

수도권 매립지의 차수시설에 관한 공학적 검토

Engineering Investigation of Liner Systems
of the Waste Landfill for Metropolitan Area

이 광열¹, 이 광신²

Abstract

Liners of the solid waste landfill for metropolitan area are a sea-reclaimed land that is constituted with clayey and silty soil deposits such as an weakly-ground. The landfill site is located along the west coast of south Korea. Because the natural ground was used as a liner of the landfill by using it's impermeability, it is necessary to investigate liner systems for satisfying the qualifications.

In this study, several investigations and analysis were performed by model simulations such as a settlement of liners depending upon waste heights, a compaction of waste, and a contamination of groundwater and streams. Especcally, the settlement of liner is predicted considering waste heights and the time elapsed, and the required penetrating depth of HDPE to cut the loachate migration is predicted by solving the governing equation for models at the critical section.

Input data for this study are used from the design and situ-tests report. Using the results of this study, several possible subsidiary alternatives are suggested against Geo-environmental engineering problems.

서 론

본 연구의 대상인 수도권 쓰레기 매립장은 해안간척지로서 지리좌표상으로 동경 126° 37' 45" ~ 126° 39' 50"와 북위 37° 34' 16" ~ 37° 35' 00"에 위치해 있는 우리나라 최대의 광역쓰레기 매립장이다.

-
1. 공학박사, 대전대학교 환경문제연구소 객원연구원
연세대학교 산업기술연구소 객원연구원
선경건설(주) 연구소 차장 (토질·지하수부)
 2. 연구원, 선경건설(주) 연구소 대리 (토질·지하수부)

전체 면적이 630만평(20,826,540m²)인데 전체부지를 5개 section으로 구분하였으며 단계적으로 30년간 쓰레기를 매립할 계획으로 1992년 제1단계의 130만평(4,297,540m²)에 매립상시설의 시공이 완료되어 현재 쓰레기의 매립이 진행중에 있다.

쓰레기 매립지는 적합한 시설을 하여 폐기물로 인한 지하수 및 토양오염 그리고 하천의 오염을 방지하기 위한 것이며, 크게 차배수시설(Liners), 침출수 수집시설, 처리시설, 계측시설 그리고 일반 부대시설등으로 구성되는데 그중 차수시설은 매립지 시설중 가장 중요한 시설로서 오래전부터 많은 연구와 개선이 이루어지고 있다. 일반적으로 매립지의 Liner는 불투성의 점토질 흙이나 토목섬유 그리고 투수성 모래등을 가지고 차수층과 배수층의 조합으로 구성되며, 자연지반을 고르게 다진뒤에 Liner의 시설을 설치하게 된다. 따라서, 현장의 조건과 시공의 효율등에 따라 Liner에서 발생하는 문제점은 다양한 형태로 나타난다. 즉, 연약한 지반에 매립지를 건설할 경우는 지반 침하에 의하여 침출수 수집을 위한 동수구배나 수집시설에 큰 역효과를 끼치게 되며, 또한 Liner 자체가 파손되어 침출수가 Liner를 통하여 누출되는 사고가 발생할 수도 있다. 지층이 균질하지 않거나 폐기물의 매립지에 부분적으로 집중하중이 작용할 경우에는 부등침하가 발생할 수 있는데 이러한 경우는 특히 시설(침출수 수집관로, Liner 등)에 큰 손상을 끼치게 된다.

원지반이 점토질층으로 이루어져 있는 곳에 매립장을 건설할 경우 점토질 지반을 차수층으로서 사용하는 경우도 있는데 이러한 경우 침출수가 누출되는 사고가 빈번하므로 매립지를 중심으로 설치된 제방하부에서의 침출수거동상황과 주변에서의 수리거동을 정확히 조사하여 매립지 내부에서 발생된 침출수가 누출되어 주변을 오염시키는 사고에 대처할 수 있는 조치를 취하여야 한다.

제방은 매립장내의 쓰레기하중 및 외부하중과 홍수등에 대하여 안정하여야 하며, 제방 내부측 법면에도 차수시설이 요구된다.

본 연구의 목적은 해안간척지 지역에 설치된 수도권 쓰레기 매립지의 차수시설의 적합성과 문제점을 지반환경공학(Geo-Environmental Engineering)측면에서 분석하고 향후 유사한 매립지 계획에 기술적인 이해를 제공하기 위해서이다.

1. 지반의 안정성 검토

해성퇴적층으로 구성된 매립지 전역은 두께가 5m 에서 19m 로 해역방향으로 갈수록 두껍게 나타나고 있으며 하부층으로 갈수록 SPT 값은 10이상되는 곳도 있다. 따라서, 퇴적층 전체를 연약층으로 보기는 곤란하며 압밀작용에 의해 침하될 수 있는 연약층의 두께는 현장실험결과를 근거로 하면 SPT값이 10이하인 곳으로 6m 와 11m 로 나타났다.(설계보고자료 : 선진 Engineering, 한서 Engineering)

침하량을 산정하기 위하여 연약층의 두께를 평균값을 사용하기에는 지역적으로 너무 큰 차이가 있으므로 본 연구에서는 최소값과 최대값인 6m 와 11m 를 선정하였다.

지반의 침하는 일시적으로 일어나지 않을뿐더러 작용하는 하중의 크기에 따라 침하량과 침하속도도 달라진다. 쓰레기 매립지에서 지반(차수층)에 작용하는 하중은 쓰레기의 매립량과 일치하며 이것은 시간의 경과에 따라 일정비율로 증가하는 것으로 가정하였으며, 매립작업중의 장비나 사람등에 의한 하중은 무시했다.

지하수위가 지표면까지 존재하고 있지는 않지만 쓰레기 매립후 침출수의 발생으로 인해 전지반이 포화상태에 있을 것으로 예상되어 자반전층이 압밀층인 것으로 간주하였다. 매립후, 사실상의 침출수 수두(Mounding Height)는 지표면(차수층)상부에 존재하기 때문에 쓰레기 매립하중에 의해 지반(차수층)이 압밀되는 기간동안에 포화상태에 있다고 볼 수 있다. 물론, 간극수의 구성성분에 따라 압밀상관인자(Consolidation parameters)들의 값은 다르나 [참고] 본 연구에서는 일정한 것으로 가정하였다.

압밀층의 토질은 대상층 범위내에서 균질한 것으로 가정하였으며, 일면 배수압밀상태로 가정했는데 그 이유는 연구대상지역에 분포한 해성퇴적층중 SPT값이 10이하인 층을 압밀 대상층으로 선정했으므로 압밀대상층과 그 아래층과의 경계면은 견고한 점토층으로서 불투수층이며 상부의 쓰레기 매립층은 10^{-3} cm/sec 정도로 비교적 투수성이 좋기 때문이다.

쓰레기의 단위체적당 중량은 쓰레기의 성분과 부패정도 그리고 매립 및 다짐방법에 따라 큰 차이를 보이는데 보통 $0.6 \sim 1.2$ t/m³ 이다. 쓰레기성상별 단위체적 중량은 Table 1.1 에서 외국의 경우와 비교하여 보였다.

Table 1.1 Unit weight of uncompacted waste (t/m³)

국가 \ 성상	일반생활쓰레기	산업 폐기물	Ashes
한 국	0.3 ~ 0.5	Varied	0.8 ~ 1.6
일 본	0.3 ~ 0.5	Varied	0.8 ~ 1.5
미 국	0.4 ~ 0.7	0.54	0.9 ~ 1.7

Table 1.2 Geotechnical properties of waste in Korea

분 류	최대건조밀도 (최적함수비) (t/m ³)	투수계수 (cm/sec)	간극비 -	점착력 (kg/cm ²)	내부 마찰각 (deg.)
도시폐기물	0.9 ~ 1.2	1x10 ⁻² ~ 1x10 ⁻⁴	4 ~ 8	0~0.2	25 ~ 40
소 각 재	0.8 ~ 1.6 (15 ~ 27)	1.8x10 ⁻² ~ 1.3x10 ⁻⁴	58	0.07	32
하수 오니	0.59 ~ 0.99 (52 ~ 103)	2.6x10 ⁻⁶ ~ 1.0x10 ⁻⁷	21 ~ 93	0.39 ~ 0.5	18 ~ 22
상수 오니	0.71 ~ 1.41 (20 ~ 84)	1x10 ⁻³ ~ 1x10 ⁻⁷	-	0.34 ~ 3.4	17 ~ 28
폐수 오니	-	-	-	-	-

* 쓰레기 처리 시설 구조지침 및 해설(환경처 1991)

Table 1.2 에서 보는 바와 같이 매립쓰레기의 토질공학적 계수값은 아주 넓은 범위를 가지고 있으며, 매립지의 전면적을 고려해 볼때 쓰레기의 성상 및 성분은 균질하지 않다. 그러므로, 침하량을 산정하기 위해 필요한 단위부피당 중량이나 압밀계수등은 설계보고서의 자료를 참고로 하였다. 침하량 산정에 사용된 토질계수는 Table 1.3 에 집계되어 있다.

