

중성계 및 알칼리성 고화재를 이용한 고화하수슬러지의 복토재가 모형매립조 내 유기물 분해에 미치는 영향

김혜진 · 박진규 · 송상훈 · 이남훈[†]

안양대학교 환경공학과

(2007년 4월 2일 접수, 2008년 7월 9일 채택)

Effect of Solidified/Stabilized Sewage Sludge using Neutral Solidifying Chemical Agent and Alkaline Agent as Landfill Cover on Decomposition of Organic Matter in Lysimeter

Hye-Jin Kim · Jin-Kyu Park · Sang-Hoon Song · Nam-Hoon Lee[†]

Department of Environmental Engineering, Anyang University

ABSTRACT : To evaluate the effect of the solidified/stabilized sewage sludge on landfill sites, lysimeter tests were conducted. Lysimeters (LR1, LR2, and LR3) were filled with the material(Compost : Fodder : Sand = 10 : 10 : 80) and covered with different types of the cover soils, the G solidified sludge produced from the neutral solidifying chemical agent(LR1), the A solidified sludge produced from the alkali solidifying chemical agent(LR2), and the weathered granite soil(LR3). Those lysimeters were kept at the temperature controlled room with $30 \pm 2^\circ\text{C}$ for about 450 days. As the results, it was appeared $\text{LR2} > \text{LR1} > \text{LR3}$ that total gas production rate(L), gas production rate(L/VS(kg)) and cumulative gas($\text{CO}_2 + \text{CH}_4$) production. There were not significant differences at decrease of the COD_{Cr} in the leachate from LR1 and LR3. Thus, it had been shown that the use of the G solidified sludge as cover soil did not affect the COD_{Cr} in the leachate. The COD_{Cr} from LR2 had been increased since around 250 days because solidified/stabilized sewage sludge became re-slurry. T-N and T-P from LR3 also were higher than LR1 and LR2. Also were, the use of the solidified/stabilized sewage sludge as a cover soil, therefore, did not affect the T-N and T-P concentrations in the leachate.

Key Words : Solidified/Stabilized Sewage Sludge, Landfill Cover, Gas Production, Leachate

요약 : 하수슬러지 고화물이 매립지에 미치는 영향을 평가하기 위하여 모형매립조 실험을 수행하였다. 모형매립조는 총 3기를 제작하였으며, 충전물질은 퇴비와 사료, 모래를 각각 10 : 10 : 80으로 혼합하여 충전하였고, 복토재는 개발한 중성계 고화제로 하수슬러지를 고화한 G고화물(LR1), 알칼리성 고화제로 고화한 A고화물(LR2), 마사토(LR3)로 하였다. 이를 $30 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온실에서 약 450일 동안 운전한 결과 누적발생가스발생량과 VS성분에 따른 가스발생량, CO_2 와 CH_4 의 누적발생량은 $\text{LR2} > \text{LR1} > \text{LR3}$ 순 나타났다. 그리고 LR1, LR2, LR3의 COD_{Cr} 변화를 살펴본 결과 LR1의 COD_{Cr} 농도는 LR3와 같이 지속적으로 감소하는 것으로 나타나 G고화물은 침출수의 COD_{Cr} 에는 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. LR2는 250일경 재슬러리화되어 COD_{Cr} 농도가 증가하고 있다. 그리고 T-N, T-P농도에 있어서도 LR3의 농도가 높은 것으로 보아, 하수슬러지 고화물 복토에 의한 침출수의 T-N, T-P에는 영향이 미미한 것으로 판단된다.

주제어 : 하수슬러지 고화물, 매립지 복토, 발생가스, 침출수

1. 서론

하수슬러지 처리에 있어 환경부에서는 매립장 신규 건설의 어려움, 하수슬러지 매립에 따른 매립지 안정화 지연 및 침출수 과다발생 등의 이유로 2003. 7. 1일부터 1만 톤/일 이상의 하수처리장에서 발생하는 하수슬러지의 직매립을 금지하였다. 2005년 말 기준 전국 268개의 하수처리장에서 발생한 하수슬러지량은 2,426,070톤으로 나타났으며, 하수슬러지의 직매립이 금지된 이후의 처리방법으로는 발생량의 77.9%가 해양투기 되었고, 소각 11.2 %, 재활용 4.8%,

매립 1.7%로 나타났다.¹⁾ 우리나라는 이와 같이 하수슬러지의 해양투기처분 의존율이 매우 높은 국가이나, 「런던협약 96의정서」에 따라 조만간 하수슬러지의 해양투기가 금지될 것으로 전망하고 있다.

