

## 차단형 최종복토층 설치가 폐기물 매립지 안정화에 미치는 영향

윤석표<sup>†</sup>, 정진모, Wei Jieling

세명대학교 바이오환경공학과

## The Effect of Final Cover Installation on the Waste Landfill Stabilization

Seok-Pyo Yoon<sup>†</sup>, Jinmo Jung, Jieling Wei

Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University

(Received: Mar. 20, 2017 / Revised: May 24, 2017 / Accepted: May 25, 2017)

---

**ABSTRACT:** In Korea, it is required to install the final cover layer immediately after the end of use of the waste landfill, and to conduct aftercare for 30 years. However, the installation of the final cover layer minimizing the penetration of the rainfall will delay the decomposition of the buried organic wastes and reduce the amount of pollutants released into the leachate. Therefore, at the end of the aftercare period, pollutants might be discharged and cause the pollution of the surrounding environment. In this study, using lab-scale lysimeters, the amount of pollutants discharged into the leachate was observed. At the initial stage, same artificial rainfall was injected, and after 7 months later, different reduced artificial rainfall was injected for 8.4 months assuming as the final soil layer was installed. From the results, it was advantageous in terms of environmental management after the end of the aftercare period to install a temporary cover layer that permits the infiltration of rainfall to some extent rather than to install the final cover layer immediately after the end of use of the waste landfill.

**Keywords:** waste landfill, final cover, lysimeter, leachate, aftercare

---

**초 록:** 우리나라는 폐기물매립지의 사용이 종료되면 즉시 차단형 최종복토층을 설치하고 30년간 사후관리를 하도록 규정하고 있다. 하지만 우수의 침투를 차단하는 최종복토층의 설치는 매립된 유기성 폐기물의 분해를 지연시키고, 침출수로 용출되는 오염물질의 양을 저감시킴에 따라 사후관리가 종료된 이후에 오염물질이 배출되어 주변을 오염시킬 우려가 있다. 본 연구에서는 실험실 규모의 모의매립조를 이용하여 약 7개월간 동일한 조건에서 인공우수를 주입한 후, 이후 8.4개월 동안 최종복토를 가정하여 매립지 내부로 유입되는 강수량을 달리한 경우에 침출수로 배출되는 오염물질의 양을 관찰하였다. 실험 결과로부터 폐기물 매립지의 사용종료 후 즉각적으로 차단형 최종복토층을 설치하는 것보다는 어느 정도 우수의 침투를 허용하는 임시복토층을 설치하는 것이 사후관리기간이 종료된 이후의 환경관리 측면에서 유리할 것으로 판단된다.

**주제어:** 폐기물 매립지, 최종복토, 모의매립조, 침출수, 사후관리

---

<sup>†</sup> Corresponding author(e-mail : [yoonsp@semyung.ac.kr](mailto:yoonsp@semyung.ac.kr))

## 1. 서론

우리나라의 폐기물관리법 시행규칙 별표 11에 의하면 폐기물매립지는 사용이 종료되면 최종복토층을 설치해야 한다. 우수 침투를 억제하는 차단형 최종복토층은 두께가 45 cm 이상이고 투수계수  $10^{-6}$  cm/s 이하인 점토층이나, 두께 30 cm 이상이고 투수계수가  $10^{-6}$  cm/s 이하인 점토·점토광물혼합토 등의 층을 설치한 후 그 위에 두께 1.5밀리미터 이상인 합성고분자차수막을 설치하도록 하고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 최종복토층이 설치되면 이후 폐기물 매립층으로 우수의 침투가 어려워져 침출수 관리 측면에서는 유리하나, 매립폐기물의 안정화 측면에서는 미생물의 분해작용이 저하되어 30년간의 사후관리기간이 지난 후, 폐기물 매립지의 관리가 더 이상 이루어지지 않는 경우에 재차 오염물질의 배출이 진행될 우려가 있다. 따라서 차단형 최종복토층의 설치는 매립종료 후 바로 하는 것보다는 일정기간 임시복토층을 설치하여 관리하다가, 매립폐기물의 안정화가 완전히 이루어진 이후에 설치하는 것이 바람직하다.

