

건설부지 조성을 위한 도시 쓰레기의 공학적특성
Engineering characteristics of municipal waste as a fill
material in the construction site

지재성¹ 배영진² 장연수³
정하익⁴ 김석구⁵ 김진만⁶

Abstract

Fill materials in the construction site must have enough strength to support the structures upon it, and be free from the possibility of endangering the health of the residents and polluting the groundwater.

The purpose of this paper is to investigate the possible geo-environmental problems that may be generated when the ground formed by municipal waste is used as a construction site and to suggest the counter measure, if necessary. The strength, hydraulic conductivity and settlement characteristics of the concerned waste fill site are measured by geotechnical laboratory and field tests, and the composition and the quantity of chemical substances in the waste are analyzed by batch test, gas generation test and simple biological response test of the leachate.

-
1. 한국건설기술연구원 환경연구실, 수석연구원
 2. 한국건설기술연구원 환경연구실, 선임연구원
 3. 동국대학교 토목공학과, 조교수
 4. 한국건설기술연구원 지반연구실, 선임연구원
 5. 한국건설기술연구원 환경연구실, 연구원
 6. 한국건설기술연구원 지반연구실, 연구원

1.서론

최근들어 인구의 증가와 도시공간의 밀집화로 도시 주변지역의 개발영역이 계속적으로 확장되고 있어 과거에 주로 도시주변에 형성되었던 매립지역을 도시생활공간의 일부로 활용하고자 하는 필요성이 점차 증대되고 있다. 현재 우리나라에서 발생하는 폐기물의 약 93% 정도는 매립처분하고 있어 일반폐기물 매립지는 전국에 600여개소 이상이 산재해 있다. 따라서, 이들 일반폐기물 매립지를 시설물 축조부지로 활용하거나 또는 매립후 상당기간이 경과해서 안정화된 폐기물을 기초지반조성을 위한 매립재로 활용하는 방안도 점차 검토되어야 할 것으로 사료된다.

일반폐기물을 지반조성의 매립재로서 쓰고자 할 때는 다음과 같은 두가지 측면에서 검토가 선행되어야 할 것이다.

첫째, 지반공학적으로 안정하여 축조될 시설물에 대하여 구조적인 문제점이 없어야 한다.

둘째, 환경적인 측면에서 그 지반위에서 활동하게 될 인구에 대해서 보건의 위험과 안전적인 위험이 없어야 하고 주변환경에 대해서 지하수오염 등의 환경에 미치는 악영향이 없어야 한다.

이에 본 연구는 폐기물 매립토를 이용하여 지반조성을 한후 일반 건축물축조부지로 활용할 경우에 발생할 수 있는 제반 환경적, 지반적 문제점들을 예상하여 검토하고 필요한 경우에는 이에 대한 대책을 제시하는 것을 목적으로 한다.

2.현장 지반 조사

2.1 조사내용

폐기물 매립토 조사를 위한 시추 및 시험굴 조사 위치는 현장 답사를 통하여 조사지역의 전반적인 지반 파악이 가능토록 그림1과 같이 조정하여 배치하였다. 현장지반조사는 시추 및 시험굴조사, 콘 관입시험(CPT), 표준관입시험

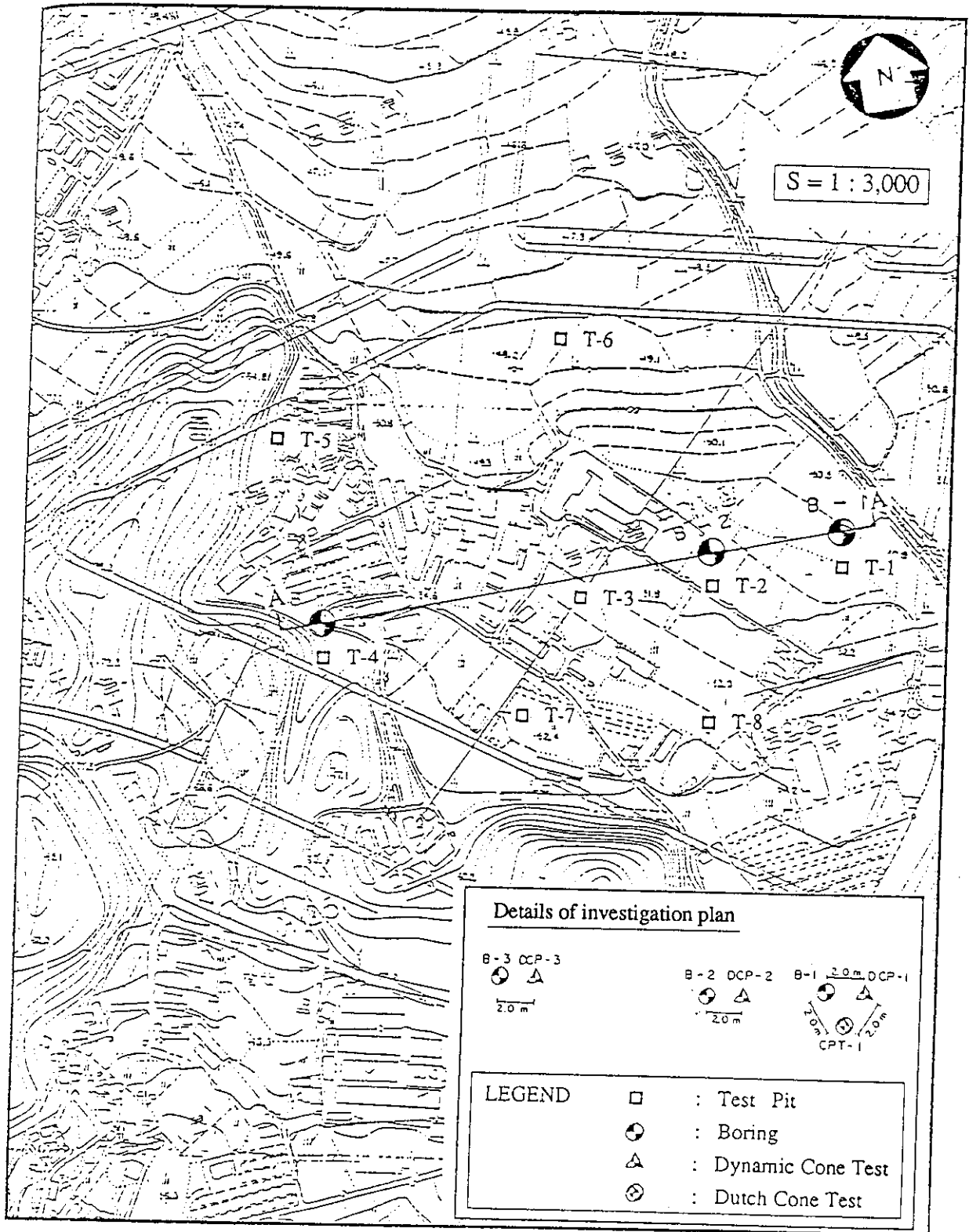


Figure 1. Investigation site of landfill

(SPT), 현장밀도 및 함수비 측정등으로 하였다.

