

벤토나이트 첨가시 불량폐기물매립지의 침출수에 미치는
화학적 특성에 관한 연구

이 채 영, 노 회 정

서울시립대학교 환경공학부

**A Study on the Chemical Characteristics for the Leachate of
Open(Illegal) Dumping Waste Landfill Mixing with Bentonite**

Jai-Young Lee, Hoe-Jung Noh

The Department of Environmental engineering, The University of Seoul

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate the chemical characteristics of the leachate for the open(illegal) dumping waste. In this study, the open dumping waste were mixed with 0, 5, 10, 15% of bentonite in each lysimeter as a rate of weight. The simulation was evaluated by CODcr, NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- and heavy metals in leachate. As a result, the mixed waste with bentonite in all lysimeters showed the reduction of CODcr and heavy metals were hardly detected. The removal rate of NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- was increased with the mixing rate of bentonite.

Key words : the open(illegal) dumping waste, bentonite, lysimeter, leachate, solidification · stabilization

요약문

본 연구의 목적은 불량 매립된 쓰레기로부터 발생하는 침출수의 화학적 특성을 조사하는데 있다. 불법 투기된 쓰레기를 각각의 모형 매립조 속에 벤토나이트를 중량비로 0, 5, 10, 15%씩 혼합한 뒤 침출수의 COD_{Cr}, NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, 중금속을 모니터링 하였다. 그 결과, 모든 Lysimer에서 COD_{Cr} 농도 감소가 보여졌으며, 중금속은 거의 검출되지 않았다. 벤토나이트 혼합율의 증가에 따라 NO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻의 제거율이 증가하였다.

주제어 : 불량매립쓰레기, 벤토나이트, 모형 매립조, 침출수, 고형화·안정화

1. 서론

현재 국내 폐기물 발생량 중 38.2% 정도는 매립에 의하여 처리되고 있지만, 위생매립방식의 개념이 국내 매립지에 도입된 것은 최근의 일로서, 김포 수도권 매립지 및 일부 몇몇 지정폐기물 매립지에 국한되고 있다. 난지도를 비롯한 대부분의 매립지는 단순 투기에 의한 불법적 매립인 불량매립지이다.

전국에 산재되어 있는 사용 종료된 매립지를 대상으로 조사한 보고서에 따르면, 5년 미만의 짧은 매립기간을 갖는 것이 전체의 85.8%를 차지하고 있으며, 짧은 매립기간으로 인해 그에 따른 매립지 면적 또한 5000 m² 이하인 것이 전체의 58.3%를 차지하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 환경오염 방지시설이 설치되어 있는 것은 전체의 22.0%로써 매우 낮은 수준을 보였다.¹⁾ 따라서 우리나라의 사용 종료된 매립지의 대부분은 소규모이고, 생활 폐기물이 주로 매립되었으며, 환경오염 방지시설이 없는 불량매립지로 파악할 수 있다.

이러한 불량 매립지로부터 발생가능한 문제로는 크게 주변의 토양 및 지하수 오염 등의 2차적 환경오염문제와 기 매립된 폐기물의 분해로 인해 매립지내의 공동화현상으로 나타나는 지반침하가 있다. 지반침하는 매립된 폐기물이 안정화 될 때까지 지

속되기 때문에 매립지 안정화 기간 동안에는 토지사용이 제한되는데, 미국의 경우는 매립지 폐쇄 후 약 30년간의 관리 및 안정화기간을 두고 있지만 우리나라는 20년까지 토지사용을 법으로 제한하고 있다. 따라서 국토면적이 좁은 우리나라로서는 이러한 사용 종료된 매립지의 재이용에 관한 사회적 요구가 토지이용 및 환경관리적 차원에서 상당히 대두될 것으로 전망된다.

국내에서의 안정화·고형화 기술은 주로 매립 전 유해 폐기물의 운반 및 처리의 용이함과 매립 후 주변환경에 대한 영향을 최소화하거나 재활용을 하기 위하여 제한적으로 사용되어 왔다. 이런 특정 폐기물에 대한 안정화·고형화 연구는 상당히 진척되어 왔으나 오염 토양 복원기술로서의 안정화·고형화 기술에 대한 연구는 아직까지는 상당히 미흡한 실정이다.

