 목적을 두었다.

2. 쓰레기 매립지 침하양상

2.1 쓰레기 매립지의 침하 메카니즘

쓰레기 매립지에서 침하를 유발하는 메카니즘은 다음과 같이 세가지로 크게 나눌 수 있다. 첫째로, 역학적 압축(mechanical compression)은 하중증가에 의해 유발되는 침하량으로 수개월 이내에 발생하는 일차압축과 오랜 기간 동안 지속적으로 발생하는 이차압축으로 구분될 수 있다. 일차압축은 가스 혹은 공기로 채워진 공극의 압축, 느슨한 쓰레기의 압축, 입자의 미끄러짐 등에 의하여 발생된다. 반면 이차 압축은 입자의 장기적인 미끄러짐 및 재배열, 쓰레기 구성성분의 지체된(delayed) 압축 등에 의하여 장기적으로 발생된다. 둘째로, 산발적인 즉시침하(ravelling)는 미세한 입자가 보다 큰 공극속으로 이동함에 따라 발생하는 침하를 가르키며 갑작스럽고 산발적으로 발생된다. 셋째로, 분해(decomposition)에 의한 침하는 유기물 성분의 생물학적 및 화학적 반응에 의하여 발생된다.

이들중 분해과정은 매우 장시간에 걸쳐서 발생되며 쓰레기 매립지 침하에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 분해과정은 먼저 호기성상태에서 초산(acetogenesis)이 발생하게 되며 점차 산소가 고갈되므로 말미암아 혐기성 분해상태에서 메탄발생단계(methanogenesis)에 이르게 된다. 쓰레기 매립지에서 유기

물 분해율에 영향을 미치는 인자로서는 함수비, 쓰레기 조성비, pH, 온도 등을 들 수 있다.

유기물 분해가 침하양상에 미치는 영향을 규명하기 위해 많은 연구들이 진행되어 왔다 (Sowers, 1973; Wardwell과 Nelson, 1981; Al-Khafaji와 Andersland, 1981 등). 특히 Wardwell과 Nelson(1981)은 유기물함량이 각각 40%, 55%, 70%인 셀룰로오스 섬유와 카올린 점토로 구성된 시료를 조성하여 6개월 가량 압밀실험을 수행하였다. 이때 동일한 유기물 함량을 갖는 시료를 각각 2 개씩 성형하였으며 그 가운데 한 시료에만 생물학적 분해를 촉진할 수 있는 영양물질을 공급하였다. 그림 1에는 유기물 함량이 70%인 경우에 대한 실험결과가 나타나 있다. 영양물질이 공급된 경우 일정시간이 경과한 후에는 유기물 분해가 촉진됨으로 말미암아 압축률이 크게 증가되었지만, 영양물질이 공급되지 않는 경우에는 쓰레기 자체의 압축으로 인한 역학적 압축단계에 계속적으로 머무르고 있음을 볼 수 있다. 또한 영양물질이 공급된 경우에 유기물 함량이 40%에서 70%로 증가함에 따라 분해효과가 포함되어 있는 이차압축률은 변형률이 25%에서 55%로 크게 증가하였다.

한편 Al-Khafaji와 Andersland(1981)는 실내실험을 통하여 유기물 함량이 30%인 경우에는 시료 초기두께의 32%에 해당하는 압축률이 발생되며, 유기물 함량이 60%일 경우에는

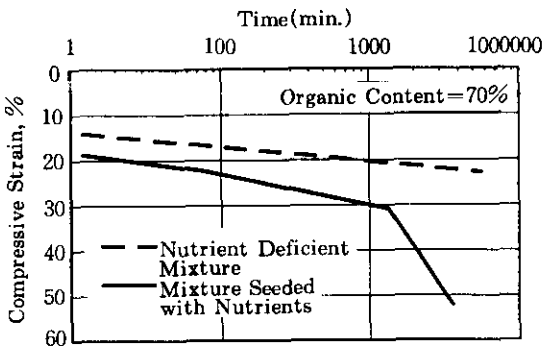


그림 1. 유기물 분해가 쓰레기 침하에 미치는 영향 (Wardwell과 Nelson, 1981)

58%의 압축률이 발생되었다고 보고하였다. 이와같이 쓰레기 성분가운데 포함된 유기물이 생물학적으로 분해되므로 말미암아 추가적인 압축률이 크게 발생되며, 유기물의 함량비에 따라 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

국내와 미국의 대표적인 도시 쓰레기 성분비를 표 1에 함께 제시하였다(환경처, 1990; Tchobanoglous 등, 1993). 표에서 나타난 바와 같이 국내 도시쓰레기는 연탄을 포함한 무기물 질 함량이 대략 60% 정도로 매우 크며, 미국의 경우에는 25% 정도에 미친다. 매립된 쓰레기 가운데 음식물은 분해가 조기에 완료되는 것으로 알려져 있으며, 이차침하와 관련되어 분해되는 유기물로는 주로 종이류, 목재류 등을 들 수 있다. 국내 도시쓰레기의 경우에 종이류 성분은 전체성분의 12%를 차지하고 있으며, 미국 도시쓰레기는 종이류의 구성성분비에서 국내의 경우보다 상당히 큰 특징을 갖는다.