Table 1.3 Geotechnical properties for evaluation of settlements of liners

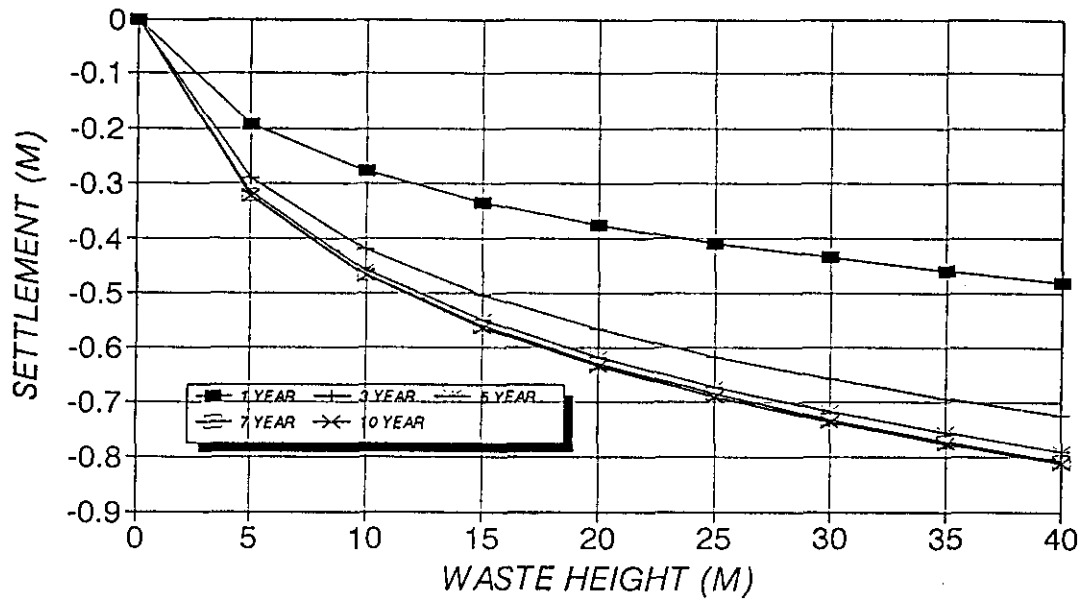
분 류	단위중량 t/m ³	압축지수(Cc) -	압밀계수(Cv) cm ² /sec	초기 간극비(e ₀) -
지 반 토	1.769	0.222	3.107x10 ⁻³	1.08
쓰레기층	1.02	-	-	-

매립지 지반의 침하량을 매립층의 높이의 증가에 따라 임의의 경과시간동안을 주기로 하여 계산하였으며 이 결과는 Fig.1.1에 보여진 바와 같다. 쓰레기 매립층의 높이는 시간의 경과에 따라 계속적으로 증가하기 때문에 매립지반에 작용하는 압밀하중은 일정하지 않다.

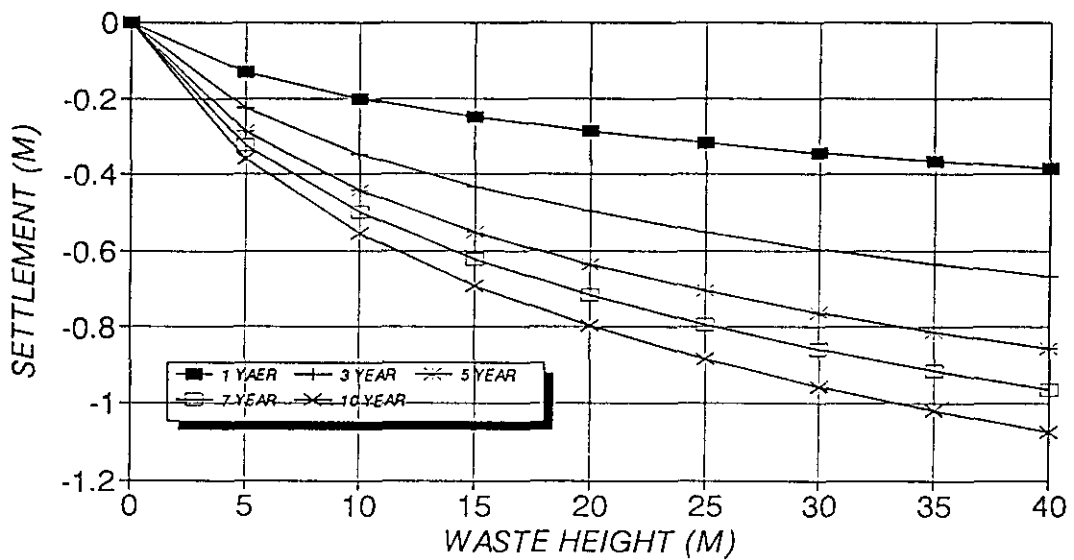
Fig.1.1 에서 나타난 침하량은 어느 임의의 매립쓰레기 높이의 하중하에서 경과된 시간동안의 침하량값이다. 즉, Fig.1.1 에서의 쓰레기 매립고와 시간과의 관계는 의미가 없다.

점토층의 두께가 6m 인 경우(Fig.1.1(a)) 쓰레기 매립고가 20m 로 10년 경과했을 경우 침하량은 0.62m 가 되며, 점토층의 두께가 11m 인 지역에서(Fig.1.1(b)) 쓰레기 매립고가 20m 로 10년 경과했을 경우 침하량은 0.8m 가 된다. 또한, 매립이 종료되었을 때의 매립고를 40m 로 할 경우, 매립종료후 10년뒤의 Liner의 침하량의 점토층두께 6m 지역에서 0.81m 이고, 11m 지역에서는 1.08m 이다. 따라서, 이 두지역에서의 침하량의 차이는 0.27m 가 될 것이다. 이러한 결과에서 보는 바와 같이 시간의 경과와 매립고의 높이가 증가함에 따라서 침하량의 차이도 증가함을 알 수 있다. 이 침하량의 차이가 매립지 시설에 영향을 끼치므로해서 여러가지의 문제점이 발생할 수 있다.

즉, 지역적 침하량의 차이로 인하여 Liner의 경사 감소함으로 인하여 침출수의 배수 효과가 약화되어 침출수의 누적수두(Mounding Height)가 증가하게 된다. 이 침출수 누적수두(Mounding Height)가 증가하게 되면 침출수의 누출(수평, 수직 방향)속도가 증가하게 되어 매립지 외부의 지하수 및 토양의 환경오염을 가속화하는 결과가 된다.



(a)



(b)

Fig.1.1 Settlements of liners based on compacted waste height

(a) Thickness of deposits = 6m, (b) Thickness of deposits = 11m

침출수의 배수효과와 누적량 그리고 침출수의 수위를 예측하는데 사용되며 배수층의 두께를 설계하는데 필요한 침출수 누적수두(Mounding Height)은 침출수의 집수관, Liner의 경사, 배수층의 투수계수, 우수의 침투율, Liner의 배수유효거리등의 값에 따라 결정되며, Demetracopoulos와 Korfiatis(1984)가 다음과 같은 식, 식(1.1)을 제안했다.

