

혼합반응 차수재의 오염정화특성

김학문*

The Purification Characteristics of Reactive Soil-Bentonite Landfill Liner

Hak-Moon Kim*

요 약 본 연구는 혼합차수재와 개발차수시스템의 정화특성을 연구하기 위한 것이다. 정화특성을 분석하기 위하여 혼합차수재, 혼합반응차수재 및 반응벤토매트가 적용된 시스템에 일반수와 침출수를 이용하여 높은 압력하에서 컬럼식 용출시험을 수행하였다. 실험결과 암모니아성 질소(NH₃-N) 및 중금속인 납(Pb), 구리(Cu) 등의 많은 양이 혼합반응차수시스템에 의해 효과적으로 제거됨을 알 수 있었다.

Abstract The purpose of this paper is to investigate purification characteristic of soil-bentonite landfill liner and to develop a desirable liner system. In order to clarify the purification characteristics, high pressure column tests using soil-bentonite, reactive soil-bentonite and reactive bentomat were carried out in the presence of water and leachate. The test results indicated that the significant amount of NH₃-N, Pb and Cu was removed through the reactive soil-bentonite liner system.

Key Words : zeolite, reactive bentomat, reactive soil-bentonite, column test, leachate, removal of NH₃-N, Cu, Pb

1. 서 론

최근 들어 인구증가와 도시 집중화 현상 및 국민의 생활수준 향상으로 생활 및 산업폐기물의 양이 증가하여, 이들 폐기물의 침출수에 의해 토질 및 지하수의 오염은 점차 심각해지고 있는 실정이다. 그러므로 폐기물 매립과 함께 필연적으로 발생하게 되는 침출수의 관리는 토질과 지하수 오염을 방지하는 중요한 기술중의 하나이다[1, 2]. 일반적으로 침출수를 제어하기 위한 방법으로는 매립장에 점토 차수층을 설치하여 낮은 투수성을 이용하여 일부 유독 폐기물의 이동을 지연시키는 방법을 적용하고 있다[2]. 그러므로, 유독 물질을 제거할 수 있는 차수시스템과 오염물질 제거능이 뛰어난 재질을 개발하는 것은 이동의 지연과 더불어 주변의 토질이나 지하수의 오염을 줄이기 위해 반드시 필요하다.

이와 같은 오염물질을 제어하기 위하여 최근에는 반응물질을 이용한 오염물질 제어시스템등이 연구중이며, 반응물질의 주요작용은 탈염반응으로 PCB 계통의 물질과 같이 난분해성이며 발암성인 물질을 분해가능하고

무해한 물질로 전환시킨다. 이러한 반응을 가능하게 하는 것은 철(Fe), 니켈(Ni), 구리(Cu), 알루미늄(Al), 아연(Zn) 등의 영가금속이며 1987년부터 기초연구가 시작되어 현재 철 및 제올라이트등이 많이 쓰이고 있다[1].

이중 제올라이트는 매우 경제적인 반응물질로서 양이온성물질, 유기물, 시안 등에 폭넓게 사용할 수 있다. 또한 계면활성제 등으로 표면의 전하를 조절하여 주입함으로서 선택성이 높은 것이 특징이다[2].

이에 본 연구는 매립장 하부에 보다 안전율을 향상시킬 수 있는 차수 시스템 적용에 있어서 벤토매트와 벤토매트 내에 침출수의 흡착과 이온반응이 가능한 제올라이트를 함유한 벤토매트를 혼합차수재에 적용하여 침출수에 의한 오염정화 특성을 연구하는데 목적이 있다.

2. 실험

2.1 실험개요

본 연구는 화강풍화토와 벤토나이트 혼합비에 따른 다짐시험 및 투수시험을 통해 가장 적절한 혼합비가 결정된 혼합차수재를 기본으로 하여, 혼합차수재내에 벤토매트와 제올라이트가 포함된 벤토매트 적용에 따른

*단국대학교 공학부 토목환경공학전공

표 1. 실험개요

차수재 종류	벤토나이트 혼합비(%)	Zeolite 혼합비(%)	벤토매트내 Zeolite 혼합비(%)	정화특성
				침출수
혼합차수재	15	—	—	●
벤토매트	—	—	0	●
반응벤토매트	—	—	5	●
반응벤토매트	—	—	10	●
혼합차수재+벤토매트	15	—	0	●
혼합차수재+반응벤토매트	15	—	5	●
혼합차수재+반응벤토매트	15	—	10	●