표 1. 국내 및 미국 도시 쓰레기 조성비

국내 도시 쓰레기(%)			미국 도시 쓰레기(%)		
유기물질	음식물류	25	유기물질	음식물류	9
	종이류	12		초류(Yard Waste)	18.5
	목재류	4		종이류	34
무기물질	연탄재	39	무기물질	플라스틱, 고무류	8
	금속류	5		섬유류	2
	기타	15		목재류	2
				금속류	9.5
			유리류	9	
			기타	2	

2.2 쓰레기 매립지의 침하모델

쓰레기 매립지반의 침하량을 보다 신뢰성있게 산정하기 위하여 적용되어온 기존의 침하산정방법들로서는 Sowers(1973), Yen과 Scanlon(1975), Gibson과 Lo(1961), Power Creep Law(Edil et al., 1990), Rao 등(1977), Morris와 Woods(1990) 등을 들 수 있다. 이들 중 Gibson과 Lo 모델은 주로 지반의 이차압축거

등을 모델하기 위해 제안된 방법으로 이토(peat)등과 같은 유기물이 많이 함유된 지반의 침하량을 예측하는데 적합한 모델이며, 유동학적 모델로부터 시간에 따른 침하량을 구할 수 있다. Yen과 Scanlon은 매립이 완료된 위생매립지들의 9년간의 실측결과로부터 침하율(m =매립지(혹은 침하판)의 표고변화(ΔH)/경과 시간 변화(Δt))을 근거로한 침하모델을 제안하였다. 또한 Power Creep Law에는 많은 공학적 재료의 크리프 거동을 나타내기 위하여 멱승법칙이 사용되었다.

한편 최근에 Bjarngard와 Edgers(1990), Fassett 등(1994)은 매립지의 실측자료를 근거로 하여 매립지의 침하예측을 위한 새로운 모델을 제안하였으며, Bjarngard와 Edgers(1990)가 제안한 식은 다음과 같다(식 1, 그림 2 참고).

$$\frac{\Delta H}{H} = CR \log \frac{P_0 + \Delta p}{P_0} + C_{a(1)} \log \frac{t_2}{t_1} + C_{a(2)} \log \frac{t_3}{t_2} \quad (1)$$

여기서,

ΔH =침하량, H =매립지의 초기두께

P_0 =초기 수직 유효응력, Δp =응력 증분,

CR =압축비, $C_{a(1)}$ =중간단계(intermediate)

이차압축지수, $C_{a(2)}$ =장기(long term)이차압축지수

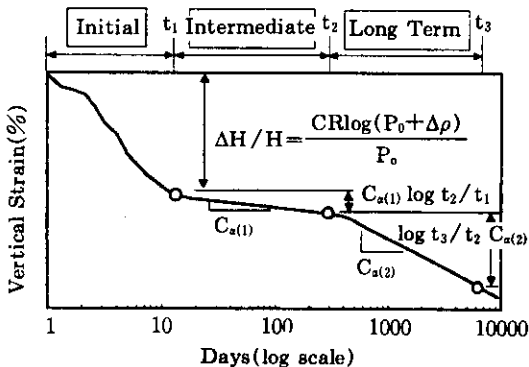


그림 2. 제안된 침하모델(Bjarngard와 Edgers, 1990)

2.3 미국 쓰레기 매립지의 침하양상

Bjarngard(1989)는 쓰레기 매립지의 침하양상을 연구하기 위하여 미국내 24개의 대표적인 매립지에 관한 자료를 수집·분석하였다. 그 결과에 따르면 침하-대수시간 축에서 대부분의 침하곡선은 침하초기에서 작은 값의 기울기를 갖는 선형적인 관계를 보이다가, 대략 100~4000일 정도에서 급한 기울기의 침하양상을 나타냈다(그림 3 참고).

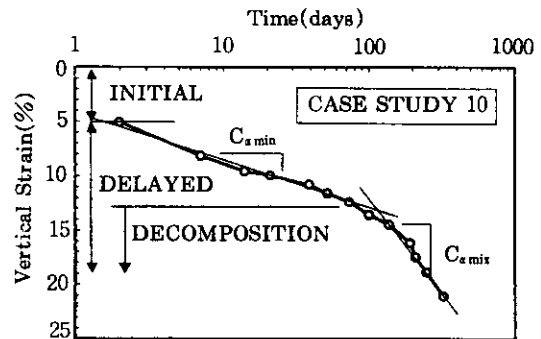


그림 3. 외국의 쓰레기 매립지에 대한 대표적인 침하-대수시간 곡선(Bjarngard와 Edgers, 1990)

