

침하에 의한 폐기물 매립지 최종복토층 HDPE의 영향에 관한 연구

The Effects of HDPE by Landfill Settlements in the Final Cover System

*1문 철 환 Moon, Chul-Hwan

*2이 재 영 Lee, Jai-Young

*3전 한 용 Jeon, Han-Yong

Abstract

The one of the most important concerns in the design of the final cover system is to restrict percolation of water into the waste body. To minimize entering the water, the final cover system has the barrier layer that consists of a single compacted clay liner(CCL) or a composite liner with high density polyethylene(HDPE) overlying CCL. The HDPE as well as CCL can be damaged by landfill settlements. Therefore, this study was conducted to assess the effects of HDPE induced by settlements in the final cover system after closure. The results of the three test that is field test, lysimeter test in laboratory, and prediction of settlement represent that the HDPE in the final cover system is not pretty much affected by settlements and stable on settlements.

요 지

최종복토의 설계에 있어 가장 중요한 요소 중 하나는 매립지 내부로 우수의 침투를 제한하는 것이다. 우수의 침투는 침출수 발생량을 증가시켜 침출수 처리 비용의 증가에 따른 매립지 운영 비용을 증가 초래한다. 따라서, 매립지의 최종복토층은 우수의 침투를 최소화하기 위해 단독의 다짐점토층 또는 HDPE와 다짐점토층의 복합으로 구성된 차단층을 포설하도록 되어 있다. 그러나 다짐점토층과 HDPE는 매립 폐기물의 분해에 의해 발생하는 침하에 의해 손상이나 파손이 발생할 우려가 있다. 따라서 본 연구는 매립 종료 후 침하에 따른 폐기물 매립지 최종복토층 HDPE의 영향에 대해 평가하고자 수행되었다. 현장시험시공과 lysimeter test, 최종복토 후 침하 예측 결과 최종복토층의 HDPE는 침하에 의한 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타나 침하에 대해 안정하다고 할 수 있다.

Keywords : HDPE, Settlement, Final cover system, Landfill

1. 서론

폐기물 매립지 완료된 후에 안정화 및 환경오염 방지를 위해 시행되는 최종복토의 기능은 첫째, 우

수를 지표면으로 유출을 증진하여 매립장 안으로 침투를 억제시키며, 둘째, 폐기물의 노출시 자연환경 위생에 대하여 완충 작용을 하며, 마지막으로 매립지의 침하 및 침강을 억제 하는데 있다(이, 2003).

*1 학생회원, 서울시립대학교 환경공학부 석사과정(Graduate student, Dept. of Env. Eng., The Univ. of Seoul)

*2 정회원, 서울시립대학교 환경공학부 교수(Member, Professor, Dept. of Env. Eng., The Univ. of Seoul)

*3 정회원, 전남대학교 공과대학 응용화학공학부 교수(Member, Professor, Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Korea)

현재 위생 매립의 형태로 건설·운영되고 있는 매립지 최종복토층의 포설 규정은 1999년 8월 이후로 Fig. 1과같이 시행되고 있다. Fig. 1에서 1안은 차단층 포설을 점토·점토광물혼합토 등으로 두께 45cm로 설치하도록 하고 있으며, 2안은 점토·점토광물혼합토 등으로 두께 30cm 이상 설치한 후 그 위에 두께 1.5mm 이상인 합성고분자차수막(Geomembrane)을 설치하도록 규정하고 있다. 매립지에서 주로 이용되는 Geomembrane은 High Density Polyethylene(HDPE)으로, 이는 밀도가 0.94g/cm³ 이상, 파단인장 변형율이 700%이상인 좋은 물리적 성질을 가지고 있다.

