

사용종료 매립장 오염원의 장기 변화 및 안정성 (Long Term Trend and Stability of Contaminant Sources of Finished Landfill)

동국대학교 토목공학과 지반환경 연구실
장 연 수

Abstract

In order to determine the proper treatment of the finished landfill, it is important to predict the trend and stability of the major sources of contaminant in the landfill. In this paper the fate of contaminant sources in the landfill is studied from various literatures by grouping the contaminants into waste, leachate, and landfill gas. One example site referred is Nanji landfill which is one of the representative finished landfills in our country and the trend of contaminant sources in this landfill at current stage is discussed.

1. 서 론

지난 수십년 동안의 지속적인 경제 발전과 인구증가로 인하여 고형쓰레기 발생량은 지속적으로 증가하여 왔고 이들의 처리는 주로 매립에 의존하여 왔다. 이로 인하여 우리나라에서는 사용이 종료된 매립지의 수가 800여개소로 조사 보고 되고 있으며 이들의 소재파악과 아울러 이들을 국내 실정에 적합하게 관리하기위한 조사 연구도 진행되고 있는 상황이다 (도 갑수 등, 1996).

본 논문에서는 이러한 경향에 맞추어 사용이 종료된 이후의 매립지에 포함된 주요 오염원의 장래 변화를 폐기물, 침출수, 매립가스로 나누어 입수 가능한 국내외 관련 문헌으로 부터 알아 보았다. 이 문헌 조사에는 매립되어 있는 폐기물의 분해 침하 특성 및 이론, 장기적인 안정성과 매립쓰레기로 부터 발생하는 침출수와 가스의 발생량 및 변화를 모사하는 이론들과 이들의 장기적인 변화가 포함되어 있다. 매립지 실패로서 국내 대표적 사용 종료 매립장인 난지도 오염원의 현단계에서의 변화된 경향과 향후를 예측하여 보았다.

에서의 변화된 경향과 향후를 예측하여 보았다.

2. 폐기물의 안정성

2.1 폐기물의 생분해 및 침하에 대한 이론

쓰레기 매립지는 매립장시설 및 운영상태에 따라 투기형 매립지, 개량형 위생매립지, 준호기성 매립지, 호기성 매립지로 구분하고 있다. 이중 난지도 매립장과 같이 차폐시설과 통기 시설이 전혀 없이 쓰레기가 매립되는 초기형의 매립지는 투기형에 속하며 분해기저의 주종은 유기물질이 물과 결합 가수분해되어 메탄가스와 이산화탄소 가스로 분해되는 혐기성 소화분해 기저이다.

혐기성분해는 유기물질이 먼저 유기산화되는 산생성단계와 생성된 산이 메탄가스로 되는 2단계 반응이며 이 두가지 단계의 적정조화가 이루어질 때 분해가 활발히 이루어져 안정화가 촉진된다. 이때 가수분해된 폐기물이 침출수와 매립가스 형태로 주변환경으로 방출되면서 유기 고형 분량이 감소되고 최종산물로 약간의 유기물과 난분해 잔류물이 남게 되며 매립지 침하도 발생하게 된다.

매립지에서 침하를 일으키는 메카니즘에는 다짐 압밀 등 하중 재하로 인한 간극비의 감소로부터 발생하는 역학적 과정과 위에서 언급한 매립 쓰레기의 생분해 부패 등 물리화학적 작용에 의한 과정으로 나눌 수 있다.

역학적 침하는 흙입자 지반에 하중이 가해졌을 때 발생하는 즉시침하와 일차압축으로 토질역학에서 사용되는 즉시침하 및 압밀 침하이론이 적용된다. 물리화학적 침하는 매립쓰레기 자체의 분해 및 부패로 인하여 고형물이 침출수나 가스화되어 시간에 따라 공극비가 늘어나므로 발생하게 된다. 따라서 폐기물 매립장의 일반적인 침하양상은 쓰레기내에 유기물 함유량이 많을수록 침하가 크고 초기에는 폐기물 매립 운용과정에서 다짐 압축 부패 등에 의한 침하가 크게 나타나며 오랜 시간이 경과한 후에도 일정 비율의 침하가 계속 진행되는 현상이 나타난다.

폐기물이 자중에 의하여 침하되는 양은 원쓰레기 두께의 5-30%에 달하며 초기 다짐정도, 쓰레기 성분, 그리고 환경적인 조건, 예를 들어 고온 다습한 환경에서의 큰 침하, 등에 따라 달라지게 된다. 초기의 큰 침하는 쓰레기가 매립된 후 1개월에서 5년 사이에 주로 일어나며 그후 부패와 Creep에 의한 2차 압축은 시간

에 따라 점차 감소되어 간다. 대부분의 2차 압축은 쓰레기 매립후 50년이 경과하면 완료되는 것으로 알려져 있다.

2.2 폐기물 매립지 침하량 산정기법

현장관측을 통한 폐기물 매립지반위 침하량을 산정하는 기법은 1973년 점성토의 압밀이론에 근거한 Sower의 방법이 제시된 이래 Yen and Scanlon(1975), Gibson and Lo, Power Creep 모델(Edil et al., 1990) 등이 제안되었다.

Sower 법

Sower법은 지반공학자들에게 잘 알려져 있는 Terzaghi 의 압밀이론에 기초하고 있어 현재까지 가장 많이 쓰이는 방법이다. 이 방법은 1차 압축(Primary Settlements)와 2차 압축(Secondary Compression)을 계산하기 위하여 다음과 같은 2가지 방정식을 사용한다.

일차 압축:

$$S = H_0 \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{P_0+dP}{P_0} \quad \text{---(1)}$$

여기서, H_0 = 초기층의 두께, e_0 = 초기간극비
 P_0 = 원지반 하중, C_c = 압축지수
 dP = 하중 증가량

매립지반의 압축지수는 그림 1과 같은 초기간극비와 압축지수의 관계로 부터 구하게 되며 대체로 C_c 는 유기물 함량에 따라 초기간극비 e_0 에 0.15에서 0.55 사이의 값을 곱하여 구해지게 된다.

이차압축(침하량과 log 시간과의 관계)

$$S_2 = \alpha \frac{H}{1+e} \log \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad \text{---(2)}$$

여기서, S_2 = 시간 t_1 과 t_2 사이에서 발생하는 침하량
 α = 이차압축지수, H = 간극비 e 상태에서 매립두께

이차압축지수 α 는 간극비의 함수이고 생화학적 부패와 관계가 있으며 그림 2와 같은 관계로 사용한다.

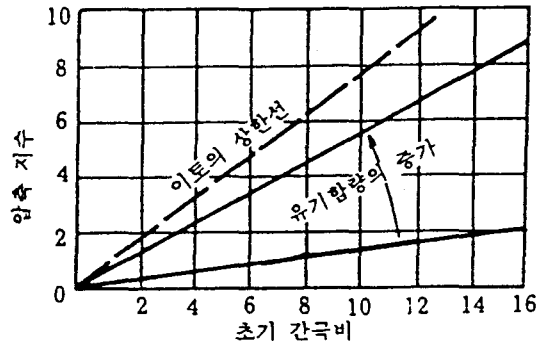


그림 1 초기간극비와 일차압축지수 관계

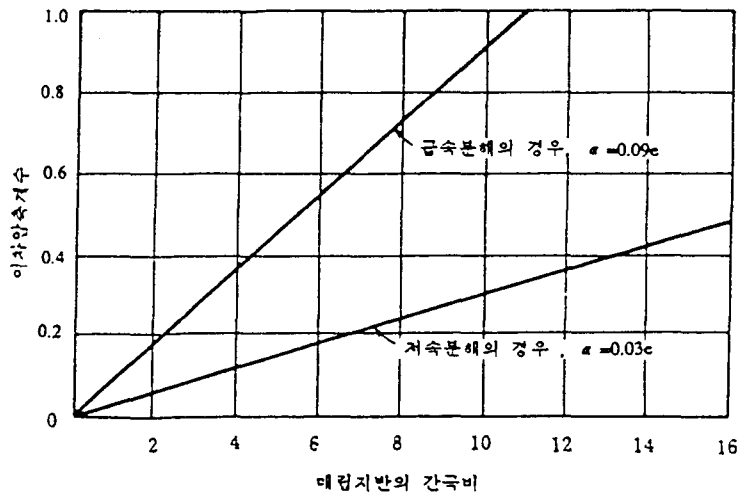


그림 2 매립지반 간극비와 2차 압축지수

Yen and Scanlon 방법(1975)

매립지반의 침하율을 측정하기 위하여 매립깊이 10-40m 범위인 3개의 매립장을 선정하여 매립이 완료된 후 9년동안 매립지반의 침하량을 측정하여 그 측정결과를 분석하였다. 침하율 해석에 있어서 매립기간을 고려하기 위하여 매립칼럼의 중간시기(media age of a fill column)라고 불리우는 수정시간을 다음과 같이 정의 하였다.

$$t_m = t - t_c / 2 \quad \text{-----(3)}$$

여기에서, t_m = 매립칼럼의 중간시기 ; t_c = 매립기간 ;

t = 매립초기부터 매립이 진행되고 있는 시점까지의 총 경과시간

매립완료시의 매립깊이(H_f), 중간 매립시기, 매립기간 그리고 침하율(m)의 상관관계는 다음과 같이 제시하였다. 여기에서 침하율(m)은 관측경과시간(개월)에 대한 관측높이의 변화의 비로 정의 하였다.

$$m = 0.088 - 0.038 t_m \quad (40 \leq H_f \leq 80 \text{ 피트}, 70 \leq t_c \leq 82 \text{ 개월의 경우}) \quad \text{---(4a)}$$

$$m = 0.124 - 0.051 t_m \quad (80 \leq H_f \leq 100 \text{ 피트}, 70 \leq t_c \leq 82 \text{ 개월의 경우}) \quad \text{---(4b)}$$

$$m = 0.142 - 0.060 t_m \quad (100 \text{ 피트} \leq H_f, 70 \leq t_c \leq 82 \text{ 개월의 경우}) \quad \text{-----(4c)}$$

$$m = 0.052 - 0.021 t_m \quad (40 \leq H_f \text{ 피트}, t_c \leq 12 \text{ 개월의 경우}) \quad \text{-----(4d)}$$

위의 관계식은 다음과 같은 일반식으로 표현할 수가 있다.

$$m = a - b \log t_m \quad \text{-----(5)}$$

그림 3에 매립깊이 H_f 에 대한 a 와 b 의 관계곡선을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 침하율 매개변수인 a 와 b 는 H_f 와 선형적인 관계가 있다. 또한 a 와 b 는 매립기간, t_c , 와는 관계가 없는 것으로 나타났는데 이는 침하율에 중간매립시기, t_m , 의 항이 있어 매립기간의 영향이 고려되었기 때문이다. 그림 3으로부터 매개변수 a , b 와 매립깊이의 관계식을 구하면 다음과 같다.