그림 3에는 사례연구되었던 매립지 가운데 대표적인 침하양상을 갖는 매립지의 침하곡선이 나타나 있다. Bjarngard는 그림에서 나타난 침하양상을 세단계로 구분하여 설명하였다. 첫 번째 단계인 초기 침하는 쓰레기의 급작스런 압축과 가스 공극의 감소로 인하여 발생되며, 둘째 단계는 지체침하(delayed compression)의 초기단계로서 침하는 쓰레기의 역학적 압축에 의해 발생된다고 파악하였다. 세 번째 단계는 장기적인 지체침하단계로서 Wardwell과 Nelson(1981)의 연구결과에서 나타난바와 같이 유기물 분해에 의한 압축률이 추가적으로 포함되므로 대수 압축률은 크게 증가하는 형태를 보였다. 이와같은 침하양상을 근거로 Bjarngard와 Edgers(1990)는 2.2 절에서 설명된 바와같은 반경험적인 침하모델을 제안하였다.

또한 이들은 대수시간축에 따른 침하량의 관계에 대하여 지체침하의 초기단계는 중간침하단계(intermediate stage)로서 $C_{s(1)}$ 의 기울기를 갖고, 장기적인 지체침하단계는 장기침하단계(long term stage)로서 $C_{s(2)}$ 의 기울기를 갖는다고 제안하였다. 매립지의 이러한 침하양상에서 중간 침하단계로부터 장기적인 이차침하단계로 전이되는 시기는 매립된 쓰레기의 조성, 분해조건 등에 따라 상이하게 나타나며, Bjargard는 국외 매립지의 경우에 100~4000일 정도로 매우 큰 시간차를 갖는다고 보고하였다.

한편 Rao 등(1977)은 종이류가 40%가량 포함된 대표적인 미국쓰레기에 대하여 대략 2~3일이 소요되는 압밀실험을 수행하였다. 하중재하시 침하곡선은 그림 4의 유기물 분해가 일어나지 않은 경우처럼 변형률-대수시간축에서 어느 정도의 초기침하가 수분내에 완료된 이후 거의 선형적인 압축거동을 보이며, 0.037 정도의 평균적인 대수나선 기울기($\Delta\epsilon / \text{Log}[(t+\Delta t)/t]$)를 얻을 수 있었다. 또한 실내실험결과들에서 얻어진 압축률은 시료의 초기 단위중량과 작용하중에 대하여 큰 차이를 보이지 않았다.

또한 Rao 등(1977)은 가정쓰레기로 채워진 모형매립지(10ft×10ft : 면적×5ft : 높이)를 조성한 후 대략 3년 가량 걸쳐서 실험을 수행하였으며, 침하량 및 가스발생량, 침출수 등과 같은 환경공학적인 인자들을 함께 계속하였다. 그 결과를 나타낸 그림 4의 침하곡선은 100여일 부근에서 다소 불균일한 침하거동을 보이며 200여일 지난 후부터는 급한 기울기를 갖는 침

하양상을 보였다. Rao 등은 이러한 불균일한 침하거동에 관한 이유에 관하여 강우 및 온도와 같은 계절적인 영향으로 인한 분해정도의 차이라고 설명하였다. 침하곡선에서 이러한 환경적인 영향을 무시하면 점선과 같은 오목한 침하거동을 보인다고 판단하였다.

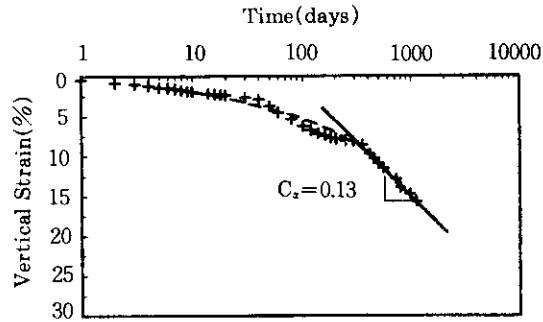


그림 4. 국외 쓰레기에 대한 모형매립지 실험 (Rao 등, 1977)

3. 난지도 쓰레기 매립지

3.1 난지도 쓰레기 매립지 침하양상

본 연구에서는 난지도 매립지 상부에 총 40개의 침하판을 설치한 후 1994년 1월 부터 1995년 10월 까지 약 650 일간에 걸쳐서 측정된 침하계측결과에 대한 분석을 수행하였으며, 침하계측지점에 관한 자료는 그림 5에 나타나 있다. 또한 난지도 매립지에서 채취된 시료에 대한 대형압밀 실험이 수행되었다.