Laner *et al.*<sup>2)</sup>은 임시복토층을 설치하였다가 이를 걷어내고, 차수기능을 갖춘 최종복토층을 설치한 오스트리아 비엔나 인근의 폐기물 매립지 사례를 토대로 최종복토층 설치가 매립지에서의 장기적인 오염물질 배출에 미치는 영향을 예측한 바 있다.

실험실 규모의 모의매립조 연구는 조건을 달리하였을 때 발생하는 침출수, 가스, 침하, 매립 종료 후의 폐기물 특성 등을 비교할 수 있으므로 매립지 관련 연구에서 많이 사용되고 있다<sup>3-7)</sup>.

Pelkonen and Wang은 침출수 배출허용기준과 강수량 및 매립고 등 매립조건에 따른 매립지 사후관리기간 동안의 침출수 처리비용을 비교하였다<sup>8)</sup>. Wang *et al.*<sup>9)</sup>은 사후종료된 매립지에서의 장기간 침출수질은 유입되는 빗물과 매립된 폐기물 중량비(L/S비)에 가장 큰 영향을 받으며, 수질인자로는  $\text{NH}_4\text{-N}$ 가 침출수 배출허용기준 이하로 도달하는데 가장 시간이 오래 걸리는 것으로 보고한 바 있다.

본 연구는 최종복토층의 설치가 매립폐기물의 안정화에 미치는 영향을 모의매립조 연구를 통해서

확인하고자 하였고, 이를 통해서 매립이 종료된 후 언제 최종복토층을 설치하는 것이 바람직한지를 제안하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

실험실 규모의 모의매립조를 제작하고, 여기에 J시 소재 S대학교 인근의 아파트 및 주거지역에서 채취한 종량제 봉투에 든 생활폐기물을 수거하여 파봉하여 혼합 후 비교적 균질한 상태로 하여 동일한 밀도로 다짐하여 충전하였다. 20 L 종량제 봉투의 평균 무게는 1.78 kg이었으며, 이에 따른 겉보기 밀도는  $128 \text{ kg/m}^3$ 이었다. 이때 비닐봉투에 수분이 많은 상태로 버려진 음식물쓰레기는 폐기물 조성분석의 편의와 각 모의매립조의 충전되는 폐기물의 균질성 확보를 위하여 파봉단계에서 배제하였다. 모의매립조는 PVC로 제작하였으며, 높이 150 cm, 유효 높이 127.5 cm, 직경 20 cm로 3조를 운전하였다. 모의매립조의 규격과 매립폐기물의 양은 Table 1과 같으며, 매립된 생활폐기물의 물리적 조성은 Table 2와 같다.

Table 1. Size of lysimeter and weight of waste in each lysimeter

	Lys 1	Lys 2	Lys 3
Diameter (cm)	20		
Length (cm)	150		
Depth of waste (cm)	127.5		
Volume of waste (L)	40.0		
Weight of waste (kg)	7.70	7.64	7.62
Bulk density of waste ( $\text{kg/m}^3$ )	192	191	190
Soil layer	upper layer : 10 cm bottom layer : 10 cm		
Upper void length (cm)	2.5		

Table 2. Composition of waste

Classification	Weight (kg)	Composition (%)
Food waste	1.60	19
Paper	3.46	41
Plastics	1.52	18
Textile	0.20	2
Wood	0.06	1
Metal	0.08	1
Others	1.56	18
Total	8.48	100

## 2.2. 실험방법

모의매립조 운전은 총 459일 운전하였으며, 이중 초기 205일간은 30 °C의 항온실에서 매주 783 mL의 증류수를 인공강우로서 주입하였다. 이는 연간 강우량을 1300 mm로 보고, 침출계수를 0.33으로 하였을 때 평균 침출수량의 3배에 해당하는 수량으로, 강우유입량 기준으로 볼 때 약 3배 빠르게 수질 오염물질이 용출되어 나올 수 있는 환경이다.