$$a = 0.0015 H_f - 0.0093 \quad (\text{피트/개월}) \quad \text{-----(6a)}$$

$$b = 0.0006 H_f - 0.0019 \quad (\text{피트/개월})$$

$$a = 4.92 \times 10^{-5} H_f - 0.0093 \text{ (피트/개월)} \quad \text{-----(6b)}$$

$$b = 1.97 \times 10^{-5} H_f - 0.0019 \text{ (피트/개월)}$$

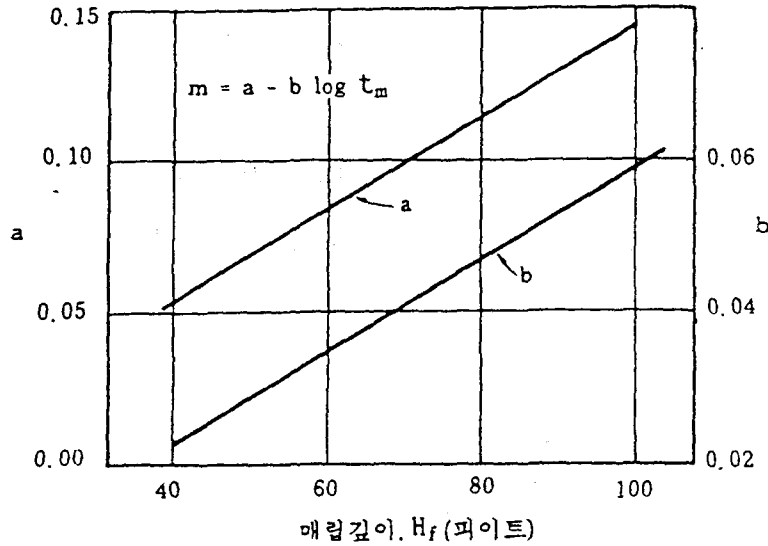


그림 3 매립깊이 H_f 에 대한 a 와 b 의 관계곡선

Gibson and Lo 모델

본 모델은 유동학적 (rheological) 모델로서 그림 4와 같이 쓰레기 매립지반의 침하를 2개의 spring과 dashpot 을 직·병렬로 조합하여 지속적인 유효 응력하의 2차압축 과정을 표현하였다.

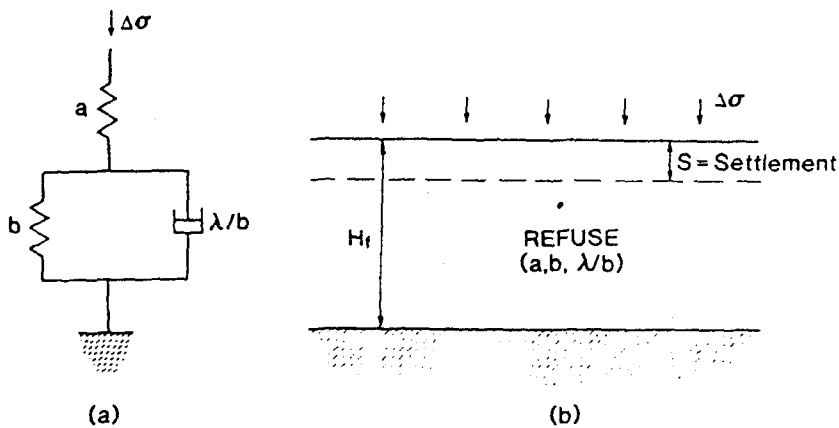


그림 4 폐기물 매립장의 침하량을 모사하는 유동학적 모델(Edil 등, 1990)

지속적하중 $\Delta\sigma$ 는 Newtonian dashpot으로 부터 Hook의 Spring으로 천이된 다음 오랜 시간이 경과한후에는 지속하중 $\Delta\sigma$ 를 2개의 스프링이 받게되는 것을 나타내고 있으며 다음과 같은 관계식으로 표현된다.

$$S(t) = H \Delta\sigma \{ a + b [1 - \exp(-\lambda/bt)] \} \quad \text{---(7)}$$

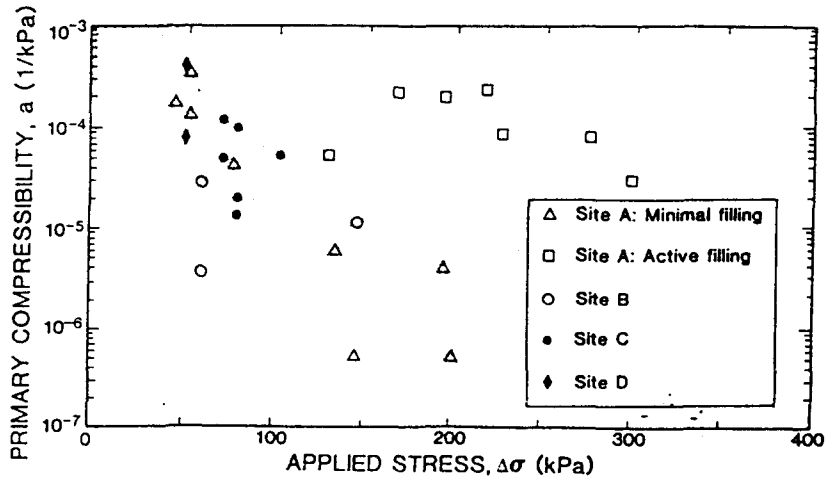
여기서, $S(t)$ = 시간 t 에서의 침하량, H = 폐기물의 초기두께

$\Delta\sigma$ = 상재하중 변화, a = 일차압축변수

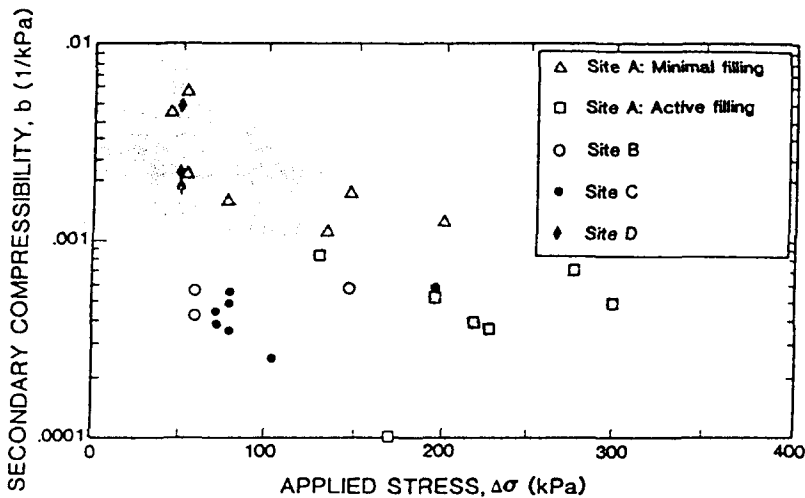
b = 2차 압축변수, λ/b = 2차 압축을

t = 하중작용후 경과시간 이다.

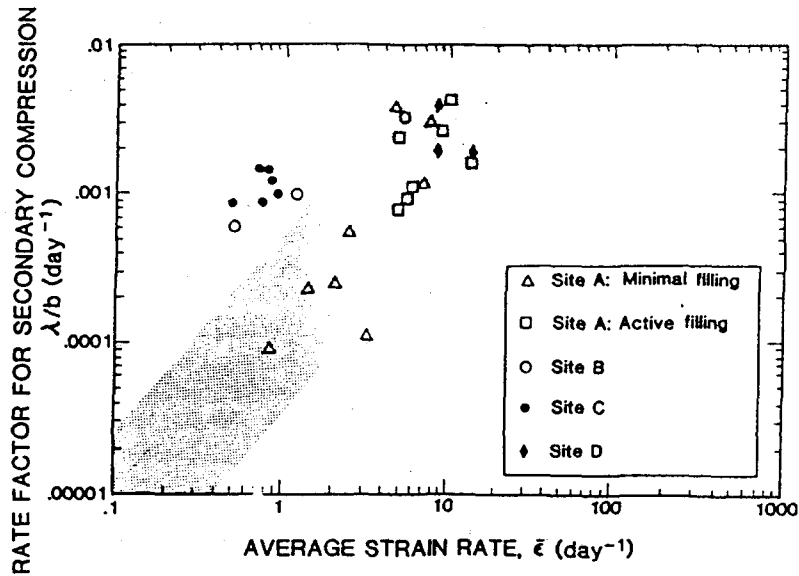
Edil등은 $a, b, \lambda/b$ 에 대한 값을 4개 매립장으로부터 구하여 그림 5 a,b,c와 같이 표현하였다. λ/b 는 0.5-15%/year의 범위에 값이 되는 것으로 나타났다.



a) 작용하중에 대한 일차압축지수(a)



b) 작용하중에 대한 2차 압축지수(b)



c) 평균변화율에 대한 2차 압축변화율(λ/b)

그림 5 Gibson and Lo 유동학 모델에 적용되는 매개변수 a , b , λ/b 의 산출 예 (Sharma and Lewis, 1994; Edil 등, 1990)

Power Creep 법

본 법칙은 많은 공학재료의 천이적인 Creep거동을 추정하는 방법으로 다음과 같이 표현된다.

$$S_{(t)} = H \Delta\sigma m \left(\frac{t}{t_r}\right)^n \quad \text{-----}(8)$$

여기서, $S_{(t)}$ = 시간 t 에서의 침하량

m = 기준 압축지수

n = 압축율(rate of compression)

t = 1일, 1년 등의 시간항을 무차원으로 하기위한 기준 시간

t_r = 하중 작용 후 경과 시간

Edil 등(1990)이 구한 앞의 4개 매립장으로부터 구한 m 값은 평균 $2.5 \times 10^{-5}/\text{kpa}$ 이 있으며 오래된 매립장의 경우($3.4 \times 10^{-5}/\text{kpa}$)가 갓 매립된 매립장($2.0 \times 10^{-5}/\text{kpa}$)의 경우보다 1.7배 정도 큰 값으로 나타났다. 압축율, n , 은 평균값이 0.65이었으며 오래된 매립지에서 0.37, 젊은 매립지에서 1.7로 대부분 그 사이의 범위에 있는 것으로 나타났다.

2.3 난지도 매립장 쓰레기의 특성

(1) 난지도 쓰레기의 물리적 조성

난지도 매립장은 매립 완료후 상당한 기간이 경과되어 분해 용이한 유기물인 음식물 폐기물은 모두 분해되어 나타나지 않고 있다. 표 1은 기본계획을 위한 조사(서울특별시, 1994)시 작성한 폐기물의 물리적 조성을 보인 것인데 음식물 쓰레기는 전 지점에서 나타나지 않고 가연성시료 대부분은 비닐, 플라스틱으로 나타났다. 가장 많은 성분은 토사로 전체의 42.53%, 그다음은 돌 도자기 성분이었다.

매립지내 폐기물층의 토성시험 결과 유기물 층의 입도분포는 시험대상 유기물 시료의 경우 균등계수 $Cu=4-30$, 유효입경 $De=0.3-1.3mm$ 의 범위로 나타나 조사위치에 따라 다소 차이가 있는 것으로 나타났으며, 입도분포는 시료에 따라 빈입도(Poorly Graded)와 양입도(Well Graded)를 나타냄을 알 수 있다. 유기물 시료의 경우 No. 200체를 통과하는 세립분의 양은 모두 3% 미만으로 나타났으며 통일분류법에 의해 분류하면 SW, SP로 분류될 수 있다.

자연함수비는 시료채취위치에 따라 상이하나 대체로 50%이내에 분포하고 있음을 알 수 있었으며 비중은 형질, 비닐, 나무조각의 함량이 많을수록 비중은 감소하는 경향을 보였다.