미국 EPA에서는 하수슬러지를 일일복토재와 최종복토재로 재이용할 수 있도록 하고 있다.²⁾ 이에 따라 미국의 여러 주에서는 하수슬러지를 폐기물매립지의 일일복토재로 사용하고 있으며, 이때 조건은 고형물함량 50% 이상(즉, 수분함량 50% 미만)이고, 최종복토재로 하수슬러지를 사용하는 경우에는 슬러지와 토양을 1 : 1 정도로 혼합하여 사용하고 있다.^{3,4)} 우리나라는 2004년 8월 이전까지 하수슬러지 고화처리물의 복토재 재활용에 대한 법적 근거가 없었으나 이후 폐기물관리법 시행규칙 제24조 별표8에서 하

[†] Corresponding author

E-mail: nhlee@anyang.ac.kr

Tel: 031-467-0891

Fax: 031-467-0789

수슬러지의 고화처리물은 투수성이 낮고 용출시험 결과 유해성이 없으면(기준이하) 폐기물매립지 복토재로 사용가능하도록 하고 있다.

하수슬러지 고화물을 폐기물매립지 복토재로 사용하였을 때 매립지에 미치는 영향과 Biosoil로의 활용성에 대한 연구는 지속적으로 이루어지고 있으며,^{5-7,14)} 특히 고화하수슬러지는 침출수 중의 NH₃-N, PO₄-P, Cd, Cr, Fe, Ni, Pb, Zn의 농도에 영향을 미치지 않고, 오히려 매립폐기물의 분해와 침출수의 안정화에 도움을 준다는 연구가 보고되기도 하였다.⁸⁾ 또한 Shinya Inazumi 등은 슬러지고화물은 지반공학적으로도 폐기물매립지의 복토재로 충분히 가능하다고 보고하였다.⁹⁻¹¹⁾

기준에 주로 사용되는 알칼리성 고화제는 고화처리 시 악취(암모니아)문제 등을 발생시켰고, 이를 해결하기 위한 방법으로 중성계고화제를 개발되었으며, 그 결과 고화처리 시 악취(암모니아 가스)가 기준에 비해 현저히 줄어들었다.¹³⁾ 본 연구에서는 모형매립조 실험을 통해 기준에 주로 사용된 알칼리성 고화제를 이용한 하수슬러지고화물과 중성계고화제로 고화한 하수슬러지고화물로 모형매립조의 상부에 복토하였을 때 발생하는 침출수와 발생가스를 분석하였다. 그리고 침출수와 발생가스로부터 각각의 하수슬러지고화물 복토재가 모형매립조에 충전한 물질의 분해에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 충전 시료

본 실험은 하수슬러지고화물이 모형매립조 내 충전물질의 유기물 분해에 미치는 영향을 보기 위한 실험으로 각 모형매립조에 동일한 양의 유기물을 충전하기 위하여 모래, 퇴비, 사료를 10 : 10 : 80의 무게비로 혼합하여 충전하였다. 이때 퇴비는 화원에서 판매하는 것이고 사료는 개사료로 퇴비와 사료는 유기성 오염물질 공급원으로 그 농도가 충분하도록 하였으며, 모래는 원활한 침출수 배수를 위해 충전하였다. 상부의 복토재로는 중성계고화제를 사용하여 하수소화슬러지를 고화한 G고화물(LR1)과 알칼리성 고화제로 하수소화슬러지를 고화한 A고화물(LR2), 그리고 유기물이 거의 없는 마사토(LR3)를 복토재로 충전하였다.

2.2. 충전시료의 특성

충전물질과 복토재를 대상으로 폐기물공정시험법에 의하여 삼성분 분석을 실시하였다. 그 결과를 Table 1에서 살펴보면, 충전물질의 경우 전체 삼성분 중 수분, 가연분, 회분이 각각 10.19%, 8.62%, 81.19%로 회분의 비중이 높았고, 이는 충전물질중 모래의 혼합비율이 80%로 대부분을 차지하고 있기 때문이다.

복토재로 사용된 A고화물의 경우에는 수분이 54.96%, 가연분이 14.27%, 회분이 30.77%로 나타나 수분함량이 35.59%인 G고화물 보다 수분함량이 19.37% 더 높은 것으로 나타났다. 마사토의 경우에는 가연분이 3.79%로 낮게 측정되었고, 회분은 86.59%로 가장 높게 나타났다. 그리고 알칼리성 고화제를 사용한 A고화물의 pH는 10.5로 알칼리성을 띠고 있었고, 중성계고화제를 사용한 G고화물의 pH는 8.2, 마사토는 pH 7.2로 나타났다.