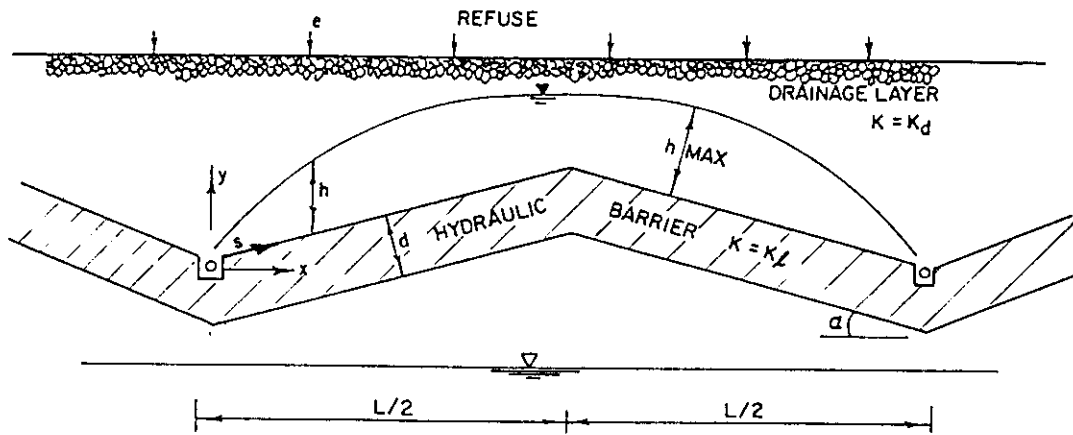


Fig.1.2 The leachate collection system with a sloping base

$$e(L/2 - s \cos \alpha) = K_d h \frac{d}{ds} (h + s \sin \alpha) \quad \text{----- (1.1)}$$

식(1.1)을 적분하면

$$\int e(L/2) ds - \int e s \cos(\alpha) ds = \int (K_d h) dh + \int (K_d h \sin \alpha) ds \quad \text{----- (1.2)}$$

만약, α 값이 작다고 가정하면 (약 0~5%의 slope) 최대 Mounding Height, h_{max} 는 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$h_{max} = (L/2) \{ (\tan^2 \alpha + e/K_d)^{1/2} - \tan \alpha \} \quad \text{----- (1.3)}$$

지반의 침하로 인한 Liner의 경사변화가 h_{max} 에 미치는 영향을 김포수도권 매립지의 자료와 식(1.3)을 이용하여 다음 그림과 같은 결과를 얻었다.

Fig.1.3은 배수층의 두께를 결정하는데 이용될 수 있으며 배수층의 두께를 h_{max} 보다 크게 설계함으로써 침출수의 누적으로 인하여 발생하는 앞에서 언급한 문제점을 해결할 수 있을 것이다.

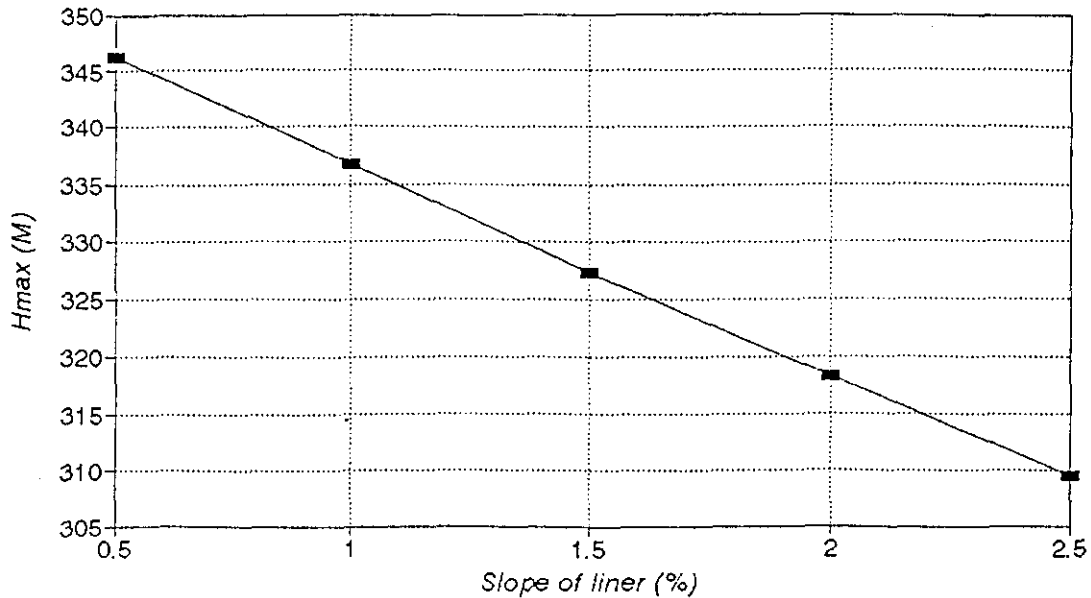


Fig.1.3 The effects of a slope of the liner on the maximum mounding height

Fig.1.3에서 보는 바와 같이 1%의 경사변화에 의해 증감이 요구되는 배수층의 두께는 17.5(cm)정도이다. 이 결과를 고려할때, 지반의 침하에 의한 Liner의 경사변화는 침출수 누적수두(Mounding Height)를 증가 또는 감소시키게 되며, 이 영향은 배수층의 두께의 결정에도 적지않은 영향을 미치게 된다.

2. 폐기물의 다짐 특성

쓰레기 매립층의 단위중량은 쓰레기의 구성인자와 형성상태, 매립방법 일일복토량 및 재료, 다짐도등에 따라 아주 큰 범위에서 다양하다.

함수비 또한 예측할 수 없을 정도로 큰 범위에 있으며, 이 함수비의 측정에도 많은 문제점이 따르게 되는데 그것은 쓰레기구성성분의 용해점이나 인화점등이 다르기 때문이다.

미국 쓰레기의 성분별 함수비와 단위체적중량을 조사한 결과 다음과 같이 보고된 바 있다. (Table 2.1, 2.2)

Table 2.1 Unit weight of uncompactd refuse components

Waste component	Uncompactd unit weight (lb/ft ³)	Water content (% of dry weight)	Ratio of compactd to uncompactd weight	
			Normal compaction	Well compactd
Food waste	8-30	50-80	2.9	3.0
Paper and paper board	2-8	4-10	4.5	6.2
Plastics	2-8	1-4	6.7	10
Textiles	2-6	6-15	5.6	6.7
Rubber and leather	6-16	1-12	3.3	3.3
Yard waste	4-14	30-80	4.0	5.0
Wood	8-20	15-40	3.3	3.3
Glass	10-23	1-4	1.7	2.5
Metals	3-70	2-6	4.3	5.3
Ash,brick,dirt	20-60	6-12	1.2	1.3

Table 2.2 Estimating unit weights of refuse for US average

Waste component	% of total waste	Assumed uncompactd weight (lb/ft ³)	Volume per ton of refuse(ft ³)		
			Uncompactd	Normal compaction	Well compaction
Food waste	8	18	9	3.1	3.0
Paper and paper board	37	4	185	41.1	30.3
Plastics	7	4	35	5.2	3.5
Textiles	2	4	10	1.8	1.5
Rubber and leather	2	9	4.4	1.3	1.3
Yard waste	18	7	51.4	12.9	10.3
Wood	4	15	5.3	1.6	1.6
Glass	10	12	16.7	9.8	6.7
Metals	10	12	16.7	9.8	6.7
Ash,brick,dirt	2	30	1.3	1.1	1.0
Total volume			334.8	87.7	65.9
Average unit weight (lb/ft ³)=2000/334.8			6	22.8	30.3

또한, 쓰레기의 종류별 단위체적중량을 조사한 결과, Table 2.3에 나타난 바와 같다.