시료에 포함된 유기물의 함량을 대략 알아볼 수 있는 지표인 유기물 함량과 비중과의 관계를 보면 유기물 함량이 30%이상인 시료의 경우 거의 2.0이하의 비중을 나타내고 있으며, 전체적으로 유기물층의 비중은 2.14-2.70의 범위로서, 조사 대상 유기물의 경우 우리나라에 많이 분포하는 화강풍화토의 비중 2.6-2.8 보다 약간 작은 것으로 평가되었다.

채취시료에 대한 유기물함량을 노건조로 강열 감량시켜 구한 결과 채취 위치에 따라 다양한 분포를 보이고 있으며 분포범위는 2.8-24.5%로 나타나 유기물 함량은 적은 것으로 나타난다. 매립쓰레기에 대한 현장들 밀도 시험결과는 1.27-1.80t/m³ 사이에 분포하고 분산정도가 매우 큰 것으로 나타나고 있다.

2) 난지도 폐기물의 압축특성

난지도 폐기물에 대한 실내압밀시험을 실시하여 e-log t 곡선을 도시해 본 결과

표 1 채취지점 및 매립깊이에 따른 폐기물의 물리적 조성(습량기준임)

채취지점	가 연 성								불 연 성						비고	
	심도(m)	음식물	종이	비닐플라스틱	섬유	목재	가죽류	기타	트사	유리	돌돌자기	철금속	비철금속	기타		
IB	1	10	0	0	7.20	0	0	1.00	0	37.53	0	54.26	0	0	0	産業廢棄物集中埋立地域
		17-17.5	0	0	16.76	0	0	0	0	76.52	0	6.71	0	0	0	
		26	0	0	2.96	0	1.32	0	0	57.35	0	38.37	0	0	0	
	2	8-11	0	7.67	35.39	16.83	18.26	0	13.76	2.1	1.36	0.96	2.65	0	0	
		18.5-20	0	19.33	13.20	5.07	4.48	1.39	0	16.53	0.78	4.51	6.15	0.15	28.4	
		26-28	0	11.87	24.47	1.43	11.40	0	5.7	2.29	2.85	10.36	20.74	0.86	5.03	
	3	12.5-14	0	7.17	8.96	38.92	20.14	4.59	10.82	0	0.24	8.84	0	-	0.31	
		18.5-20	0	0.56	1.38	0	5.15	0	0	91.34	0	1.55	0	-	0	
		25-27	0	0	2.13	0	1.06	0	0	86.36	0	8.92	0	1.06	0	
	4	9.5-10.5	0	0.84	13.14	2.84	9.50	0.17	0	40.95	4.96	3.71	0.01	1.53	22.3	
		19-20	0	0	6.67	0	9.35	0	0	31.33	0	46.63	6.02	0	3	
		22-23	0	0.49	33.86	0.08	13.34	0.45	0.25	26.79	1.33	11.28	12.25	0.09	0	
5	112	0	48.67	19.58	7.26	1.90	0	0	17.86	0	0	0.31	4.41	0		
	15-16	0	3.13	24.69	54.66	2.32	13.53	0.8	0	0.07	0.49	0.19	0.09	0		
	19-19.5	0	3.89	11.19	9.87	6.95	0.66	0.29	54.58	3.76	1.91	1.01	0	5.87		
GAS공 (GE)	0-5	0	0	0.31	0.94	5.91	0	0	50.38	0	42.45	0	0	0		
	5-10	0	2.80	0.89	0.39	0.93	0	0	72.06	0.13	22.79	0	0	0		
	10-15	0	2.08	27.83	18.55	17.97	0.92	0	26.85	0.22	3.44	2.12	0	0		
	15-20	0	10.28	80.62	9.10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
	20-25	0	1.58	69.24	5.09	19.75	0	0	0	0	0	4.35	0	0		
	25-30	0	0	0.13	0	0	0	0	95.00	0	4.87	0	0	0		
	30-35	0	0	0.17	0	0	0	0	76.91	0	22.92	0	0	0		
	35-40	0	0	1.95	0	5.24	0	0	58.25	0	34.57	0	0	0		
	40-45	0	0	0	0	0.64	0	0	49.75	0	49.61	0	0	0		
SL	1	25+27.5	0	1.94	42.79	39.93	2.10	0.82	0	0	0	12.87	0	0		
	2	24+27	0	9.11	25.10	31.28	0.19	10.53	0	0	0	23.79	-	0		0
	3	13.5+19	0	11.20	6.24	2.90	7.81	0	0	66.63	0	2.07	3.14	0		0
	4	13.5+30	0	1.74	11.74	10.59	26.27	0.66	0	0	0	48.99	-	0		0
	5	12+16.5	0	0.66	7.98	1.66	9.13	0	0	53.39	0	22.00	5.19	0		0
	6	9+28.5	0	0.66	0.92	0	7.32	0	0	57.24	0	33.39	1.12	0		0
S	13	3+21	0	3.20	16.83	1.25	0.07	-	-	47.65	0	30.99	0	0	0	
	14	5+25	0	0	47.83	8.74	14.62	-	-	0	0	27.13	1.68	0	0	
MPI	10	0	0.24	1.86	1.01	0.29	0	0	89.86	0	5.54	1.21	0	0		
	20	0	6.56	37.33	6.18	5.59	0	31.73	12.61	0	0	0	0	0		
	30	0	0.85	21.09	6.32	8.06	0	44.93	15.64	0.56	0	0	2.55	0		
	40	0	0	0.21	0	0.19	0	0	78.08	0	21.52	0	0	0		
	50	0	0	2.99	0.17	0.73	0	0	70.88	1.66	23.57	0	0	0		
SE	1	70	0	0	7.72	4.20	1.30	0	0	75.68	0	10.19	0.91	0	0	
		30	0	0	3.96	6.77	0.65	0	0	75.31	0	13.30	0	0	0	
	2	40	0	0	0.12	0.23	0.66	0	0	81.97	0	16.95	0.07	0	0	
		50	0	0	5.86	1.54	2.15	0	23.10	47.98	0	17.40	1.98	0	0	
평균치	-	0	3.28	15.69	7.17	5.92	0.85	3.20	42.53	0.44	16.49	2.05	0.26	1.58		

흡과는 달리 초기 압축효과 거의 없이 하중단계별 초기 공극비에서 빠른 시간내에 1차 압밀이 완료되고 이차압축 특성인 일정한 비율의 공극비 변화가 나타난다. 각 시료의 압축 및 팽창지수에 대한 조사에서는 유기물 함량이 큰 시료일수록 압축지수와 팽창지수의 값이 큰 것으로 나타나 일반적으로 알려진 유기물 함량이 큰 지반의 침하정도가 크다는 인식을 뒷바침하고 있다.

2.4 난지도 매립지의 침하특성과 예측

서울시 기본 조사계획시 매립지에 총 40개소의 침하판을 설치 203일간에 걸쳐 침하량을 측정한 결과 매립지반의 비균질성으로 인하여 위치에 따라 150mm-1,470mm 정도로 심한 기복을 나타냄을 알 수 있었다.

또한 현장계측 결과를 토대로 Gibson and Lo 모델과 Power Creep Law, Yen and Scanlon 방법에 의해 장기침하량을 예측하였는데 Gibson and Low 모델의 경우 현장계측 침하량에 대한 변형을 증분의 대수량, $\log(d\epsilon/dt)$ 과 시간, t 의 관계에서는 선형적인 관계가 전혀 성립되지 않았으며 다른 침하판에서 측정된 경우에서도 마찬가지로 매우 불규칙한 관계를 나타내므로 Gibson and Lo 모델을 사용하여 현재 관측된 침하로부터 장기침하량을 예측하는 것은 곤란한 것으로 나타났다.

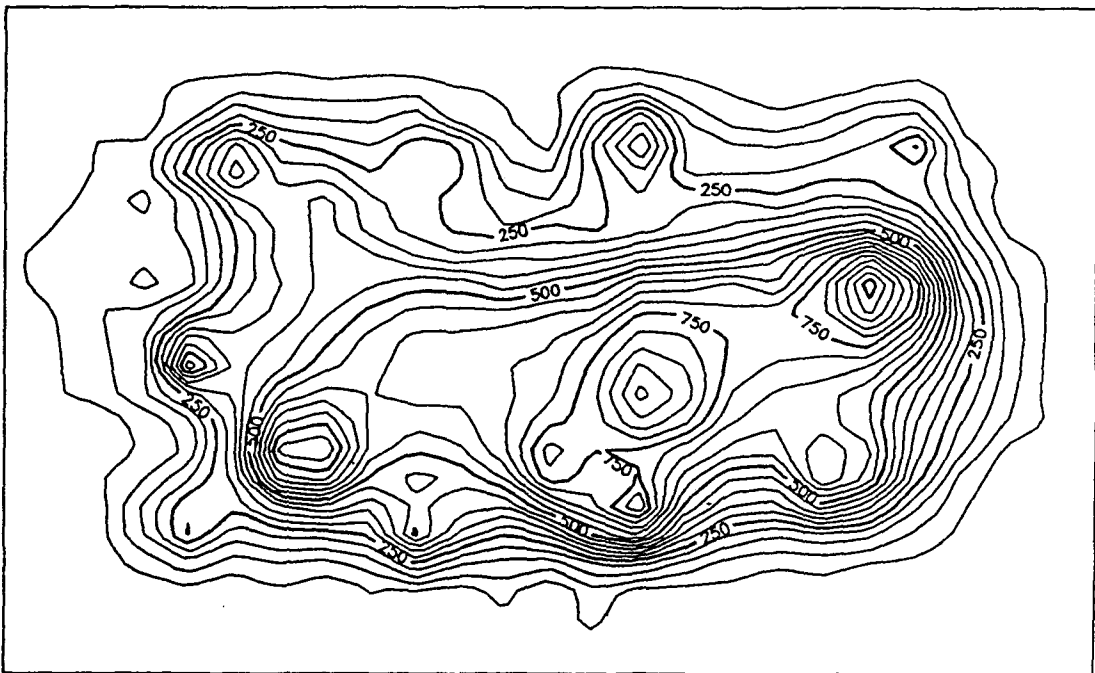
Yen and Scanlon식에 의해 산정된 예측 침하량이 계측 초기시점인 현재까지의 계측 결과와는 비교적 일치된 경향을 나타내고 있어, 단기적으로는 제시된 곡선 형태를 따르리라고 예상되나 장기적으로는 일치하지 않을 가능성도 있으므로 향후 시간경과에 따라 예측침하량이 일치되지 않고 계속 증가되는 부분은 현장 계측결과가 축적되면 이를 바탕으로 Yen and Scanlon 수정식을 재도출하여 장기예상 침하량을 재산정하는 것이 필요한 것으로 나타났다.

Power Creep Law의 경우 지반조사 보고서에 나타난 바와 같이 현장 계측치에 대한 변형율의 대수량, $\log \epsilon$ 과 시간의 대수량 $\log t$ 와의 관계로부터 비교적 정확한 직선 근사식을 얻을 수 있었다.

계측 결과 나타난 제1, 2매립지에 대한 침하분포곡선을 그림 6 a,b와 같이 도시하였는데 제1매립지의 경우 산업폐기물이 집중적으로 매립되었을 것으로 판단되는



(a) 제1매립지 침하



(b) 제2매립지 침하

그림 6 침하관계측을 이용한 난지도 매립지의 침하량 분포(203일 누계)

지점의 부등 침하가 1000mm이상의 큰 값을 보이고 있으며 제방과 인접 외곽도로 부근의 침하는 150-300mm 정도인 것으로 나타난다. 제2매립지의 경우는 폐기물이 매립된 구간별로 중앙부에 침하가 집중되는 경향을 보이고 외곽부는 250mm정도이며 지점별로 불규칙한 양상을 나타내고 있었다.