그러나 폐기물 매립지에서 매립 폐기물의 분해에 의한 체적 감소로 발생하는 침하에 의해 최종복토층, 특히 차단층의 손상이 발생할 경우 우수 침투에 의해 침출수 발생량 증가에 따른 처리비용의 상승에 의해 매립지 운영비용이 증가하게 된다. 문헌에 따르면 최종복토에서 다짐점토층(Compacted Clay Liner; CCL)은 부등침하의 결과 크랙(crack)이 발생할 수 있으며, Geomembrane은 비교적 큰 부등침하에도 잘 견딜 수 있다고 서술하고 있으나(Daniel, 1993), 국내외 적으로 이에 대한 연구가 부족한 실정이며, 과거의 연구 또한 역학적 계산에 의한 것으로 실제 매립지에서의 현상을 충분히 반영할 수 없는 문제점을 가지고 있다(Nenad Gucunski et al. 1996; L. Courard 2000).

따라서 본 연구는 침하에 대한 HDPE의 영향을 평가하기 위해 현장시험시공, lysimeter 실험, 대상 매립지의 침하 예측을 수행하였으며, 현장시험시공 및 침하 예측 결과를 바탕으로 매립지 사후관리 기간 동안의 침하에 의한 HDPE의 내구성을 판단해보고

자 하였다.

2. 실험방법

2.1 Lysimeter test

매립된 폐기물은 gas와 침출수로 분해되어 원질량의 30~40%가 감소하며, 질량의 감소는 부피의 감소를 유발하여 매립 폐기물층에 공간이 발생하고 폐기물의 자중 및 상재하중에 의해 침하가 발생한다. 즉, 매립지에서의 침하는 매립폐기물의 분해에 의한 공극의 발생과 상재하중에 의해 발생하게 된다. 따라서, lysimeter 실험에서는 매립지에서 발생하는 전체 및 부등침하를 재현할 수 있는 실험기구를 제작하여 상재하중과 하중재하시간에 따른 HDPE의 변형율과의 관계를 알아보고, 이를 통하여 침하발생시 HDPE의 영향을 파악하고자 하였다.

최종복토층에서 HDPE에 영향을 주는 상재하중은 배수층과 식생대층으로 하중의 산정과정 및 결과를 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용되는 lysimeter는 하중을 발생시키기 위하여 모터(motor)를 사용하였으며, 실험기간동안 일정한 하중 유지를 위해 로드셀(load cell)에서 하중을 감지하여 모터를 컨트롤 하도록 제작되었다. 로드셀에서 하중을 감지하여 미리 입력한 값을 초과하게 되면 모터가 멈추게 되고, 하중이 입력한 값 밑으로 떨어지게 되면 모터가 작동하여 하중을 주는 방식으로 실험기간동안 일정한 하중을 유지할 수 있게 하였다. 실험기간동안 HDPE를 고정하는 부분에서 HDPE가 빠지거나 찢어지지 않게 하기 위해 HDPE를 고정 plate와 chamber

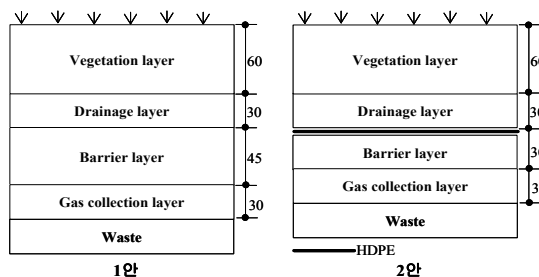


Fig. 1. The regulations for final cover system

Table 1. Calculation of loading acting on HDPE

Classification	Unit Weight (kg/m ³)	Thickness (cm)	loading (kg/m ²)
Vegetation layer ^{a)}	2,028	60	1,216.8
Drainage layer ^{b)}	1,919	30	575.7
Total	1,216.8 + 575.7		1,792.5