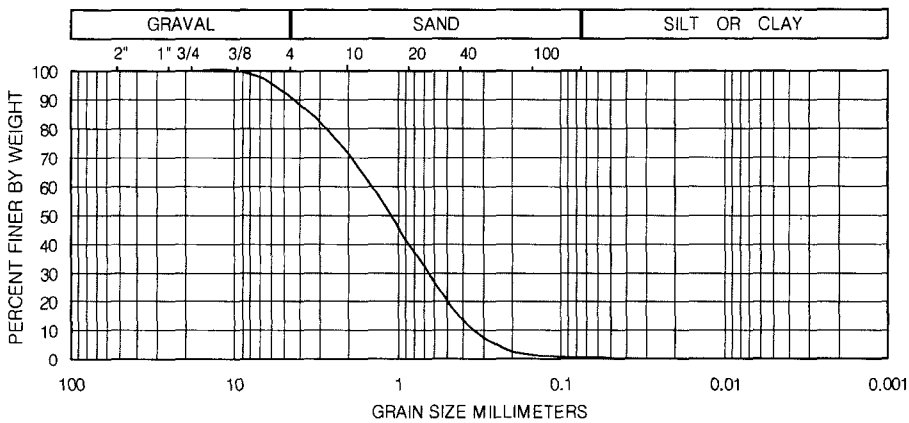


그림 1. 화강풍화토의 입도분포

침출수 오염정화 특성을 연구한 것이다. 이를 위해 다음 표 1과 같이 실험을 수행하였고 실험시 사용된 차수재는 화강풍화토에 대한 중량비를 기준으로 하였다.

2.1.1 화강풍화토의 기본물성

본 실험에 사용된 재료는 화강풍화토와 벤토나이트 및 제올라이트로 화강풍화토는 충청남도 00지구의 인근에서 채취한 화강풍화토를 사용하였다. 실내시험을 위한 화강풍화토의 시료는 24시간 노건조시킨 후 4번 체 통과시료를 사용하였다. 그림 1은 화강풍화토의 입도분포를 나타내고 표 2는 화강풍화토에 대한 기본물성치의 결과를 나타내고 있다.

2.1.2 벤토나이트, 제올라이트 및 침출수의 화학적 구성성분 및 함량

표 3과 표 4는 본 실험에서 사용된 벤토나이트와 제올라이트 및 침출수의 화학적 구성성분을 나타내고 있다.

2.2 실험방법

벤토나이트, 제올라이트의 혼합비에 따른 혼합차수재와 벤토매트 및 반응벤토매트설치에 따른 투수성 및 정

표 2. 화강풍화토의 기본물성

시험항목	시험결과	
	시험내용	화강풍화토
비중시험	비중(G_s)	2.62
현장 함수비시험	자연함수비(%)	11
액·소성 시험	액성한계(LL,%)	—
	소성한계(PL,%)	NP
	소성지수(PI)	—
입도 시험 A 다짐 시험	유효입경(D_{10} , mm)	0.085
	D_{30} (mm)	0.28
	D_{60} (mm)	0.85
	균등계수, C_u	10
	곡률계수, C_g	1.09
	통일분류	SW-SM
	#200번체 통과량(%)	8.53
	최적함수비(%)	13
	최대 건조단위중량(γ_m)	1.88

표 3. 벤토나이트와 제올라이트의 구성성분 및 함량

구성성분	함량(%)	
	벤토나이트 (미국산)	제올라이트 (국내산)
SiO ₂ (규산)	61.7	65.4
Al ₂ O ₃ (산화알루미늄)	20.1	13.2
Fe ₂ O ₃ (산화철)	4.3	13.2
MgO(산화마그네슘)	2.6	0.92
CaO(산화칼슘)	1.0	3.57
Na ₂ O(산화나트륨)	2.5	2.03
K ₂ O(산화칼륨)	0.3	1.77

표 4. 침출수 성분 (수도권 매립지)

항목	침출수 (mg/L)
pH	6.3
BOD ₅	-
COD _{cr}	-
T-P	5.80
T-N	1160
NH ₃ -N(as N)	543
Alk	3410
Pb	0.41
Cu	0.32

화특성을 규명하기 위해 용출실험을 수행하였다.