2.5 향후 난지도 매립지 침하경향

서울특별시 기본계획(1994)이 수립될 때까지도 일차압축과 Active한 상부 유기성 폐기물의 부패가 진행되고 있어 200일동안 1 m이상의 큰 침하가 나타나는 곳이 있었으며 매립된 폐기물의 유기물과 수분 함유 정도에 따라 지점별로 큰 차이를 보였다. 앞으로도 수년간은 이러한 침하의 경향이 계속될 것으로 보이며 함수비가 많은 산업 sludge가 매립된 곳의 일차 압축 침하와 매립지 상부의 90년대 초에 매립된 유기물 함유량이 많은 부분의 부패침하가 주종을 이룰 것으로 보인다. 그림 6에 나타난 바와 같이 사면안정을 위해 토사와 쇄석을 많이 섞어 매립하고 사면부로 누출이 많아 수분 함유 정도가 적을 것으로 예상되는 제체 및 외곽 도로부의 침하는 적은 반면 중앙부의 침하가 커서 1, 2매립지 모두 오목한 렌즈 형태를 이룰 것으로 예상되며 산업폐기물과 유기성폐기물의 매립정도에 따라 지점별로는 불규칙한 양상을 띄울 것으로 보인다.

3. 침출수

3.1.1 매립장에서의 침출수 발생량과 성상 추정

쓰레기 매립지에서 발생하는 침출수의 양과 성상은 매립지마다 다르며 동일 매립지내에서도 시간에 따라 변화한다. 침출수의 이러한 변화는 쓰레기의 성상, 매립 경과시간, 강우 침투량, 쓰레기에 포함된 수분함량 및 쓰레기 압축정도 등 많은 인자에 의해 영향 받는다.

이러한 영향요소를 침출수 발생량과 침출수 수질로 나누어 검토하여 보았다.

(1) 침출수 발생량

매립지에서 생성되는 침출수량의 예측은 물수지에 관계되는 인자인

- 강수량 (P, Precipitation)
- 증발산량 (ET, Evapo-transpiration)
- 표면유출량 (R/O, Overland and Channel Surface Runoff)
- 저수량 (ΔS , Interception and Depression Storage)

에 의하여 표현되며 매립층으로 침투되어 침출수화되는 누수량(PERC Percolation)을 기준한 물수지식은 아래와 같다.

$$PERC = P - (ET + \Delta S + R/O) \quad \text{--- (3.1)}$$

상기식은 매립장의 물수지를 가장 간략하게 표현하였으므로 외부에서 표면수 및 지하수 유입, 쓰레기층의 함수능력 변화, 침출수의 매립지내 재순환 등의 요소는 감안하지 않았다.

매립지에서 발생하는 침출수량의 예측은 초기에는 위와 같은 간단한 물수지식을 사용 하였으나, 이후 강우수치 해석모델(Rainfall Simulator Model), 물수지 수치 해석모델(Water Balance Model) 등의 컴퓨터 수치해석 모델이 개발되었다.

강우 수치해석 모델은 물수지 수치해석 모델의 전단계에 발표된 방식으로 식 (9) 와 같이 누수량 (PERC, gal/ft²)을 강우량 (R, inch), 표면 경사(s, %) 복토층의 함수비(M, %) 및 흙의 밀도(D, lbs/ft³)를 독립변수로 하여 회귀방식으로 풀게 된다(신만호 등, 1993).

$$PERC = 3.50 (R-0.3)^{-0.126} (S)^{0.160} (M)^{0.619} (D)^{-2.143} \quad \text{--- (9)}$$

물수지 수치해석 모델은 여러층의 쓰레기층과 배수층, 차수층, 커버등 매립지의 현장조건을 입력할수 있는 모델로서 대표적인 프로그램은 HELP(Hydrological Evaluation of Landfill Performance) 모델이 있다. HELP 모델은 매립지의 수직 및 수평으로 흐르는 물수지 이동을 모사할 수 있는 유사 2 D 모델(quasi-2D

model)로서 기후, 토질 그리고 해석하고자 하는 매립지 설계 입력 자료를 받아들여서 표면 저류, 침투, 초목성장, 증발, 토질 수분 저장, 수평 지하 배수, 침출수 재순환, 불포화 수직 배수 그리고 흩이나 매립장의 고무 차수막을 통한 물의 이동을 계산하여 사용자가 원하는 매립장 내외로 집배수되는 물의 양, 라이너 누수량, 표면 유출량 등을 얻게 하여 준다.

대체로 강우수치 해석 모델에 비하여 물수치 해석 모델이 많은 상관인자를 감안할 수 있어 자연상태의 발생량 예측이 정확한 대신 해석 모델의 상관인자에 대한 정확한 현장조사가 충족되어야 한다. HELP 모델과 같이 외국에서 개발된 모델의 국내 적용을 위해서는 입력변수들에 대한 검증 및 추가 연구가 필요하다.

이외에도 침출수 발생량 예측을 위해 경험적 수치가 제시되기도 하는데 예를 들어 복토가 없을 경우 0.7-1.0mm/day, 복토가 양호하게 포설될 경우 0.05mm/day 정도로 남궁(1992)은 제시하였고 Bagchi(1990)는 강수량의 20-30%를 침출수 발생량으로 제시하고 있다.

3.2 침출수 수질

매립지에서 발생하는 침출수의 수질은 매립지의 경과 변수에 가장 큰 영향을 받는데 수질에 변화를 주는 주요 인자는 다음과 같다.

- 매립된 쓰레기의 특성(Nature of the Waste)
- 매립 경과 년수에 따른 쓰레기의 분해 정도(Age of Fill and the Degree of Solid Waste Stabilization)
- 강우량과 침투량(Amount of Precipitation and Infiltration)
- 쓰레기의 다짐도(Degree of Compaction)
- 쓰레기의 함수비(Moisture Content of Waste)
- 미매립지역의 영향 유무(Influence of Unfilled Areas on the System)
- 복토재의 토질 조건(Porosity, Permeability and Adsorption Characteristics of Cover Soil)

일반 생활 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수 수질 검토 항목중 오염잠재 능력이 가장 큰 항목은 유기물질이며 BOD와 COD로 표시된다. 매립후 시간이 경과함에 따라 생물학적으로 분해가 용이한 BOD는 빠르게 줄어들고 난분해성 유기물에 의한 COD가 상대적으로 증가하게 된다. 그림 7에는 매립경과 연수에 따른 침출수의 이러한 변화 특성을 COD/TOC, BOD/COD, pH의 변화로 보인 것인데 시간 경과에 따른 COD/TOC의 변화와 BOD/COD변화를 비교하면 COD의 시간에 따른 감소가 BOD보다 매우 작음을 보여준다.

매립장내의 pH는 매립후 초기 5년이 경과하기 이전에는 acetic acid가 많이 발생하여 산성을 띄는 것으로 나타난다. 또한 COD/TOC 비는 매립 초기에 거의 2.5-3.5 범위에 있고 전형적으로는 3정도를 나타내며 매립기간이 10년정도 경과하면 1.0-2.5 (평균 2.0)의 범위로 떨어진다. 초기의 BOD/COD 비는 0.5-0.75의 범위에 있으나 매립기간이 10년정도 지나게 되면 BOD/COD 비는 0.2 미만으로 떨어지게 된다. VS/FS 비는 초기에 2.0 부근이며 매립기간이 경과함에 따라 0.2 미만으로 낮아진다.

한편, 침출수 수질항목중 매립 경과연수에 따라 그 변화 정도가 적은 것은 암모니아와 염분으로 나타나고 있으나, 국내 쓰레기의 경우 식생활 영향으로 염분 농도가 초기에는 약 8,000mg/l까지 이르고, 안정화된 뒤에는 3,000mg/l 정도인 것으로 나타나고 있다(신만호 등, 1993).

3.3 난지도 매립지의 침출수 발생량 및 특성

(1) 침출수 발생량 산정

삼성 난지도 매립지 기본 계획(서울특별시, 1994)에서는 침출수 발생량 산정을 위하여 HELP모델을 이용하였다. HELP프로그램에 입력조건은 1982년부터 1992년 10년간의 기상자료와 매립지 현황을 근거로 작성하고 난지도 상부면에 침출수량 감소를 위한 복토재 설치 유무에 따라 침출수 발생량을 다음과 같이 산출하였다.

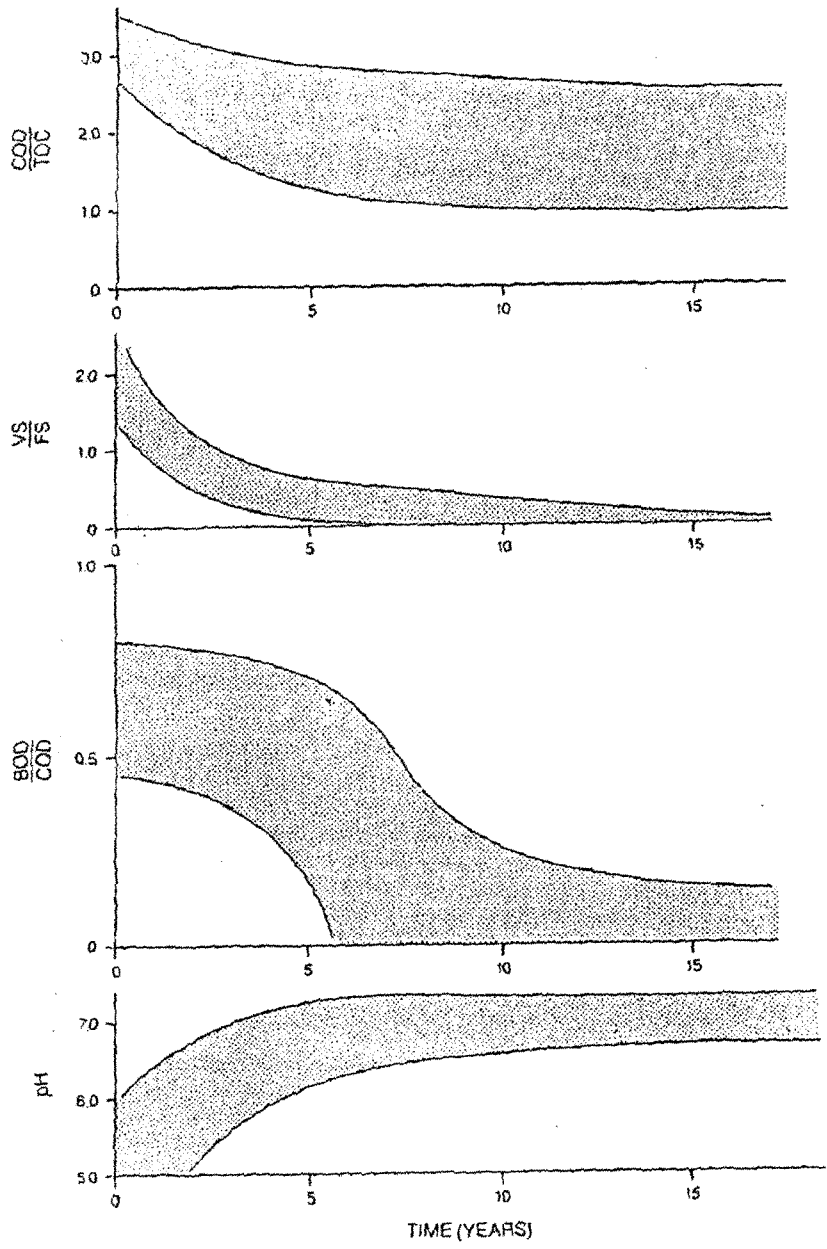


그림 7 매립경과 년수에 따른 침출수의 변화 특성

표 2 난지도 침출수 발생량 비교

구 분	복토전	복토후
평균침출수량	2,350	664
최대침출수량	14,849	1,140
최대/평균	6.3	1.7

또한 HELP MODEL에서 구해진 침출수를 고려하여 매립장내에 형성된 지하수위 상승의 영향을 고려한 매립지 외곽으로의 침출수 유출량 해석 결과를 표 3과 같이 산출하였다.