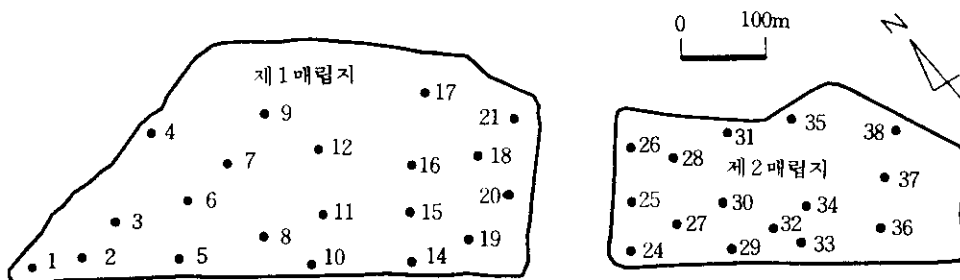


그림 5. 난지도 매립지에 설치된 침하계측 지점

그림 6에는 난지도 매립지에서 계측된 대표적인 변형률-대수시간 곡선이 나타나 있다. 난지도 매립지의 경우에서도 대부분의 침하곡선 형태가 국외의 대표적인 매립지 침하곡선과 유사한 침하양상을 갖는 것을 알 수 있다. 즉 침하곡선이 변형률-대수시간 축에서 계측초기에는 작은 기울기를 가지지만 상당 시간이 지난 후에는 더 급한 기울기를 갖는 침하거동을 보인다(그림 6 참고). 그러나 몇몇 침하계측지점에서는 산발적인 침하(ravelling)로 인한 영향을 받은 것으로 생각되는 불규칙적인 침하양상을 보이기도 하였다.

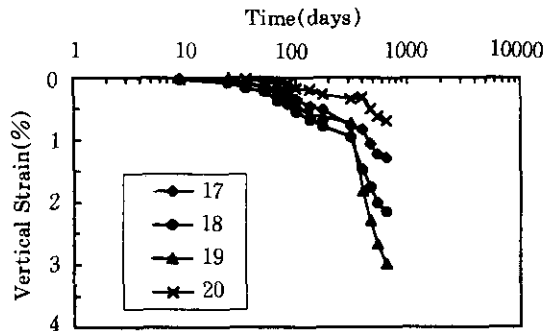


그림 6. 난지도 매립지에 대한 대표적인 침하량-대수시간 관계곡선

한국지반공학회(1994)에서는 직경 25cm, 높이 40cm의 stainless steel pipe로 이루어진 대형압밀 시험장치를 제작하여 난지도 매립지에서 채취된 시료에 대한 대략 2~3일 정도의 압축실험을 수행하였다. 실험자료들은 변형률-대수시간 축에서 대략 0.006 정도의 평균적인 기울기를 갖는 선형적인 거동을 보였다. 이러한 침하거동은 그림 1에서 나타난 것과 같은 분해가 포함되지 않은 경우의 선형적인 압축거동과 동일함을 살펴볼 수 있다. 그림 7에는 채취된 시료가운데 유기물함량(volatile organic content)이 13%인 시료에 대한 실험결과가 나타나 있다.

서울대학교 환경안전연구소(1994)는 난지도 매립지에서 시료를 채취한 후 13% 정도의 유

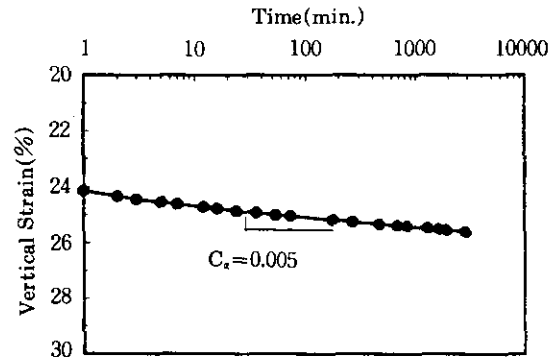


그림 7. 난지도 매립지에서 채취된 쓰레기에 대한 실내실험결과(한국지반공학회, 1994)

기물 함량(volatile solid content)을 갖는 시료 두 개를 조성하여 모형매립조(lysimeter) 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 안정적인 생물학적 분해조건을 유지시켰으며, 한 시료에 대해서는 lysimeter하부를 통해 유출된 침출수를 상부 물공급장치를 통하여 공급함으로써 재순환시켰다. 그림 8에는 침출수를 재순환 시킨 시료에 대한 침하양상이 나타나 있다. 대략 20여일 가량 경과한 후부터 선형적인 압축거동을 보였으며, 두 시료에 대하여 약 0.05 정도의 평균적인 대수나선 기울기($\Delta\epsilon / \text{Log}[(t+\Delta t)/t]$)값을 얻을 수 있었다. 이 값은 난지도 쓰레기에 대해 수행된 대형압밀 실험에서 얻어진 값의 약 8배정도이며, 이는 실험시작후 생물학

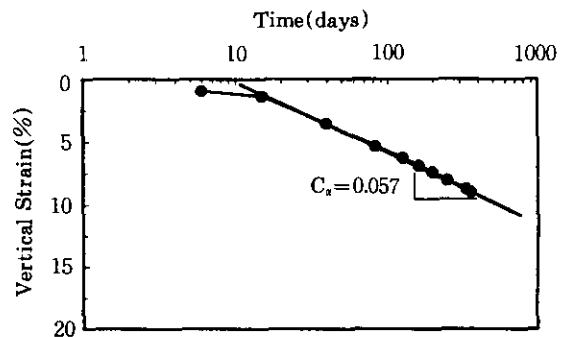


그림 8. 난지도 매립지에서 채취된 쓰레기에 대한 모형매립조(Lysimeter) 실험 (서울대학교 환경안전연구소, 1994)

적 분해조건이 조속히 활성화되어 분해에 의한 양이 침하에 포함되었기 때문인 것으로 사료된다.