a) Vegetation layer : 느슨하고 모난 실트질 모래

b) Drainage layer : 느슨하고 균질한 모래

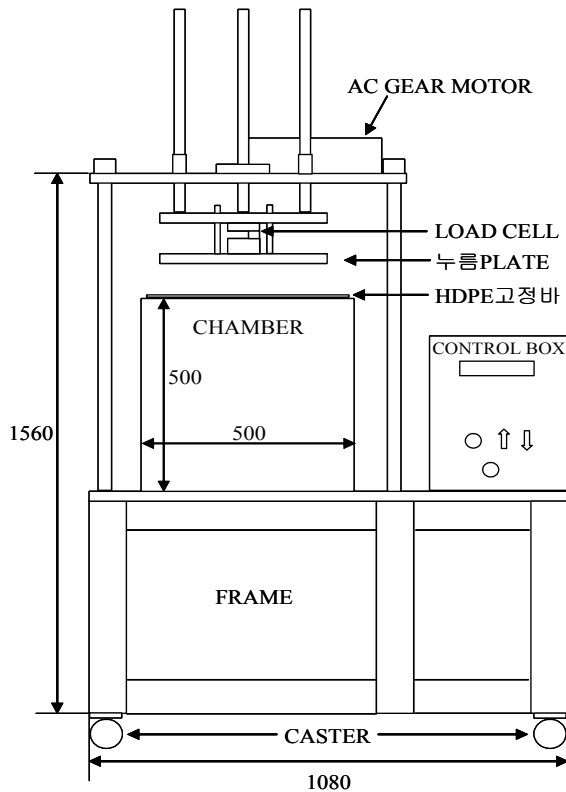


Fig. 2. The lysimeter used in this study

상부에 볼트와 너트를 이용하여 고정하였다. HDPE에 하중을 가해주는 누름 plate는 실제 매립지에서의 침하에 의한 최종복토층의 변형이 원형으로 발생한다고 가정하여 원형으로 제작하였다.

상재하중의 산정에서 식생대층은 느슨하고 모난 실트질 모래, 배수층은 느슨하고 균질한 모래로 하여 산정하였으며, HDPE에 가해지는 상재하중은 $1,792.5 \text{ kg/m}^2$ 으로 산정되었다. 실험에 사용되는 HDPE의 면적이 가로, 세로 각각 50cm이므로 HDPE에 가해지는 하중은 약 450kg이 된다. 하지만 매립지 운영과정에서 건설장비 및 차량하중 등의 영향을 더 받게 되므로 본 실험에서는 HDPE 상부의 하중을 최소 450

kg에서 최대 900kg까지 단계적으로 증가시켜 실험을 실시하였다. 또한 하중재하시간은 1, 2주로 하여 실험을 실시하였으며, 매립 폐기물의 분해는 HDPE 하부를 빈 공간으로 비워둠으로서 모두 분해되었다고 가정하였다. 본 실험에서는 D산업의 1.5mm의 HDPE가 사용되었으며, 실험이 끝난 시료는 ASTM D 638 방법으로 인장변형율을 측정하였다. 본 실험에 사용된 lysimeter 및 실험과정을 Fig. 2, 3에 나타내었다.

2.2 현장시험시공

본 실험은 실제 매립지에 최종복토층을 시험시공함으로써 매립지에서 발생하는 침하에 대한 HDPE의 변형을 살펴보고자 수행되었다. 시험시공은 8단 매립이 완료된 수도권 매립지 제 1 매립장 M 블록 상부에 각 안별 11m(W)×27m(L)의 크기로 총 1,200 m^2 의 크기로 실시되었다. 각 안별 시험시공 표준단면도는 Fig. 4와 같다. 시험시공된 최종복토층은 지지층의 개념으로 중간복토층을 포설한 후 그 위에 차단층, 배수층, 식생대층을 포설하였다. 차단층의 구성은 1안은 해성점토층으로만 50cm를 포설하였으며 2, 3, 4안은 서로 다른 다짐점토층 30cm에 1.5mm의 HDPE를 포설하였다. 본 시험시공은 “수도권 매립지(1공구) 안정화공사 실시설계용역”(수도권매립지운영관리조합, 2000)에서 수도권 매립지 최종복토층의 적절한 차단층 재료원 선정을 위해 수행되었으며, 시험시공 후 31개월이 경과한 2002년 11월에 시공현장을 굴착하여 HDPE 시료를 채취하였다. 시료 채취지점은 각 안별로 3지점, 양쪽 끝에서 2m 이격된 지점 2곳과 중앙부분 1지점으로 총 12지점을 가