시추조사는 연구대상 부지내에 선정된 3 개소를 대상으로 BX 규격(시추공 직경 약 4cm) 회전수세식 시추기(Y-150)를 사용하여 굴진하였으며, 굴진심도는 구조물의 안정된 지지층으로 기대되는 충분한 깊이까지 확인하는 것을 원칙으로 하였다.

굴진작업과 병행하여 매 1.5 m 깊이마다 또는 지층이 변하는 깊이에서 KS F 2318의 규정에 의한 표준관입시험을 실시하여 각 지층의 N치를 측정하고 동시에 이 시험에 수반하여 토질시료를 채취하고 이로부터 각 지층의 구성상태등을 파악하였다. 그리고 굴진작업이 종료된 시추공은 공내수위가 안정될 때까지 2~3 시간 정도 기다려 평형이 이루어진 후 공내 수위를 측정하였다.

또한 포크레인을 이용하여 최대 지하 4 m까지 시험굴을 굴토하고 시험굴내에서 지층상태와 토질특성을 파악하고 실내 토질시험을 실시하기 위하여 대표적인 시료를 채취하였다.

콘 관입시험은 원추형 정적관입시험기와 동적관입시험기를 적용하였다. 동적관입시험은 시추조사와 병행하여 SPT 해머를 이용하여 실시하였다. 표준관입 시험은 KS F-2318 규정에 따라 실시하여 중량 63.5 kg의 해머를 지상 75 cm 높이에서 자유낙하시켜 sampler가 30 cm 관입하는데 소요되는 타격회수(N치)를 측정하였으며 N치로부터 지반물성치를 추정하였다.

현장밀도는 지표에 덮여 있는 토사 복토층과 복토층 하부에 묻혀 있는 폐기물 매립토층에 대하여 실시하였다. 현장밀도 측정은 KS F 2311에 따른 모래 치환법과 일정 체적의 지반토 무게 측정방법을 사용하였다. 현장 함수비 측정은 채취한 시료중에서 일부분을 선정하여 실시하였으며 2개 이상 함수비를 측정한 다음 평균하여 현장 함수비로 하였다.

2.2 조사결과 및 분석

본 연구대상 지역의 원지형은 서쪽에서 북측으로 약간 경사진 지형이었으나 현재는 매립이 실시되어 평탄한 지형으로 조성되어 있다. 그림 2에는 시추주

상도와 시험굴 조사 결과를 바탕으로 지층 단면도(그림 1의 A-A 단면)를 구성하였다. 여기에서 보는 바와 같이 지표로부터 0.5~3 m은 복토층, 1.0~3.5 m은 쓰레기층으로 구성되어있으며 그 이하에는 충적층과 잔류토층으로 구성되어 있다.

본 연구대상 폐기물 매립층에 대한 SPT 시험결과, 지표 토사 복토층의 N값은 4~11에 분포하고 대부분 실트질 모래로서 평균 10정도의 값을 갖는다. 폐기물 매립층의 N값은 4~29로 나타났으며 그 하부 충적토층 및 잔류토층은 8~50의 범위로서 매립이전 전답이었던 부분은 8~10, 그외 부분은 15~30 사이에 대부분 분포하였다. 폐기물 매립층에 대한 N 값의 평균치는 12.2로 나타났으며 B-2 지역의 지표하 2.2~2.7 m 지점에는 깨어낸 돌 층이 존재하여 N 값이 50, B-3 지역의 경우 지표하 1.5 m 지점에서 목재나 금속잔재 등이 존재하여 N 값이 29로 나타났다.

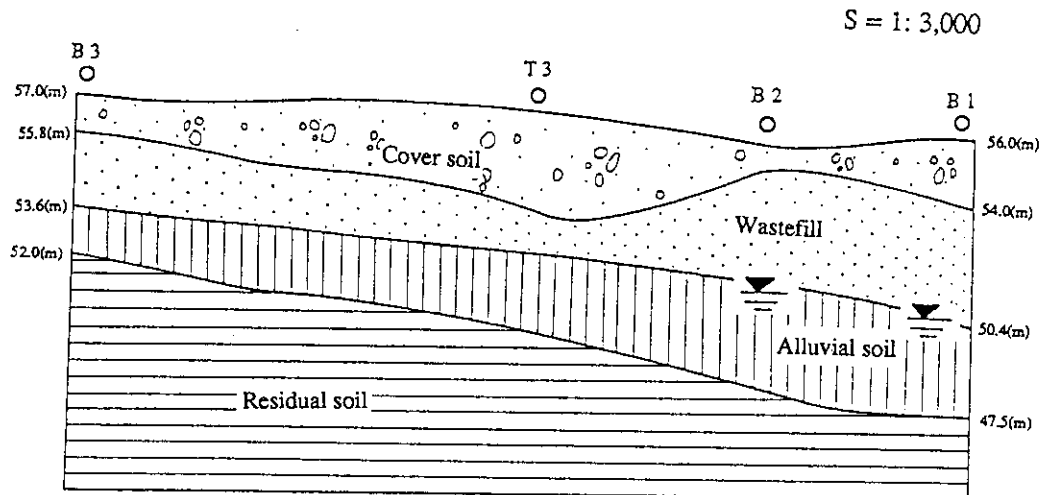


Figure 2. Soil profile (A-A section of Fig. 1)

동적 콘관입 시험결과를 살펴보면 토사 복토층의 콘관입 저항치 N_d 는 3~20, 폐기물 매립층의 N_d 는 2~31, 그 이후 충적토층 및 잔류토층의 N_d 는 8~65로 나타났다. 그리고 폐기물 폐립토층의 평균 N_d 는 12.8로 나타났다. 동적 콘관입 지수(N_d 치)와 표준관입시험치(N 치)와의 상관계수를 조사 자료로부터 도출하였는데(그림 3) 보는 바와 같이 데이터의 분산정도가 매우 심하며 분산도는 N 치가 증가할수록 크다. 본 폐기물 매립지반 전체의 경우 $N_d=1.239N$ 의 관계가 있으며 이중 폐기물 매립층의 경우만 보면 $N_d=1.196N$ 의 관계가 있는 것으로 분석되었다.

정적 콘관입시험은 관입 능력이 1 ton인 Dutch cone을 사용하여 B-1 지점에서 실시하여 폐기물 층의 지지력을 구한 결과 $q_c=11\sim 18 \text{ kg/cm}^2$ 의 값을 갖는 것으로 나타났다.