표 3 MODFLOW 를 이용한 침출수 유출량 해석

기간	초기	1년	3년	5년	10년	15년	20년	비고
유출량(m ³ /day)	4,750	3,272	1,800	1,553	1,151	993	808	

(2) 난지도 매립장의 침출수 수질

난지도 기본 계획 보고서(서울특별시, 1994)에서는 난지도 매립지의 침출수질을 파악하기 위하여 11개 지점에 대하여 '94년 2, 5, 9월에 평균 5회에 걸쳐 수질조사를 실시하였다. 침출수 채취지점에 따라

- 1)사면 누출형태의 침출수(LE)
- 2)난지도 외곽 보오링에 의한 지하수와 혼합된 침출수(SE)
- 3)상부분출 침출수(CE)

로 분류하여 침출수의 채취지점, 심도, 시기에 따라 매우 다양한 농도를 보이고 있음을 할 수 있었다. 매립후 오랜 시간이 경과한 매립 하부 지점은 안정화가 상당히 진행되어 오래된 매립지의 침출수 형태를 나타낸 반면 상부매립지점의 굴착 관측공내(상부 20-40m 구간)에 포집된 침출수(CE)는 산 생성 단계의 왕성한 분

해시기 침출수질을 나타내고 있었다(표 4의 BOD, COD 항 참조). LE-4지점은 메탄생성단계의 특징을 나타내었다.

BOD는 문헌 조사 결과 일반적인 매립지 침출수에 비하여 농도가 낮으며 매립 경과년수가 오래된 침출수와 특성이 비슷하였는데 BOD/COD_a비가 0.15이하로 생화학적으로 분해가능한 유기물의 양이 낮은 것으로 나타났다. 누출 침출수 4개지점 중 2매립장(LE-4)의 BOD가 가장 높았다.

난지도 매립지 침출수중의 질소 농도는 문헌조사 결과와 비교하면 높은 편에 속하는데 그 이유로는 우리나라의 폐기물 특성상 음식 쓰레기가 많기 때문으로 볼 수 있다.

(3) 침출수 처리

침출수처리에 있어서 침출수 발생량 감소는 중요한 의미를 가지며 다음과 같은 사항 등을 고려하여 침출수 발생량을 가능한 줄이도록 노력하여야 한다.

- 복토, 지표경사, 단계적 운영에 따른 우수의 효과적 배제
- 차수층, 차수층 위의 다공성 집배수층, 집배수관 등 우수차단 및 집배수시설 설치

난지도 기본계획 보고서(서울특별시, 1994)에 의하면 가스의 발산으로 인한 인체의 악영향을 없애고 우수의 과다 침투에 의한 침출수 발생량도 줄이기 위하여 미국 EPA권장 최종복토층과 난지도 현장 조건을 감안하여 표층과 식생층 60cm, 여과층을 포함한 배수층 30cm, 인공 합성 차수막을 포함한 토사, 하수 슬러지층 50cm의 최종 복토층을 설치한 것을 제안하고 있다.

침출수 처리 시설은 매립지 운영기간 및 매립 완료 후 침출수가 주변환경에 악영향을 미치지 않는 수준에 도달할 때까지 처리될 수 있도록 설계되어야 한다. 흔히 매립완료 후 30년정도를 침출수 처리기간으로 간주하거나 규정하고 있지만(WSDE, 1992) 50년 이상을 예상하는 전문가도 있다(Belevi and Baccini, 1992).

표 4 지역별 침출수의 수질분석결과 (서울특별시, 1994)

項 目	單 位	①漏出浸出水		②地下水混合浸出水		③噴出浸出水		備 考
		範 圍	중양값	範 圍	중양값	範 圍	중양값	
온 도	℃	25-40	38	-	-	53-64	56	
pH	-	6.8-8.7	8.2	6.8-8.2	7.5	8.3-8.6	8.5	
BOD	mg/ℓ	44-1545	160	5.4-179	91	3060-25000	11850	
COD _{mn}	"	330-2448	770	7.7-512	47	3475-9425	6020	
COD _{Cr}	"	1052-5920	2200	8.0-1330	336	10398-37300	19000	
SS	"	0.5-1865	135	18-920	119	38-356	123	
색 도	"	350-14500	3430	16-2810	284	7065-20400	14000	
T-N	"	1299-5200	3600	2.0-3421	8.0	5600-7312	6000	
NH ₃ -N	"	142-4600	2900	0.89-2854	6.4	4000-6921	5051	
T-P	"	1.86-14.9	9.7	0.02-3.39	0.34	13.33-18.2	17.17	
F	"	ND	ND	ND	ND	ND	ND	
Fe	"	0.56-36.52	4.0	0.55-126.9	17.36	11.93-21.73	18.40	
Cd	"	ND-0.033	TR	ND-0.06	0.016	0.031-0.037	0.036	
Cu	"	ND-0.25	0.017	ND-0.0287	0.059	0.062-0.126	0.094	
Pb	"	ND-0.213	0.111	ND-1.688	0.543	0.237-0.421	0.311	
Cr ⁺⁶	"	0.132-1.4	0.814	ND-0.148	0.062	0.433-1.52	0.742	
Zn	"	ND-3.27	0.076	0.206-23.42	3.205	0.483-1.69	0.943	
As	"	TR-0.208	0.049	ND-0.056	0.003	0.008-0.158	0.063	
Hg	"	TR	TR	ND-TR	TR	TR	TR	
CN	"	0.001-0.173	0.026	0.003-0.099	0.025	0.006-0.489	0.098	
전기전도도	μMH/cm	16100-29300	21000	368-16160	3080	35300-45700	43400	
Cl ⁻	mg/ℓ	1680-7731	3670	29.2-4665	608	2905-6735	5420	
알칼리도	"	2650-10600	7000	73-4038	510	3038-18400	12600	
n-Hexane	"	ND-340	0.34	ND-191	5	70-144	8.7	
페놀	"	ND-TR	TR	ND-TR	TR	ND-0.094	0.051	
PCE	"	ND-TR	TR	ND	ND	ND-TR	TR	
PCB	"	ND	ND	ND	ND	ND-TR	TR	
TCE	"	ND-TR	TR	ND	ND	ND-TR	TR	
유기인	"	0.07-0.30	0.23	ND	ND	ND-0.20	0.14	

주) ND : NOT DETECTABLE

TR : TRACE

Chian(1976)은 물리-화학적 처리, 생화학적 처리등과 침출수의 경과년수, 처리효율을 종합하여 다음 표 5에 나타난 바와 같이 COD/TOC, BOD/COD, 이입경과시간, COD 등을 이용하여 적합한 침출수 처리 공정을 판단할 수 있는 기준을 제시하였다.

표 5 유기물 제거에 따른 공정의 선정 기준(Chian, 1976; 서울특별시, 1994)

浸出水の 特徴				處理工程의 効果						
COD/TOC	BOD/COD	埋立經過時間	COD (mg/l)	生物學的處理	化學的沈澱 (lime注入)	化學的酸化 Ca(ClO) ₂	오존	역삼투막법	活性炭法	이온交換수지법
>2.8	>0.5	Young (>5yr)	>10,000	양호	불량	불량	불량	보통	불량	불량
2.0-2.8	0.1-0.5	Medium (5-10yr)	500-10000	보통	보통	보통	양호	양호	보통	보통
<2.0	<0.1	Old (>10yr)	<500	불량	불량	보통	보통	양호	양호	보통

침출수처리에 대한 호기성/혐기성 생물학적 처리 효율은 대체로 매립경과 기간이 오래된 침출수일수록 분자량이 크고 생물학적 분해에 저항하는 경향이 강하고, 반대로 매립경과 기간이 오래되지 않은 침출수는 분자량이 적고 호기성 및 혐기성 처리에 의해 잘 분해되게 된다.

난지도의 침출수는 pH가 6.8~8.7(8.2)정도이며 COD크롬의 농도는 대부분 1,050-5,900mg/l(2200mg/l)정도, COD/TOC도 대부분 1.5이하로 나타났으며 국내 생활폐기물 매립지 침출수에 나타나는 공통된 특성으로 침출수의 높은 암모니아 농도를 대비하여 암모니아 제거를 위한 전처리 후 생물학적 처리를 권장하고 있다(서울특별시, 1994).

4 매립지 가스의 안정성

매립된 쓰레기에서 발생하는 가스(Landfill Gas, LFG)의 질과 양을 추정하는 문제는 매립장의 가스를 활용하는 문제 뿐만 아니라 이를 방치하였을 때 화재, 폭발, 수목 고사 등 주변환경에 미치는 영향 최소화, 매립지의 안정화된 정도를 파악하는데 중요하다.

현재까지는 가스 발생량에 대하여 질량평형법을 통하여 최대 가능 발생량을 추정하고 이를 실내 및 현장 라이지미터 시험을 통하여 검증하는 방법으로 연구가 진행되고 있다. 그러나 실제 매립 현장에 대해서는 매립 쓰레기의 성상과 매립 시기, 양에 대한 자료가 없는 경우가 대부분이어서 현장 관측을 통하여 검측 시기의 가스 발생량과 질을 파악하는 정도에 그치고 있으며 장기 발생량을 모델을 이용하여 가스 발생량을 추정한 사례는 있으나 검증은 되어 있지 않은 상황이다.

본 절에서는 매립가스의 양과 질을 추정하는 이론을 소개한 후, 매립지 가스가 주변환경에 미치는 악취 등의 영향과 최소화 기법, 난지도 매립지의 가스 발생 현황과 예측 발생량을 알아 보았다.

4.1 매립지 가스 발생 이론

1)매립지 가스 발생 단계

폐기물의 생화학적 천이과정을 보면 포함된 셀룰로오스, 전분, 단백질 등이 여러 가지 미생물로 인하여 가스 및 기타 단순하고 용해 가능한 물질로 변하여 가게 되며 그 변화과정은 다음과 같은 4단계로 구분된다.