3.2 난지도 쓰레기 매립지에 대한 환경공학 적 검토

난지도 매립지는 1978년 3월에 매립을 시작한 후 1993년 3월에 폐쇄될 때까지 서울에서

배출되는 일반 및 산업 쓰레기의 대부분이 단 순투기 방식으로 매립되었다. 최근에 난지도 매립지의 활용방안에 대한 논의가 대두됨에 따라 이에 대한 환경공학적인 연구도 활발히 진행되고 있는 상황이다. 기존의 보고서를 근거로 하여 난지도 매립지의 쓰레기 조성을 살펴 보면 음식물 쓰레기는 발견되지 않았으며 연탄 류가 포함되어 있는 토사류가 상당부분을 차지 하고 있다(표 2 참고).

표 2. 난지도 매립지 쓰레기 성상(서울대학교 환경안전 연구소, 1994)

	가연성							불연성				
	음식물	종이	비닐플라스틱	섬유	목재	가죽고무	기타	토사	유리	돌&도자기	철금속&비철금속	기타
평균치	0	3.3	15.7	7.2	5.9	0.9	3.2	42.5	0.4	16.5	2.3	1.6

매립지에서 배출되는 침출수의 pH와 COD 에 관한 자료, CH₄, CO₂ 등과 같은 매립지 가스의 성상 등은 매립지 내부에 존재하는 유기 물에 대한 생물학적 분해정도를 평가하는 인자 로 사용될 수 있는 것으로 알려져 있다(Tchobanoglous 등, 1993). 여러 보고서에 의하면 난 지도 매립지에서 발생하는 침출수 특성과 매립 지 가스추출공에서 발생하는 매립가스의 조성 에 대하여 현재까지 상당한 조사가 수행되었 다.

난지도 매립지에 대한 침출수 특성에 관한 연구(윤석표, 1994; 서울특별시 청소사업본부 기본계획 보고서, 1992; 이채영, 1994; (주)대 우 건설기술 연구소, 1992; 이승무 등, 1990)에 의하면 난지도 매립지 침출수의 pH는 6.4~8.7 의 범위를 가지며 메탄형성단계의 침출수 특성 을 나타내고 있다. COD와 BOD₅ 농도 값은 시 료채취 장소 및 시간에 따라 상이한 결과를 보 이고 있으나, 생분해도 지표인자인 BOD₅ /COD 비는 일부 값이 상당히 높은 값을 보임 을 제외하고는 대부분 0.1 이내의 값을 가지므 로, "old" 매립지의 특성을 보이고 있다.

이승무 등(1992)에 의하면 6개소의 난지도 매립지 가스 추출공에서 발생하는 매립가스의 조성은 실측 위치 및 깊이에 따라 다소 차이는

있으나, 정상적인 메탄 생성 단계에서의 가스 조성상태를 나타내는 CH₄, 50~60%, CO₂, 35~45% 의 조성비를 보여주었다. 또한 서울대학 교 환경안전연구소(1994)는 난지도 매립지에 서 채취된 시료에 대한 실험실 규모의 모형매 립조(lysimeter) 실험을 수행하였다. 실험결과 에 의하면 lysimeter에서 발생하는 가스 조성 비의 경우, 실험 시작 후 10여일 지난 후부터 안정적인 메탄생성 단계에 도달하였으며, pH 값은 8~9의 범위를 가졌다.

위의 결과들로부터 Tchobanoglous 등(1993) 에 의한 매립지의 분해정도를 평가하는 기준에 따르면, 난지도 매립지의 생물학적 분해정도는 4단계에 해당하는 안정적인 메탄형성단계에 도달되어 있으며, 이러한 안정적인 유기물 분 해단계가 상당기간 지속될 것으로 판단된다. 따라서, 난지도 매립지에서 유기물의 분해에 따른 메탄형성단계가 지속되는 한 난지도 매립 지의 장기적 이차 침하량에는 유기물 분해효과 에 의한 압축량이 지속적으로 전체 침하량에 포함될 것으로 사료된다.

위의 사실들을 근거로 볼 때 쓰레기 매립지 내부로부터의 가스추출장치에서 유기물 분해 로 인해 발생하는 매립지 가스가 지속적으로 검출된다면, 매립지에서 유기물 분해에 의한

추가적인 침하량이 지속적으로 발생되고 있음을 추측할 수 있을 것이다. 따라서, 매립지의 침출수 및 추출된 가스 등에 관한 환경적인 조사를 통하여 매립지의 생물학적 분해상태가 평가된다면, 향후 매립지 침하양상을 평가하는데 상당한 도움이 될 것이다.