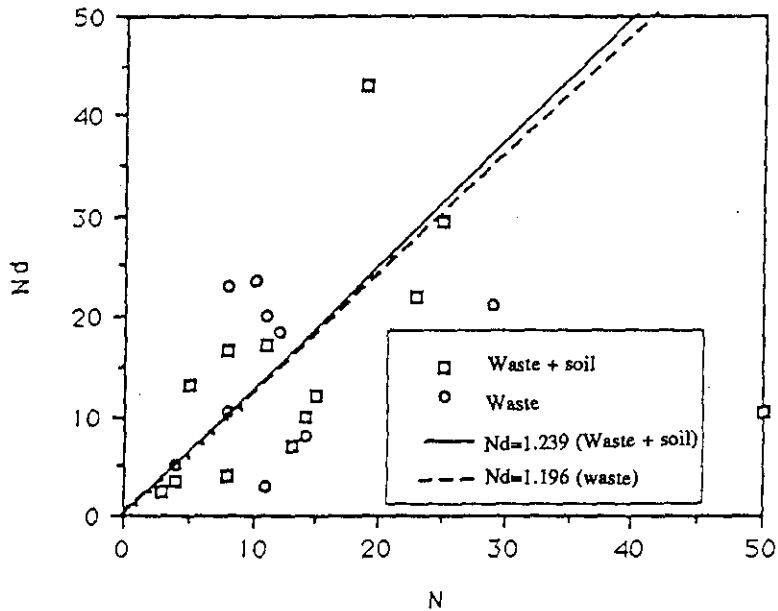


Figure 3. N_d - N relationship

쓰레기 매립물의 특성은 구성성분, 재령기간, 다짐 그리고 기타 환경조건에 따라 매우 다양하며 그것을 정확하게 결정한다는 것은 매우 어려운 작업이다. 매립물의 물리적 특성에는 여러가지가 있겠지만 그중에서도 가장 기본적인 것은 단위중량, 함수비라 할 수 있다. 쓰레기 매립장에서는 매립물이 위치에 따라 비균질 하기 때문에 동일 매립장에서의 매립물의 단위 중량의 분포와 분산 정도는 매우 크다.

조사 대상지역의 단위중량은 쓰레기층 0.95~1.42 g/cm³, 복토층 1.69~2.08 g/cm³의 범위로 나타났다. 쓰레기층의 이러한 다짐상태는 일반적인 위생 매립장내 쓰레기 매립물 보다는 양호한 다짐상태로 조사 대상지역의 쓰레기 구성물의 큰 균등계수에 기인한 것으로 사료된다.

함수비는 쓰레기층 27~39%, 복토층 10~18%, 원지반층 15% 정도로써 쓰레기 매립층의 경우 다른층에 비해 높은 함수비를 나타낸다. 이러한 함수비특성은 쓰레기 매립층에 있는 종이류, 섬유류, 나무등의 큰 함수성 때문으로 사료된다.

공내 지하수위는 지질단면도(그림 2)를 보면 B-1 에서 6 m, B-2에서 5.5 m, B-3에서는 없는 것으로 나타나 있다. 그러나 B-3의 시추깊이가 6 m 정도인 것으로 미루어 지하수 위치가 그곳에서도 시추 최종깊이 부근에 위치하는 것으로 보인다. 따라서 이곳의 평균 지하수면의 깊이는 6 m 정도로 보는 것이 적당한 것으로 사료된다.

3. 실내 지반공학 관련 시험

3.1 실내 토질시험 내용

시험굴 조사와 표준관입시험조사에 의해 채취된 대표적 시료에 대하여 실내 토질시험을 실시하여 폐기물 매립토의 지반공학적인 물리·역학특성을 살펴보고자 한다.

물리·역학적 시험으로는 입도분석(KS F 2302), 비중(KS F 2308), 함수량

(KS F 2306), 다짐시험(KS F 2312), 직접전단시험(KS F 2343), 압밀시험(KS F 2316), 투수시험(KS F 2322) 등을 수행하였다. 다짐시험은 A-1 다짐방법으로 하였으며 투수시험은 변수위 투수시험으로 하였다. 직접 전단시험기의 전단 박스 규격은 가로, 세로, 높이가 각각 30cm, 30cm, 20cm(대형)와 원형으로 직경 6cm, 높이 2cm(소형)이었고, 전단시험시 적용 수직하중은 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 3.0 kg/cm² 이었다. 전단시험시 대형 직접전단시험기에 대한 전단속도는 2 cm/min, 소형 직접전단 시험기에서는 0.8 cm/min 으로 하였다.

3.2 시험결과 및 분석

기본 물리적 특성

연구대상지역의 쓰레기층과 복토층의 기본특성시험 결과는 표 1과 같다. 쓰레기층의 비중은 2.4~2.65의 범위로서 복토층의 비중 2.58~2.71 보다 작게 나타났다. 입도분포는 쓰레기층의 경우 균등계수 $C_u=35\sim167$, 유효입경 $D_{60}=0.009\sim0.02$ mm의 범위로 나타나 조사위치에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타나며, 양입도(well graded)임을 알 수 있다. No. 200체를 통과하는 세립분의 양은 복토재와 쓰레기 모두 15% 미만으로 나타났다. 통일분류법에 의한 흙 분류 결과 GM, SM으로 분류되었고 액·소성시험결과 모든 시료가 비소성(Non-Plastic)으로 나타났다.

다짐시험결과는 표 2 및 그림 4와 같으며 A-1 다짐시험에 의한 최대건조밀도는 쓰레기층 1.50~1.60 g/cm³, 복토층 1.92~2.07 g/cm³의 범위로서 복토층이 비교적 크게 나타났다. 최적함수비는 쓰레기층 20~28%, 복토층 10~13%로 나타나서 복토재의 경우 일반 풍화화강토 11~15%의 범위와 유사하고 쓰레기층은 다소 큰것으로 판명되었는데 이는 일반 토사와 달리 쓰레기는 유기질 성분이 다량 함유되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

Table 1. Results of physical test

Boring and test pit		Sampling depth(m)	Specific gravity	Atterberg limit		D ₁₀ (mm)	Uniform coef. C _u	Soil classification
				LL	PI			
B-1*		2.00	2.64	NP	-	0.04	275	GM
		5.00	2.65	NP	-	0.06	67	SM
		7.00	2.62	NP	-	0.07	34	SM
B-2		1.00	2.64	NP	-	0.04	33	SM
		3.50	2.61	NP	-	0.03	27	SM
		6.00	2.64	NP	-	0.06	75	SM
B-3		1.00	2.67	NP	-	0.03	57	SM
		2.50	2.64	NP	-	0.04	50	SM
		6.00	2.68	NP	-	0.05	8	SM
Waste	T 1**	3.0	2.54	NP	-	0.01	167	SM
	T 2	4.0	2.45	NP	-	0.007	143	SM
	T 3	4.0	2.40	NP	-	0.009	167	SM
	T 4	3.5	2.60	NP	-	0.02	35	SM
	T 5	2.2	2.57	NP	-	0.012	139	SM
Cover	T 1	0.0	2.60	NP	-	0.02	125	SM
	T 2	0.0	2.58	NP	-	0.02	250	SM
	T 3	0.0	2.69	NP	-	0.18	33	SM
	T 4	0.0	2.63	NP	-	0.04	175	SM
	T 5	0.0	2.71	NP	-	0.01	117	SM
Ground		3.4	2.62	NP	-	0.05	28	SM

* Boring , ** Test pit

Table 2. Results of compaction test

Layer Test pit	Cover layer		Waste layer		Original ground	
	γ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)	W _{opt} (%)
T 1	2.05	10.5	1.50	26.0	1.97	13.0
T 2	1.99	13.0	1.46	27.5		
T 3	1.92	11.7	1.48	28.0		
T 4	2.03	12.4	1.58	21.5		
T 5	1.88	11.8	1.60	20.0		