Fig. 3. The procedure of lysimeter test

로 4m, 세로 3m의 크기로 굴착하였으며, 굴착시에는 HDPE에 손상을 주지 않기 위해 블레이드(blade)를 장착한 백호우(backhoe)를 이용하였다. 채취한 HDPE 시료는 ASTM D 638 Standard Test Method Tensile Properties of Plastics 방법에 의해 인장변형을 시험을 실시하였다. 현장시험시공이 실시된 지역과 현장을 굴착하여 HDPE 시료를 채취하는 사진을 Fig. 5 (a), (b)에 나타내었다.

2.3 최종복토 후 침하량 예측

쓰레기 매립지반의 침하량을 보다 신뢰성 있게 예측하기 위해 사용되는 침하산정 방법에는 Sowers, Yen and Scanlon, Morris and Woods, Power creep law 등의 방법이 있으나, 본 연구에서는 쌍곡선법과 Gibson & Lo법을 이용하여 수도권 매립지 제 1 매립장의 블록별 장기 침하량을 예측하였다. 쌍곡선법과 Gibson & Lo법은 이(2000) 및 박 등(2002)에 의해

본 연구의 대상 매립지인 수도권 매립지의 침하예측에 신뢰성이 검증되었으며, 침하예측의 Model식은 다음과 같다.

$$\text{쌍곡선법} : S_t = S_0 + \frac{t}{a + \beta t} \quad (1)$$

여기서, S_t 는 매립종료 후 경과시간 t 에서의 침하량, S_0 는 매립종료 직후의 침하량, t 는 매립 종료 후 경과시간, a , β 는 실측 침하량으로부터 구한 계수이다.

Gibson & Lo :

$$S(t) = H\varepsilon(t) = HdP \left[a + b \left(1 - \exp\left(-\frac{\lambda}{b} t \right) \right) \right] \quad (2)$$

여기서, S 는 침하량, t 는 경과시간, H 는 쓰레기의 초기높이, ε 은 변형율, dP 는 작용하중, a 는 일차압축계수, b 는 이차압축계수, λ/b 는 이차압축률이다.

최종복토 후 침하에 의한 HDPE 영향을 파악하기

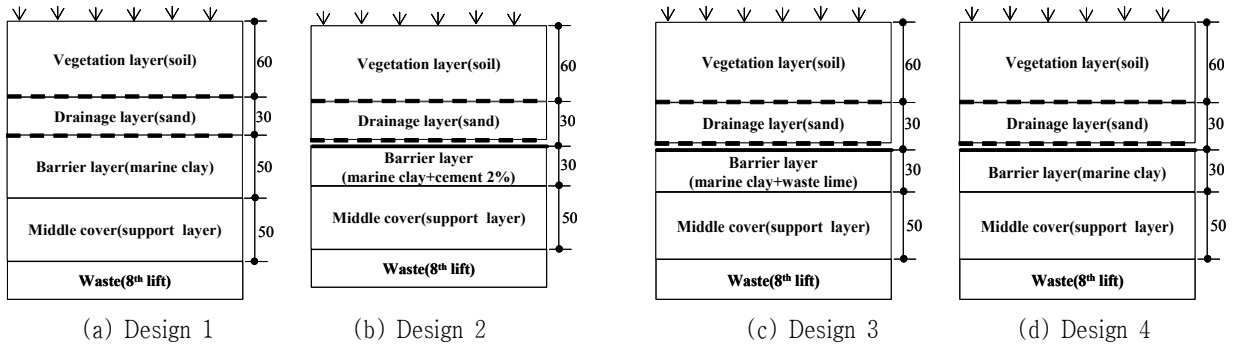
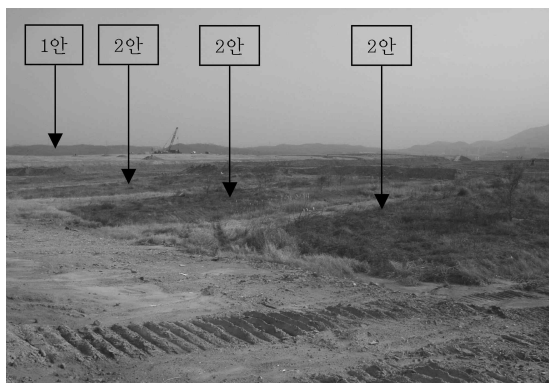