오염 토양 복원기술로서의 적용시 안정화·고형화 개념은 오염 토양의 복원후 토지이용도의 폭을 넓히고, 보다 효율적으로 이용될 수 있어야 하므로 앞에서의 개념과는 상당한 차이가 있을 수 있다. 사용종료된 매립지에 대한 안정화 판단 기준은 아직까지는 법적으로 규정되어 있지 않아 다소 모호하지만, 대개의 경우 매립지내의 심도별 온도의 경년변화, 매립가스의 성분분석, 매립 경과된 폐기물의 성분분석, 침출수의 수질분석, 매립지의 지반침

하 측정 등을 통하여 안정화 정도를 판단하고 있다.²⁾

본 연구에서는 그간 유해 폐기물의 안정화·고형화에 있어서 중금속을 비롯한 오염물질에 대해 흡착능력이 우수하다고 인정되고 있는 벤토나이트³⁾를 이용하여, 사용종료 후 약 6~9년이 경과된 매립지의 안정화·고형화에 대한 실험실 규모의 기초 연구를 수행하였다. 안정화에 대한 지표로서 벤토나이트 첨가에 따른 침출수의 수질 분석을 통하여 모형 매립조 내부의 화학적 변화를 모니터링 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 고형화·안정화(Solidification·Stabilization)

고형화·안정화는 유해폐기물의 독성을 제거하기 위해 화학적, 물리적, 열적 처리를 한다는 점에 있어서 유사하다. 우선, 안정화는 오염물질의 용해성, 이동성, 독성을 저감시킴으로써 폐기물에 의해 발생하는 위험을 줄이는 처리로서 폐기물의 물리적 성질이 반드시 변하는 것은 아니다. 반면 고형화는 폐기물을 큰 구조적 결합체인 집괴 덩어리로 캡슐화(encapsulation)시키는 처리로서 반드시 폐기물

과 고화제(binders)간에 화학적 상호 작용을 한다는 것은 아니고, 다만 기계적으로 폐기물을 큰 덩어리화 시킨다는 것이다. 이로 인해, 오염물의 이동이 엄격히 제한되는 것이다. 이러한 고형화·안정화 기술은 수십년동안 개발되어 왔고, 여러 종류의 고화제를 사용하여 유기성, 무기성 폐기물의 처리에 적용시켜왔다.

2.2 벤토나이트의 반응기작

(Fig.1)에서 보듯이 점토물질은 실리카 사면체(silica tetrahedral)층과 알루미늄 팔면체(aluminum octahedral)의 연속되는 층으로 이루어진 광물이다. 실리카 사면체는 산소원자들로 결합되어 있고, 알루미늄 팔면체는 산소원자나 히드록실기(OH)로 결합되어 있다. 이 두층이 응축(condensation)에 의해 1:1 이나 2:1 층을 이루는데 이중 2:1 층 점토가 확장되어 있는 것을 흔히 벤토나이트(bentonite)라고 한다. 이런 벤토나이트 점토의 표면은 사면체층에 있는 Al^{3+} 가 Si^{4+} 로, 팔면체 층에 있는 Mg^{2+} 가 Al^{3+} 로 대체되면서 영구적인 표면 음전하가 된다. 일반적으로 이 음전하는 점토 표면에서 Na^{+} 이나 Ca^{2+} 과 같은 무기성

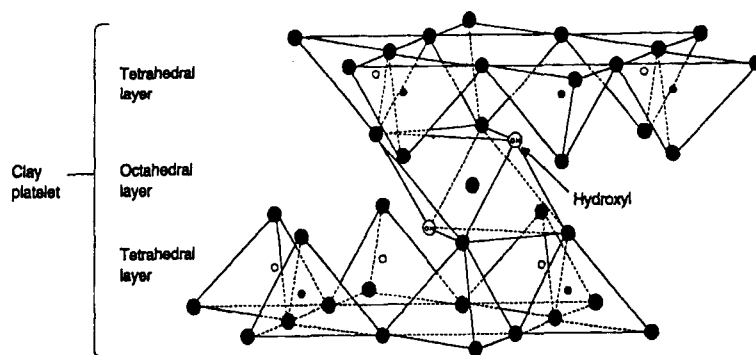


Fig. 1. The Construction of clay mat

양이온에 의해 중화되어지고 또한 물분자와 결합한다. 전 세계적으로는 Ca계 벤토나이트가 주종을 이루지만 팽창성이 적고 침전에 의한 안정성이 낮아서 원소치환을 한 Na계 벤토나이트가 많이 사용된다.⁹⁾

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

실험기구는 실험실규모의 4개의 Lysimeter(ϕ 0.6m \times H 1m)를 이용하였다. 이 매립조는 침출수의 영향에도 비교적 안정성이 있는 PVC 재질로 되어있다.

