

폐기물 매립지의 최종복토 구조에 따른 침출계수 변화에 관한 연구

임은진^{1*} · 이재영² · 최상일³

¹이름다운환경건설(주)

²서울시립대학교 환경공학부

³광운대학교 환경공학과

A Study on the Variation of the Coefficient of Leachate as Final Cover Systems in the Landfill

Eun Jin Lim^{1*} · Jai-Young Lee² · Sang Il Choi³

¹Beautiful Environmental Construction co., Ltd.

²Dept. of Environmental Engineering, University of Seoul

³Dept. of Environmental Engineering, Kwangwoon University

ABSTRACT

This study is objected to estimate the variation of the coefficient of leachate according to designs in landfill cover systems. Design (a) is the unsanitary landfill cover system with 50 cm soil. But Design (b), (c) are sanitary cover systems which are composed of soil top layer, drainage layer, barrier liner(Design (b): Geomembrane(1.5 mm) and compacted clay liner(30 cm), Design (c): compacted clay liner(45 cm)), gas venting layer. Quantity of leachate estimates Rational Method generally and depend on the coefficient of leachate, on one of the factors in Rational Method largely. The coefficient of leachate is defined as the leachate production ratio result from incident precipitation. To estimate the variation of the coefficient of leachate, the authors use HELP(Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) Simulation and Pilot Test. As a result of HELP Simulation, the coefficient of leachate is 0.36~0.42 in Design (a) and 0.03~0.15 in Design (b), (c) according to designs in landfill cover systems and quality of barrier liner placement. These numerical values are similar to 0.13 with the coefficient of leachate in Pilot Test.

Key words : Coefficient of leachate, Rational method, Pilot test, HELP model

요 약 문

본 연구는 최종복토 구조에 따른 폐기물 매립지에서의 침출계수의 변화에 관한 것이다. (a)는 1999년 최종복토 설치 기준이 강화되기 이전, 양질의 토사를 이용하여 50 cm 두께로 최종복토를 실시하는 구조이며, (b), (c)는 최종복토 설치 기준 강화로 식생대층, 배수층, 차단층((b): Geomembrane(1.5 mm)와 다짐점토층(30 cm), (c): 다짐점토층(45 cm)), 가스배출층으로 최종복토를 설치하는 구조이다. 침출수 발생량은 일반적으로 합리식에 의해 산정되며 합리식 인자 중 침출계수에 의해 영향을 크게 받는다. 침출계수는 우수로 인한 침출수 발생비율로 최종복토 구조에 따라 큰 변화를 보이는 인자로서 이 연구에서는 최종복토 구조 변화에 따른 침출계수를 산정하기 위해 HELP(Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) Simulation과 Pilot Test를 이용하였다. HELP Simulation 결과 (a) 구조의 침출계수는 0.36~0.42로, (b), (c)의 침출계수는 최종복토의 차단층의 설치 질에 따라 0.03~0.15로 예측되었다. 또한 Pilot Test 결과 강화된 구조의 최종복토의 침출계수는 HELP Model 결과와 유사한 0.13의 수치가 발생되었다.