Fig. 4. Cross section for field test designs(unit:cm)



(a) The location of field test



(b) Sampling of HDPE

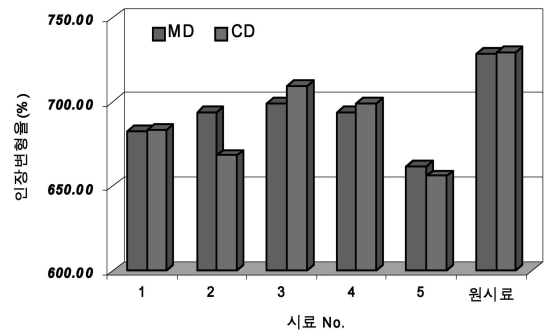
Fig. 5. The photos of field test

위해 최종복토 후의 침하량을 산정하여야 한다. 최종복토 후의 침하량 산정은 쌍곡선법과 Gibson & Lo 법을 이용하여 예측한 블록별 최종침하량에서 최종복토층의 시공이 완료된 시점까지의 침하량을 제외한 것을 최종복토 후의 침하량이라 하였다. 그러나 2003년 3월 현재, 제 1 매립장의 최종복토층의 시공이 진행중에 있으나 2002년 9월에 기존의 침하계측기를 새로운 것으로 교체하였기 때문에 침하계측기 교체 후 현재까지의 침하량은 연속된 자료라 판단하기 어려워 본 연구에서는 블록별 장기 침하량에서 2002년 9월까지의 침하량을 제외한 것을 최종복토 후 침하량이라고 하였다. 산정된 최종복토 후 침하량은 현장시험시공 기간동안의 침하량 및 HDPE 인장시험결과와 비교하여 최종복토 후의 침하에 의한 HDPE의 영향을 판단하는 기초자료가 된다.

3. 실험결과

3.1 Lysimeter 실험결과

상재하중과 하중재하시간에 따른 HDPE의 변형율과의 관계를 알아보기 위해 실시된 lysimeter 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다. 현재까지 실시된 5번의 실험은 하중을 최소 450kg에서 600kg, 800kg, 최대 900kg까지로 4단계의 변화를 주었으며 하중재시간은 1, 2주로 제한하여 수행되었다. 450kg의 하중을 1주일간 재하시킨 실험에서 인장변형율이 원시료에 비해 MD(Machine Direction)가 6.27% 감소한 682.71%, CD(Cross Machine Direction)가 6.15% 감소한 683.61%로 나타났다. 동일하중에서 하중재시간을 2주일로 증가시킨 2번 실험에서는 인장변형율이 1번 실험에 비해 MD는 다소 증가하였으나 CD는 감소하였다. 하중재시간을 2주로 제한한 상태에서 하중을 증가시키는 실험에서는 하중이 600kg일 때 450kg일 때보다 인장변형율이 다소 증가하였으나 계속해서 하중이 증가함에 따라 인장변형율이 감소하여 2주간 900kg의 하중을 재하한 5번 실험에서는 HDPE의 인장변형율이 원시료에 비해 7.66%



시료 1 : 하중 450kg, 하중재시간 1주일
 시료 2 : 하중 450kg, 하중재시간 2주일
 시료 3 : 하중 600kg, 하중재시간 2주일
 시료 4 : 하중 800kg, 하중재시간 2주일
 시료 5 : 하중 900kg, 하중재시간 2주일

Fig. 6. The results for tensile strain of tested HDPE (lysimeter)

감소한 672.64%(MD), 8.24% 감소한 668.43%(CD)로 나타났다.