2.3. 모형매립조 실험장치 및 운전방법

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 아크릴관으로 D 150 mm × L 1950 mm인 모형매립조 3기를 제작하여 폐기물과 복토재를 충전하였다. 상부에는 인공강우를 주입하기 위한 장치를 설치하였고, 발생가스를 측정하기 위한 sampling port를 장착하였다. 그리고 가스발생량을 측정하기 위하여 모형매립조에는 Fig. 1과 같이 포화식염수가 담긴 가스포집조를 설치하였다. 모형매립조 상부와 하부에는 우수 및 침출수의 원활한 흐름을 위해 각각 모래와 자갈을 각각 50 mm씩 충전하였고, 침출수 배출부는 모형매립조 하부에 설치하였으며, 공기의 유입을 방지하기 위해 U자관을 두었다. 그리고 모형매립조는 충전물질과 복토재를 Table 2와 같이 각각의 모형매립조에 충전한 후 약 450일 동안 Table 3과 같이 30 ± 2°C의 항온실에서 운전하였다. 이때 강우 주입량은 주당 122 mL로 1년 강우를 1,200 mm로 가정하고 이중의 30% 매립지 내부로 침투된다고 가정하여 산정하였다.

2.4. 분석 항목 및 방법

2.4.1. 발생가스 분석

모형매립조에서 발생하는 가스의 조성은 GC(Gas Chromato-

Table 1. 3-components and pH of filled material and cover material

Item		Moisture(%)	Combustible(%)	Ash(%)	pH
Filled material	Sand	2.70	0.20	97.10	-
	Compost	57.88	26.31	15.81	-
	Fodder	6.68	73.98	19.34	-
	Mixture	10.19	8.62	81.19	-
Cover material	Neutral solidified/stabilized sewage sludge(G-SS)	35.59	22.78	41.63	8.2
	Alkali solidified/stabilized sewage sludge(A-SS)	54.96	14.27	30.77	10.5
	The weathered granite soil	9.62	3.79	86.59	7.2

Table 2. Component of filled material and cover material in lysimeters

Lysimeter	Cover material			Filled material		
	Material	Weight(kg)	Density(ton/m ³)	Material	Weight(kg)	Density(ton/m ³)
LR1	Neutral solidified/stabilized sewage sludge(G-SS)	4.8	0.905	Compost Fodder Sand	3.339	1.4
LR2	Alkali solidified/stabilized sewage sludge(A-SS)	5.5	1.038		3.339	
LR3	The weathered granite soil	8.5	1.603		26.71	

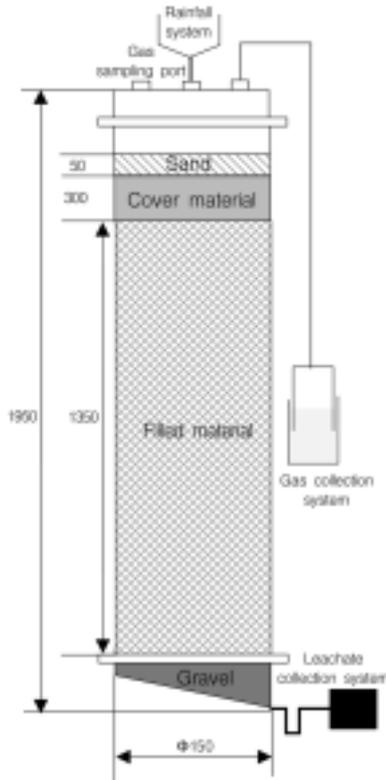


Fig. 1. Schematic of simulated lysimeters.

Table 3. Operation conditions in this study

Item \ Lysimeter	LR1	LR2	LR3
Operation condition	anaerobic		
Filling amount(kg)	38.19	38.89	41.89
Filling height(mm)	1650		
Water injection intensity	122 mL/week		

graph / Younglin 6000M)로 농도분석을 주 1회 행하였으며, 분석항목으로는 CH₄, CO₂, O₂ 및 N₂를 측정하였다. 그리고 LR1, LR2, LR3의 모형매립조에 가스포집조를 설치하여 발생가스량을 측정하였다.

2.4.2. 침출수 분석

침출수의 분석은 발생가스의 분석주기와 같이 주 1회 행하였으며, 분석시료는 우수 주입 후 발생한 침출수를 측정하였다. pH, COD_{Cr}, T-N, T-P을 분석하였고, 모든 분석은 수질오염공정시험법에 준하여 실시하였다.