주제어 : 침출계수, 합리식, Pilot Test, HELP Model

*Corresponding author : leejy@uos.ac.kr

원고접수일 : 2004. 4. 29 게재승인일 : 2004. 6. 22

질의 및 토의 : 2004. 9. 30 까지

1. 서 론

폐기물관리법(Korea Waste Management Act, KWMA) 제 43조 2항에 근거하여 사후관리대상인 폐기물매립지가 사용종료 되었을 경우 침출수 누출 등으로 인하여 주민의 건강 또는 재산 및 주변 환경을 보호하기 위해 매립지 사후관리에 소요되는 비용을 예치하게 하고 있다. 사후관리 소요비용은 침출수 처리비용, 매립가스 처리 비용, 지하수 검사정 유지 및 지하수 오염검사에 소요되는 비용 등으로 구성된다. 이 중 침출수처리비용 산정기준은 1999년 8월 9일 폐기물 관리법이 개정되기 이전 매립지 설치 기준으로 침출수 발생량을 산정하여 적용하고 있다. 1999년 개정된 폐기물관리법은 기존에 양질의 토사 50 cm로 최종복토 하던 구조에서 식생대층, 배수층, 차단층, 가스 배제층으로 구성된 최종복토를 실시하도록 규정하고 있어 강화된 최종복토 구조에서 개정 전 기준보다 침출수 발생량이 크게 감소하리라 판단된다. 그러나 강화된 최종복토 규정으로 최종복토를 실시한 매립지의 침출수 발생량 자료가 부족하여 매립지에서 우수로 인한 침출수가 어느 정도 발생하는지 알기 어려운 실정이다.

현재 침출수량 산정 시 널리 이용하는 것은 합리식으로, 합리식 인자 중 침출계수(The Coefficient of Leachate)는 우수로 인한 침출수 발생 비율로 매립지 최종복토 구조에 따라 크게 영향을 받는 인자이며 현재 모든 매립지 최종복토 구조에 일률적으로 0.3이라는 수치가 적용되고 있다.

따라서 본 연구에서는 1999년 이후 강화된 최종복토 구조에 따른 침출계수 산정을 위해 매립지 물 수지 산정 모델인 HELP(Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) Model과 Pilot Test를 이용하여 매립지 구조 및 설치 질과 면적에 따른 침출계수가 변화를 예측하고자 한다.

2. 침출계수 및 HELP Model

매립지에서 침출수 발생량 산정에 널리 이용되는 합리식은 식 (1)과 같다.

$$Q = \frac{1}{1000}CIA \quad (1)$$

- 여기서, Q : 침출수량(m^3/day)
- C : 침출계수
- I : 일 강우량(mm/day)
- A : 매립지 면적(m^2)

이 합리식은 현재 폐기물 관리법에서 침출수 발생량을 산정하기 위해 사용하고 있는 식이다. 이 합리식 인자 중 침출계수(C)는 우수로 인한 침출수 발생비율로 매립지 구조 및 시간 경과에 따른 최종복토 기능 저하로 변화될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최종복토 구조 및 질에 따른 침출계수 변화를 예측하기 위해 HELP Model을 이용하였다.

HELP Model은 매립지에서 물 흐름 파악에 이용되는 반 2차원 수리학적 모델이다. 이 모델은 기상과 토양, 매립지 설계 자료를 포함하며, 지표 토양 수분저장 능력, 표면유출, 복토층을 통한 물 통과율, 증발산, 식생대층의 식물 성장 단계, 침출수 재순환 비율 등을 평가하여 매립지 내 물 흐름을 파악한다. 기본 물 수지 식은 식 (2)와 같으며, 침출계수는 전체 강우량에 대한 침출수 발생비율인 Q_{PERC}/W_A 로 산정하였다.

$$Q_{PERC} = W_A - W_{RO} - \Delta ST - AET \quad (2)$$

- 여기서, Q_{PERC} : 침출수량(m^3)
- AET : 증발산량(m^3)
- W_{RO} : 지표면 배수량(m^3)
- ΔST : 수분 변화량(m^3)
- W_A : 유입되는 물의 양(m^3)

3. HELP Model Input Data

HELP Simulation에 필요한 기상자료는 선정된 매립지의 증발산, 강수량, 온도 및 태양복사량 등이며, 본 연구에서는 울산지역의 5년간(1998년 1월~2002년 12월) 기상 자료를 기상청 자료를 이용하여 입력하였다.

최종복토 구조는 1999년 폐기물 관리법(KWMA) 개정 전(a)·후(b, c)의 구조를 이용하였으며, Fig. 1과 같다. 개정 전 구조인 (a)는 양질의 토사로 50 cm 깊이로 최종복토를 실시한 구조이며, 개정 후 이용되는 최종복토 구조는 (b)와 (c)의 2가지 구조로 (b) 구조는 차단층(Barrier Liner)을 다짐점토(30 cm)와 Geomembrane(1.5 mm, 이하 GM) 포설하는 경우이며, (c) 구조는 Geomembrane없이 다짐점토층만 45 cm 포설하는 방안이다. 개정 후 각 층은 폐기물 관리법에서 제시한 설치기준을 적용하였으며, 층별 통일분류법 상 Soil Type는 Table 1과 같다.