Lysimeter의 하부 저면에 침출수의 포집을 위하여 직경 2cm의 구멍을 뚫고, 그 위에 부직포를 2겹으로 깔아 하부배수층의 역할을 하도록 하였다. 부직포성상은 폴리프로필렌으로 700g/m²의 중량을 갖는 Geotextile이다. 침출수의 정체현상을 방지하기 위하여 10°의 경사를 주었다.

Lysimeter의 주변장치로는 매립지의 현장조건

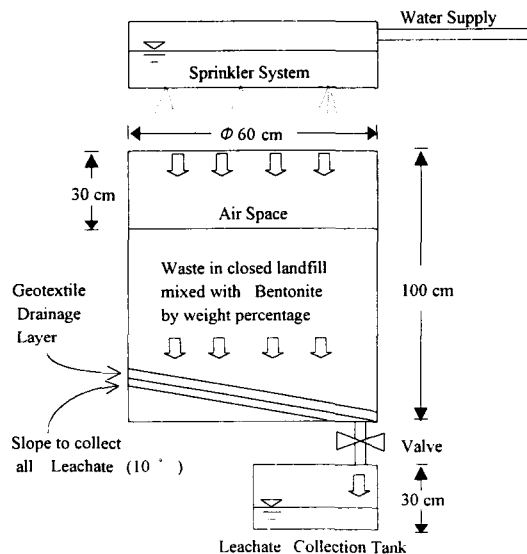


Fig. 2. The structure of Lysimeta

에 부합되는 강우조건을 형성하기 위한 인공 강우 시설을 Lysimeter의 상단에 설치하였고, 각 Lysimeter의 하단에는 매립층을 통과한 침출수를 받기 위한 침출수 포집용기가 갖추어져 있다. 인공 강우는 Lysimeter내 매립층의 상부표면에 고루 살포되도록 고려하여 살수장치를 설치하였다.

3.2 대상시료

① 시료채취

경기도 Y시의 택지개발 구역 내 불량 매립지로서 매립 종료된 후 6~9년 정도 경과된 매립 쓰레기를 굴착 채취하였다.

② 전처리

앞 선 Delome 등의 석회처리가 매립된 폐기물의 침출수에 미치는 영향에 관한 연구에 근거하여⁵⁾, 본 연구에서도 굴착한 폐기물을 섬유류, 비닐 및 플라스틱류, 목재류, 음식물류, 종이류, 고무류 등의 가연분과 금속, 유리, 잔여토사 등의 불연물로 손선별하였고, 중량비로 균일하게 4등분하여 벤토나이트와 교반하였다. 이 때 각 성분의 크기가 4~6cm를 넘지 않도록 절단하였다.

3.3 시료의 관리

① 충전

성상별로 구분한 폐기물을 4등분하여 토사분을 주입한 후 0, 5, 10, 15%의 벤토나이트를 각각 중량비(w/w %)로 교반하여 충전시켰다.

- Lysimeter I -매립 폐기물의 0%를 벤토나이트로 충전
- Lysimeter II -매립 폐기물의 5%를 벤토나이트로 충전
- Lysimeter III -매립 폐기물의 10%를 벤토나이트로 충전
- Lysimeter IV -매립 폐기물의 15%를 벤토나이트로 충전

② 시료 채취

과거 30년간의 년 평균 강우량(1274mm/yr)중 일주일 강우량에 해당되는 7L을 지속적으로 주입하였고, 각 Lysimeter의 운전 시작 3주 후부터 집수된 침출수는 90일 이후 1회 300mg/l 씩 채취하여 실험시료로 활용하였다.

음이온 분석은 NO₃⁻, Cl⁻를 대상으로 K.S.M.(수질편)의 Ion Chromatography 법(DX-100)에 의하여 검출하였다.

3.4 실험방법

pH 분석은 K.S.M.의 이온 전극법으로 측정하였다. CODqnstjr은 S.M. Open Reflux Method(Cr)로 하였고, 중금속 분석은 Cu, Cd, Hg, Pb, Zn, Cr을 대상으로 K.S.M.(폐기물편)에 의하여 유도결합 플라즈마 방출 분광법(ICPs-1000IV, SMIMADZU, Japan)으로 분석하였다.