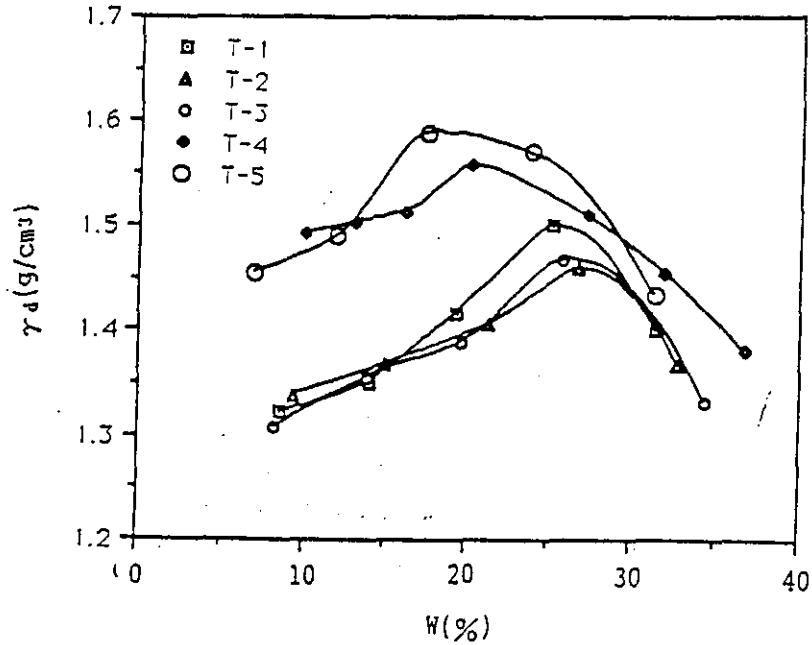


Figure 4. A-1 compaction curve of waste

투수특성

폐기물 매립층내 물의 유동은 Darcy의 법칙으로 해석할 수 있으며 여기에는 투수계수가 중요한 요소가 된다. 투수계수에 영향을 미치는 요소로는 침투수의 밀도, 점도 및 매립물의 구조와 입도분포 등이 있으며 폐기물 매립지반의 경우는 이 요소가 매우 다양하게 분포되어 있다.

도시폐기물의 투수계수는 실내 및 현장시험에서 측정할 수 있으며 일반 토사와는 달리 불교란 시료의 채취가 어렵고 시료의 불균질성이 매우 크기 때문에 실내시험 보다는 현장시험이 적절한 측정 방법이라 할 수 있다. 연구대상지역의 투수시험은 현장밀도로 다져진 쓰레기 시료에 대해 실내압밀시험과 변수위 투수시험으로부터 산정하였으며 그 결과 쓰레기층의 투수계수는 표 3에서 보는 바와같이 $1.9 \times 10^{-4} \sim 9.8 \times 10^{-5}$ cm/sec로 나타났다.

Table 3. Permeability coefficient of waste
(Unit: cm/sec)

Test pit	T 1	T 2	T 3	T 4	T 5
Per. coef.	9.8×10^{-5}	1.9×10^{-4}	2.6×10^{-4}	8.6×10^{-5}	2.1×10^{-4}

강도특성

매립물은 시간이 경과함에 따라 그 특성이 계속적으로 변화하는데 아직까지도 이러한 변화가 매립물의 강도정수에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 정량적인 규명이 되어 있지 않다. 매립물의 강도를 측정하는 방법에는 실내시험, 현장시험 그리고 기존 매립장의 관측결과를 이용한 역산방법(back-calculation technique) 등이 있다. 실내시험에서 가장 일반적인 시험방법은 매립장에서 채취한 원시료를 대상으로 대형 전단박스를 사용하는 직접 전단시험이며 현장시험에는 표준관입시험, 베인 전단시험 그리고 콘관입 시험 등이 있다. 본 실험에서는 일반적으로 강도정수를 구하기 위해 사용되는 소형직접전단시험과 대형직접전단시험을 동시수행하여 비교함으로써 전단상자의 크기에 따른 강도정수의 상이성 정도를 평가하였다.

대형 직접전단시험에 의해 구해진 수직변위 및 전단응력 - 수평변위 관계곡선의 예를 들면 그림 5 및 그림 6과 같으며, 전단시 전단응력과 수직변위는 수평변위가 증가함에 따라 증가하고 수직응력이 커질수록 큰 값을 나타낸다.

대형 직접전단시험에 의한 전단강도를 도시하면 그림 7과 같고 대형 및 소형 전단시험결과를 정리하면 표 4와 같다. 소형 직접전단시험은 점착력 $4 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$, 내부마찰각 $23 \sim 41^\circ$, 대형 직접전단시험은 점착력 $0.09 \sim 0.26 \text{ kg/cm}^2$, 내부마찰각은 $32 \sim 40^\circ$ 정도로 대형 직접전단시험결과와 소형 직접전단시험의 결과 중에서 점착력의 크기가 크게 차이를 알 수 있다. 두 전단시험결과에 대한 점착력의 큰 차이는 소형 직접전단시험의 경우 조립자가 시료 속에 섞여 전단에 저항함으로써 작은 수직하중에서도 큰 전단 강도로 나타나는 Scale effect때문으로 사료된다. 따라서 쓰레기에 대한 강도정수 결정시

대형 직접전단시험기의 사용이 필요할 것으로 판단된다.

침하특성

매립지반의 침하를 일으키는 메카니즘에는 여러가지가 있는데 특성에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 역학적 작용 : 다짐, 압밀
- 물리·화학적 및 생화학적 작용 : 분해, 부패

매립지반 침하는 매립초기 몇달 동안에는 상당히 큰 침하가 발생하고 그 이후에도 어느 정도 일정한 비율로 침하가 계속해서 일어난다. 초기침하를 일차 압축이라 하고 그 이후의 침하를 이차압축이라 하는데, 이때 일차압축은 역학적인 작용에 기인하며 이차압축은 역학적인 이차압축, 물리화학 작용 그리고 생화학적 작용에 기인한다고 하였다.(Sowers, 1973)

폐기물 매립토는 흐트러지지 않은 시료를 채취하기가 매우 어렵다. 따라서 본 실험에서는 현장에서 채취한 흐트러진 시료를 현장밀도, 함수비등 현장조건을 이용하여 시료를 포화시켜 실내압밀실험을 실시하였다. 대부분 시료가 통상적인 압밀시험 결과와는 달리 일차압밀의 완료시점이 확실하게 나타나지 않고 이차압밀 영역은 매우 작게 나타나고 있다. 압밀 시험시 하중 변화에 따른 시료의 간극비 e 를 살펴보면 T 1 시료가 하중 변화에 따라 0.813~1.401로 가장 작게 나타났으며 T 2 지점에서 채취한 시료가 1.418~2.584로서 가장 크게 나타났다. 따라서 T 1 지점에서 폐기물 매립층이 가장 조밀하고 T 2지점 폐기물이 가장 느슨하게 구성되어 있음을 알 수 있다. 압축지수 C_c 는 대체적으로 0.4~0.51로 나타났으며 압밀시험으로부터 구한 투수계수 k 는 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$ cm/sec로 나타났다.