4. Pilot Test

매립지 침출계수를 산정하기 위해 매립지구조를 모사한

| Before Amendment of the KWMA | After Amendment of the KWMA | |
|---|--|--|
| <div style="border: 1px solid black; width: 150px; height: 100px; margin: 0 auto; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> Soil 50cm </div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Top Soil Layer 60cm </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Drainage Layer 30cm </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Compacted Clay Liner 30cm </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Gas Venting Layer 30cm </div> | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Top Soil Layer 60cm </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Drainage Layer 30cm </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Compacted Clay Liner 45cm </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> Gas Venting Layer 30cm </div> |
| Soil Depth 50cm | Composition of Barrier Liner: Compacted Clay Liner 30cm +GM(——) | Composition of Barrier Liner: Compacted Clay Liner 45cm |
| (a) | (b) | (c) |

Fig. 1. The final cover systems.

Table 1. The composition of final cover system to simulate the HELP model

| Layer | Classification | Porosity(Vol/Vol) | Field Capacity(Vol/Vol) | Wilting Point(Vol/Vol) |
|----------------------|----------------|-------------------|-------------------------|------------------------|
| Top Soil Layer | SM | 0.45 | 0.16 | 0.09 |
| Drainage Layer | Gravel | 0.40 | 0.04 | 0.02 |
| Compacted Clay Liner | CL | 0.45 | 0.41 | 0.31 |
| Gas Venting Layer | Gravel | 0.39 | 0.03 | 0.01 |

Lysimeter Fig. 2를 이용하여 침출계수를 측정하였다. 시험에 이용한 Lysimeter의 크기는 0.75 m×2.4 m에 높이는 약 2 m 이다. 벽체는 철제 구조로 되어 있으며, 표면 유출수량(Surface Runoff), 배수층에서 배수되는 수량(Drainage) 및 토양층을 통과한 누출수량(Bottom Leakage)을 측정하기 위해 집수탱크(Collection Tank)를 설치하였다. Sprinkler Pipe의 직경은 1.2 cm로 70 mm/hr의 강우 강도로 우수를 유입시켰다. 토양층의 구조는 Fig. 2와 같이 (c) 구조와 유사하게 최종복토를 모사한 다음 실험을 실시하였다.

Pilot Test를 통한 침출계수 산정은 HELP Model에서 침출계수 선정 방법과 같이 전체 유입수량에 대한 토양층을 통과한 누출수량 비로 산정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. HELP Model 결과

5.1.1. 강우량에 따른 침출수 발생 변화

침출수 발생에 가장 큰 영향을 주는 기상인자는 강우량으로 울산지역의 최근 3년간(1999. 1~2001. 12) 강우 특성은 Fig. 3과 같으며 건기와 우기의 뚜렷한 양상을 보이고 있다. Fig. 3, Fig. 4는 강우 유입에 따른 (a), (b) 구조의 표면 유출수량(Surface Runoff), 배수층을 통한 우수 배수량(Lateral Drainage)과 침출수 발생량(Percolation)을 나타내었다. Fig. 3에 나타난 (a) 구조의 경우 비위생 매립지 최종복토 구조로 강우 그래프, 표면 유출 그래프는 유사한 형태를 나타내고 있다. 침출수발생 그래프도 강우