이후 침출수질이 어느 정도 안정화되었다고 판단하여 206일째부터 253일간은 매립지 사용이 종료된 것으로 가정하여 최종복토가 되었을 때 우수침투량이 달라지는 것을 감안하여 모의매립조 상단에 벤토나이트를 첨가한 모래층을 추가하고 인공강우량을 최초 대비 100 % (Lys 1), 67 % (Lys 2), 33 % (Lys 3)로 달리하여 주입하였다. Lys 1은 모래층만, Lys 2와 Lys 3는 중량 기준으로 벤토나이트:모래의 혼합비를 각각 1:10과 1:5로 한 토사층을 모의매립조 상단에 3 kg씩 추가하였으며, 두께로는 8.2~11.7 cm이었다.

인공강우를 주입한 다음날에 매주 침출수를 채취하여 발생량, pH, COD, TKN, Cl<sup>-</sup>, 침하량을 측정하였다<sup>10)</sup>.

운전종료 후 모의매립조는 해체하여 매립폐기물 내의 수분 보유량을 확인하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 침출수 발생량 및 물 수치

누적 침출수 발생량은 Fig. 1과 같다. 인공강우 주입 후 최초 침출수 발생은 Lys 1과 Lys 3은 39일째 발생하였으며, Lys 2의 경우 53일째 발생하였다. 초기 인공강우 주입량이 동일하고, 채취한 폐기물을 가급적 균질하게 혼합한 후 각 모의매립조에 충전하였음에도 이러한 침출수 발생 시점의 차이가 나는 것은 폐기물이 갖는 불균질성에 기인하는 것으로 보인다. 인공강우량 주입량이 변동된 206일 이후에는 침출수 발생량도 이에 따라 저감되었으며, 실험기간 동안 투입된 강우량 대비 침출수 발생 비율은 Lys 1이 87.1 %, Lys 2가 77.9 %, Lys 3가 79.0 %를 나타내었다. 침출수로 발생되지 않은 인공강우량은 폐기물층(3.6~5.1 %)과 상하단의 모래층(2.7~6.5 %)에 수분이 보유되었거나, 매립지 상단에서 수증기 형태(1.1~4.5 %)로 배출되었다.

모의매립조에 충전한 폐기물을 459일째 해체하여 폐기물의 수분함량을 측정한 결과 Lys 1이 65.4 %, Lys 2가 67.9 %, Lys 3가 58.8 %를 나타내었는데, 이들의 수분함량이 폐기물 매립층에서의 field capacity에 해당된다. 매립시 폐기물 중량에 비하여 매립종료 후에는 수분함량이 증가되어 최초 무게 대비 46.8~66.7 % (평균 56.2 %)의 무게가 증가하였다. 즉, 매립폐기물의 중량 기준으로 56.2 %에 해당하는 수분이 폐기물층에 추가적으로 보유되었다.

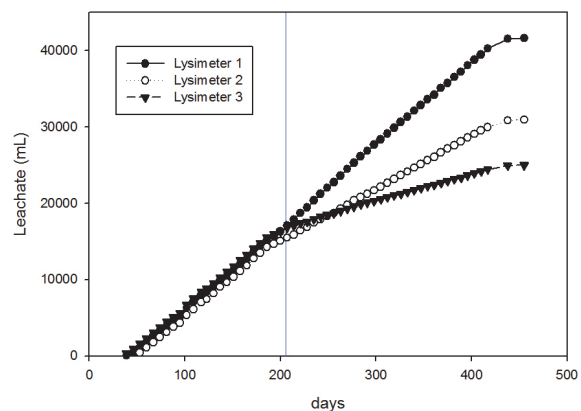


Fig. 1. Generation of leachate.

3.2. 침출수질 변화

3.2.1. pH

시간에 따른 pH의 변화는 Fig. 2와 같다. 침출수

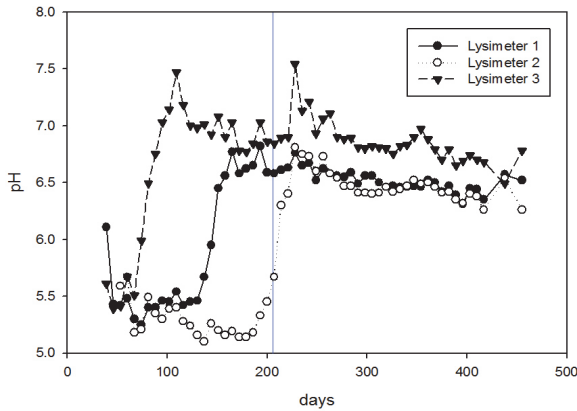


Fig. 2. pH change of the leachate.