제 1단계인 매립기 초에는 산화(oxidation)와 호기성부패(aerobic decomposition) 작용이 발생하는데 폐기물내의 유기물에 있는 효소(enzyme)에 의하여 전분과 셀룰로오스의 산화를 촉진시키며 지방산(fatty acids)과 식물성 기름을 직접 산화하게 된다. 이러한 과정중 발생한 열은 매립지내의 온도를 40°C 까지도 상승시켜 산화를 촉진 시키면서 매립지 내의 산소를 고갈 시켜 CO_2 와 H_2O 를 형성 시킨다. 산화 및 호기성 분해시 단백질은 분해되어 암모니아와 황화수소(H_2S)를 발생시키며 이는 다시 질산이나 황산(nitric 또는 sulfuric acid)으로 변화하게 된다. 산화로부터 발생한 열은 매립물내의 습기를 증발시키고 또한 산소도 고갈시켜 분해작용이 줄어들게 된다. 호기성 분해는 pH 7.0 근처에서 일어나며 폐기물에서 용해

된 이온과 무기물로 구성된 산으로 인하여 pH는 산성으로 변하여 분해 반응을 저해하게 된다.

매립지의 산소가 고갈 되어 혐기성 상태가 되는 제 2단계 상태가 되는 혐기성 분해시는 두가지 미생물, 즉 산발효 박테리아(acid fermentation bacteria)와 메탄 발효 박테리아(methane fermentation bacteria)가 교차하며 작용하는데 산발효 박테리아는 탄수화물과 셀룰로오스를 당분과 알코올, 초산(CH_3COOH), 프로피온산(CH_3CH_2COOH), 낙산(C_3H_7COOH)으로 변환시키며 이 과정에서 이산화탄소를 발생 시킨다. 이로 인하여 매립지의 pH는 한시적으로 강하하여 추가적인 산발효를 제지시키나, 이 때 메탄 발효 박테리아가 용해 가능한 산을 메탄과 이산화탄소로 변화시키는 제 3단계가 된다. 이 세 번째 단계는 매립후 대개 180-400일이 경과 하는 동안 일어 나게 되며 메탄의 비율이 증가함에 따라 CO_2 와 H_2 의 비율이 낮아지게 된다.

제 4단계는 매립후 1-2년이 경과 후에 일어나게 되며 이 마지막 단계에서 가스의 조성이 정상상태를 유지하게 되어 CH_4 의 조성이 50-70%, CO_2 의 조성은 30-50%로 된다.

매립지내에서는 3, 4단계의 메탄화(Methanogenic)단계에서 산 생성균(Acid former)가 공존하면서 쓰레기를 분해 시킴으로써 CH_4 와 CO_2 가 동시에 생성된다. 쓰레기의 생분해의 제 5단계는 매립쓰레기내의 유기물이 거의 고갈되어 메탄 생성물이 매우 저하 되고 매립지 표층부 대기층으로부터 확산되어 쓰레기층으로 들어온 질소 성분이 LFG에 나타나게 되는 단계이며 매립장의 상부층에 호기성 영역이 다시 생겨나게 된다.

이러한 쓰레기의 생분해 단계는 균질한 쓰레기를 대상으로 이상화된 변화 단계이며 실제 쓰레기 매립후 경과 시간 및 성분이 매우 불균질한 관계로 각 매립지별로 다른 생분해 단계를 보일 수 있다.

2) 매립 가스의 발생에 영향을 미치는 인자

매립 가스의 발생에 영향을 미치는 인자는 매립 쓰레기의 성분, pH, 수분 함유량, 지중온도등 여러 가지가 있는데 매립지의 환경 조건과 쓰레기의 특성에 따라 분

해 속도가 다르기 때문에 수년에서 수세기에 걸쳐 발생하기도 한다.

가. 쓰레기의 성분

가스 발생 및 분해 용이성과 관련된 쓰레기의 분류는 주방 쓰레기, 물, 잡초류 등과 같이 분해 용이성분, 종이, 목재, 섬유류 등의 중위급 분해성분, 플라스틱, 고무류 등과 같은 난분해성 성분으로 나누어 볼 수 있다. 특히 지방, 단백질, 탄수화물류를 포함하는 주방쓰레기는 매립후 2년 이내의 초기에 분해되는률이 높고 반감기는 1년 정도로 본다.

중위급 분해성분의 반감기는 2년, 난분해성 성분은 20년정도이며 총가스 발생량의 99%를 분해 발생시키는데 소요되는 기간은 분해 용이성분의 경우에는 3년 반, 중위급 분해성분은 최고 6년, 난분해성성분의 경우에는 60년이 된다 (이승무, 1993).

나. pH

혐기성 분해가 이루어 지는 범위는 pH 6.6-7.6 이며 pH 6.2 이하에서는 메탄 발효성분의 활동이 저해되면서 산박테리아의 활동이 활발해진다.

다. 수분 함유량

일반적으로 다량의 수분에 의해 methane former가 지중수에 완전히 침적되는 경우, 쓰레기의 성분은 균일하여지고 영양분 및 분해 가능 유기물의 농도 변화를 감소 시키며 혐기성 분해 작용으로 인해 생성된 NH_3 의 용해로 pH가 상승된다. 또한 지중 산소와의 접촉을 막게 되므로 메탄가스의 발생량이 많아지게 된다. 건조된 폐기물을 매립했을 경우에는 가스의 생성량이 줄어들게 되며 수분의 첨가에 따라 메탄가스의 생성량이 증가한다. 수분은 미생물의 성장에 필요함은 물론 전체 쓰레기에 영양분 및 박테리아가 균일하게 분포되도록 하는 작용을 한다.

라. 지중 온도

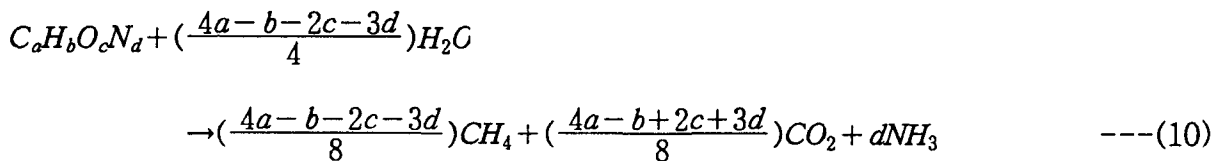
지표하 1-2 m 에서는 공기의 투과 확산과 외기 온도의 영향으로 광범위하게 변하게 되나 지층 3m 부터는 심도가 깊어짐에 따라 30-40℃의 범위에 있게 된다. 또한 쓰레기층의 온도가 35℃이하로 내려가면 CH_4 의 발생이 억제되게 된다.

마. 영양분

매립지에서의 박테리아 성장을 위해서는 탄소, 수소, 질소, 산소 및 인 등이 충분한 양으로 존재하는 것이 필수적이며 적은 양의 나트륨, 칼륨, 황, 칼슘 및 마그네슘 등도 필요하다. 메탄생성은 질소 대 탄소의 비(C/N)가 30일 때 최상의 값을 나타내는 것으로 알려져 있다. C/N의 비가 크면 CO₂의 생성증가로 인해 LFG의 조성이 변하게 되며 C/N의 비가 낮은 경우에는 매립지내의 암모니아의 농도가 커지게 된다. 미생물의 성장을 유도하기 위해서는 질소나 인 같은 무기성 양분이 필요하나 일반적으로, 매립층 내에서의 질소와 인의 함량은 필요량보다 훨씬 많이 존재하므로 이와같이 인위적인 첨가는 불필요하다 (이승무, 1993).

3) 매립 가스의 발생량 추정

매립지에서 발생하는 LFG의 양과 성분은 유기물이 완전 분해되는 것으로 가정할 때 식 (10)으로 표시되게 된다 (Tchbanoglous 등, 1977).



위 식을 이용하여 발생하는 CO₂ 및 CH₄ 성분이 표 6과 같으며 이 표를 보면 셀룰로오스가 완전 분해될 때 메탄가스 50%와 탄산가스 50%가 생성됨을 알 수 있다. 단백질의 완전 분해에 의하여는 메탄가스 51.5%와 탄산가스 48.5%, 지방은 메탄가스 71.4%, 탄산가스 28.6%를 생성된다. 가스의 조성은 특정 시간대에 분해되는 물질에 따라 달라진다.

표 6 이론상으로 본 CO₂ 및 CH₄ 발생량 (Ham and Barlaz, 1989)

	CO ₂ + CH ₄ produced (l/kg decomposed material x 100)	Gas composition (% CH ₄)
Cellulose	8.29	50.0
Protein	9.88	51.5
Fat	14.3	71.4

또한 날씨와 환경 조건도 가스의 조성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있는데 호기성과 산생성 분해 단계는 탄산가스의 발생을 증가시키므로 메탄생성 혐기성 분해 단계에서 보다 탄산가스의 함량이 높게 된다. 또한 수분함량과 매립지내로의 수분이동량에 따라 달라질 것이다. 탄산가스는 메탄가스보다 물에 대한 용해성이 높아 탄산가스의 용해로 인하여 메탄가스의 함량이 상대적으로 증가될 수도 있다.

많은 시설 운전자와 연구자들에 의하여 측정된 가스의 조성에 의하면 메탄가스 55%와 탄산가스 45%가 가장 일반적인 것으로 나타났으며 현장에서의 메탄가스 함량은 35-75%로 변화됨을 알 수 있었다. 메탄가스의 농도가 낮은 경우에는 분해 초기단계에서 메탄생성박테리아의 수가 적거나 분해가 늦어 다른 미생물이 우점종일 때 나타나며 비정상적인 가스조성을 나타내는 또 다른 원인은 쓰레기의 조성이 특별하거나 극히 건조하여 메탄가스 발생이 방해되는 경우이다. 건조한 환경은 거의 대부분의 미생물의 활동을 감소 시키지만 일부의 혐기성미생물들은 수분함량에 보다 민감하여 메탄가스발생을 위하여 필요한 미생물의 균형이 깨어질 수 있다. 건조한 환경은 또한 매립지내로 공기의 유입을 증가시킬 수 있어 메탄가스의 발생을 감소시킨다.

문헌과 경험으로 부터 얻어진 쓰레기로부터 발생되는 총가스량을 표 7에 요약하여 나타내었다(Ham and Barlaz, 1989). 첫번째의 이론적 발생량은 일반적인 미국 도시쓰레기로 부터 생성 가능한 최대량으로 쓰레기가 완전히 분해되는 것으로 가정하여 구한 것이다. 보다 타당한 가정은 두번째에 나타난 것으로 쓰레기의 전부가 분해되지 않는 것이라고 가정하여 얻어진 값으로 전형적으로 음식쓰레기와 종이의 2/3만이 메탄과 탄산가스로 분해된다고 가정하여 구한 값이다. 이러한 가정은 쓰레기는 완전히 분해되지 않는다는 사실을 의미하며 쓰레기의 일부가 메탄이나 탄산가스 이외의 다른물질로 분해되고 일부는 분해되지 않는 물질이 존재한다는 것을 의미한다. 분해되지 않는 물질은 플라스틱, 리그닌 등이 있으며 물리적으로 고립되거나 생물학적으로 분해되지 않는 기타 물질이 포함되어 있다. 몇몇 연구자들은 쓰레기로부터 발생될 수 있는 메탄과 탄산가스의 양을 결정하기 위하여 이상적인 혐기성시설을 이용하였으며 그 결과가 표 7 세번째 줄에 나타나

있다. 라이지미터를 사용할 경우에는 가스발생량이 과소평가될 가능성이 매우 높음을 알 수 있다. 매립지에서 발생하는 총 가스량은 문헌에 따라 큰 차이가 있으나 최근의 연구결과들을 종합하면 이론적으로는 400-500L/kg이고 실제량은 100-250L/kg 범위에 있다고 알려져 있다(한국지반공학회, 1994).