Table 4. Analytical condition for gas chromatograph(TCD)

Parameter	Condition
GC	6000M(Younglin/Korea)
Column	6'x1/4" outer 6'x1/8" inner SS(CTR 1 Column)
Detector	TCD(Thermal Conductivity Detector)
Carrier gas	He gas / 50 mL/min
Injector temp.	120 °C
Detector temp.	120 °C
Oven temp.	35 °C

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지고화물이 발생가스에 미치는 영향

Fig. 2에 나타난 각 모형매립조의 누적가스발생량을 살펴보면, G고화물을 복토한 LR1과 A고화물을 복토한 LR2가 마사토를 복토한 LR3에 비하여 지속적으로 높게 발생하는 것으로 나타났다. Table 5에 정리한 바와 같이 고화물을 복토재로 사용한 LR1과 LR2의 약 450일까지 누적가스발생량은 127.59 L, 172.06 L로 마사토를 사용한 LR3 94.37 L보다 각각 1.35배, 1.82배 높은 것으로 보아 하수슬러지 고화물은 가스발생량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 LR2와 LR1를 비교하면 LR2의 누적가스발생량이 LR1보다 지속적으로 높게 증가하는 것으로 나타났으며 450일까지 총 44.47 L 더 많이 발생하였다. 폐기물의 VS성분에 따른 가스발생량을 Table 5에서 살펴보면 LR2

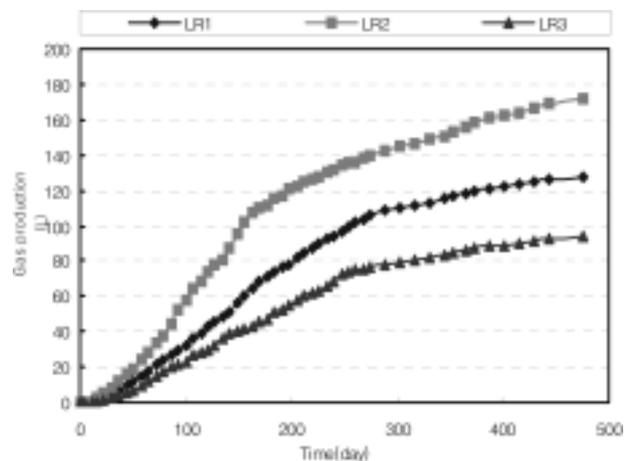


Fig. 2. Cumulative gas production with lysimeter operation time.

Table 5. Comparison of gas production rate in each lysimeter

Item	Total gas production rate(L)	Gas production rate (L/VS(kg))
LR1	127.59	32.13
LR2	172.06	46.97
LR3	94.37	29.49

가 46.97 L/VS(kg)으로 가장 높았으며, LR1이 32.13 L/VS(kg), LR3가 29.49 L/VS(kg) 순으로 누적가스발생량과 동일한 결과를 보이고 있었다. 즉, 하수슬러지고화물을 모형매립조에 복토 시 가스발생량은 증가하였고, A고화물이 G고화물보다 가스발생량과 VS성분에 따른 가스발생량 증대에 더 영향을 미치는 것으로 나타났다.

Fig. 3~5에 LR1, LR2, LR3 모형매립조에서 발생한 발생가스의 조성을 주 1회 분석하여 나타내었다. 모든 모형매립조에서 초기에는 CO₂의 농도가 75%까지 급격히 증가하다 이후 서서히 감소하고 있고, CH₄농도는 점차적으로 증가하고 있다. 이는 초기에 분해도가 높은 유기물 산화가 일어나 CO₂농도가 급격히 증가한 것이며, 이후 CH₄농도가 서서히 증가하는 것으로 보아 메탄균의 활성이 정상적으로 이루어지고 있다는 것을 알 수 있다. CO₂와 CH₄가 어느 정도 일정한 농도를 유지하는 안정화 단계는 LR1은 약 230일, LR2는 약 200일, LR3는 약 220일 이후로 볼 수 있으며, 안정화 되는 시점은 각 모형매립조 마다 차이가 있으나, 200일에서 230일경 모두 안정화되는 것으로 보아 하수슬러지고화물은 모형매립조의 발생가스로 보았을 때 안정화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어진다.

그리고 운전기간동안 A고화물을 복토재로 활용한 LR2에서의 CH₄농도가 G고화물을 복토재로 활용한 LR1과 마사토를 복토재로 활용한 LR3보다 빠르게 증가하였으며, 그 농도가 높게 나타났다. CO₂와 CH₄의 누적발생량을 살펴보면 Table 6에 정리한 바와 같이 LR1, LR2, LR3가 각각 114.1 L, 158.2 L, 82.0 L로 LR2가 가장 높게 나타났고 LR1, LR3순으로 발생하였다.