Table 2.3 Unit weights for landfill materials

Description and state	Total unit weight	
	lb/ft ³	kN/m ³
Municipal waste		
Poor compaction	18-20	2.8-3.1
Moderate to good compaction	30-40	4.7-6.3
Good to excellent compaction	55-60	8.6-9.4
Baled waste	37-67	5.5-10.5
Shredded and compacted	41-67	6.4-10.5
In situ density	35-44	5.5-6.9
Active landfill with leachate mound	42	6.6
North-east US active landfill	30-40	4.6-6.3
Incinerator residue		
Poorly burnt	46	7.2
Intermediate burnt	75	11.8
Well burnt	81	12.6
Ashes	41-52	6.4-8.2
Hazardous waste landfill site		
75 ft deep dry dust and soil	101	15.9
40-50 ft deep dry dust and soil	30-110	4.6-17.3
62 ft deep waste average		
Kiln dust, sludge tar, creosote and soil	73	11.5
Dust	46	7.2
Tars	104	16.3
Contaminated soils	69	10.8
75 ft deep chemical solutions and scrap		
metals mixed with contaminated soil	63-74	9.9-11.6
30-40 ft deep landfill with 90-95% waste in metal drums	90	14.1

쓰레기층의 다짐에는 주로 동다짐(dynamic compaction)공법을 사용하는데 다짐효과로 약 70%의 초기침하와 50%의 잔유침하량을 감소시킬 수 있다. 또한, 쓰레기층의 다짐을 함으로서 오염물질(침출수)가 표면으로 배어나오게 되는데 이에 대한 배수처리문제도 해결되어야 할 것이다.

3. 침출수의 이동 및 오염방지

쓰레기의 매립에 의하여 발생하는 침출수는 침출수 집수관로를 통하여 침출수 처리장으로 전량이동되어야 하지만, 일반적으로 100% 제거되기는 어렵다. 결국, 제거되지 못한 침출수는 누적되거나 차수층의 하부방향으로 침투되어 지하수의 오염이나 주변하천의 오염발생의 근원이 된다.

본 연구에서는 침출수가 매립지 외부로 누출되기 쉬운 가장 Critical한 재방도로 부분을 선정하여 침출수의 시간경과에 따른 이동경로 및 오염농도의 분포상태를 검토하였다.

오염물질의 이동은 여러가지 다른 현상들에 의해서 통제되는데 그 요소들에는 Advection, Chemical Reaction, Diffusion, Retardation, Decay Rate 그리고 Dispersion 등이 있다. 사용된 식은 질량불변의 법칙(The Law of Conservation of mass)을 근거로 해서 Ogata(1970)와 Bear(1972)에 의해 유도되었다. 이 식을 유도함에 있어서의 가정은 균질하고 등방성이며, 완전 포화상태인 매체이고 Darcy's 법칙이 적용된다. 이러한 가정을 포함한 오염물질이동을 설명하는 미분방정식을 1방향식(One-Dimensional Equation)으로 나타내면 다음과 같다.

$$D_x \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} - u_x \frac{\delta c}{\delta x} = \frac{\delta c}{\delta t} \quad \text{----- (3.1)}$$

$$\text{여기서 } D_x = \alpha_x u_x + D^* \quad \text{----- (3.2)}$$

c = 오염농도 (concentration) (mg/l)

D^* = 유효확산계수 (the diffusion coefficient) [m^2/day]

α_x = 분산지수 (Dispersivity) [m]

$u_x = \frac{V}{n} = \text{흡속 흐름속도 (Darcy's velocity) [m/day]}$

n = porosity

위 식에서 첫번째항인 $\alpha_x u_x$ 는 흡의 공극과 흐름속도에 관계하며, 두번째항인 D^* 는 오염물질의 물리적성질에 관계한다.

매립지에서의 침출수의 이동해석을 위하여 김포수도권매립지의 경우를 가지고 분석해 보았는데 이 매립지는 별도의 차수시설이 없이 본래의 불투수성 점토층을 차수시설로 간주하여 설계되었다. 매립지의 주변에는 하천이 있으며, 하천과 매립지를 분리하기 위하여 제방을 설치하고 제방의 매립지쪽 법면부는 토목섬유(HDPE)로 덮어 침출수의 누출을 차단했으며, 이 HDPE는 차수층(지반토)하부 0.5(m) 까지 근입시켜 제방하부의 침출수 누출을 차단하고자 했다. 제체의 재료는 주로 마사토를 사용했으며, 제체 축조건 50~30cm 두께의 모래층을 설치하여 제방도로부분에서의 Pre-Loading을 통한 압밀의 효과를 기대하였다. 설계보고자료에 의하면 이 부분에서의 침하량은 23(cm)정도가 되는 것으로 보고 되었다.

매립지 지반(차수층)을 형성하고 있는 해성퇴적층의 토질특성은 아래표에 나타나 있다.

Table 3.1 Geotechnical Characteristics of the Liner

토질 정수	단 위	값
비 중	-	2.668-2.693
함 수 비	%	29.9-45.9
간 국 비	-	0.848-1.286
#200체 통과량	%	81.3-97.4
액 성 지 수	%	31-53.1
소 성 지 수	%	3.8-27.2
점 착 력	kg/cm ²	0.18-0.36
일축압축강도	kg/cm ²	0.303-0.69
압 축 지 수	-	0.15-0.48

침출수의 이동은 투수성이 높고 이동경로가 짧은 곳에서 현저하게 나타나므로 매립지 제방의 폭이 가장 작은 부분을 택하여 한계단면(Critical Section)으로 삼아 오염물질 이동에 대하여 Simulation을 하였다.

본 연구에 사용된 Model은 Eq.3.1 을 유한 요소법에 의한 수치해석(Finite Element Method)으로 해석했으며, 이를 Computer Program으로 만든 "AQUA"인데 Iceland의 Vatnaskil Consulting Engineers에 의해 개발되었다. 2차원으로 해석한 AQUA는 Homogeneous, Heterogeneous, Isotropic, Anisotropic한 토질조건하에서 지하수 및 오염물의 거동을 Simulation할 수 있으며, 삼각형 Mesh System을 채택했으며 Galerkin Finite Element Method에 의해 해석된 Program이다.

"AQUA" Computer Program을 사용하여 매립지에서 발생한 오염물(침출수)의 거동을 분석하여 다음과 같은 상호관계를 규명하고자 하였다.

- 시간의 변화에 따른 오염농도의 분포 및 경로
- HDPE 변화에 따른 오염농도의 분포 및 경로
- 제방내측 10 폭 녹지설치에 따른 오염농도의 분포 및 경로
- HDPE 근입깊이 변화에 따른 C/C₀ Vs. time
- 수두경사변화에 따른 C/C₀ Vs. HDPE 근입 깊이

또한, 제방의 외측녹지부분에서 검출될 수 있는 오염농도를 수두경사와 경과시간과의 관계를 지어 지하수 수질기준에 비교하여 설명하였다.

3.1 모델에 대한 조건 및 자료 분석

차수층으로서 사용된 해성퇴적층의 상부층은 점토질 Silt(2m)이며, 하부층은 Silt질 점토층으로서 투수계수를 현장에서 원위치 현장투수시험에서 얻은 값의 산술평균값을 사용하였다. 쓰레기 매립장 내부측에서의 침출수의 수두는 제방의 높이를 고려하여 3m를 적용했으며 수두경사를 결정하는데 사용되는 인접하천에서의 수두는 갈수기와 우수기때의 수두가 같지 않으므로 0m 에서 2m 까지 변화시키면서 여러가지 값을 적용했다. 본 연구에서 사용된 Model의 Cross Section은 매립지 제방중 가장 위험하다고 판단되는 단면을 설정하였으며 Fig.3.1에 보여진 바와 같다.