본 실험에서는 HDPE의 인장변형율이 초기 하중의 증가 및 하중재시간이 증가함에 따라 다소 증가했지만, 그 증가폭이 작아 거의 유사하다고 할 수 있으므로 4번 실험까지 거의 유사한 인장변형율을 나타냈다고 할 수 있다. 하지만 하중이 900kg일 때는 인장변형율의 감소가 9% 이상인 것으로 나타나 하중이 증가함에 따라 HDPE의 인장변형율이 감소한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 앞으로 계속적인 실험을 통하여 하중재시간을 증가시키면서 HDPE 인장변형율과의 관계 정립이 필요하다고 사료된다.

3.2 현장시험시공 결과

3.2.1 HDPE 인장 시험결과

현장시험시공된 현장을 굴착하여 채취한 각 안별 HDPE의 인장시험결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보면, HDPE의 인장변형율이 600~700% 정도로 나타나 인장변형율의 감소율은 3.1%에서 최대 17.86%로 나타났다. 4안에 비해 2안과 3안의 변형율이 높게 나타났는데, 이는 차단층 재료원의 차이라고 보기는 어려우며 매립 폐기물의 분해에 의한 침하량의 차이로 사료된다. Fig. 5(a)에서 보면 시험시공된 지역이 국부적인 지역임에도 불구하고 2

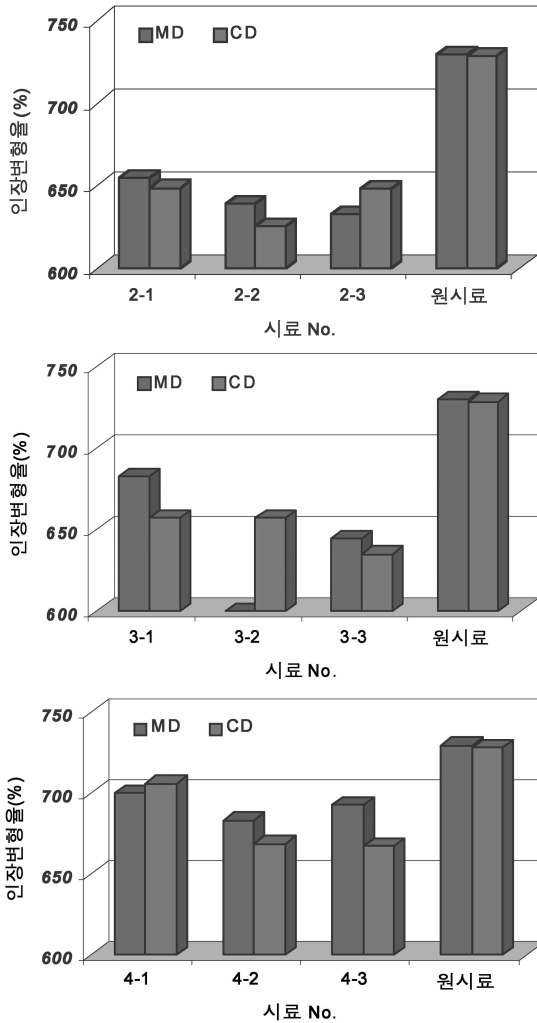


Fig. 7. The results for tensile strain of tested HDPE (field test)

안과 3안이 위치한 지역이 4안에 비해 침하가 많이 일어났음을 볼 수 있으며 인장변형율의 차이도 이에 대한 영향이라 사료된다.

Fig. 6에는 HDPE의 변형율을 MD와 CD로 구분하여 나타내었는데, 총 9개 지점의 시료중 3지점을 제외한 6개의 시료에서 CD가 MD보다 변형이 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 HDPE 제조 당시에 MD가 CD 보다 좋은 물리적 성질을 가지기 때문인 것으로 사료된다.