본 연구대상 부지와 같은 폐기물 매립층의 침하 특성은 상재 하중에 의한 즉시 및 압밀침하와 부패에 의한 침하로 구분할수 있으므로 이들 각각에 대하여 계산하여 전체적인 침하량을 산정하고자 한다. 본 연구의 현장시험시에 SP

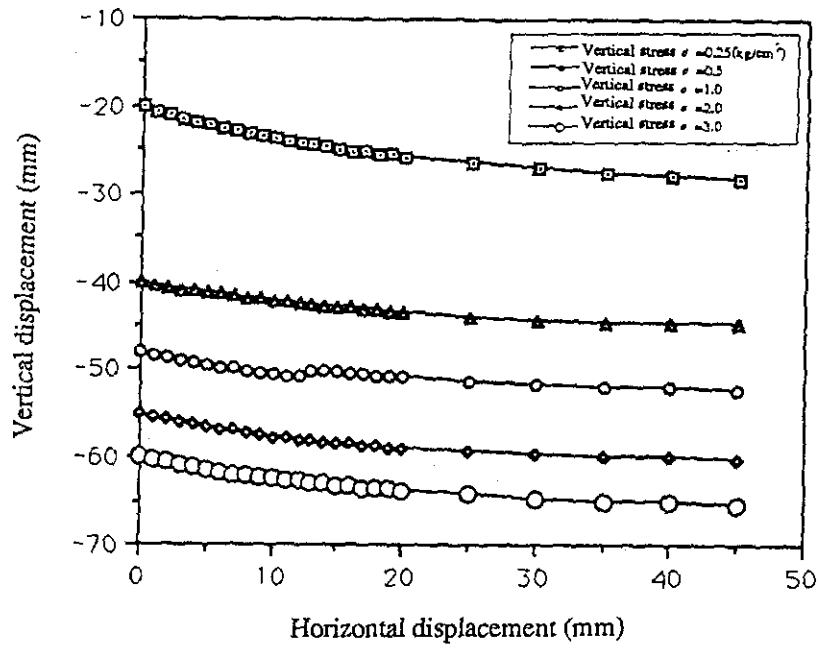


Figure 5. Horizontal - vertical displacement relationship

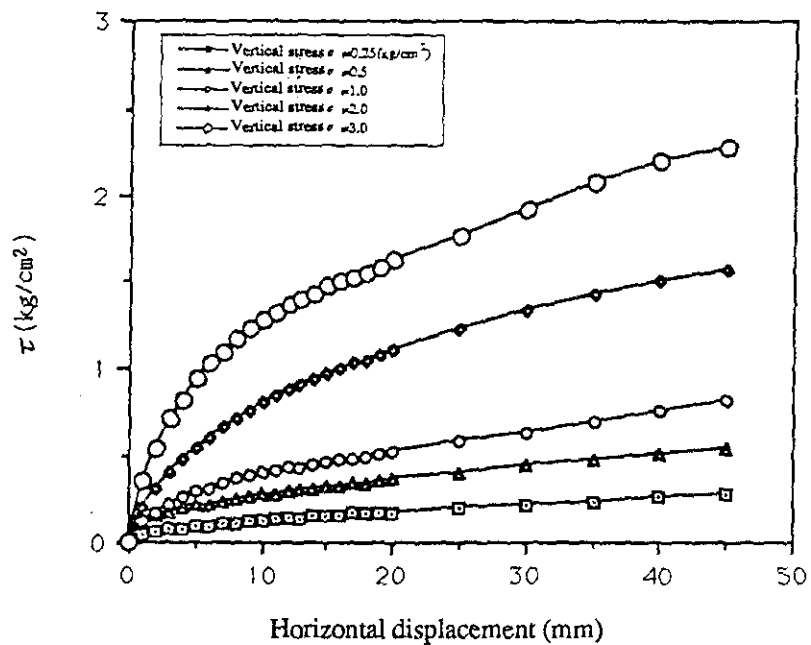


Figure 6. Shear stress - horizontal displacement relationship

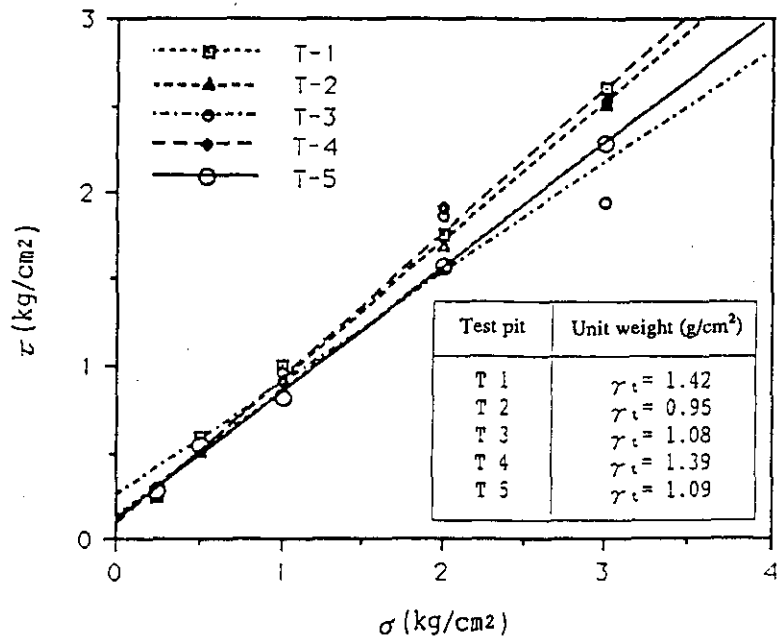


Figure 7. Results of large direct shear test

Table 4. Results of direct shear test

Test method	Large direct shear		Small direct shear	
	c(kg/cm ²)	$\phi(^{\circ})$	c(kg/cm ²)	$\phi(^{\circ})$
T 1	0.12	39.56	5.51	39.18
T 2	0.11	38.72	4.38	41.34
T 3	0.26	32.46	4.14	32.87
T 4	0.09	39.88	4.00	34.08
T 5	0.12	35.66	6.06	23.85

T를 실시하였으므로 SPT의 N값에 의하여 매립층의 즉시침하량을 산정하고자 한다. N값에 의한 즉시 침하량 산정식은 (식 1)로부터 얻어진다.

$$S = 0.4 \frac{P_o}{N} H \log \frac{(P_o + \Delta P)}{P_o} \dots (1)$$

상식에서 유효 상재하중 P_o 는 현재 폐기물 매립층이 받고 있는 지반응력으로 하였으며 상재하중 증가량 ΔP 는 향후 추가될 구조물 하중으로 하였다. 여기에서 구조물 하중은 구조물의 고정하중과 적재하중을 합한 값으로 하였으며 건설부 및 건축학회에서 지정된 구조물의 고정하중과 적재하중을 참고로 하여 산정하였다. 이와같이 산정된 상재하중 및 N값을 이용하여 계산한 시험굴조사 위치별 즉시침하량을 표 5에 나타냈다. 표 5에서 보는 바와 같이 폐기물 매립층의 즉시침하는 T 3에서 22 mm로 가장 작게 나타났고 T 1 이 66 mm로 가장 크게 나타났으며 평균 즉시침하량은 45 mm로 나타났다.