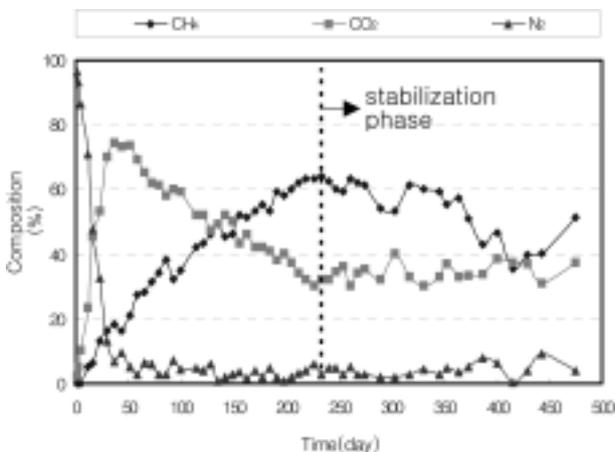


Fig. 3. Profiles of gas composition from LR1.

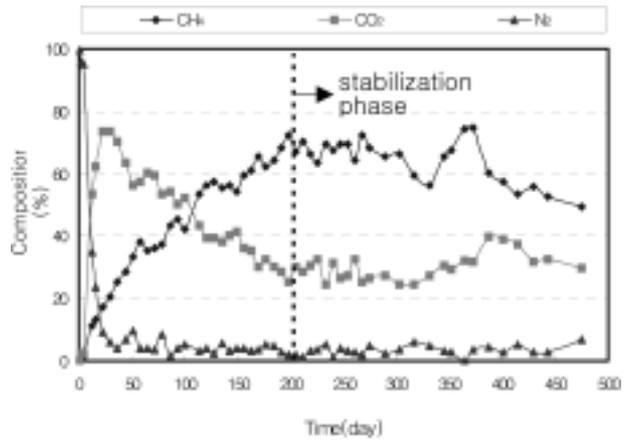


Fig. 4. Profiles of gas composition from LR2.

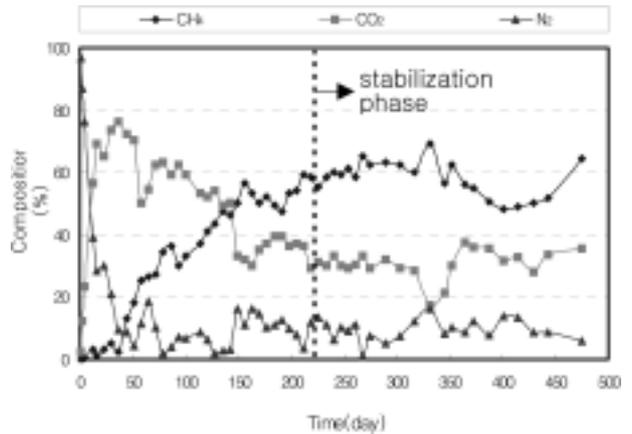


Fig. 5. Profiles of gas composition from LR3.

Table 6. Cumulative gas(CO₂ + CH₄) production

Lysimeter	LR1	LR2	LR3
Cumulative gas production(L)	114.1	158.2	82.0

누적가스발생량과 폐기물의 VS성분에 따른 가스발생량, CO₂와 CH₄의 누적발생량 모두 LR2 > LR1 > LR3 순으로 나타났다. LR2가 모든 항목에서 높게 나타난 이유를 침출수의 pH에서 살펴보면 LR2는 운전초기부터 마지막까지 pH 7~pH 8.8을 유지하고 있었고, LR1과 LR3는 운전초기에 pH 5.2~pH 5.8로 약산성상태로 감소한 후 50일경 이후 pH 7.0 이상을 유지하고 있었다. 이는 알칼리계 고화재로 인한 하수고화물 복토재의 높은 pH(pH 10.5)가 모형매립조에 충전물질을 분해하는데 있어 혐기성 분해의 초기단계인 산성성단계를 빠르게 메탄생성단계로 최적화시켜 주어 LR2의 CH₄농도가 다른 모형매립조보다 높고 빠르게 증가하였으며, 모형매립조의 가스발생에 영향을 미친 것으로 사료된다.

3.2. 하수슬러지 고화물이 침출수에 미치는 영향

주 1회 122 mL씩 우수주입을 행하였고, 발생하는 침출수를 주 1회 측정하였다. 충전 초기에 주입한 인공강우는 충

전폐기물의 공극에 적체되어 침출수는 발생하지 아니 할 것으로 판단하여 충전 초기 3일 동안 하루에 1 L씩 인공 강우를 주입하였다. 이후 본 연구에서 계획한 인공강우를 주입한 결과 LR1, LR2, LR3는 충전 후 23일이 경과한 후에 침출수가 발생하였다.