발생량이 불균질한 특성을 보인 것과 같이 동일한 운전 조건임에도 초기에는 pH 값이 최대 2 이상 큰 차이가 발생하는 경우가 있었다. 초기 pH는 5.2~5.4의 약산성을 나타내었으며 Lys 2의 pH가 가장 낮았다. 하지만 최종복토층을 추가하고, 주입 강우량을 달리한 206일 이후에는 pH 값은 6.3 이상을 나타내었으며 각 모의매립조건에 pH 차이가 크지 않았다. Lys 3의 pH가 초기를 제외하고는 대부분의 실험기간 동안 가장 높은 값을 나타내었다.

3.2.2. COD

시간에 따른 COD 농도 변화는 Fig. 3과 같다. 침출수 발생량과 COD 농도를 곱하여 구한 COD 배출부하량을 표시하면 Fig. 4와 같다. COD 배출부하량은 초기 205일까지 90.5~97.3 %가 배출되었으며, 이후 249일간은 2.7~9.5 %가 배출되어, 매립 초기

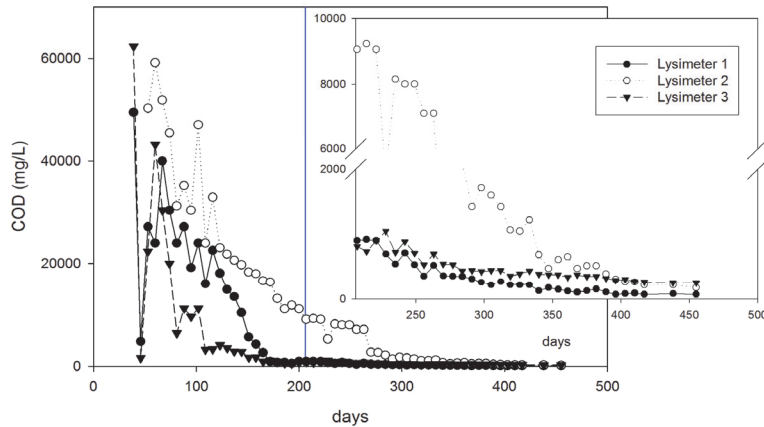


Fig. 3. COD concentration change of the leachate.

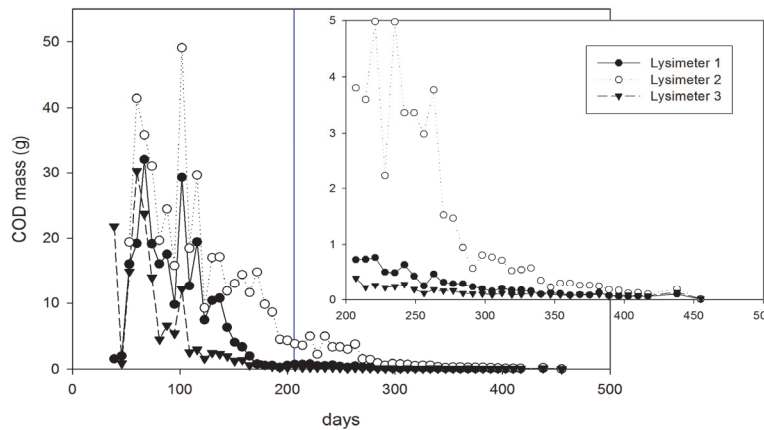


Fig. 4. COD mass change of the leachate.