4. 실험결과

4.1 굴착폐기물의 물리적 조성

굴착된 폐기물은 매립종료 후 6~9년이 경과되어 다소 안정화가 이루어진 상태로 파악되었다. 그중 약 70% 정도가 잔여토사로 분류되었으며, 이는 다른 연구자들의 구성 비율과 거의 비슷한 것으로 나타났다.^{6),7)} 본 실험에 사용된 시료의 물리적 조성은 <Table 1>과 같다. 가연분은 20.6%이고, 불연분은 79.4% 이다.

Table 1. The Physical Characteristics of the Open Dumping Wastes.

	Component	Weight(kg)	Percentage(%)
Combustible	Textiles	5.20	4.0
	Plastics	15.20	11.6
	Woods	0.38	0.3
	Food Wastes	0.01	0.0
	Papers	1.20	0.9
	Rubbers	0.40	0.3
	Others	4.61	3.5
Non-combustible	Residual soil	90.00	69.3
	Metals	2.00	1.5
	Glass	1.20	0.9
	Others	10.00	7.7
Total		130.20	100.0

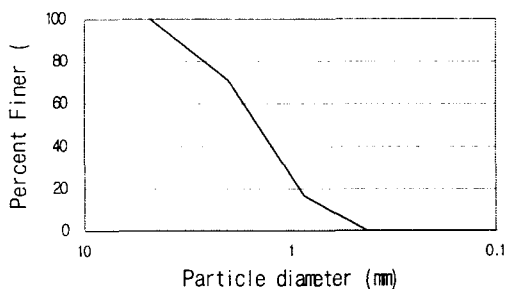
4.2 잔여토사의 입도분석

잔여토사는 <Table 2>에서 보듯이 모래질이 많은 마사토의 성질을 보여주고 있으며, 이는 과거의

연탄제분 매립과 사용종료후의 폐기물 매립지 복토의 영향이라 볼 수 있다.

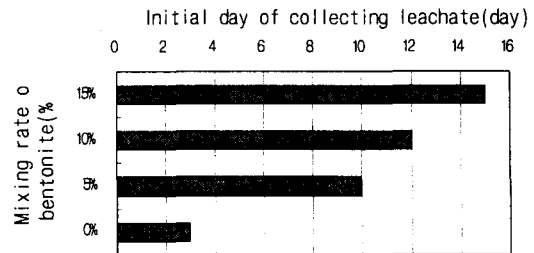
Table 2. The Sieve Test for The Residual Soil

Dia. (mm)	Weight (kg)	Percentage (%)	Accumulative Percent (%)
4.750	0.38	28.8	100.0
2.000	0.72	54.5	71.2
0.850	0.22	16.6	16.7
0.425	0.002	0.1	0.1
0.250	0.00	0.0	0.0
0.180	0.00	0.0	0.0
0.075	0.00	0.0	0.0

**Fig. 3. The Particle Size Distribution Curve for Residual Soil**

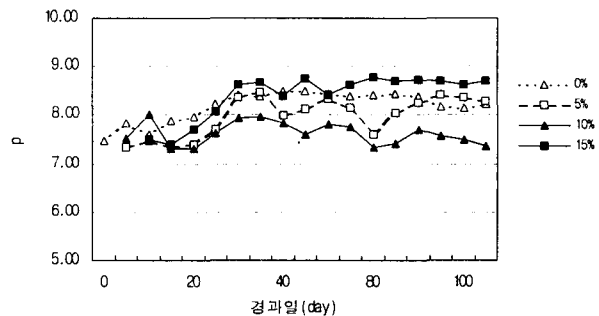
4.3 침출수 발생량

일반적으로 벤토나이트는 점토물질의 하나로서 매우 낮은 투수성을 보이고 있어 벤토나이트 함량이 높을수록 초기 침출수 발생 경과일이 길어짐을 알 수 있다. (Fig.4)은 벤토나이트 함량에 따른 침출수의 최초발생일을 보여주고 있다. 즉 Lysimeter I (0%)는 3일 후, Lysimeter II (5%)는 10일 후, Lysimeter III (10%)는 12일 후, Lysimeter IV (15%)는 15일 후에 침출수가 발생하였다. 인공강우 주입에 따른 침출수의 발생량은 전체 강우량의 약 86%를 나타내었으며, 이러한 침출수의 변화량은 굴착폐기물의 최초 포화도 및 증발산의 영향으로 볼 수 있다.