표 7 도시쓰레기로 부터 총 가스 ($CO_2 + CH_4$) 발생량

조	건	가스발생량 (L/kg)
전형적인 미국도시쓰레기(이론량, 전량완전 분해기준)		520
쓰레기내 분해가능한 유기물의 질량기준(이론량)		100-300
하수슬러지와 쓰레기의 혐기성 소화(실험실 자료)		210-260
라이지미터 또는 폐쇄용기 실험		0.5-40
실제 매립지		50-400

4) 매립가스 발생속도 및 기간

LFG 발생에 관한 속도론적 고찰은 여러 학자들에 의하여 많이 연구되었으며 (11) 식과 같은 영차 반응 속도론이 지배적이었다.

$$\frac{dG}{dt} = -K'(L - R) \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot (11)$$

여기서, G = 시간 t 에서 발생한 총 기체량 (m^3/kg)

K' = 속도상수 (y^{-1})

L = 가능 최대 기체 발생량

또 Alpern이나 Cheremisinoff는 혐기성 소화조 내에서 기체생성 속도를 연구한 결과 2단계 공정(two-stage process)를 제안하였다. 즉, 첫 단계는 기체의 생성속도가 최대 속도가 될 때까지 증가하는 단계이며 그 이후 둘째 단계에서는 분해가 완료될 때까지 다른상수의 값으로 기체의 생성 속도가 감소한다. 이 두단계를 속도식으로 나타내면 식 12, 13과 같은 일차 반응식으로 나타난다(도갑수, 1993).

(첫째단계)

$$\frac{dG}{dt} = K_1 G \quad \text{-----}(12)$$

(둘째단계)

$$\frac{dR}{dt} = -K_2 R \quad \text{-----}(13)$$

여기서 G = 시간 t 에서 생성되는 기체의 량 (m^3/kg)

R = 시간 t 에서 생성되기 위하여 남은 기체의 량

즉, t 시간 이후 발생한 gas 량 (m^3/kg)

K_1, K_2 = 속도 상수 (y^{-1})

식 13을 적분하고 시간의 경과에 따른 가스발생량을 고려하면 식 14가 유도되고 (Stegmann, 1989) 시간 t 와 추정 가스발생량 R_t 의 관계가 그림 8과 같이 나타나게 된다.

$$R_t = R_c [1 - \exp(-kt)] \quad \text{-----}(14)$$

여기서

R_t = 시간 t 까지 발생된 가스량

R_c = 최종 가스발생량

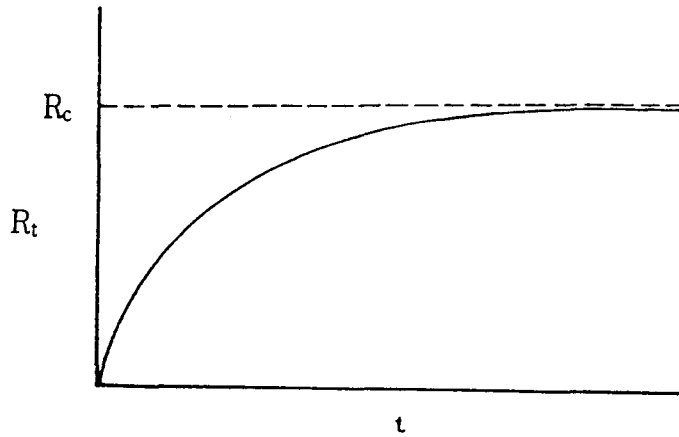


그림 8 시간의 경과에 따른 누적가스발생량

실제로 매립지 가스 추출 현장에서의 경험치를 검토하여 보면 추출량 또는 발생량이 위의 공식들과 같이 일차반응 속도식에 부합되게 시간이 지남에 따라 감소하는 것이 아니고 수분, 영양물질, 유기물 등의 변수와 관계없이 일정하다는 것이다. 이는 가스 추출이 대개 매립지내 가스 발생이 매우 활발한 기간 중에만 이루어지기 때문으로 일차반응 속도식은 전 매립가스 발생기간을 고려할 때에 사용할 수 있고 매립가스 발생이 매우 활발한 기간, 즉 매립가스 추출기간만을 고려할 때에는 영차반응 모델을 적용하기를 추천하고 있다 (Ham and Barlaz, 1987).

표 8 매립쓰레기에서 가스 ($CO_2 + CH_4$) 발생속도(Ham and Barlaz, 1989)

Conditions	Gas production rate refuse per year (l/kg)
Lysimeters, average production rate observed during periods of CH_4 generation	0.001-30
Pilot-Scale or test landfills	15-60
Full-Size landfills, field tests	0.8-40 (typically 10-20)

표 8은 여러 문헌에서 제시되고 있는 가스발생 속도를 요약한 것으로 라이지미터로부터의 가스발생 속도는 변화가 매우 큰 것을 알 수 있다. 라이지미터 실험은 현장 매립지의 분해기간에 비하여 기간이 짧고 메탄이 생성되기 전 지체기간

(Lag period)이 전체 관측기간중 커다란 비율을 차지하는 경우가 많아 실험조건과 라이지미터 실험방법에 따라 가스발생 속도는 차이가 있게 된다. 실제규모의 매립지에 적용할 수 있는 가스매립지에서의 전형적인 가스발생속도의 범위는 10-20 L/kg/yr 정도이며 가스발생속도가 10 L/kg/yr 이하이면 매립지가 건조상태에 의한 경우를 생각할 수 있고 20L/kg/yr 이상이면 특별한 폐기물을 포함하거나 수분 함량이 높은 경우에 나타난다.

매립가스 발생기간은 몇 년 미만에서 길게는 수십년씩 지속되나 대개 5-20년 정도로 예측된다. 총 가스발생량을 150L/KG로 가정하고 가스발생속도를 15L/kg/yr로 가정한다면 가스추출기간은 10년 정도가 될 것이다. 일반적으로 매립가스 발생기간을 매립완료 후 10년 정도로 보는 것이 보통이다 (한국 지반 공학회, 1994).

4.2 난지도 매립지의 매립가스 성상 변화 예측

1)매립가스 성상

서울시 기본설계 보고서(1994)에서는 1곳의 추출정과 4곳의 감지정을 설치 깊이별로 94년 7-8월 3회에 걸쳐 CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 , 암모니아, 황화수소, 미량 유해 성분 등을 분석하였다.

그결과 CH_4 48.11-54.7% (평균 51.19%), CO_2 31.66-38.07% (평균 35.24%), N_2 2.45-11.26% (평균 6.53%), O_2 0.23-1.89% (평균 0.98%), NH_3 19.92-26.92ppm (평균 23.49ppm), H_2S 3.69-5.84ppm (평균 4.71ppm)이 함유된 것으로 나타났다.

채취지점별 조성변화는 전체적으로 큰 변화를 보이고 있지 않다고 볼 수 있는바, 이는 난지도 매립지가 폐쇄된지 1년 반 이상이 경과하였고, 매립지 상부에 일부 불안정하지만 폐쇄시점에 실시된 건설사토등에 의한 임시복토의 영향으로 전반적으로 모든 지역에서 안정적 혐기성 분해가 진행되고 있기 때문으로 사료된다. 또한 매립지 가스중 메탄의 농도는평균적으로 50%이상 존재하므로, 현 매립지의 분해 단계는 제4단계 정상 혐기성 단계로 판단 되었다(서울 특별시, 1994).

미량유해성분은 Benzene 9.30-98.50ppm (평균 30.74ppm), Toluene 23.4-268.8 ppm (평균 136.48ppm), Xylene 20.6~142.3ppm (평균 75.12ppm), Dichloromethane 204.2-384.0ppm (평균 265.47ppm)이 함유된 것으로 나타났다.

현재까지로 난지도 매립지에서 수행된 매립가스성상 조사는 이승무 교수팀의 3년에 걸친 CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 4성분의 조사, 서울시 지도 기본 계획 조사시 대우 엔지니어링(1992)과 기본 설계조사로 삼성건설(1994)에 의하여 CH_4 , CO_2 , N_2 , O_2 , NH_3 , H_2S 의 6가지 성분에 수행된 기록이 있으며 표 9에 요약 하였다.

표 9 문헌에 나타난 난지도 매립지 매립가스 조성 성분

	CH_4	CO_2	N_2	O_2	NH_3
이승무외,1990	49.8-63.2 (54.4) ¹	28.5-31.9 (30.2)	6.6-17.1 (12.1)	1.7-4.6 (3.2)	N.A. ²
이승무외,1991	63.2-71.5 (68)	23.7-28.4 (25)	2.0-7.1 (4.5)	0.5-1.5 (1.1)	N.A
이승무외,1992	53.2-61.4 (58)	34.1-38.3 (35)	2.0-7.1 (4.5)	0.5-2.0 (1.1)	N.A
서울시,1992	54.3-57.6 (55.7)	39.2-42.2 (41.1)	0.27-0.36 (0.3)	0.07-0.09 (0.1)	25.7-31.7 (28.8)
서울시,1994	48.1-54.7 (51.2)	31.7-38.1 (35.2)	2.45-11.3 (6.5)	0.23-1.89 (1.0)	19.9-26.6 (23.5)

단위: Vol(%)

주: 1-평균값, 2-N.A.: Not Available

이 결과를 보면 난지도 매립지 메탄가스 성분 최대치는 1991년도 평균 68% 으로 그 후 조금씩 감소하는 추세를 보이고 있어 안정화 단계로 들어서고 있음을 알 수 있다.

2) 매립가스 발생량 예측

서울시 기본설계 조사 (1994)시에는 향후 매립 가스발생량의 추정을 위하여 미국의 EMCON Associates가 캘리포니아 소재 Scholl Canyon 매립지의 가스포집 안정성 연구보고서를 통해 발표한 최적 혐기성상태 조성기간인 lag time을 고려하지 않은 1차 반응식의 가스발생량 추정모델을 사용하였다. 매립 폐기물을 표 10과 같이 급속, 중속, 완속 분해 물질로 분류하고 반감기를 3가지 경우로 가정하여 모델 해석을 한 후 현재까지 문헌에 나타난 난지도 매립지 가스발생량 조사값 (표 11)과 비교하였다.

표 10 발생량 예측에 사용된 매립 폐기물의 분류 및 반감기 (서울 특별시, 1994)

廢棄物의 種類	分 類	半 減 期(年)		
		CASE1	CASE2	CASE3
음식, 주방쓰레기	急速分解物質	1	5	1
종이, 섬유, 나무	中速分解物質	2	15	15
프라스틱, 가죽, 고무	緩速分解物質	20	40	40

표 11 문헌에 나타난 매립지 메탄 발생량(서울특별시, 1994)

出 處	實 施 年 度	메탄發生量(NM ³ /min)*
韓國科學財團報告書	1991	472
蘭芝島埋立地安定化基本計劃	1992	311
蘭芝島埋立地安定化基本設計(抽出試驗)	1994	144~319
蘭芝島埋立地安定化基本設計(發散試驗)	1994	232

*廢棄物量當, 시간당 埋立가스發生量을 시간당 메탄 發生量으로 계산한 수치임.