Table 5 Immediate Settlements

Test pit	Height of waste H (m)	Height of cover soil H_c (m)	Settlement S (mm)
T 1	3.3	1.7	66
T 2	3.0	0.5	57
T 3	1.0	3.0	22
T 4	2.0	1.0	39
T 5	2.0	3.0	43

본 연구대상 매립층에 대한 압밀침하량 산정시 일반토사에 적용되고 있는 기존의 압밀침하량 산정식(식 2)을 사용하였는데 이유는 폐기물 매립층에 대한 압밀실험결과 압밀곡선이 일반토사에 대한 압밀곡선과 형태가 유사하기 때문이다.

$$S = H \frac{e_o - e_1}{1 + e_o} = H \frac{C_c}{1 + e_o} \log \frac{(P_o + \Delta P)}{P_o} \dots (2)$$

상식에서 유효상재하중 P_o 와 상재하중증가 ΔP 계산은 즉시침하량 산정시와

동일하게 사용하였다. 이와같이 산정된 상재하중 및 실내압밀 시험결과를 이용하여 시험굴 위치별 압밀침하량을 표 6에 나타냈다. 표 6에서 보는 바와 같이 실내압밀 시험결과로부터 계산된 폐기물 매립층의 압밀침하는 T 3에서 14 mm로 가장 작게 나타났고 T 1 이 104 mm로 가장 크게 나타났으며 평균 압밀침하량은 61 mm로 나타났다.

Table 6. Consolidation settlements

Test pit	e _o	C _c	H (m)	H _c (m)	S (mm)
T 1	1.401	0.42	3.3	1.7	104
T 2	2.584	0.51	3.0	0.5	90
T 3	1.837	0.40	1.0	3.0	14
T 4	1.528	0.44	2.0	1.0	65
T 5	2.154	0.44	2.0	3.0	30

폐기물 매립토의 유기물질에 의한 침하량 산정방안에는 Sowers 방법과 Yen and Scanlon방법등이 있는데 여기에서는 식 (3)과 같이 Sowers가 제안한 방법을 이용하여 침하량을 산정하였으며 산정결과는 표 7에 제시한 바와 같다.

$$s = \frac{C_a \cdot H}{1 + e} \log (t_1/t_2) \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기에서 C_a : 이차압축지수 (0.03e 적용)

H : 폐기물 매립층 두께

Table 7. Settlements by Sowers(1973) method

Test pit	Height of waste H (m)	Settlements S (mm)						
		2 year	4 year	6 year	8 year	10year	15year	20year
T 1	3.3	5	8	12	15	17	23	28
T 2	3.0	5	10	13	17	20	26	31
T 3	1.0	2	3	4	5	6	8	9
T 4	2.0	3	5	7	9	11	14	17
T 5	2.0	3	6	8	10	12	16	20

(Assume landfill period t₂=10)

표에서 보는 바와 같이 Sowers 방법에 의하면 폐기물 매립층의 두께가 가장 작은 T 3지점의 경우가 부패침하량은 가장 작게 나타났으며 T 2의 경우가 가장 크게 나타났다. 부패가 거의 완료되리라고 판단되는 20년 경과 후 본 조사 대상 부지의 예상 평균부패 침하량은 20mm로 예상된다.

부패에 의한 침하량을 계산하는데 위에 소개한 식을 사용하는데는 2가지 점에서 문제가 있음을 염두에 두어야 할 것이다. 첫째, 이러한 제안식은 매립초기부터 한장소에 매립된 상태의 매립층에 대한 침하량을 산정하는 식인 반면에 본 연구대상 매립층의 경우에는 기존의 매립장에서 이동되어 현지점에 포설되었으며, 둘째, 제안식의 대상 폐기물지반은 외국 쓰레기 성분을 기준으로 파악한 것으로 국내 쓰레기 성분에 대한 침하량의 제안식은 달라질 수 있다는 점이다. 따라서 정확한 폐기물 매립층의 침하량을 측정하기 위해서는 매립층내 침하판 설치등 향후 지속적인 침하 계측관리가 요망된다.

4. 환경에 대한 현황분석 및 평가실험

본 연구의 대상지역인 택지개발 사업지구 예정부지 주변에 대한 현황분석을 위해 현장조사와 시료채취를 실시하였으며, 채취된 일반토양과 매립쓰레기의 물리적인 성상을 분석하였다. 또한 폐기물 용출실험을 실시하여 유해폐기물 존재유무를 확인하고 용출되는 중금속과 기타 유해가능성이 있는 물질의 침출에 따르는 지하수 오염가능성을 추정하였다.

일반토양과 달리 상당량의 유기물을 함유하고 있을 것으로 예상되는 매립쓰레기에 대하여 잔류유기물의 생물학적 분해가능성과 가스발생 가능성을 판단하기 위한 실험을 수행하였다.

또한 매립쓰레기의 용출액으로 생물적용실험을 수행하여 단기적인 독성유무를 조사하였다.

4.1 현장조사

조사 대상지역에 대하여 현장답사와 포크레인을 동원한 굴토 및 시료채취

를 실시하였다. 시험굴토시 발견된 쓰레기는 육안으로 뚜렷하게 구분가능한 흑회색으로 약간의 분해중인 쓰레기 냄새가 나며 주로 비닐류, 병조각, 플라스틱 등이 섞여 있었다. 또한 일부지점에서는 쓰레기 포설후 복토시 주변의 공사장에서 발생된 콘크리트, 나무, 폐비닐 등 건설폐기물을 채우거나 야적한 곳들도 있었다.

4.2 매립쓰레기의 기초 성상 분석

연구지역의 현장조사 후 포설된 매립쓰레기의 특성을 검토하기 위하여 채취한 시료의 성상을 분석한 결과를 표 8에 나타내었다.

표 8에서 알 수 있듯이 현장에서 채취한 매립복토를 비교대상인 일반토양과 견주어 볼 때 폐기물 매립쓰레기의 수분함량은 평균 23.7% 정도로 복토층 토양보다 높았으며 유기물 함량은 23.6%로 일반토양의 14.2%보다 높게 나타났다. pH의 경우는 매립쓰레기와 일반토양에서 각각 7.51과 7.17로 나타나 비교적 안정적인 것으로 판단되었다. 또한 폐기물 매립쓰레기내에 잔류하는 비닐류, 플라스틱류, 고무, 가죽, 나무, 유리 등 난분해성 물질 또는 분해 불가능한 폐기물의 함량은 평균 11.9%정도로 나타났으며 이외의 특별한 폐기물이 발견되지 않았다.

Table 8. Comparison landfilled solid wastes with soil

Items Samples	Water content(%)	Organic content(%)		pH	Residual solid wates(W/W, %)
		Dry	Wet		
Landfilled solid wastes(avg.)	23.7	5.58	23.6	7.51	11.9
Soil	13.7	1.93	14.2	7.17	-

4.3 지하수의 오염가능성 평가

지반분야의 현장조사 결과로 대상지역내에 지하수층이 존재함을 확인할 수

있었다. 따라서 매립된 쓰레기로 인한 지하수의 오염가능성을 검토하기 위하여 매립쓰레기중의 오염물질의 함유량을 분석하고 우리나라의 폐기물 공정 시험법에 따른 용출실험과 미국 환경청(U.S.EPA)에서 규정하는 EP TEST를 실시하여 단기적인 용출조건에 따른 오염물질의 용출여부와 매립된 폐기물의 유해성 여부를 검토하였다.