3.2.2 Seam test 시험결과

현장 굴착 후 HDPE 시료채취 시 3안이 포설된 곳에서 접합(seaming)부위의 HDPE 시료를 채취하

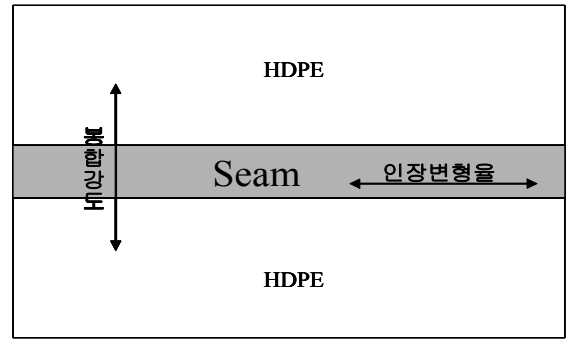


Fig. 8. Basic types of HDPE seam tests

여 봉합강도와 인장변형율 시험을 실시하였다. 봉합강도와 인장변형율에 대한 설명을 Fig. 8에 나타내었으며, 봉합강도 및 인장변형율 시험결과를 Table 2에 나타내었다.

접합부위에 대한 실험 결과, 봉합강도가 실험전과 비교하여 20% 정도 감소였으며, 인장변형율은 다소 감소한 것으로 나타났다. 이러한 결과로 봤을 때, 접합부위는 인장변형율 측면에서는 문제가 되지 않으며, 봉합강도 측면에서는 실험전과 비교해 감소하기는 하였으나, 시험기간 동안 접합부위의 손상이나 파손이 관찰되지 않은 것으로 보아 봉합강도 또한 침하

Table 2. The results of seam tests

횟수	Original HDPE	Tested HDPE
	봉합강도(kgf/2.5cm)	
1	62.25	52.75
2	62.75	47
3	62	52.63
4	71	51.5
5	59	57.38
6	61.25	49.63
7	64.25	51
8	64.13	57.29
9	68.25	50.63
10	70.75	49.38
평균	64.56	51.92
횟수	인장변형율(%)	
1	420.55	369.85
2	374.45	346.55
3	371.25	371.24
평균	388.75	362.54

Table 3. The results of prediction of settlement after closure(unit : cm)

Classification	A B/L	B B/L	C B/L	E B/L	G B/L	H B/L	J B/L	I B/L	K B/L	L B/L	M B/L
Hyperbolic Function	170.3	102.3	263.2	224.7	95.6	68.3	342.6	74.2	171.6	354.5	314.8
Gibson & Lo	93.8	98.5	218.4	187.3	121.3	59.3	401.3	45.6	195.1	300.8	304.5

에 대해 안정적이라고 할 수 있다.

3.2.3 침하량 예측결과

수도권 매립지 제 1 매립장은 2000년 9월에 최종적으로 매립이 종료되었으며, 각 블록별로 매립이 완료된 직후 즉시 침하를 예측을 실시하였다. 시험시공이 실시된 M 블록의 매립고는 시험시공 직후 41.5m였으며, 굴착시의 매립고는 37.55m로 실험기간동안의 침하량은 3.95m로 예측되었다. 시험시공기간동안에 예측된 침하량과 3.3에서 다루어질 최종복토 후 예측된 침하량 비교를 통해 최종복토 후의 침하에 의한 HDPE의 인장변형율을 판단해 볼 수 있다.

3.3 최종복토 후 침하량 예측 결과

최종복토 후의 침하량 산정을 위해 쌍곡선법과 Gibson & Lo법을 이용하여 최종침하량을 예측하였으며, 2002년 9월까지의 침하량을 제외하여 산정한 값을 Table 3에 나타내었다. 최종복토 후 침하량 예측 결과 최소 0.68m에서 최대 I 블록에서 4m로 예측되었으며 평균적으로 1.9m가 침하되는 것으로 나타났다.