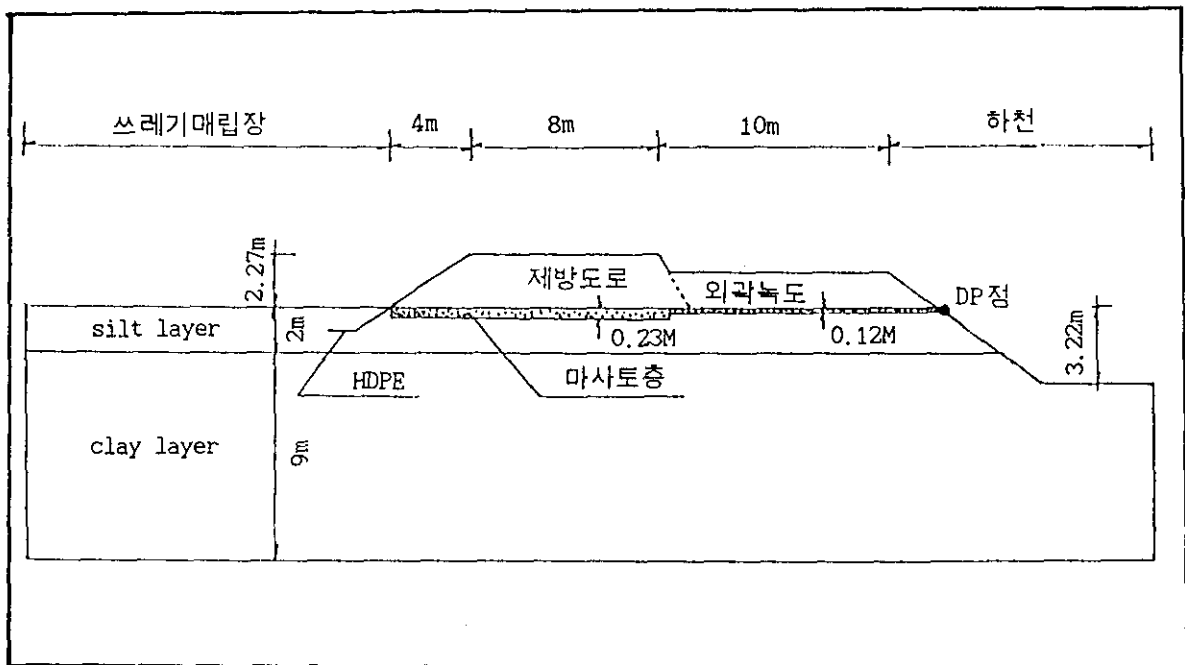


Fig.3.1 A Cross-Section of the Critical site in the landfill

Fig.3.1의 표준단면에서 보는바와 같이 제방도로의 높이는 Liner로부터 2.27(m)이며, 매립지 외곽쪽에 위치한 하천의 하상은 Liner 표면의 위치로부터 3.22(m) 낮은 위치에 있다. 제방은 제방도로부분과 외부하천쪽의 외곽녹도로 구성되어 있으며, 제체를 구성하는 성분은 주로 마사토로서 투수계수가 비교적 높은 종류의 흙이다. 또한, 제방도로와 녹도부분의 Liner는 압밀에 의해 침하가 발생되는데 침하량은 각각 0.23m와 0.12m 로 보고서에 나타나고 있다.(설계 및 시공감리보고서 : 선진 Engineering 1992) 본 연구에서는 이 침하량만큼의 마사토층이 제방 및 녹도의 하부 Liner에 포설되어 있는 것으로 가정하여 분석하였으며 이러한 가정은 시간의 경과에 따라 더욱 타당하다.

Fig.3.1에서 오염원(The Source of Contaminants)은 제방의 내(內)측의 Liner 표면 부이며 $C/C_0 = 1$ 로 가정하였다. HDPE가 제방내측법면을 따라 Liner의 0.5m 까지 근입하여 깔려 있는데 HDPE에서의 투수성은 불투수층으로 가정하였으며, 유속을 결정하게 되는 수두경사는 제방외곽하천의 하상에서의 수위변화에 따라 결정된다. 매립폐기물의 흙속에서의 유효확산계수의 실측자료가 없는 관계로 Goodal과 Quigley의 보고서에서 보인 값을 인용했으며 분산지수는 1m로 가정하여 적용했다.

Fig.3.1의 Model의 Simulation을 위한 유한요소망을 짜기 위해서 AQUA를 이용했으며, 총 nodal point의 수는 194이며 element의 수는 286인데 유한요소망은 Fig.3.2에 보여진 바와 같다.

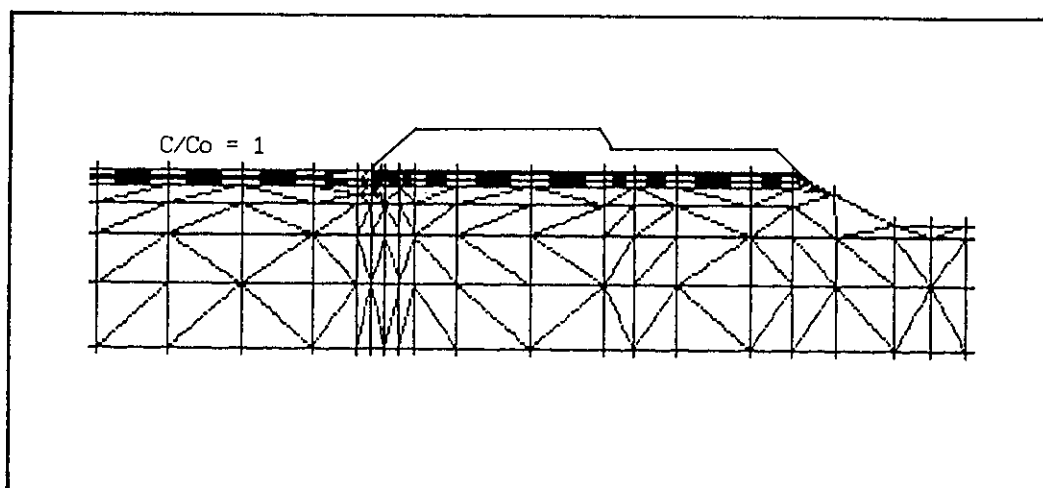


Fig.3.2 The finite element mesh system for the simulation of contaminant migration

제방 외곽 하천에서 시간에 따른 오염 농도의 변화를 알아보기 위하여 하천선단부에 Detection point를 선정하였으며 수치해석시 제체내에도 오염물이동은 제외시켰다. Fig 3.1에서 설명된 Critical Section Model을 Simulation하기위하여 사용된 토질상수 및 침출수의 물리적 특성들은 Table 3.2에 집계하여 나타내었다. 라이너의 투수계수값은 점토지반이 비균질, 이방성지반이며 부분적으로 산재하는 모래층(Sand seam)등의 영향을 고려하여 현장실측에서 얻은 값을 산술평균하여 적용하였으며 마사토의 투수계수는 적용가능한 범위인 $1E-3$ cm/sec 를 적용 하였다.

Table 3.2 Summary of input data for the model(Fig3.1)

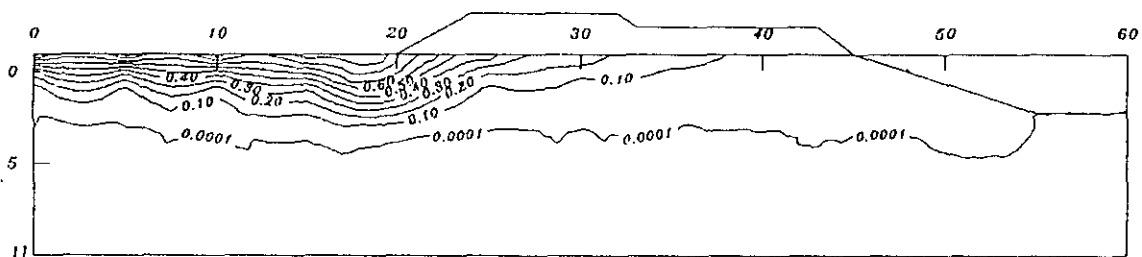
분 류		값	비 고
투수계수 (cm/sec)	Silt	1.794E-5	· 투수계수는 실측지 평균값을 사용 · 유효확산계수는 Goodal과Quigley로 부터 인용 · 분산지수는 가정
	Clay	3.60E-6	
	마사토	1.0E-3	
공극률 (%)		0.46	
분산지수 (m)		1.0	
유효확산계수 (cm ² /sec)		6.0E-6	

3.2 결과 및 분석

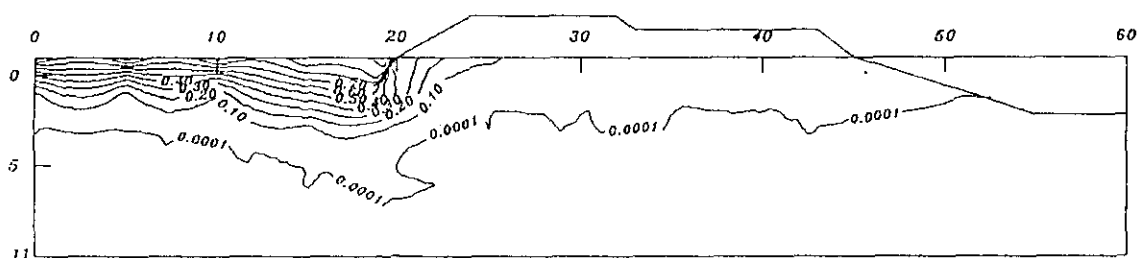
이미 설명한 바와 같이 현장 및 실험실에서 얻은 토질정수들과 포화된 흙속에서의 침출수의 이동에 필요한 특성계수들을 가능한 한 범위내에서 적당한 값을 가정하여 Fig.3.1의 Model을 매립후 20년이 경과된 시점에서 Simulation 한 결과 Fig.3.3(a)(b)(c) 와 같은 결과를 얻었다.