모형매립조의 pH 변화를 Fig. 6에서 살펴보면, LR1와 LR3의 pH는 운전 초기에 pH 5.2~pH 5.8인 약산성상태로 감소한 후, 약 50일 이후 7.0 이상을 유지하는 것으로 나타났으며, LR2는 다른 모형매립조와는 달리 초기부터 pH 7~pH 8.8을 유지하고 있다. 이와 같은 차이는 알칼리계 고화제로 고화된 하수슬러지 고화물에 의한 pH 완충작용으로 판단된다. 그리고 COD_{Cr}의 시간경과에 따른 농도변화를 Fig. 7에 나타내었다. 모든 모형매립조는 시간경과에 따라 COD_{Cr}의 농도는 최초 80,400~948,000 mg/L에서 초기 30일에서 40일까지 최대 100,200~116,000 mg/L로 증가한 뒤 서서히 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 폐기물 내 존재하는 유기물질의 용해현상에 의해 증가한 것으로 판단된다.¹⁴⁾ LR2의 경우 약 81,000 mg/L로 감소하다가 250일 이후 107,063 mg/L까지 농도가 증가하고 있는데, 이는 A고화물이 충전 당시 건조되어 흙 형태를 띠고 있었으

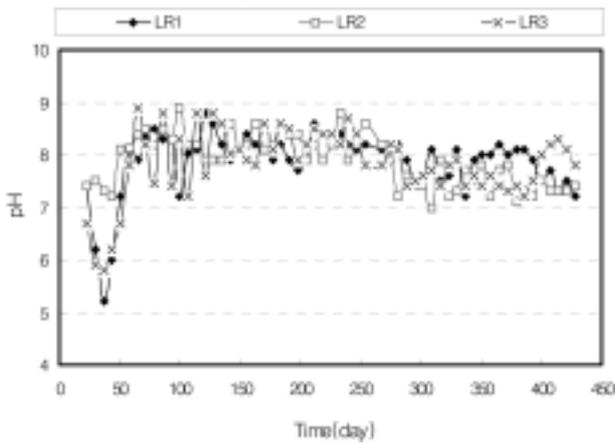


Fig. 6. Variation of pH concentration in the leachate produced from each lysimeter.

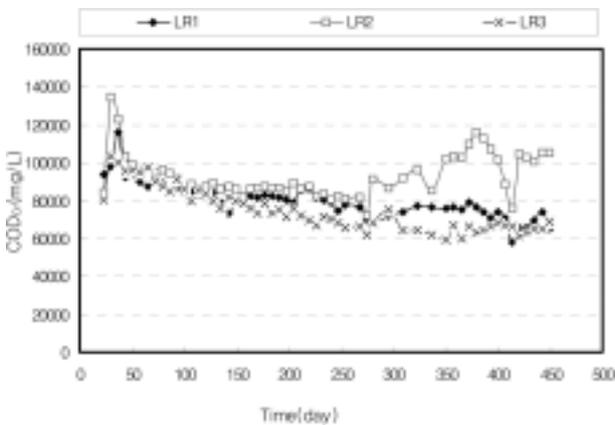


Fig. 7. Variation of COD_{Cr} concentration in the leachate produced from each lysimeter.

Table 7. Total leachate amounts of COD, T-N and T-P in each Lysimeter (g)

Lysimeter	COD _{Cr}	T-N	T-P
LR1	625	19.37	2.33
LR2	726	21.42	2.28
LR3	556	25.08	2.42