표 9에서 알 수 있듯이 KOEP 및 EPT 용출실험결과 유해성의 기준이 되는 수치는 기본적으로 만족시키고 있으므로 최소한 기준 매립되었던 폐기물이 유해 폐기물이 아님을 간접적으로 판단할 수 있다. 또한 우리나라에서는 지하수 오염지표가 아직 없으나 미국의 경우 음용수 수질기준의 10배를 지하수 오염지표로 하고 있으므로 우리나라의 음용수 수질기준의 10배치와 용출실험 결과를 비교한 결과 양호한 것으로 나타나고 있다.

Table 9. The result of leaching test

(Unit : mg/l)

Samples		Items	Cd	Pb	Cu	Zn	Cr ⁶⁺	Fe	Hg	TCE	PCE
Soil	KOEP		ND	0.0150	ND	ND	ND	0.1021	ND	ND	ND
	EPT		ND	0.0239	ND	0.0746	ND	0.7067	ND	ND	ND
Landfilled solid wastes	KOEP		0.0005	0.0560	0.0107	0.0027	0.0016	0.0763	ND	ND	ND
	EPT		0.0013	0.0573	0.0064	0.0195	ND	0.1909	ND	ND	ND
Standard of underground water	Korea		0.1	1.0	-	10	0.5	3.0	ND	-	-
	U.S.A		0.1	0.5	-	50	0.5	3.0	0.02	-	-
	U.S.A		0.1	0.5	-	50	0.5	3.0	0.02	-	-

* Standard of underground water = 10 × (standard of drinking water)

현장의 쓰레기층은 재매립연한이 약 1년 정도로 알려져 있고 각 지점의 pH 측정결과 7.2~7.7 정도로 안정화되어 있으며, 호기성 내지 통기성 (facultative) 조건인 것으로 판단되나 장차 국부적인 노출지역이 완전히 복토되고 공기의 유통이 차단되어 혐기성 조건이 형성될 경우 미생물에 의한 유기산 생성으로 pH가 내려가고 상당량의 침출수가 발생되며 매립쓰레기내의 중금속이 용출될 것으로 예상된다. 용출실험결과에 의하면 pH 5~6인 조건에서 용

출능력이 큰 중금속은 Cd, Pb 등이며 1970년~1980년까지의 기간중 폐기물내의 연탄재 함량이 75~85% 가량되는 것으로 나타나고 있어 연탄재에 의한 매립쓰레기층 내의 중금속 흡착능력이 고려될 수 있으나 장기적이고 구체적인 평가는 현장내에 지하수의 수위 및 수질을 계속적으로 관측하고 현장에서 매립쓰레기층의 분해반응추이등을 관찰함으로써 내려질 수 있을 것이다.

4.4 잔류 유기물의 분해 및 가스발생 가능성 실험

대상지역의 매립쓰레기 중에는 약 5%(습량기준) 정도의 잔류유기물이 존재하고 있으며, 이러한 유기물은 혐기성 또는 호기성으로 분해될 가능성이 있다. 따라서 이에 대한 검토를 위해 간단한 실험장치를 제작하여 분해 실험을 실시하였다.

잔류 유기물의 혐기성 분해 실험을 실시한 결과, 가스발생은 전혀 없는 것으로 측정되었으나, 실험기간이 짧았기 때문에 잔류 유기물 분해실험의 경우 상당히 오랜기간을 수행하여야 적절한 자료를 얻을 수 있을 것으로 보인다. 현재까지의 측정결과를 보면 중균제의 주입이 없는 자연상태에서는 혐기성 분해가 쉽게 일어나지 않는 것으로 판단되며, 잔류하는 유기물질의 대부분이 중위급 분해성 및 난분해성 유기물임을 입증하는 것으로 사료된다.

매립쓰레기내에 존재하는 유기물질의 생물학적 분해가능성을 추정할 수 있는 다른 방법으로는 생화학적 메탄 생성 가능성(Biochemical Methane Potential) 실험을 들 수 있으며, 혐기성 분해의 최적 조건을 유지시키면서 각각의 폐기물에 대한 가스 생성량을 측정하고 혐기성 분해가 저해되는 독성 유무를 판단하기 위해서 수행된다.

가스발생 실험에서는 반응조 내부의 반응조건이 안정화되어 가스가 발생하기까지 약 3일 정도가 소요되었으며, 발생하는 가스의 성상은 간이 분석한 결과 대부분이 CO₂임을 알수 있었으며, 점차 CH₄의 함량이 증가되는 경향을 나타냈다. 가스발생실험에 있어서는 반응조내의 유기물질이 완전히 분해되어 발생하는 가스의 총량이 일정해질 때까지 관찰하여야 하는데 현재까지 관찰된 기간내에서는 충분한 유기물 분해가 이루어졌다고 볼 수 없어 지속적인 실험이 요구되었다.

잔류 유기물의 분해실험과 가스 발생실험을 통해서 나타난 결과로 볼 때 장기적인 관점에서의 가스발생 가능성이 충분히 있는 것으로 사료되며 따라서 현

재 매립된 지역내에서의 발생 가스의 적절한 확산이 요구되며 토지이용계획에 따라 농수산물 도매시장이 건설될 경우 각 건축물에 가스의 배기가 용이하도록 배기관을 시설하고 각종 관거에 있어서도 발생된 가스의 침투를 방지하기 위해 기밀성을 유지해야 할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 건설부지 조성을 위한 일반폐기물의 사용이 지반 및 생활 환경에 미치는 영향을 검토하였다. 지반분야에서는 현장 및 실내실험을 통하여 본 대상 폐기물 포설지반의 역학적 특성과 투수 및 침하 특성을 규명하여 폐기물 매립지반의 건설지반으로 사용을 위한 타당성을 검토하였다. 환경분야에서는 매설 폐기물의 용출실험, 함유량실험, 가스발생 실험 등을 수행하였고 용출수에 대한 간이 생물반응 실험도 추가하여 부지 및 주위 환경에의 영향을 검토하였다.

주요 연구 결과는 다음과 같다.

- (1) 본 조사 대상 지역의 기본 물성 시험결과 현장폐기물의 밀도가 0.95 ~ 1.42 g/cm³으로 일반 흙보다는 밀도면에서 충실하지 못하나 쓰레기 자체의 밀도로는 잘 다짐된 경우의 값에 해당되어지며 쓰레기 지반은 SM으로 분류되고 입도분포는 매우 양호한 것으로 나타났다.
- (2) 본 지반의 투수계수는 쓰레기지반은 2.1x10⁻⁵~2.6x10⁻⁴ cm/sec, 복토층은 1.3x10⁻²~4.0x10⁻⁵ cm/sec, 원지반은 1x10⁻³ cm/sec 정도이다. 지하수층은 복토된 표면으로부터 5~6m 하부에 위치하고 있으며, 쓰레기 매립층으로부터는 0.5~1m 하부에 놓여 있는 것으로 나타나 강우, 강설등으로 인해 폐기물 층으로부터 원지반으로 침투가 일어날 경우에 대비 침출수로 인한 지하수층의 오염가능성에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.
- (3) 현장 폐기물 지반의 현장 강도 측정 결과 평균 N치가 12.2정도로서 복토

층의 평균 N치 10과 거의 유사하게 나타나고 있으며 실내 전단 시험 결과 내부마찰각은 $32^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 로서 중간에서 조밀한 사질토와 비슷한 값을 나타내고 있다.