침출수의 이동경로에 영향을 미치는 요소들은 투수계수, 확산계수, 분산지수, 간극 율 등의 침출수와 토질의 특성과 시간, 수두경사, 이동거리 등이 있다. 침출수의 이동 경로를 Simulation한 결과 Fig.3.3(a)와 같이 나타나고 있는데 침출수는 제방 및 외곽늪도 하부지반에서 제방 내측 Liner의 표면위치보다 23(cm)와 12(cm) 침하되어 있는 얇은 마사토층을 따라 빠른 속도로 이동하고 있다. 즉 압밀침하로 발생된 제방 및 늪도 하부지반의 마사토부분에서의 이류(Advection)의 영향이 크게 나타난다. 호우기 철에 우수의 영향으로 외곽하천의 하상에서 수위가 증가함에 따라 수두경사가 감소하게 되는데 이 수두경사의 감소는 침출수의 이동 속도를 감소시킨다. 즉 제방 외곽 하천에서의 수위 증가는 수두경사의 감소와 함께 침출수 이동속도를 감소시키는 결과를 가져오게 된다.

HDPE의 근입깊이를 1(m) 증가시키고 Fig.3.3(a)와 같은 조건에서 Simulation 한 결과는 Fig3.3(b)에 보여지는 바와 같이 제방 외곽하천에서 검출되는 침출수로 인한 오염농도가 HDPE의 근입깊이를 증가시킴으로써 제방 내측의 Liner 표면에 분포한 오염원(Sources)으로부터 시작되어 하천쪽으로 이동하는 침출수의 이동경로가 길어지고 비교적 투수성이 큰 Silt 층을 차단하는 효과도 있다. 이러한 이유로 해서 Fig.3.3(a)와 Fig.3.3(b)의 해석결과를 비교해 볼때 HDPE의 근입깊이를 증가 시킴으로써 침출수 누출을 차단할 수 있는 효과를 증가 시킬 수 있다.



(a)



(b)

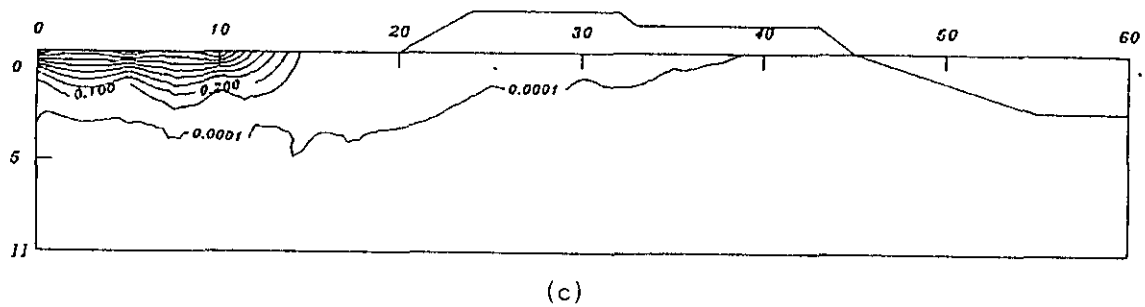


Fig.3.3 Contours of leachate migration through liners under the bank at 20 yrs
 (a) The depth of HDPE = 0.5m (b) The depth of HDPE = 1.5m
 (c) Using extended bank

지금까지의 결과로 보아 침출수의 이동경로를 증가시킴으로서 침출수의 누출로 인한 인접하천의 오염을 감소시킬 수 있다는 것을 쉽게 확인 했다. 침출수의 이동경로를 증가시키는 다른 하나의 방법은 제방내부쪽에 녹도를 설치하는 방법도 생각해 볼수 있다. 따라서 제방내부쪽에 10m 폭의 녹도를 설치하였을 경우에 대하여 Simulation을 한결과 Fig.3.3(c)와 같은 결과를 얻었다. Fig.3.3(c)에서 제방 내부쪽에 10m 폭의 녹도를 설치한 외에는 Fig.3.3(a)의 경우와 같은 조건이다. 여기서 설치된 녹도의 성토재료는 Liner에 쓰인 재료와 같은 것으로 하고 제방토질 특성도 Liner와 같은 것으로 가정 하였다. 결과적으로 제방내측에 녹도를 설치하는 방법도 제방인접하천의 오염을 감소시키기 위한 좋은 수단이라할 수 있다.

침출수의 누출을 감소 시킬수 있는 방법으로는 여러가지가 있겠으나 일반적으로 두 가지 방법인 차수시설(HDPE)의 근입깊이를 증가시키는 방법과 녹도를 두어 침출수 이동경로를 증가시키는 방법을 생각할 수 있다. Fig.3.3(b)와 Fig.3.3(c)를 비교하여볼 때, 매립후 20년 경과된 사점에서의 침출수의 누출방지효과는 10m 폭의 녹도를 제방내측에 설치했을때가 HDPE(차수벽) 근입깊이 1.5m 설치 때보다 더 크다는 것이 확인 되었다.

침출수가 누출되어 제방외곽하천에서 검출되는 농도는 시간의 경과에 따라 증가하게 되는데 그 이유는 Model Simulation에서 오염원의 농도가 항상 일정한값을 유지하는 것으로 가정 했기 때문이다. 따라서 어느 기간까지는 계속 증가 하지만 오염원의 농도가 감소됨에 따라 제방외곽하천에서 검출되는 농도역시 감소된다. 본 연구에서는 Model Simulation 기간동안 오염원(Sources)에서의 농도변화는 없는 것으로 가정하였으며 제방외곽하천의 선단부(Detection Point)에서 검출되는 침출수의 농도변화와 시간과의 관계를 여러가지 침출수 누출 방지시설의 조건(HDPE의 근입깊이, 녹도의 폭)의 효과를 비교하였다. 비교결과는 Fig.3.4(a)와 Fig.3.4(b) 에서 잘 나타나고 있는 바

와 같이 HDPE의 근입깊이가 깊을 수록 누출방지 효과는 크게 나타나는데 이효과는 시간의 경과에 따라 더욱 크게 나타난다. 이 두 그림(Fig.3.4(a)와 Fig.3.4(b))에서 확인된 바와 같이 제방내부쪽에 10(m)폭의 녹도를 설치할 때의 효과는 HDPE의 근입깊이를 2(m)로 하는 것과 거의 일치한다.