에 유기물질이 대부분 배출됨을 볼 수 있다. 3개의 모의매립조에 충전한 생활폐기물을 가급적 균질하게 하고자 하였으나, 운전결과 최종복토층 설치 전에도 배출되는 침출수의 유기물 부하량이 상이하어 Lys 2 > Lys 1 > Lys 3의 순서를 보였으며, 최종복토층 설치이후에도 오염물 배출부하량의 순서는 동일하였다. COD와 pH 간에는 (-)의 상관관계를 보였는데, COD가 가장 높은 Lys 2의 pH가 가장 낮아 유기물 분해에 따른 유기산 발생으로 pH가 낮아진 것으로 추정된다. 반면, COD가 가장 낮은 Lys 3는 가장 높은 pH 값을 보였다. 최종복토층 설치 이후의 COD 배출량을 비교하면 Lys 1이 Lys 3보다 1.9 배 많이 배출되었다.

### 3.2.3. Cl<sup>-</sup>

염소 이온은 보존성 물질로서 분해되지 않고, 물에 쉽게 용해되어 나오는 성질이 있어서 침출수질의 변동을 파악하는 대표적인 지표로 활용된다. 시간에 따른 Cl<sup>-</sup> 농도 변화는 Fig. 5와 같다.

침출수 발생량과 Cl<sup>-</sup> 농도를 곱하여 구한 Cl<sup>-</sup> 배출부하량은 초기 205일까지 74.8~80.4 %가 배출되었으며, 이후 249일간은 19.6~25.2 %가 배출되어, COD에 비하여 매립 초기에 배출되는 비율이 상대적으로 낮았다. 이는 COD의 경우 초기에 쉽게 분해될 수 있는 성분들이 분해된 이후 분해속도가 느린 성분들은 아직 분해가 이루어지지 않았음을 의미한다. Cl<sup>-</sup> 성분의 누적 배출량은 Lys 1 > Lys 3 ≈ Lys 2의 순서를 보였는데, COD 배출량과는 다

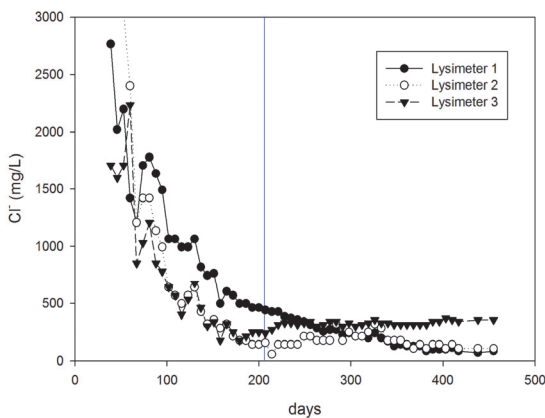


Fig. 5. Cl<sup>-</sup> concentration change of the leachate.

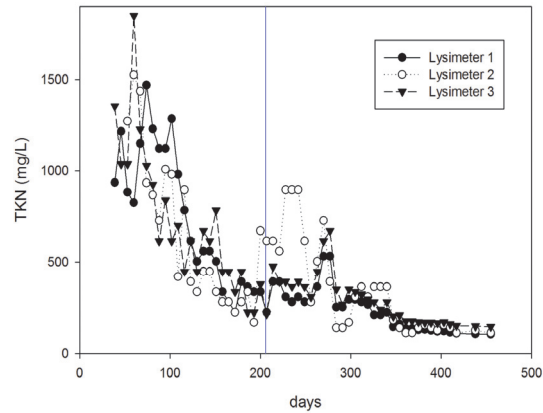


Fig. 6. TKN concentration change of the leachate.

른 특성을 나타내었다. 인공강우량을 달리한 이후에는 우수침투량에 반비례하여 농도는 Lys 3 > Lys 2 > Lys 1의 순서를 나타내었으며, 최종복토층 설치시기 이후 Lys 1과 Lys 3의 누적 배출량의 비는 2.0으로서 우수침투량의 비율인 3보다는 다소 낮은 값으로서 희석비율이 완전 비례하지는 않았다.