모델 추정결과치와 실측치를 그림 9에 도시하였는데 세가지 경우 모두 현재 1990년대 초의 최대 메탄가스 발생단계를 지나 급속히 감소하는 안정화단계로 들어서는 것으로 나타나고 있으며 난지도의 실제 분해 상황을 현장에서 확인한 결과와 비교한 결과 중속 및, 완속 분해 물질의 반감기를 길게 잡은 Case 3과 현장 조사 결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

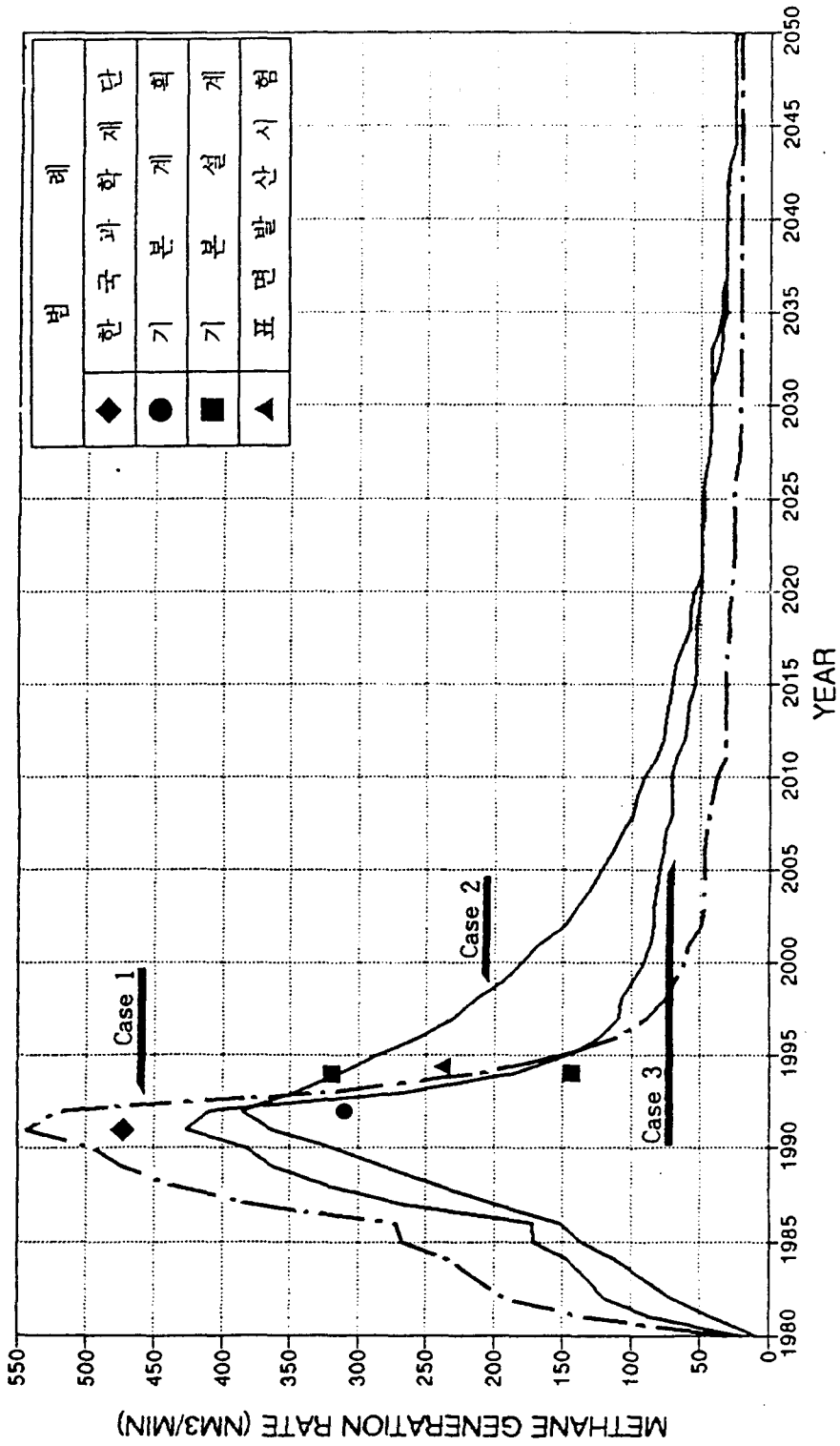


그림 9 메탄 가스 발생량 모델 예측치와 문헌에 나타난 현장 발생량의 비교

5. 결 론

본 논문에서는 사용 종료 매립지에 포함된 주요오염원의 장래 변화를 폐기물, 침출수, 매립가스로 나누어 국내외 관련 문헌으로 부터 알아 보고 대표적 사용 종료 매립장인 난지도 오염원의 현단계에서의 변화된 경향과 향후를 예측하여 보았다. 본 조사로 부터 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 문헌에 나타난 매립 경과 년수에 따른 침출수의 변화 특성으로 BOD/COD의 비율, pH의 변화의 경향은 매립장 사용 종료 후 5년에서 10년 사이에 걸쳐 안정기에 들어서는 것으로 나타나고 있다.
2. 난지도 매립장의 경우 1994년 메탄 가스의 조성성분이 1992년의 55.7%로 부터 51.2%로 낮아져 절정기를 지나 안정화 단계로 들어서고 있는 것으로 추정되며 이는 1994년 서울 특별시 난지도 안정화 공사 기본 설계 보고서의 메탄가스 발생량 모델 예측치와 실제 현장 발생량과의 비교에서도 나타난다. 난지도의 경우 사용 종료 후 5년 이내에 이러한 안정화 추세를 보이는 것은 쓰레기의 매립이 1980년대 초부터 시작되어 매립기간이 길었으며 따라서 초기 및 중기에 매립된 쓰레기는 안정화 되는 추세를 보이기 때문으로 사료된다.
3. 조사 결과 침하판을 이용하여 폐기물의 침하량 계측이 수행된 국내 사용 종료 매립장은 난지도 이외에 그 사례를 찾을 수 없었으며 앞으로 사용종료 매립장 안정성의 체계적인 관리를 위하여 계측 사례가 많이 보고 되기를 기대한다.
4. 난지도 매립지의 침하량 계측결과를 보면 산업폐기물이 집중적으로 매립되었을 것으로 판단되는 지점의 부등 침하가 1000mm이상의 큰 값을 보이고 있으며 제방과 인접 외곽도로 부근의 침하는 150-300mm 정도인 것으로 나타난다. 폐기물이 매립된 구간별로 중앙부에 침하가 집중되는 경향을 보이고 외곽부는 250mm정도이며 지점별로 불규칙한 양상을 나타내고 있었다. 향후 수년간은 이러한 큰 침하의 경향이 계속될 것으로 보이며 합수비가 큰 산업폐기물과 유기성폐기물의 매립정도에 따라 불규칙한 양상이 클 것으로 사료된다.

5. 많은 산업 sludge가 매립된 곳의 일차 압축 침하와 매립지 상부의 90년대 초에 매립된 유기물 함유량이 많은 부분의 부패침하가 주종을 이룰 것으로 보인다. 사면안정을 위해 토사와 쇄석을 많이 섞어 매립하고 사면부로 누출이 많아 수분 함유 정도가 적을 것으로 예상되는 제체 및 외곽 도로부의 침하는 적은 반면 중앙부의 침하가 커서 1, 2매립지 모두 오목한 렌즈 형태를 이룰 것으로 예상된다.

참고 자료

1. Bagchi, A., Design, construction, and monitoring of sanitary landfill, John Wiley & Sons, 1989.
2. Belevi, H. and Baccini, P., Water and Element Fluxes from Sanitary Landfills, in Sanitary Landfilling: Process, Technology and Environmental Impact edited by Christensen T.H., Academic Press, (1992)
3. Edil, T.B., Ranguette, V.J., and Wueller, W.W, "Settlement of Municipal Refuse, " in Geotechnics of Waste Fills: Theory and Practice, ASTM STP 1070, A. Landva and G.D. Knowles, Eds., ASTM, Philadelphia, 1990.
4. Ehrig, H.J., "Leachate Quality", Sanitary Landfilling, edited by T.H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, Academic Press, 1989, pp231-229.
5. Christensen, T.H. and Kjeldsen, P., "Basic Biochemical Processes in Landfills", Sanitary Landfilling, ed. by T.H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, Academic Press, 1989, pp29-49.
6. EPA, "The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) Model, Engineering Documentation for Version 3., Sep. 1994.
7. Ham, R.K. and Balaz, M.A., Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality", Sanitary Landfilling, ed. by T.H. Christensen, R. Cossu, and R. Stegmann, Academic Press, 1989, pp155-166.
8. Oweis, I.S. and Khera, R.P., Geotechnology of Waste Management, Butterworths and Company (Publisher) Ltd., 1990.
9. Sharma, H.D. and S.P. Lewis, Waste Containment systems, waste stabilization, and landfills, John Wiley & Sons, Inc..
10. Sowers G.F. , "Settlement of Waste Disposal Fills", Proceedings, The Eighth International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moskow, Vol. 2.2, 1973, pp207-210.
11. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Eliassen, R., "Solid Waste", McGraw-Hill, Inc, 1977.

12. Tchobanoglous, G., Theisen, H., and Vigil, S., Integrated Solid Waste Management, McGraw-Hill, Inc, 1993.
13. WSDE, Solid Waste Landfill Design Manual, Washington State Department of Ecology(WSDE), Prepared by Parametrix, Inc., 1987.
14. Yen, B.C. and Scanlon, B., "Sanitary Landfill Settlement Rates", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 105, No. GT5, 1975, pp475-487.
15. 남궁완(1992), 폐기물 매립지 입지선정기준, 한국 환경 과학 연구 협의회.
16. 도갑수 외, "사용종료 매립지의 실태조사", 96폐기물 매립기술 심포지움, 1996, pp 251-254.
17. 윤석표, 난지도 매립지의 침출수에 의한 지하수오염 기여도 추정과 해석, 한국 과학 기술원, 1994.
18. 이승무 외, "매립지 가스 (LFG) 추출 이용 기술에 관한 개발 연구 I, II, III, 한국 과학 재단, 1990, 1991, 1992.12.
19. 이승무, "매립가스 추출과 이용 기술, " 매립 신기술의 이론과 실제 -환경 공학 및 지반공학적 접근 -, 한국 과학 기술원, 1993, pp205-230.
20. 서울특별시, "난지도 환경 오염 방지 및 안정화 대책 ", 기본 계획 보고서, (주) 대우 건설 기술 연구소, 1992.
21. 서울특별시, "난지도 매립지 안정화 공사", 기본 설계 보고서, (주) 삼성 건설, 1994, 11.
22. 수도권 매립지운영 관리조합, 수도권 매립지 (제1공구) 기반시설 보완 (지반 안정성 및 지하수 오염(중금속) 평가 분야) 연구 보고서, 1995, 9.
23. 최세영, 쓰레기매립지의 침출수에 의한 지하수 오염에 관한 연구, 서울대학교 박사학위 논문, 1992년 2월
24. 신만호, 장근, 최종식, "매립장 현장 시공의 발전 방안- 차수 시설을 중심으로", 매립 신기술의 이론과 실제 -환경공학 및 지반공학적 접근 -, 한국 과학 기술원, 1993, pp65-120.
25. 한국건설기술연구원, 도시폐기물 매립장의 건설 부지 활용과 위생 매립 시스템에 관한 연구, 전기연 연구 보고서, 92-GE-112
26. 한국 지반 공학회, "폐기물 매립시설 세부설치기준 연구 보고서, " 1994, 6.