**Fig. 4. The First Collection Days of Leachate**

4.4 pH

(Fig.5)에서 보듯이 pH는 7~9사이의 분포영역을 유지하였으며, 벤토나이트 함량이 증가할수록 pH가 다소 상승하는 경향을 보이고 있다. 이는 벤토나이트와 물과의 반응에서 벤토나이트의 나트륨 이온성분이 물의 수소이온성분으로 치환⁸⁾되면서 나타난 결과로 볼 수 있다.

**Fig. 5. The History of pH Concentration**

4.5 COD 농도 및 이온성 물질제거

(Table 3)에서 보듯이 초기 CODcr의 농도는 1,250mg/l로 일반적인 생쓰레기의 CODcr의 농도보다 매우 낮은 것으로 볼 수 있다. 이는 매립 종료 후 시간의 경과에 따른 안정화에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 중량별로 벤토나이트를 첨가한 후

90일이 경과된 후 모든 Lysimeter의 CODcr 농도가 감소하는 것을 볼 수 있었으며, 벤토나이트의 함량이 15%의 경우 가장 높은 제거효율을 보여 주었다.

이온물질의 경우, 벤토나이트의 함량이 증가됨에 따라 대체적으로 제거효율이 증가하는 것을 볼

수 있었으며, 특히 SO_4^{2-} 의 경우에는 75%까지 제거효율을 나타냈으며, NO_3^- 는 벤토나이트를 첨가하지 않은 Lysimeter에서보다 훨씬 높은 제거효율을 나타내었다. 이러한 이온성 물질의 제거는 벤토나이트의 이온교환에 의한 결과인 것으로 사료된다.

Table 3. The Removal Rate and Concentration for CODcr and Ionic Concentrations

		The Rate of Bentonite(w/w %)			
		0%	5%	10%	15%
CODcr	I.C (mg/l)	1,250	1,750	1,250	1,250
	F.C (mg/l)	450	600	550	350
	R/E (%)	64	65.7	56	72
SO_4^{2-}	I.C (mg/l)	1,585	1,806.7	2,600.7	2,167.7
	F.C (mg/l)	1,179.2	840.2	648.5	585.4
	R/E (%)	25.6	53	75	73
NO_3^-	I.C (mg/l)	85.8	87.8	93.8	107.2
	F.C (mg/l)	79.8	72.4	62.4	66.4
	R/E (%)	7	17.5	33.4	38
Cl ⁻	I.C (mg/l)	323.4	323.8	313.4	414.2
	F.C (mg/l)	147.9	140.6	137.0	140.0
	R/E (%)	54	56.5	56.3	66

I. C : Initial Concentration
 F. C : Final Concentration
 R/ E : Removal Efficiency

4.6 중금속

중금속은 거의 검출되지 않았으며 이는 불량폐

기물 매립지(Y시)의 굴착폐기물이 주로 일반 생활 폐기물매립에 기인된 결과인 것으로 보인다.

Table 4. The Concentment of Heavy Metals

	The Rate of Bentonite(w/w %)							
	0%		5%		10%		15%	
	I.C	F.C	I.C	F.C	I.C	F.C	I.C	F.C
Cr	0.025	0.156	0.022	0.089	0.025	0.087	0.024	0.006
Cu	N/D	0.105	N/D	0.103	N/D	0.096	N/D	0.03
Zn	N/D	0.368	N/D	0.286	N/D	0.162	N/D	0.562
Cd	N/D	0.076	N/D	0.076	N/D	0.07	N/D	0.024
Pb	0.01	N/D	0.005	0.02	0.005	0.001	N/D	N/D
Hg	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D