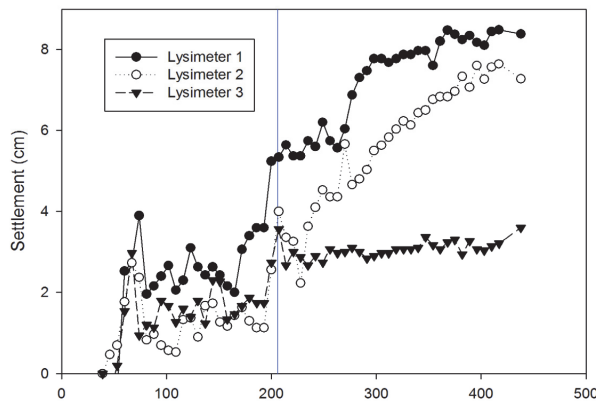
### 3.2.4. TKN

TKN은 유기성 질소와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N의 농도를 합한 질소 농도로서 침출수 수질을 측정할 때 많이 활용된다. 침출수에서 질소의 농도 변화 특성은 COD가 1차분해 반응으로 시간에 따라 급속히 감소하는 것과 달리 일정 시간이 지나면서 높아져서 상당한 기간동안 높은 농도를 유지하는 특성을 보인다<sup>11)</sup>. 하지만, 본 연구에서는 TKN의 경우에도 1차분해 반응 형태로 농도가 낮아짐을 볼 수 있으며, 다만 오염물질의 배출비율은 초기 205일까지 66.4~82.3 %가 배출되었으며, 이후 249일간은 17.7~36.7 %가 배출되어, COD나 Cl<sup>-</sup>에 비하여 매립 초기에 오염물질이 배출되는 비율이 가장 낮았다. 최종복토층 설치 이후의 TKN 배출량 비율은 Lys 1, 2, 3의 인공우수량 주입비율인 3 : 2 : 1 보다 다소 낮은 2.4 : 2.1 : 1을 보였다.

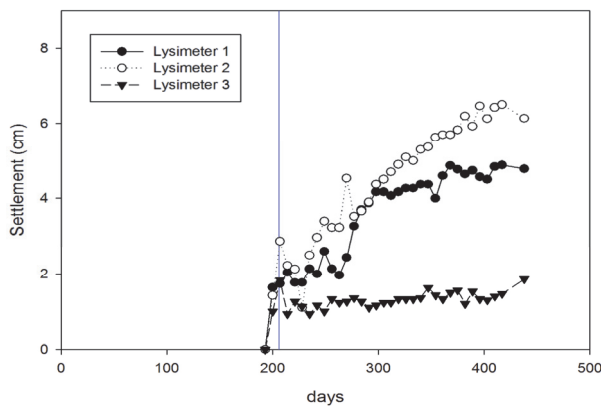
### 3.2.5. 침하량

매립 후 438일째의 침하량은 Lys 1이 최초 매립 고의 6.6 %, Lys 2가 5.7 %, Lys 3이 2.8 %로서 Lys 1 > Lys 2 > Lys 3의 순서를 보였다(Fig. 7 (a)).

침하량이 비교적 작은 이유는 매립폐기물 중 생물학적으로 분해되기 어려운 플라스틱류가 무게비로 18 % 들어있으며, 부피 기준으로는 더욱 비율이 높아서 침하율이 낮게 나오는 것으로 판단된다. 최종복토층 설치 후의 침하는 Lys 2 > Lys 1 > Lys 3의 순서였다(Fig. 7 (b)). Lys 1의 경우 대부분의 침하가 매립 초기에 일어난 결과에 기인하는 것으로 보이며, Lys 3의 경우 인공강우의 침투량이 가장 작은 관계로 물 다짐에 의한 물리적 침하량도 작고, 아울러 COD 배출량도 가장 작아서 생물학적 분해량이 작은 것에 기인한다.



(a) cummulative settlement since lysimeter operation



(b) cummulative settlement since cover layer installation

Fig. 7. Settlement of each lysimeters

### 3.3. 최종복토층 설치가 폐기물 매립지 안정화에 미치는 영향

본 연구에서는 매립폐기물이 어느 정도 안정화된 시점(매립 후 206일 이후)부터 모의매립조 상단에

벤토나이트와 토사를 혼합한 토사층을 추가하고, 인공강우량을 달리하면서 배출되는 침출수질의 변화를 관찰함으로써 최종복토층 설치시기에 따른 폐기물 매립지의 안정화 효과를 검토하고자 하였다.