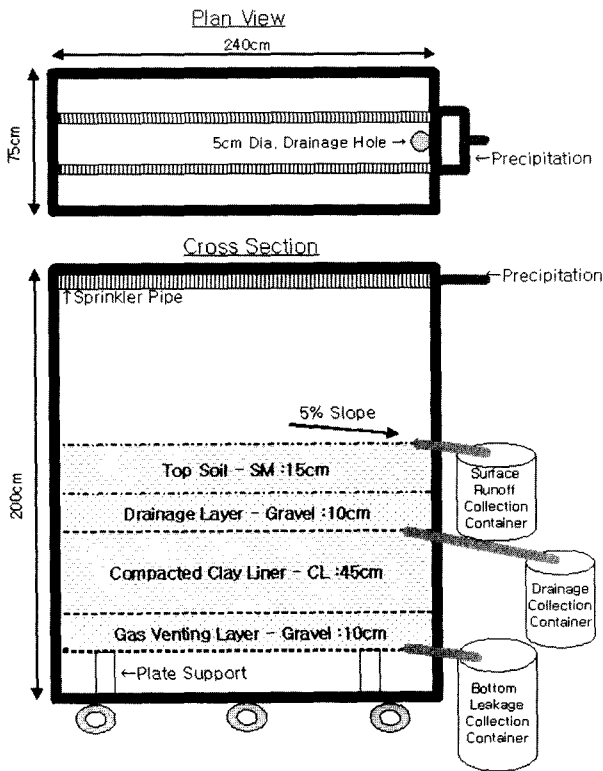


Fig. 2. The lysimeter for simulation.

그래프와 유사한 형태를 띠고 있으나 침출수 발생 침투 유량은 우수의 침투 유량보다 약간 늦게 발생하였다. 이는 우수가 토양층을 통과하는데 시간차 발생으로 인한 것으로 보인다. Fig. 4는 (b) 구조의 물수지를 나타낸 것이다. 표면 유출량은 Fig. 3과 비슷한 경향을 보이고 있으나, (a) 구조와 달리 (b) 구조는 우수 배수층이 있어 식생 대층을 통과한 우수가 이층에서 우수배제가 많이 일어났으며 결과적으로 폐기물 층을 통과한 침출수량이 적음을 알 수 있다. (c) 구조에서도 (b) 구조의 물수지 그래프와 유사한 결과가 나왔다.

5.1.2. 매립구조에 따른 침출계수 변화

본 연구에서 1997년~2001년 울산시 기상자료를 바탕으로 HELP Model을 실시한 결과로 얻은 5년간의 평균 침출계수를 사용하였다. (a) 구조로 최종복토 된 매립지를 HELP Simulation한 결과 최종복토의 투수계수에 따라 침출계수 크기는 다르지만 약 0.35 이상의 값으로 나타났다. 이를 울산시 G 매립지의 실제 침출수량을 바탕으로 합리식을 이용하여 구한 실제 침출계수와 비교한 결과, 현장 침출계수도 0.34~0.4 정도로 비슷한 수치를 보였다 (Table 2).

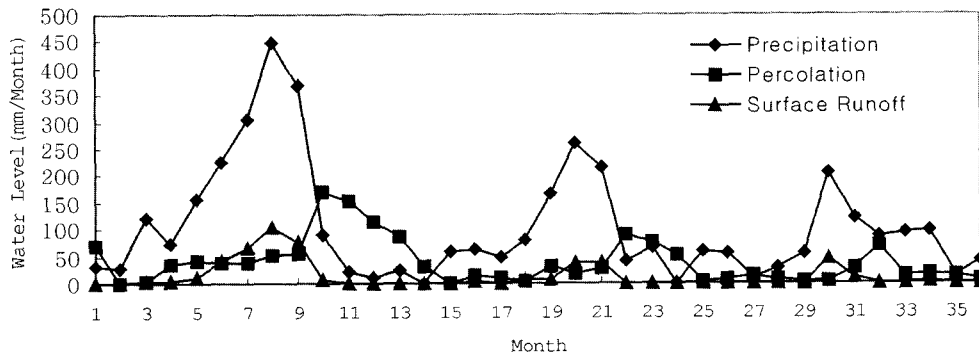


Fig. 3. The water level of design (a).