N/D : Not Detected

I.C : Initial Concentration

F.C : Final Concentration

5. 결론 및 고찰

굴착폐기물의 물리적 조성에는 가연성 물질보다 불연성 물질의 구성비가 두드러졌으며, 가연성 물질 중에는 비닐·플라스틱(Plastics), 가죽·고무(Rubbers)의 순으로 타 조성에 비해 많은 부분을 차지하고 있었다. 이의 조성은 경과년수, 복토의 유무, 양 분석자의 차이에 따라 달라질 수 있지만, 6~9년의 경과년수로 인해 생분해 가능한 물질은 거의 분해되었기 때문이라 판단된다. 한편 불연성 물질인 토사성분의 함량은 약 70%로 불량폐기물 매립지의 굴착폐기물의 잔여 토사량의 평균에 해당한다고 볼 수 있다. Lysimeter 하부 침출수의 수질분석 결과를 보면 그 결과가 일반 매립지의 침출수의 성상보다는 농도면에서 낮게 나타났으며, 특히 침출수의 중금속 농도는 수질환경 보전법 상 배출허용기준(가, 나, 특례지역)에 위배되지 않음을 알 수 있었다. 이는 일반 생활폐기물 매립지내에서

중금속에 의한 토양의 오염은 크게 우려할 사항이 아님을 입증해 주는 것이다.

본 실험에서 사용한 나트륨계 벤토나이트의 중금속에 대한 우수한 흡착능은 이미 여러 논문들을 통하여 알려져 있다.^{8),9)} 본 실험의 분석 대상 시료는 매립 경과된 후 약 6~9년이 지난 생활폐기물을 대상으로 했으므로, 중금속보다는 유기성, 이온성 오염물질이 주종을 이루고 있었다.

CODcr의 경우, 실험실시 후 90일이 경과함에 따라 모든 Lysimeter의 CODcr 농도가 감소하였으나, 벤토나이트를 첨가함에 따른 CODcr 농도 제거효율 증가는 5~10%의 Bentonite 혼합으로 그리 크지 않았다. 그러나, 15%의 혼합에 대한 제거율은 Bentonite를 첨가하지 않은 상태보다는 8% 정도 더 높은 효율성을 볼 수 있었다. 또한 이온성 물질의 경우는 벤토나이트의 이온교환으로 인해 제거효율이 증가하는 양상을 보였으며, 그 제거효율도 높은 편이었다. 따라서, 벤토나이트의 첨가

는 전반적으로 침출수 성상을 안정화시키는데 기여하는 것으로 판단된다.

본 실험을 통해서 나타난 결과로 미루어볼 때 전체적으로 벤토나이트를 첨가함에 따라 사용종료 후 폐기물 매립지 침출수의 화학적 특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한 사용종료 매립지의 처리시 굴착폐기물의 잔여토사 함유율을 고려하면 잔여토사를 재활용할 수 있는 향후 지속적인 연구가 필요하다고 본다.

<감사의 글>

본 논문을 위하여 실험에 수고를 한 안기석, 이기행, 민병주, 김영민에게 감사를 드립니다.

<참고문헌>

1. 김용진, 이동훈, “굴착폐기물의 물리·화학적 특성에 관한 사례연구”. 한국 폐기물 학회지, 제 13권 제 5호, pp 691-698 (1996)
2. 구자공, 윤석표, 최지용, “폐기물 매립 안정화 및 토지이용”, 월간폐기물 2월호, pp 77-88 (1995)
3. 장암, 최용수, 김인수, “폐광산 지역에서 발생되는 중금속의 Chemical Fixation을 위한 토양

- 의 물리·화학적 특성실험과 Bentonite의 흡착 실험”, 한국토양학회 추계 학술 발표회 논문집, pp 81-87 (1995)
4. David B. M, “Principle of Geotechnical Engineering”, 4th Edition (1998)
5. Cecile Delome, Francois Jabob, Joseph Perrier, “Impact of Liming of Waste on Landfill Activity and Leachate Characteristics : A Laboratory and Field-scale Approach”, Waste Management & Research, 16, 2, pp 160-174, 1998
6. 남궁완, 황기영, 윤범한, 윤석표, 이남훈, “폐기물 매립지 선별토양의 중금속 흡착능력”, 한국폐기물학회지, 제 13권, 제 2호, pp 273-280 (1996)
7. 이재영, “불량매립지 폐기물의 고형화를 위한 기초적 연구”, 한국토양학회지, Vol. 3, No. 1, pp 75-81 (1998)
8. Irene M.C. Lo., “Solidification/Stabilization of Phenolic Waste Using Organic-Clay Complex”. Journal of Environmental Engineering, Vol. 122, No. 9, pp 850-855 (1996)
9. William C. Anderson, P.E., Dec. “Stabilization/Solidification. Innovative Site Remediation Technology”, Vol. 4, 1.1 (1994)