채취한 폐기물을 균질화 작업을 하여 모의매립조에 충전하였으나, 침출수가 배출되는 특성을 살펴본 결과 매립폐기물의 불균질한 특성이 발견되어 인공강우량의 변화에 따른 일관된 침출수질의 변화는 발견되지 않으나, 최종복토층의 설치를 지연시킨 경우 (Lys 1)가 최종복토층을 설치함으로써 매립지 내부로 침투되는 우수의 양이 1/3로 저감된 경우 (Lys 3)보다 COD,  $Cl^{-1}$ , TKN 등의 오염물질이 침출수를 통하여 더 많이 배출되어 나오며, 침하량도 더 크게 나타났다.

현재 우리나라의 폐기물관리법에서는 폐기물매립지의 사후관리기간을 30년으로 규정하고 있으며<sup>12)</sup>, 그 이후에는 폐기물매립지의 관리에 대한 뚜렷한 책임을 명시하지 않고 있다. 따라서 30년간의 사후관리기간 동안 통제가능한 조건하에서 오염물질을 적극적으로 배출시켜 처리하는 것이 환경오염사고의 예방측면에서 바람직하다고 할 것이다. 사용종료된 폐기물매립지에 바로 차단형 최종복토층을 설치하여 우수의 침투를 최소화시키면 폐기물 매립지 내부는 수분의 부족으로 유기성 물질의 분해속도가 느려지고, 아울러 침투한 우수에 용출되어 나오는 무기성 오염물질의 배출도 이루어지지 않으므로 사후관리기간 동안 폐기물 매립지 내부에 갇혀 있다가 폐기물매립지를 사후관리하는 주체가 없을 때 최종복토층이 손상되거나 열화되면 환경오염 사고의 발생이 우려되고, 이를 복원하는데 소요되는 비용도 많아질 것이다.

따라서 폐기물 매립지의 사용이 종료되면 매립지 내부로의 우수의 침투를 기존의 침출수 처리시설 용량을 고려하여 적절히 허용하는 임시복토층을 설치함으로써 폐기물 매립지의 조기안정화 및 수세가 가능한 오염물질의 적극적인 용출을 허용하고, 이를 적절히 처리하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 최종복토층을 설치하는 시점은 발생하는 침출수의 수질 및 폐기물 매립지 침하속도 등을 종합적으로 판단하여 결정하여야 할 것이며, 예상되는 오염물

질의 분해/배출량의 2/3 이상이 지난 시점이 바람직할 것으로 보인다. 참고적으로 Yang *et al.*<sup>9)</sup>은 침투우수량 대 매립폐기물 중량비(L/S비)가 6이상이 되어야 침출수질이 배출허용기준을 맞출 수 있다고 예측하였다.

침출수 재순환의 경우 폐기물매립지 내부의 수분 함량을 높이고, 특히 암모니아성 질소를 외부의 질산화 처리시설과 연계하여 처리하는 경우 경제성이 있는 것으로 평가되었으나<sup>9)</sup>, 염소이온과 같은 보존성 물질의 경우 계속 침출수를 재순환하는 경우 오염물질 농도가 축적되어 높아지는 문제가 있고, 침출수 재순환에 따른 동력비와 재순환시키기 위한 침출수 배수설비의 설치 및 관리가 필요하다. 따라서 차단형의 최종복토를 한 후 침출수 재순환을 하는 것 보다는 임시복토층을 통해 일정한 수준에서 우수의 유입을 허용하는 것이 경제적 측면에서 보다 유리할 것으로 판단된다.