3.3. 난지도 및 국외 쓰레기 매립지에 대한 침하양상 분석

아래 표 3에는 국내 및 국외 쓰레기 매립지의 계측자료, 모형 매립조, 실내실험결과들로부터 얻어진 이차압축계수값들이 나타나 있다. 우선 국외 자료를 검토하면 다음과 같다. 국외 매립지에서 계측된 중간단계 이차압축계수($c_{z(min)}$) 값은 약 0.019이며, Sowers의 제안치에 의하면 열악한 생물학적 분해조건일 경우(즉 역학적 압축이 주된 침하요인인 경우)에 이차압축계수 값은 0.02이다. 또한 Rao 등의 대형압밀 실험 결과도 침하에 분해효과가 포함되지 않은 경우에 해당하며 이때의 이차압축계수 값은 0.037이다. Rao의 실험결과 값이 다소 크긴 하지만 위의 값들은 서로 큰 차이를 보이지 않으며, 실내 실험결과와 Sowers의 제안치와의 비교를 통하여 볼 때 국외 매립지의 중간단계 이차압축계

수 값이 역학적 압축에 의한 양임을 확인할 수 있다.

한편 분해가 포함되는 장기적인 압축단계에서의 압축계수 값을 비교할 경우, 국외매립지의 장기적 이차압축계수($c_{z(min)}$), 분해가 활성화된 매립지의 침하자료를 근거한 Sowers의 제안치, 생물학적 분해조건이 활성화되어 있는 모형매립조 실험(Rao 등, 1977)에서 얻어진 값들은 각각 0.125, 0.09, 0.13이다. 이들 서로의 값들 역시 큰 차이를 보이지 않으나 역학적 침하가 주로 고려된 위의 값들보다는 상당히 크게 나타났다. 따라서, 모형매립조 실험 및 Sowers의 제안치와의 비교를 통하여 볼 때 국외 매립지의 장기 이차압축계수 값은 역학적 침하에 분해효과가 추가적으로 포함된 양임을 확인할 수 있다.

난지도 침하자료를 분석할 경우, 한국지반공학회(1994)의 대형압밀 실험결과에서 나타난 대수나선 기울기(c_z) 값은 대략 0.006이었으며, 난지도 매립지에서 계측된 평균적인 초기 기울기($c_{z(min)}$)의 값은 0.008이었다. 미국 매립지 자료들의 검토시 나타난 바와 같이 변형율-대수시간 곡선에서 초기기울기를 갖는 난지도 매립지의 침하율이 역학적 압축에 의한 대형압밀 실험

표 3. 쓰레기 침하곡선의 대표적인 이차압축계수 값들

위 치		계측기간	이차압축지수	
국	국의 24개 매립지 사례연구 (Bjarngard, 1989)	35~6205일	$C_{z(min)}$	0.019
			$C_{z(max)}$	0.125
외	Sowers(1973) ($e_0=4$)	-	$C_{z(min)}$	0.02
			$C_{z(max)}$	0.09
외	모형매립조(Rao 등, 1977)	300~900일	C_z	0.13
	실내실험(Rao 등, 1977)	10~3000분	C_z	0.037
국	난지도 매립지	648일	$C_{z(min)}$	0.008
			$C_{z(max)}$	0.033
내	Lysimeter 실험결과 (서울대학교 환경안전연구소, 1994)	359일	C_z	0.05
	실내실험(지반공학회, 1994)	대략 3000분	C_z	0.006

험결과와 유사한 값을 보였다. 그러나 난지도 매립지의 변형률-대수시간 곡선에서 급한 기울기를 갖는 두번째 대수나선 기울기(c_{max}) 값은 0.03이었다. 또한 난지도 매립지에서 채취된 시료에 대한 lysimeter 실험결과를 분석할 경우, 안정적인 생물학적 분해상태에서 얻어진 대수나선 기울기 즉 이차압축계수 값은 0.05이었다. 따라서 난지도 매립지의 두번째 기울기를 갖는 침하상태는 생물학적 분해가 포함된 이차압축 단계(secondary stage)에 해당한다고 추측할 수 있다.

위의 자료들을 검토할 경우 난지도 및 미국 매립지의 침하결과는 기존에 수행된 실내실험 자료 들과 상반된 결과를 보이지 않으며, 미국 매립지의 침하양상이 역학적인 침하단계를 거쳐서 분해가 포함되는 장기적인 이차압축단계에 다다른다는 예측은 기존의 실험결과들과도 잘 일치함을 보여 준다. 난지도 매립지 침하에서도 초기 기울기 단계에서는 쓰레기의 역학적인 침하양상을 추정하는 한국지반공학회(1994)의 실내실험결과와 유사하게 나타나며, 더 급한 기울기를 갖는 침하곡선 단계의 기울기 값은 분해가 고려된 lysimeter 실험결과와 유사함을 보여 주고 있다.