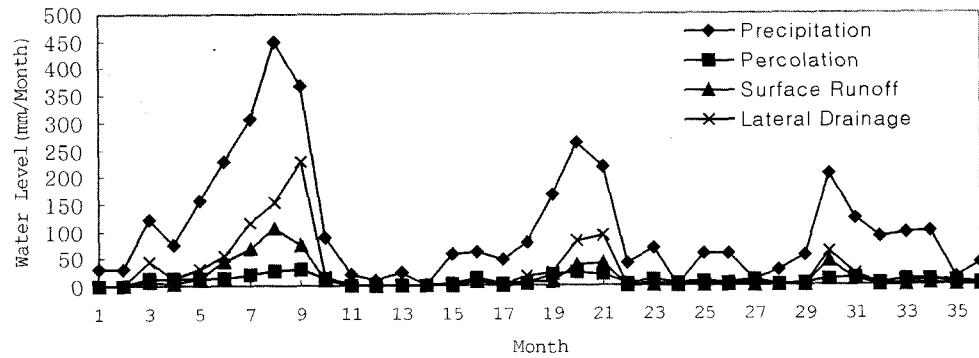


Fig. 4. The water level of design (b).

Table 2. The variation the coefficient of leachate of (a) structure

| Classification | Hydraulic | Landfill Area (m ²) | Coefficient of Leachate |
|----------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| | Conductivity of Top Soil (cm/s) | | |
| HELP Model | 1.9×10^{-4} | 100,000 | 0.36 |
| | 7.2×10^{-4} | 100,000 | 0.42 |
| G Landfill | - | 24,635 | 0.35 |
| | - | 36,200 | 0.4 |

Table 3. The variation the coefficient of leachate of (b) structure

| Classification | Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liner (cm/s) | GM Quality | Coefficient of Leachate |
|----------------|---|---------------|----------------------------|
| | I | | |
| II | 1.0×10^{-6} | Bad | 0.13 |
| III | 2.0×10^{-6} | Bad | 0.15 |
| IV | 1.0×10^{-6} | Good | 0.03 |

(b)는 차단층을 다짐점토층(30 cm)과 GM을 함께 포설한 구조로 Table 3의 I~III에서 다짐점토층의 투수계수가 증가함에 따라 침출계수가 증가하고 있다.

또한, Table 3의 II와 IV는 GM의 설치 재질 (HELP 모델의 GM 재질은 Perfect, Excellent, Good, Poor, Bad의 5가지 상태로 구분)에 따른 침출계수 변화로서 Quality가 Bad한 경우(II)가 Good인 경우보다(IV) 침출계수 4배 가량 크게 산정되었다. 따라서 (b) 구조의 침출수량은 다짐점토의 투수계수보다 GM의 설치 성공여부에 따라 크게 변할 수 있으리라 본다. 그리고 GM의 설치된 재질이 주로 나쁜 것으로 보았는데 이는 매립지 사후관리 년수가 현재 20년으로 되어있어, 그 기간동안 매립지 안정화에 따른 침하 및 생물·화학적 작용에 의해 GM 손상이 발생할 수 있어 이를 고려하기 위함이다. 또한 (c) 구조로 최종복토를 설치한 경우, 다짐점토층(두께: 45 cm)의 투수계수가 1×10^{-6} cm/s 일 때, 침출계수가 0.12로 (b) 구조의 II 경우보다 작았으나, GM이 잘 설치된 경우(IV)와 비교했을 때 4배 큰 수치였다.

5.1.3. 매립면적에 따른 침출계수의 변화

현 법안에서 제시하고 있는 최종복토 다짐점토층의 투수계수를 1×10^{-6} cm/s 로 고정시키고 매립지 면적에 따른 침출계수를 산정한 결과는 Table 4와 같으며 매립 면적이 증가할수록 침출계수가 약간 증가하기는 하였지만

Table 4. The coefficient of leachate according to landfill area

| Landfill Area (m ²) | Leachate Quantity (m ³ /day) | Coefficient of Leachate |
|------------------------------------|--|----------------------------|
| 5,000 | 2.2 | 0.12 |
| 10,000 | 4.7 | 0.128 |
| 50,000 | 24.1 | 0.13 |
| 100,000 | 27.9 | 0.13 |

Table 5. The coefficient of leachate by pilot test

| Classification | Quantity(m ³) | Ratio |
|----------------|---------------------------|-------|
| Precipitation | 1.25 | 1 |
| Surface Runoff | 0.365 | 0.29 |
| Drainage | 0.7 | 0.56 |
| Evaporation | 0.026 | 0.02 |
| Leakage | 0.159 | 0.13 |

그리 큰 변화는 없었다.