임시복토층은 현행 폐기물관리법 상에 규정된 최종복토층에서 식생대층 + 가스배제층으로 구성하고, 악취 및 VOC 발산의 우려가 있는 경우 가스배제층에 매립지 가스를 추출하는 관로를 설치하는 것을 제안한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 모의매립조 상단에 벤토나이트/토사 혼합층을 추가하고, 인공강우량을 달리하면서 배출되는 침출수질의 변화를 관찰함으로써 최종복토층 설치시기에 따른 폐기물 매립지의 안정화 효과를 검토하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매립폐기물의 field capacity는 58.8~67.9%(평균 64.0%)의 범위를 보였으며, 매립폐기물은 최초 매립중량을 기준으로 평균 56.2%에 해당하는 수분을 추가적으로 보유하였다.
2. 459일간의 모의매립조 운전결과, 최종복토층을 설치하지 않은 경우는 설치한 경우(우수침투량 1/3로 감소 case)보다 침출수로의 배출량이 COD는

1.9배, CI<sup>-</sup>는 2.0배, TKN은 2.4배 많았고, 침하량은 2.6배 높았다. 이는 최종복토층을 설치하는 경우 폐기물 매립지 내에 존재하는 오염물질의 배출이 늦어져 사후관리기간이 지난 후에도 오염물질이 배출될 가능성을 보여주는 바, 폐기물매립지의 사용이 종료되면 바로 차단형의 최종복토층을 설치하도록 규정한 현재의 폐기물 매립지 관리기준은 재고할 필요가 있다.

3. 사용이 종료된 폐기물 매립지의 임시복토층은 폐기물 처리시설의 기존 침출수 처리시설 용량을 감안하여 결정하되, 감당할 수 있는 침출수의 발생은 적극적으로 허용함으로써 폐기물 내 오염물질의 생분해를 극대화하고, 수세가능한 오염물질은 사후관리기간 이내에 배출시키도록 하여야 한다. 이를 위해 임시복토층은 식생대층 + 가스배제층으로 구성하고, 악취 및 VOC 발산의 우려가 있는 경우 가스배제층에 매립지 가스를 추출하는 관로를 설치하는 것을 제안한다.

## 사 사

이 논문은 2016학년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

## References

1. Enforcement rule of the wastes control act, Attached Table 11, Korea Ministry of Environment, Amended by Dec 30, 2016.
2. Laner, D., Fellner, J., Brunner, P.H., "Future landfill emissions and effect of final cover installation - A case study", Waste Management, 31, pp. 1522-1531. (2011).
3. Yoon, S.P., Kim, H.U., Lee, N.H., Kim, K., Lee, B.S., "Change of leachate characteristics at aerobic landfill lysimeter with different air flow-rate", Journal of Korea Society of Waste Management, 29(3), pp. 275-280. (2012).

4. Kim, H.U., Wang, F., Yoon, S.P., Park, H.S., "A Lysimeter Study on the Waste Landfill Injection of Anaerobically Digested Food Wastewater", *Journal of Korea Society of Waste Management*, 31(2), pp. 228–234. (2014).
5. Yoon, S.P., Lee, N.H., Kim, J.Y., "Landfill Decomposition Characteristics of Mechanical–Biological Pretreated Waste", *Journal of Korea Society of Waste Management*, 21(6), pp. 618–626. (2004).
6. Park, J.K., Kang, J.H., Chong, Y.G., Lee, N.H., "A Study on Mass Balance of Carbon in a Solid Waste Landfill", *Journal of Korea Society of Waste Management*, 29(4), pp. 348–355. (2012).
7. Kajiwara, N., Hirata, O., Takigami, H., Noma, Y., Ayako Tachifuji, A., Matsufuji, Y., "Leaching of brominated flame retardants from mixed wastes in lysimeters under conditions simulating landfills in developing countries", *Chemosphere*, 116, pp. 46–53. (2014).
8. Pelkonen, M. and Wang, Y., "Leachate direct–discharge limits and incentives related to landfill aftercare costs", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), pp. 413–422. (2017).
9. Wang, Y., Pelkonen, M., Kaila, J., "Optimization of landfill leachate management in the aftercare period", *Waste Management & Research*, 30(8), pp. 789–799. (2012).
10. APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed. (1998).
11. McBean, E.A., Rovers, F.A., Farquhar, G.J., *Solid waste landfill engineering and design*, Prentice Hall PTR, pp. 307–309. (1995).
12. Enforcement rule of the wastes control act, Attached Table 19, Korea Ministry of Environment, Amended by April 28, 2016.