나 약 250일경 다시 슬러지 형태를 가지게 되는 재슬러리화가 일어났으며, 이것이 침출수의 COD_{Cr} 농도에 영향을 미친 것으로 추정된다. 그리고 침출수로 유출된 누적 COD_{Cr}를 살펴보면 마사토를 복토한 LR3를 100%로 기준할 때 LR1은 112%, LR2는 131%로 하수슬러지 고화물을 복토한 모형매립조가 생분해된 폐기물중 침출수로 전환된 유기성 오염물질 발생량이 1.12~1.31배 높은 것을 볼 수 있었고 이는 고화물 내의 안정화되지 못한 유기물질에 의한 것으로 사료된다. 그러나 LR1의 COD_{Cr}농도는 LR3와 같이 지속적으로 감소하는 것으로 나타나 G고화물을 모형매립조 상부에 복토하여도 침출수의 COD_{Cr} 수질변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 8은 T-N의 농도변화를 보여주고 있다. LR1, LR2, LR3 모형매립조의 T-N은 약 90일까지 680~860 mg/L 정도의 값을 나타내다가 이후 급격히 증가하여 최대 4,759~5,219 mg/L까지 T-N의 농도가 높아지고 있으며, 450일 경에도 T-N의 농도는 등락을 반복하는 것으로 나타나고 있다. 모형매립조 운전기간 동안 침출수로 유출된 LR1, LR2, LR3의 T-N 농도는 Table 7에 정리한 바와 같이 각각 19.38 g, 21.42 g, 25.08 g으로 LR3를 100%로 기준 할 때 LR1 77.3%, LR2 85.4%로 마사토를 매립지 상부에 복토한 LR3가 다소 높게 나타났다. T-P의 농도는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 실험초기 621.6~698.8 mg/L의 범위에서 지속적으로 감소하여 450일 경에는 95~155 mg/L 범위로 나타났다. 이러한 인농도의 감소는 침출수에 다량 포함되어 있는 양이온이 인과 결합하여 침출수로 용출되는 것이 억제되었기 때문으로 사료된다. 즉, 인산염 형태의 인이 중성과 알칼리성에서 칼슘, 산성에서는 철 또는 알루미늄

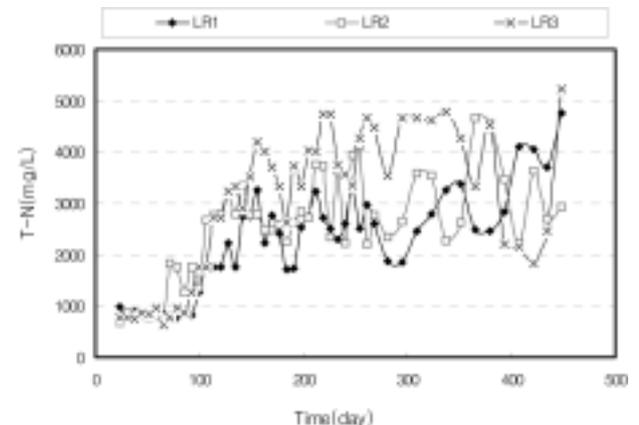


Fig. 8. Variation of T-N concentration in the leachate produced from each lysimeter.

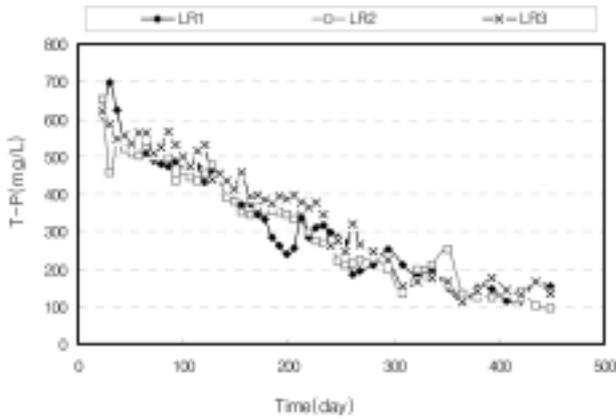


Fig. 9. Variation of T-P concentration in the leachate produced from each lysimeter.

과 반응하여 화학침전물을 형성하게 되어 침출수 내에 용출되는 양이 감소하는 것이다.¹⁴⁾ 침출수로 유출된 T-P 농도를 비교하여 보면 LR1이 2.33 g, LR2가 2.28 g, LR3가 2.42 g으로 LR3를 100%로 기준할 때 LR1은 96.3%, LR2는 94.2%로 유사하게 나타났다.

4. 결론

모형매립조 실험을 통해 기존에 주로 사용된 알칼리성 고화재를 이용한 하수슬러지 고화물과 중성계고화물로 고화한 하수슬러지 고화물을 모형매립조 상부에 복토하였을 시 이들이 충전물질의 분해에 미치는 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론은 얻었다.

1) 누적가스발생량과 폐기물의 VS성분에 따른 가스발생량, CO₂와 CH₄의 누적발생량 모두 LR2 > LR1 > LR3 순으로 나타나 하수슬러지고화물을 모형매립조에 복토 시 가스발생량이 증가되었음을 알 수 있었고, A고화물이 G고화물보다 가스발생 증대에 더 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 가장 많은 가스발생량을 보인 LR2의 경우 알칼리계 고화재로 인한 하수고화물 복토재의 높은 pH(pH 10.5)가 모형매립조내에 충전물질을 분해하는데 있어 혐기성 분해의 초기단계인 산생성단계를 빠르게 메탄생성단계로 최적화시켜 주어 모형매립조의 가스발생에 영향을 미친 것으로 판단된다.