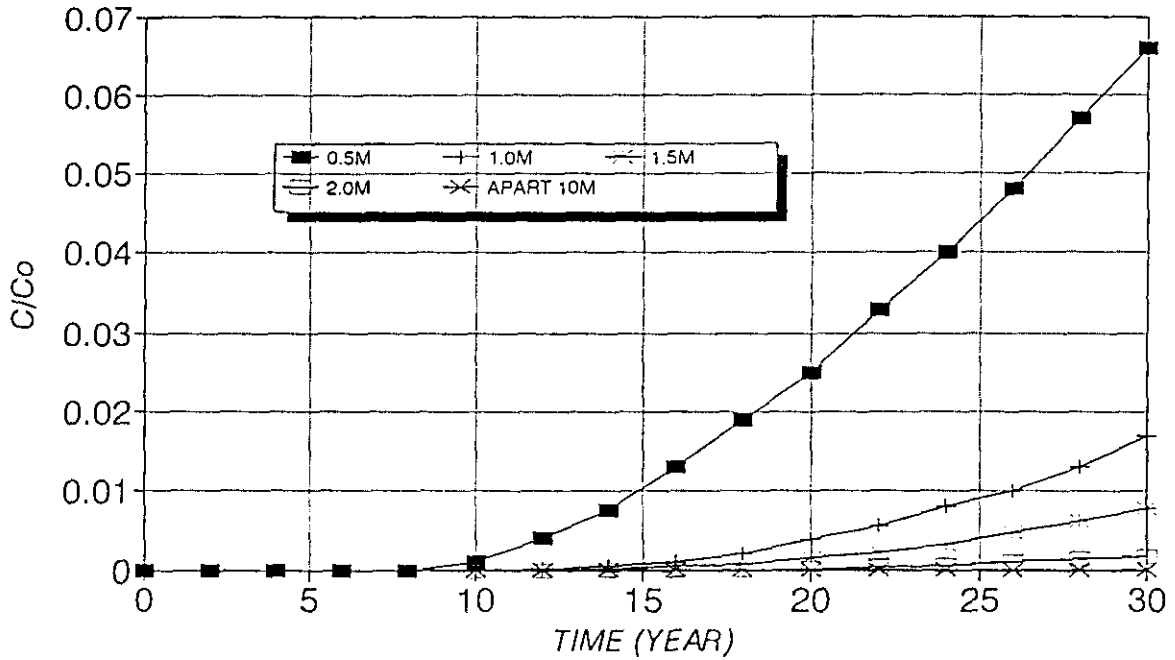


Fig.3.4(a) C/Co Vs. Time at the detection point(DP)
for different depth of HDPE(H=0.0 m)

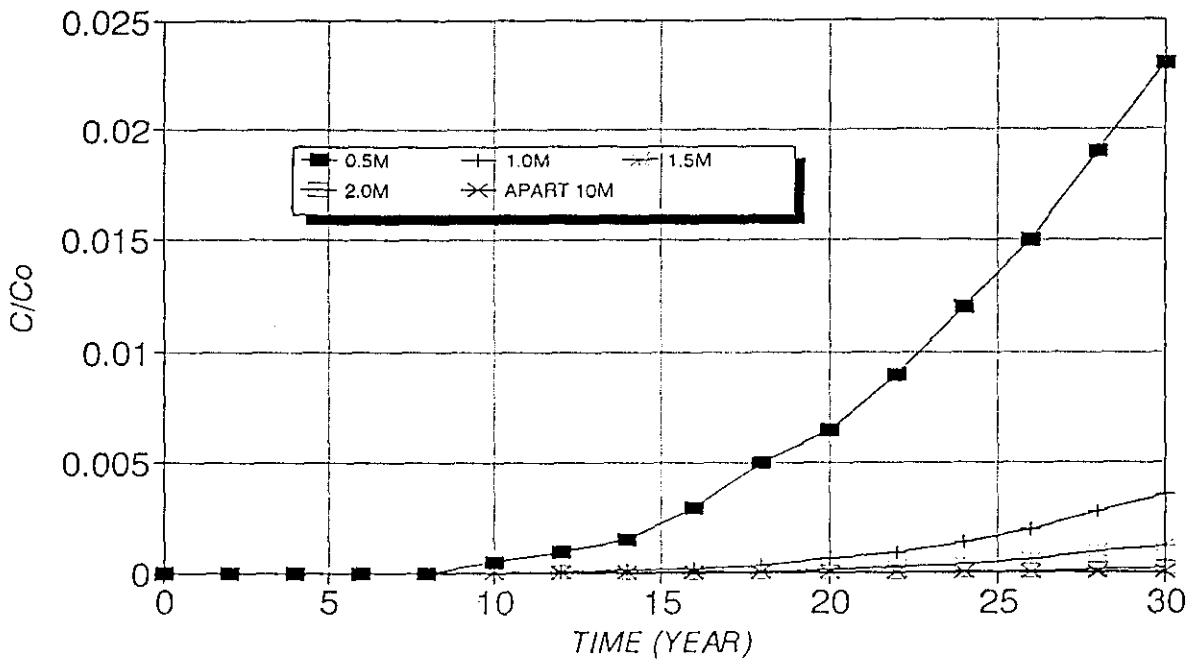


Fig 3.4(b) C/Co Vs. Time at the detection point(DP)
for different depth of HDPE(H=2.0 m)

이 두 그림에서 HDPE의 깊이를 현재의 0.5(m)로 하고 매립 20년 경과후의 호우기일 때(H=2.0m) 하천선단 (DP지점)에서의 오염농도의비(C/Co)는 0.0067로 나타나며 같은 저건에서 갈수기(H=0.0m) 일때는 0.025로 나타난다. 또한 갈수기(H=0.0m)때 (Fig.3.4(a)) 현재상태인 HDPE의 근입깊이가 0.5(m) 일때와 HDPE의 근입깊이를 2(m)로 증설하거나 10(m) 폭의 녹도를 제방내측에 설치했을 경우, 매립 20년 경과후의 C/Co는 각각 0.025(HDPE 근입깊이 0.5m)와 0.00025로서 거의 100배 이상의 차이가 있음을 알 수 있다.

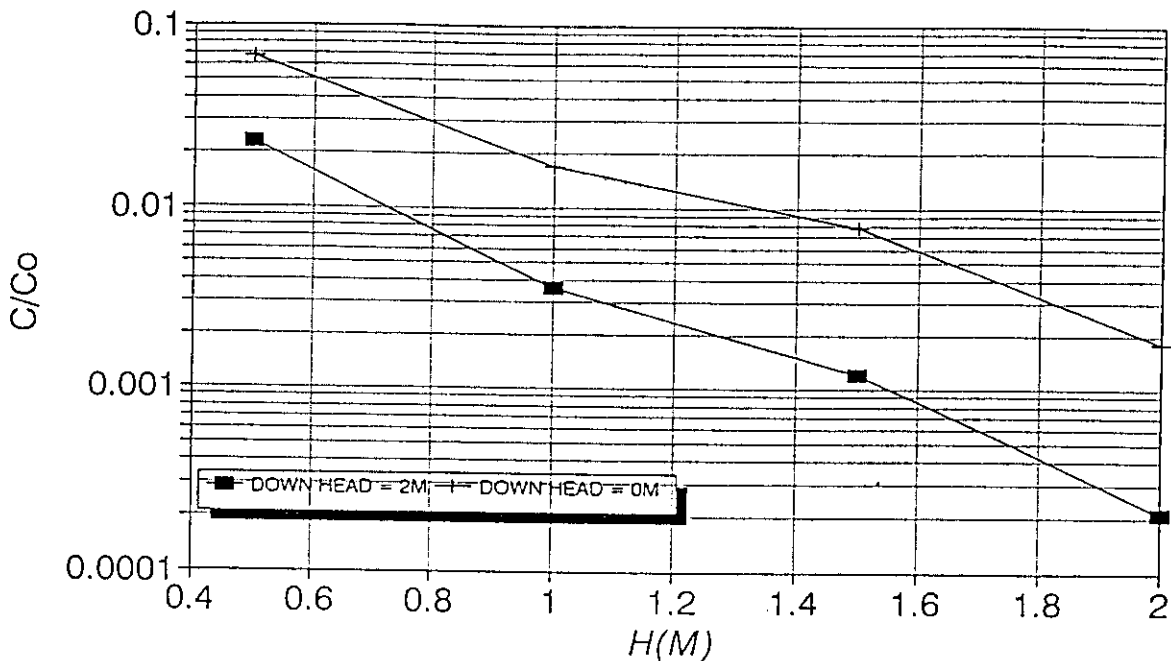


Fig.3.5 C/Co Vs. depths of HDPE for different down-heads after 30 year

그러므로, HDPE의 근입깊이는 침출수의 누출량을 감소시키는데 아주 중요한 요소로 작용함을 알 수 있는데 제방외곽하천선단부(Detection Point, DP지점)에서 검출되는 C/Co와 HDPE의 근입깊이와의 관계를 가지고 반대수표(Semi-Log Graph)에 나타낸 결과 Fig.3.5와 같이 나타났다. 그림에서와 같이 Log(C/Co)의 값은 HDPE 근입깊이의 증가에 따라 반비례한다.