4. 결 론

폐기물 매립지 최종복토층에서 침하에 의한 HDPE의 영향을 평가하기 위해 수행된 lysimeter 실험, 현장시험시공, 침하예측 결과를 요약하면 다음과 같다.

매립지에서 발생하는 침하를 재현할 수 있는 lysimeter를 제작하여 상재하중과 하중재하시간을 변화시키면서 수행된 실내실험에서는 하중이 증가함에 따라 HDPE의 인장변형율이 증가하다가 감소하는 경향을 보였으나 변화가 크지 않았으며, 하중을 900kg으로 증가시켰을 경우 다소 감소하는 것으로

나타났다. 본 실험은 향후 계속적으로 하중 및 하중재하시간을 증가시키면서 HDPE 인장변형율과의 관계 정립이 필요하다고 사료된다.

매립지의 시험시공을 통해 실제 매립지에서 발생하는 침하에 대한 HDPE의 영향을 파악하고자 한 현장시험시공에서는, 시험시공기간 동안의 침하량은 3.95m로 예측되었으며, 이때의 HDPE의 인장변형율은 600~700%로 나타났으며, 접합부위에 대한 실험에서도 침하에 대해 안정적인 것으로 나타났다.

기존의 침하예측식을 이용하여 수도권 매립지 제 1 매립장의 최종복토 후 침하량을 예측한 결과 I 블록에서 최대 4m가 침하되는 것으로 예측되었다.

현장시험시공 기간동안 예측된 침하량과 예측된 최종복토 후 침하량 비교를 통하여 최종복토 후 침하에 의한 HDPE의 영향을 파악해보면, 예측된 최종복토 후의 침하량이 현장시험시공 기간 동안의 침하량과 거의 유사한 4m로 나타나 최종복토 후의 침하에 의한 HDPE의 인장변형율은 현장시험시공결과와 유사한 600~700% 정도로 나타날 것이라고 판단할 수 있다. 이러한 인장변형율은 원시료(730%)에 비해 감소하기는 하였지만, HDPE의 인장변형율의 감소에 따른 투수계수의 변화가 미미하며, 현장시험시공 기간 동안 HDPE의 파괴나 손상이 관찰되지 않은 것으로 볼 때 최종복토층의 HDPE는 침하에 대해 안정적인 것으로 사료된다.

외국의 폐기물 매립지 설계·시공시에는 많은 실험적 연구를 바탕으로 매립지의 안전 및 발전을 위하여 Geosynthetics(토목합성수지)의 사용이 증가하고 있다. 국내에서도 이에 대한 많은 연구를 통하여 Geosynthetics의 사용을 권장하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 문철환, 이재영(2003), "폐기물 매립지 최종복토층에서

- 침하에 따른 HDPE 내구성 평가 연구”, 2003년 한국폐기물학회 춘계학술발표연구회 논문집, pp. 197~200.
2. 박정현, 최문영, 이재영(2002), “수도권 매립지(제1매립장)에서의 침하거동에 대한 연구”, 2002년 한국폐기물학회 추계학술발표회, pp. 195~198.
 3. 이기중(2000), “현장계측에 의한 쓰레기 매립지의 장기 침하거동”, 연세대학교 석사학위논문.
 4. 이재영(2003), “폐기물 매립지 최종복토층의 설계 및 시공”, 폐기물 매립 및 준설매립 설계·시공, 토목섬유응용기술연구회, pp. 165~185.
 5. 환경부(2001), “폐기물 관리법”.
 6. Daniel E. David(1993), *Geotechnical Practice for Waste Disposal*, Chapman & Hall, pp. 455~496.
 7. L. Courard(2000), “Settlements in landfills and geomembranes induced strain”, *Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference*, pp. 529~533.
 8. Nenad Gucunski, Vahid Ganji and Mohamad H. Masher (1996), “Analysis of settlements of landfill caps by FEM”, *Proceedings of the 3rd International Symposium*, pp. 485~494.