난지도 매립지는 높이가 대략 90m에 다다르고 매립기간만도 15년에 이르는 초 대형매립지이며 또한 단순투기의 매립방식이 적용되어서 매립지 침하가 불규칙적인 양상을 종종 나타내므로 이를 분석한다는 것은 매우 어려운 상황

이다. 본 논문에서 분석된 실험결과들 만을 근거로 하여 난지도 매립지의 침하양상을 분석할 경우 다음과 같은 결론을 내릴수 있다. 난지도 매립지의 침하곡선에서 작은 값의 초기 기울기를 보이는 침하단계는 역학적 침하양상을 보이는 구간으로 판단할 수 있으며, 더 급한 기울기를 갖는 침하단계는 분해가 추가적으로 포함되어 나타나는 장기적인 이차압축 단계로 판단할 수 있다(그림 9 참고).

또한 난지도 매립지 침하양상은 미국의 24개 매립지의 침하양상과 유사한 거동을 보이지만 중간단계 및 장기 침하단계에서의 압축률의 크기에서 차이를 보이고 있다. 이는 Al-Khafaji 와 Andersland(1981)의 실험결과에서 유기물 함량의 증가에 따라 이차압축률의 크기가 증가한 바와 같이 미국 쓰레기 특성상 이차침하와 관련되어 분해되는 종이류와 같은 유기물함량이 국내의 경우보다 매우 큰 차이를 갖는 특징으로 인한 것이라 사료된다. 또한 분석된 침하양상을 근거로 난지도 매립지의 장기침하량을 예측하고자 할 경우 장기침하단계에서 산정된 이차압축계수($c_{s,max}$)를 이용하여 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

3.4. 난지도 매립지 장기침하량 예측

2.2 절에서 언급된 바와 같이 매립지 침하예측을 위해서 현재까지 여러 침하모델식들이 제안되었다. 이 가운데 Gibson & Lo와 Yen & Scanlon의 제안식은 난지도 매립지의 실측자료와 상당한 차이를 보이고 있어서, 난지도 매립지의 장기침하예측에 적용하기에는 곤란하였다. 반면 Power Creep Law의 경우에는 계측된 매립지 침하곡선과 비교적 일치하는 경향을 보였다. 그러나 이 제안식은 난지도의 매립지 침하특성을 파악한다는 측면보다는 단지 곡선맞춤(curve fitting)을 통하여 장기침하량을 예측하는 방법이다.

본 연구에서는 Power Creep Law에 따른 맞춤곡선과 장기침하단계에서 산정된 이차압축지수($c_{s,max}$)를 이용하여 난지도 매립지의 향후

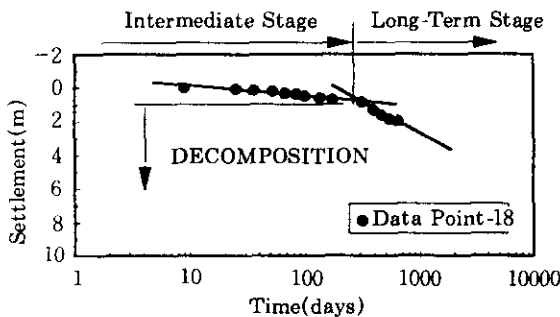


그림 9. 난지도 매립지 침하양상 분석

10년간의 장기 침하량을 각각 예측하였다. 그림 10에는 난지도 매립지의 한 지점에 대하여 두 방법에 의한 장기예측침하량이 나타나 있다. 예측결과 Power Creep Law 및 장기침하 단계에서 산정된 이차압축지수를 사용하여 예측된 10년후에 발생하는 추가적인 침하량은 각각 12m, 3m로 산정되었다. 이와같이 적용하고자 하는 모델에 따라 장기침하량 예측시 매우 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 국내 매립지의 침하특성에 대한 연구가 선행되지 않은 상황에서 단지 제안된 여러 모델식을 근거한 맞춤곡선을 사용할 경우 매립지의 장기침하량 예측에 큰 오류를 범할 수 있음을 알 수 있다.