- (4) 본 쓰레기 매립지반의 침하 특성은 본 지반이 포설된 지반이고 부패로 인한 침하량 산정식이 외국 쓰레기 성분을 기준으로 제안된 것이어서 한계성이 있기는 하지만 실내 압밀시험 및 Sowers의 부패 침하량 산정식을 이용 계산한 본 대상지반의 전체 침하량은 최소 4.5cm, 최대 20.1cm, 평균 12.6cm로서 매립층 평균 두께 2.26m의 5.6%에 해당된다.
- (5) 실내 압밀 시험과 Sowers 제안식을 이용해 구한 본 지반의 침하특성은 연약 점토의 침하특성에 비해서는 좋은 특성을 가지고 있으나 양호한 지반은 아닌 것으로 나타나고 있다. 따라서 본 지반에 구조물을 건설 할 경우에는 건물기초가 세워질 부지 중 폐기물이 매립된 부분에 대해서는 폐기물을 치환하거나 동다짐, 약액주입을 실시하거나 또는 깊은 기초로서 시공함이 좋을 것으로 사료된다.

또한, 본 침하가 부등침하로 나타날 경우에는 장기적으로 보아 상하수도관, 가스관 등 배관설비(utility line)의 파괴 또는 성능 저하를 가져올 수 있는 것으로 보인다. 따라서 배관설비 관로에 연성 조인트(flexible joint), 신축관등을 설치하거나 관로 기초하부에 말뚝 또는 철근 콘크리트베딩으로 보강하여 부등침하에 대비하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

- (6) 본 지반에 대한 보다 정확한 침하량 추정을 위해서는 쓰레기층에 대한 깊이별 침하판을 설치하여 시간 경과에 따른 침하량을 직접 실측하여 현 지반의 관리에 참고하는 것이 좋을 것으로 보인다.
- (7) 폐기물 매립쓰레기내에는 비닐류, 플라스틱류, 고무, 가죽, 나무 및 유리 등 난분해성 물질내지는 분해 불가능한 폐기물의 함량은 평균 11.9% 정도로 나타났으며, 이외의 특별한 폐기물은 식별되지 않았다.
- (8) 폐기물 매립쓰레기 내의 중금속 함량과 오염물질의 용출특성을 분석한 결과 용출농도는 특정폐기물 기준 이하로 현단계에서 특별한 유해성을

발견할 수 없었다. 중금속 함량의 경우에는 일반폐기물중의 함량과 비교할 때는 약간 높거나 비슷한 수준이었지만 일반토양 보다는 약 6배 Pb, Cd, Cu, Zn 함량을 나타내었다.

- (9) 특정폐기물 검사항목중 유해유기물로 지정되어 있는 트리클로로에틸렌 (TCE)과 테트라클로로에틸렌(PCE)은 검출되지 않았다. 따라서 위의 (8) 과 종합하여 볼 때 원래의 매립쓰레기는 대부분이 일반폐기물이었다고 판단된다.
- (10) 침출수로 인한 지하수 오염의 가능성이 존재하는 것으로 판단된다. 따라서 부지의 이용시에는 지면으로부터 우수의 침투를 최소화하도록 차수재료를 사용하여 포장을 하는 것이 바람직하며 지하수는 사용하지 않도록 한다. 본과업의 연구기간이 2개월로 짧아 포괄적인 판단에 어려움이 있다. 다만, 현시점에서 예상할 수 없는 상황에 대비하여 2~3년간 간단한 지하수 모니터링 시설을 설치·운영하여 만일의 오염시에 처리가능하도록 대비함이 권장된다.
- (11) 매립쓰레기내에 잔류유기물의 분해가능성 실험 결과 약 25일간 자연조건에서 수행된 혐기성 분해 실험에서 별다른 유기물의 분해나 가스의 발생이 관찰되지 않았다. 종균제를 투여하여 혐기성 분해를 촉진시킨 생화학적 메탄발생 실험에서도 매립 폐기물을 주입한 반응조와 Control 반응조 사이에 커다란 차이없이 매립초기에 통상적으로 볼 수 있는 CO₂ 가스의 발생이 주로 측정되었다. 다만, 매립폐기물 분석에서 나타난 잔류유기물 함량이 아직 높아 가스발생의 잠재력은 배제할 수 없다. 따라서 본지반에 구조물을 설치할 때에는 가스발생가능성에 대한 고려가 필요하다. 메탄가스의 이동, 침투 및 축적을 방지하기 위하여 가스 확산공을 부지에 곁고루 설치하는 등의 조치가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설부, 극한강도설계법에 의한 철근콘크리트구조 기준, 1992. 10.
2. 김정대, 남궁완, 용출시험방법이 폐기물 용출특성에 미치는 영향, 한국폐기물학회지, 제 9권 제 2호, 1992. 10.
3. 대한건축학회, 건축텍스트북 편집위원회, 건축텍스트북, 1985. 10.
4. 대한주택공사, 서울 상계지구 연약지반 개량방안 용역 보고서 1986.7.
5. 이승무, 홍지형, 유지창, 서울특별시 구의동 매립지에서의 발생가스 및 안전도 조사연구, 한국폐기물학회지, 제 5권 제 2호, 1988.
6. 최의소, 이정전, 도시폐기물로부터 Biogas 생산에 관한 기초적 연구, 대한토목학회지, 제 7권 제 4호, 1987. 12.
7. 한국건설기술연구원, 도시폐기물 매립장의 건설부지 활용과 위생매립시스템에 관한 연구, 최종보고서, 1992.12.
8. 한국과학재단, 매립지(LFG) 추출 이용기술 개발에 관한 기초연구(I), 1990. 6.
9. California Waste Management Board, "Procedural Guidance Manual for Sanitary Landfills", Vol. I; Landfill Leachate Monitoring and Control Systems, 1989.
10. Bowles, J.E., "Physical and Geotechnical Properties of Soils", McGraw Hill, pp. 212.
11. Oweis, I.S. and R.P. Khera, "Geotechnology of Waste Management", Butterworths, pp. 171~174, 1990.
12. Sharma H.D., M.T.Dukes, and D.M. Olsen, "Field Measurements of Dynamic Moduli and Poisson's Ratios of Refuse and Underlying Soils at a Landfill Site", ASTM Special Technical Publication, pp. 57~70, 1990.
13. Owen, W. F., D. C. Stuckey, J. B. Healy, L.Y. Young and P. L. McCarty, "Bioassay for Monitoring Biochemical Methane Potential and Anaerobic Toxicity", Water Research, Vol. 13, pp. 485-492, 1974.
14. Sowers, G. F., "Settlement of Waste Disposal Fills", Proceedings, The

Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol.2.2, PP.207-210, 1973.

15. Wilson, D. G., "Handbook of Solid Waste Management", Van Nostrand Reinhold Company, 1977.
16. U.S.EPA, "Handbook : Ground Water", EPA/625/6-87/016, Technology Transfer, 1987.
17. Yen, B.C. and B. Scanlon, "Sanitary Landfill Settlement Rates", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT5, pp.475 ~487, 1975.