우리나라의 쓰레기 매립지에서 발생하고 있는 침출수의 COD와 BOD는 각각 매립 2년 경과 후 16000ppm과 8950ppm(도갈수 : 1992)으로 나타나고 있다.

이값들을 기준으로하여 이미 설명한 바 있는 세가지의 Model 들을 가지고 Simulation 하여 쓰레기 매립 10년, 20년, 30년 경과 후 매립지 제방 외곽 하천의 Detection Point(DP 지점)에서 검출될 수 있는 COD와 BOD값을 계산해본 결과 Table 3.3과 같은 현황을 얻었다. 여기서 COD와 BOD는 시간의 경과에 관계없는 것으로 가정하였다. 사실은 COD와 BOD의 값은 시간의 경과에 따라 감소한다. 그러나 실제의 매립지에서 시간의 경과에 따라 농도가 무관한 유해물질도 많이 있다.

따라서 본 연구에서는 실제의 침출수 농도를 가지고 분석하지 않고 이해하기 쉬운 COD와 BOD의 값을 가지고 분석하였다.

Table 3.3 침출수 누출방지 시설들의 방지효과 및 수두경사의 영향

단위 mg/l

누출방지 시설		갈수지역 (H=0.0m)			호우지역 (H=2.0m)			비 고
		10년	20년	30년	10년	20년	30년	
HDPE 근입깊이 0.5 m	COD	48	400	1056	8	99.2	368	Fig. 3.3(a)
	BOD	26.85	223.75	590.7	4.48	55.5	205.9	
HDPE 근입깊이 1.5 m	COD	3.2	24	126.4	0.16	2.4	19.2	Fig. 3.3(b)
	BOD	179	13.4	20.1	0.09	1.34	10.7	
제방내측 10m 녹도	COD	0.03	0.48	1.92	0.002	0.03	0.30	Fig. 3.3(c)
	BOD	0.018	0.27	1.07	0.001	0.02	0.17	

Table 3.3에서 나타난바와 같이 HDPE 근입깊이가 0.5m 이며 제방외곽하천에서의 수두가 Zero일때 하천의 DP점에서 검출되는 COD는 매립 20년 경과후에 400ppm이고 30년 경과후는 1056ppm 으로 우리나라의 수질기준(30ppm)을 훨씬 초과하는 값으로 나타나고 있다. 그러나 HDPE의 근입깊이를 1.5(m)로 하거나 제방내측에 10(m) 폭의 녹도를 설치했을 경우의 COD 값은 아주 안전한 범위에서 나타난다.

4. 결론 및 제안

폐기물 매립지는 폐기물의 최종처분장으로서 폐기물로부터 발생하는 오염물질을 외부와 격리시켜 관리 하여야 하는데 이에 차수층의 역할은 대단히 중요한 부분을 차지하고 있다. 이 연구에서 Model로 사용한 김포 수도권 매립지의 경우 본래의 지반인 해성퇴적층을 차수층(Liner)으로서 사용하였고 제방부분의 차수시설에서는 제방하부지반의 차수보다는 제체 자체에 노력을 했다. 수도권매립지와 같이 본래의 지반을 차수층으로 대용한 현장에서 야기되는 침출수 누출은 지반을 통하여 이루어지는 것이 일반적이다.

지금까지 김포 수도권 매립지의 설계자료 및 현장조사자료를 근거로 하여 지반의 침하, 침출수의 누출 및 거동과 침출수 누출방지 시설의 효과 및 영향 등을 임의의 한계 단면을 Model로 하여 Computer Simulation 한결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 지반 침하량의 차이에 의해서 침출수의 배수효과가 저하될 수 있으며 그로인하여 침출수 누적수두(Mounding Height)가 증가하여 침출수의 외부누출 속도에 영향을 미칠 수 있다.

이것은 침출수의 배수효과를 높히거나 침출수의 발생량을 감소시키는 방법을 택함으로써 많은 효과를 얻을 수 있을 것이다.

Liner의 Slope과 침출수의 최대 누적수두(Maximum Mounding Height)는 서로 반비례하는 관계에 있다.

2. 제방부분에서의 침출수의 누출속도는 제방하반부의 처리나 제체의 재료의 선택에 따라 좋은 효과를 볼 수 있으며 또한 차수시설을 한다면 더욱 좋은 효과를 얻을 수 있을 것이다. 본 연구에서 얻은 결과와 같이 HDPE의 근입깊이는 침출수의 누출량을 감소시키는데 큰영향을 끼치며 HDPE의 근입깊이와 DP지점에서의 검출되는 $\log(C/Co)$ 와의 관계는 반비례 한다.

3. 침출수가 제방하부로부터 외곽하천 쪽으로 누출되는 것을 방지하기위한 다른 수단으로는 제방내부측에 녹도를 설치하는 것도 고려되어질 수 있다. 이렇게 설치된 녹도는 침출수가 하천에 까지 이동하는데 걸리는 시간을 지연시키는 역할을 한다. 따라서 녹도설치에 있어서 녹도하부층에 사용되는 재료는 가능한한 차수층(Liner)의 재료와 같은 것일 수록 좋다.

Fig.3.4 에서 확인된 바와 같이 10(m) 폭의 제방내측 녹도설치는 HDPE의 근입깊이를 2(m)로 한것과 같은 침출수 누출방지 효과를 얻을 수 있다.

4. Liner로 침투하여 매립지외부로 누출되는 Leachate의 이동경로를 분석하기에는 규명되어져야할 사항들이 많이 있는데 그 이유는 Leachate를 구성하고 있는 성분들이 아주 다양하여 각각의 성분들이 상호작용을 하고 있기 때문이다.

Liner와 차수벽시설의 설계에 있어서 다루어져야할 여러가지 사항들이 본 연구를 통하여 밝혀졌는데 그중 세가지만 밝혀 두고저 한다. 본래의 점토질 지반이 차수층(Liner)로 사용될 경우 첫째, 제방내부법면에서의 차수시설의 설계는 침출수가 안전한 경과기간 내에서 법적 Model Simulation을 통하여 매립지 외곽에서 검출된 수질 기준 범위를 넘지 않도록 그의 근입깊이가 결정 되어져야 하며, 차수재(HDPE)의 내구성도 안전기간 내에서 안정하여야 할것이다. 둘째로 침출수 수집관로의 배치와 Liner의 경사에 대한 설계 그리고 배수층의 두께 등 지반의 침하량과 침출수 누적수두(Mounding Height)를 고려하여 결정하되 서로다른 지역의 침하량의 차이에 대해서도 고려하여야 할것이다. 세번째로는 녹도의 설치를 이용하여 차수의 기능은 물론 외관상의 환경보호에도 고려할 수 있는 방법등의 다양한 검토를 통하여 최적의 조건을 갖는 수단을 택할 필요가 있다.

참고문헌

1. 환경처, 쓰레기처리시설 구조지침 및 해설, 1991
2. 환경처, 수도권 매립지 건설사업 제1단계 시설공사 시공감리보고서, 1992
3. Demetracopoulus, A.C. and Korfiatis, G.P., Design Considerations for landfill bottom collection system, Civil Engineers for Practicing and Design Engineers, v.3, 967-984, 1984
4. Wood, Richard D. Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE, 1987
5. U.S.EPA, Seminar on The Design, Operation, and Closure of Municipal Solid Waste Landfill, 1992
6. U.S.EPA, Corrective Action : Technologies and Applications, U.S.EPA, Cincinnati, OH, 1989
7. Oweis, S. and Khera, R. Geotechnology of Waste Management, Butterworths, 1990
8. Oberlander, P.L. and R.W. Nelson, An Idealized Groundwater flow and chemical transport model (S-PATHS). Groundwater vol.22.No.4, P.441-449, 1984
9. Ogata A., Theory of dispersion in a granular medium. U.S.Geol. Survey Prof. paper 411-I, 1970