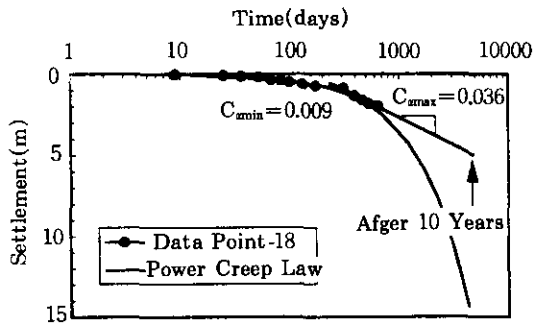


그림 10. 난지도 매립지 No.18 침하지점에서의 장기침하량 예측

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 난지도 매립지에서 일정기간 동안 예측된 침하자료와 미국의 매립지 침하 자료 및 국내 자료들을 분석할 경우 난지도 매립지의 침하양상은 Bjarngard와 Edgers의 침하모델에서 나타난 것처럼 중간침하 단계를 거쳐 장기침하단계에 다다른 미국의 매립지의 침하경향과 유사함을 알 수 있었다.
2. 장기침하량 예측시 쓰레기 매립지의 침하양상이 분석되지 않은 상황에서 단지 기존의 침하모델을 통한 맞춤곡선을 사용하여 장기침하량을 예측하는 것은 상당한 오차가 포함될 우려가 있음을 살펴볼 수 있다. 본 연구를 근거로 할 경우에는 Bjarngard와 Edgers의 침하모델에 장기침하 단계에서 구해진 이차압축계수를 적용하여 추후 침하량을 산정하는 것이 보다 타당할 것으로 사료된다.
3. 매립지 침하단계에서 유발되는 압축률은 표4와 같이 비교적 큰 차이를 보이며, 국내 및 미국의 대표적인 쓰레기 성상에서 이차침하단계에서 주로 분해되는 종이류 등과 같은 유기물의 함량의 큰 차이로 말미암는 것으로 사료된다.

표 4. 난지도 매립지 및 미국 매립지의 이차압축 계수값

	중간단계(intermediate stage) 이차압축계수(c_{zmin})	장기(long-term stage) 이차압축계수(c_{zmin})
미국 24개 쓰레기 매립지	0.019	0.125
난지도 쓰레기 매립지	0.008	0.033

참고 문헌

1. (주) 대우 건설기술 연구소(1993), 매립지 침출수 및 가스 특성 연구-난지도 매립지 중심으로.
2. 라일용 등(1995), 침하계측에 대한 폐기물 매립지반의 장기침하예측, 대한토목학회 학술발표회 논문집(Ⅲ), pp.547~550.
3. 서울대학교 환경안전연구소(1994), Lysimeter를 이용한 폐기물 매립지 안정화 연구.

4. 서울특별시 청소사업본부(1992), 난지도 매립지 환경오염방지 및 안정화 대책 기본 계획 보고서.
5. 윤석표(1994), 난지도 매립지의 침출수에 의한 지하수 오염의 기여도 추정과 해석, 박사학위논문, 한국과학기술원.
6. 이승수 등(1995), "도시쓰레기의 침하특성," 대한토목학회 학술논문집, 제15권, 제6호, pp. 1773-1782.
7. 이승무 등(1990), "매립지 가스(LFG) 추출 이용 기술에 관한 개발 연구(I)", 한국과학재단.
8. 이채영(1994), 매립지 침출수의 고율 혐기성 처리, 석사학위논문, 한국과학기술원.
9. 한국건설기술연구원(1992), 도시폐기물 매립장의 건설부지활용과 위생매립시스템에 관한 연구, 최종 보고서.
10. 한국지반공학회(1994), (난지도 매립지 안정화 기본설계) 장기침하 특성분석 보고서.
11. 환경처(1990), 전국 일반 쓰레기 처리 실적 및 계획.
12. Al-Khafaji A. W. N. and Andersland, O. B. (1981), "Compressibility and Strength of Decomposing Fibre-Clay Soils," *Geotechnique* 31, No. 4, pp. 497-508.
13. Bjarngard, A.(1989), "The Compression Characteristics of Landfills", M.S. thesis, Tufts University, Medford, MA.
14. Bjarngard, A. and Edgers, L.(1990), "Settlement of Municipal Solid Waste Landfills," *Proceedings of the Thirteenth Annual Madison Waste Conference*, Madison, WI, pp. 192-205.
15. 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, PA., pp. 225-239
16. Fassett, 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.
17. Gibson, R. E., and Lo, K. Y. (1961), "A Theory of Consolidation for Soils Exhibiting Secondary Compression," *ACTA Polytechnic Scandianavica*.
18. Morris, D. V. and Woods, C. E.(1990), "Settlement and Engineering Considerations in Landfill and Final Cover Design," *Geotechnics of Waste Fills-Theory and Practice, ASTM SPT 1070*, ASTM, Philadelphia, PA., 9-21.
19. Rao, S. K., Moulton, L. K., and Seals, R. K. (1977), "Settlement of Refuse Landfills," *Geotechnical Practice for Disposal of Solid Waste Materials*, ASCE, Geotechnical Engineering Division, pp. 574-599
20. Rao, S. K.(1974), "Prediction of Settlement on Landfills for Foundation Design Purposes," Ph. D Dissertation, Graduate School of West Virginia University, Morgantown, WV.
21. Sowers, G. F.(1973), "Settlement of Waste Disposal Fill", *Proceedings of the 8th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, Part 2, pp. 207-210.
22. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigin, S. A.(1993), "Intergrated Solid Waste Management", McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
23. Wardwell, R. E. and Nelson, J. D.(1981), "Settlement of Sludge Landfills with Fiber Decomposition," *Proceedings of the 10th International Conference for Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, Stockholm, Sweden, pp. 397-401.
24. Yen, B. C. and Scanlon, B.(1975), "Sanitary Landfill Settlement Rates," *Journal of The Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101, No. 5, pp. 475-487.

(접수일자 1996. 9. 16)