5.2. Pilot Test 결과

매립지의 수문학적 특성을 파악하기 위해 매립지의 구조를 모사한 탱크를 이용하여 침출계수를 산정하였으며 시험결과는 Table 5와 같다. Pilot Test 결과, 강우에 대하여 누출되는 물의 비율을 침출계수로 보았으며, 0.13정도로 이는 (b) 구조의 II 및 (c) 구조의 HELP Model과 비슷한 수치를 보였다.

6. 결 론

HELP 모델 결과 최종복토 설치기준 개정 전의 침출계수는 0.3이상의 큰 수치가 발생하였으나 강화된 최종복토 설치기준으로 최종복토 한 매립지는 GM의 재질 및 다짐점토의 투수계수에 따라 차이는 발생하나 HELP 모델에서 0.12~0.15, Pilot Test는 약 0.13수치로 개정 전의 수치보다 감소함을 볼 수 있었다. 또한 매립지 면적에 따른 투수계수 변화가 크지 않음을 확인할 수 있었다.

본 연구의 침출계수의 결과를 선행연구와 비교 조사 하였다. Kmet(1982)는 배수층과 다짐점토층이 포설된 최종복토 구조에서 우수에 의한 침출수 발생비율을 0.07~0.2 정도로 말하고 있다. 또한 Yuen(2001)은 다짐점토가 포설된 최종복토 구조에서 침출계수가 0.03~0.04 정도로 표현되었으며, Tatsi, Zouboulis (2002)는 배수층, 다짐점토층, 가스배제층이 포설된 구조에서 침출수 발생비율이 0.24 정도로 나타내고 있다. 일반적으로 최종복토에 다짐점토

층이나 GM이 포설된 경우 침출계수는 0.24 이하의 값을 보임을 알 수 있었다. 따라서 본 연구의 결과 및 선행연구의 침출계수를 바탕으로 볼 때, 강화된 폐기물 매립지 최종복토 구조의 침출계수는 변화가 될 것으로 판단된다.

본 연구에서는 강화된 최종복토 구조에서 침출계수를 Pilot 실험 및 HELP 모델을 통하여 0.13~0.15으로 산정하였으며, 실제 폐기물 매립지에서는 이 수치에 어느 정도 안전율이 고려된 침출계수 0.15~0.2 정도의 수치가 적용이 바람직하리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. 환경부, 사용종료 매립지 정비지침 (2001).
2. 환경부, 폐기물 관리법.
3. 환경부, 폐기물 매립시설 사후관리 소요비용 산출기준에 관한 연구 보고서 (2001).
4. Kmet, P., "Analysis of parameters affecting the collection efficiency of clay lined landfill", *4th Annual Madison Conference of Applied Research and Practice on Municipal and Industrial Waste* (1982).
5. Schroeder, P. R., Dozier, T. S., Zappi, P. A., McEnroe, B. M., Sjostrom, J. W., and Lee, R., *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model engineering documentation for Version 3*, U.S. EPA.
6. Schroeder, P. R., Loyd, C. M., and Zappi, P. A., *The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model user's guide for Version 3*, U.S. EPA.
7. Yuen, S.T.S., Wang, Q.J., Styles, J.R., and McMahon, T.A., "Water balance comparison a dry and a wet landfill - a full-scale experiment", *Journal of Hydrology*, pp. 29-48 (2001).
8. Tasi, A.A. and Zouboulis, A.I., "A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate", *Advanced Environmental Research*, pp. 207-219 (2002).