3) CH₄와 CO₂ 농도로 본 안정화 단계는 LR1은 약 230일, LR2는 약 200일, LR3는 약 220일 이후에 이루어지고 있으며, 200일에서 230일경 모두 안정화되는 것으로 보아 하수슬러지고화물은 모형매립조의 안정화에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 사료된다.

4) LR1, LR2, LR3의 COD_{Cr}농도는 최초 80,400~948,000 mg/L에서 실험초기 최대 100,200~116,000 mg/L으로 증가한 뒤 서서히 감소하고 있으며, LR2에서만 250일 이후 107,063 mg/L까지 농도가 다시 증가하고 있는데, 이는 A

고화물이 재슬러리화가 일어나 이것이 침출수의 COD_{Cr} 농도에 영향을 미친 것으로 추정된다. 이에 따라 장기적으로 보았을 때 중성계 고화재로 고화한 G고화물이 알칼리성 고화재로 고화한 A고화물보다 안정적으로 고화가 이루어진 것으로 판단된다. 그리고 LR1의 COD_{Cr}농도는 LR3와 같이 지속적으로 감소하는 것으로 나타나 G고화물을 모형매립조 상부에 복토하여도 침출수의 COD_{Cr} 수질변화에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

5) LR1, LR2, LR3의 T-N은 실험초기 680~860 mg/L 범위에서 90일 이후 급격히 증가하여 최대 4,759~5,219 mg/L까지 T-N의 농도가 높아지고 있으며, 450일 경에도 T-N의 농도는 등락을 반복하는 것으로 나타나고 있다. T-P의 농도는 실험초기 621.6~698.8 mg/L의 범위에서 지속적으로 감소하여 450일 경에는 95~155 mg/L 범위로 나타났다.

6) 침출수에 유출된 누적 T-N과 T-P는 LR3가 LR1보다 1.29배, 1.04배, LR2보다 1.17배, 1.06배 높은 것으로 보아, 모형매립조 내 하수슬러지고화물 복토에 의한 침출수의 T-N, T-P에는 그 영향이 미미한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 상하수도국 생활하수과, 하수도통계, 환경부, pp. 12~14 (2006).
2. Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge Rule, Federal Register 40CFR Parts 503, U.S EPA, **58**(32), pp. 9247~9420(1993).
3. Metcalf, Eddy, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Refuse, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 25~37(1992).
4. Lue-Hing, C., Zens, D., Kuchenrither, R., "Municipal Sewage Sludge Management: Processing, Utilization and Disposal," *Water Quality Management Library*, Eckensfelder W.W., Malina J. F., Patterson J. W.(Eds), Technomic Pub. Co., Lancaster, pp. 165~193(1992).
5. Rhew, R. D., Barlaz, M. A., "Effect of Lime-stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition," *J. Environ. Eng.*, **121**(7), 499~506(1995).
6. Jacobs and M. Silver, "Sludge Management at the Middlesex County Utilities Authority," *Water Sci. Technol.*, **22**(12), 93~106(1990).
7. 남영우, 박태욱, 박주양, "매립지 복토재로의 재활용을 위한 하수슬러지의 부산석회계고화재를 이용한 안정화 연구," *한국폐기물학회지*, **17**(5), 658~664(2000).
8. Rhew, R. D. and Barlaz, M. A., "Effect of Lime-Stabilized Sludge as Landfill Cover on Refuse Decomposition," *J. Environ. Eng.*, **121**(7), 499~506(1995).
9. Inazumi, S., 京都大學經營管理大學院經營管理研究部 工學研究科都市社會工學專攻研究室 Home Page, <http://lakers.kuciv.kyoto-u.ac.jp>, January(2003).

10. 임성진, 이재복, “석회처리에 의한 정수슬러지의 복토재 활용에 관한 연구,” 대한상하수도학회지, **14**(3), 231~239 (2000).
11. 강화영, 김종천, 이영동, 박상숙, 정정조, “유기성 폐슬러지를 이용한 매립장 복토재 개발,” 대한환경공학회지, **24**(9), 1569~1577(2002).
13. 박상철, “하수슬러지의 매립지 복토재로 활용방안,” 음식물류폐기물 관리 및 유기성폐기물 직매립금지 정착방안 공동심포지엄(국립환경과학원, 수도권매립지관리공사, 제주지역환경기술개발센터, 유기성자원학회), ISSN 1225-6498, pp. 158~171(2005. 10).
14. 범봉수, “유기물 조기안정화, 메탄회수 및 질소제거를 위한 폐기물 신매립공법의 개발,” 인하대학교 공학박사 학위논문, pp. 43~48(2001).