2.2.1 칼럼식 용출시험

칼럼식 용출시험(leaching column test)은 토양칼럼을 통한 오염물질의 흡착 및 확산특성 모두를 산정하기 위한 것이다. 실제적으로 현장에서 이루어지는 흙의 흡착 특성을 정밀하게 파악하기 위해서는 오염수가 토양 내를 통과하는 상황을 모사 하는 것이 필요하다.

이러한 목적을 달성하기 위하여 칼럼식 용출시험을 실시하며, 이때 보통 용출셀이라고 부르는 토양칼럼을 사용한다.

칼럼을 통과한 유출수에 나타나는 화학물질의 농도 C를 시간경과에 따라 측정한다. 측정농도와 초기농도 C₀의 비인 C/C₀과 시간경과 또는 간극체적(PV: pore volume)의 상관관계를 나타내는 유출농도곡선(breakthrough curve)을 작도한다. 여기서 간극체적은 유출수의 누적체적을 흙의 간극체적으로 나눈 것이다.

칼럼 용출시험의 시험절차를 도식적으로 나타내면 그림 2와 같다[2].

위의 그림 2의 시험절차에 근거로 하여 그림 3과 같이 혼합차수재와 차수재내에 3가지 종류의 매트릭을 적용한 시험물드를 제작하여 압력을 가한 정수위 투수시험을 적용하였으며, 침출수 투과에 따른 벤토매트의 투수 시험 및 용출시험을 실시하였다. 실험시 사용된 시료는 다짐시험 결과로부터 구한 최대건조밀도의 95% 이상, 최적함수비보다 2% 높은 습윤층의 함수비로 하여 3cm씩 2층으로 정적다짐을 실시하여 직경 10cm, 높이 6cm의 시료를 제작하여 투수시험을 실시하였다.

또한 벤토매트에 의한 차수재의 침출수 정화특성을 분석하기 위해 혼합차수재 내부에 벤토매트를 설치하여 시료를 제작하였고 벤토매트와 몰드사이의 누수현상을 막기 위하여 실리콘으로 벤토매트주위를 실링(Sealing)한후 가압에 견딜 수 있도록 위쪽과 아래쪽을 볼트로 조여서 높은 압력에도 견딜 수 있게 하였다. 시료의 포화를 위하여 우선 시료물드를 24시간 이상 일반수에 수침시켜 모세관 현상으로 시료의 물이 차도록 하였고 진공펌프를 이용하여 시료내의 기포를 제거한 후에 실험을 실시하였다.

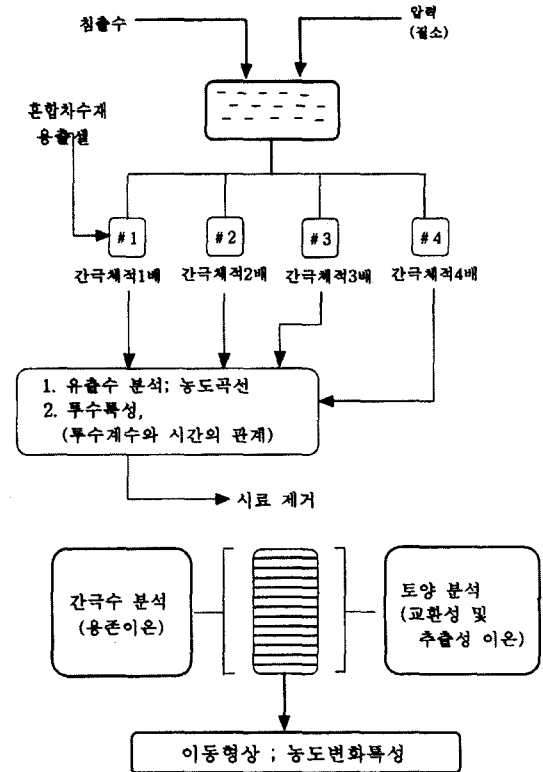


그림 2. 칼럼식 용출시험의 시험절차[2]

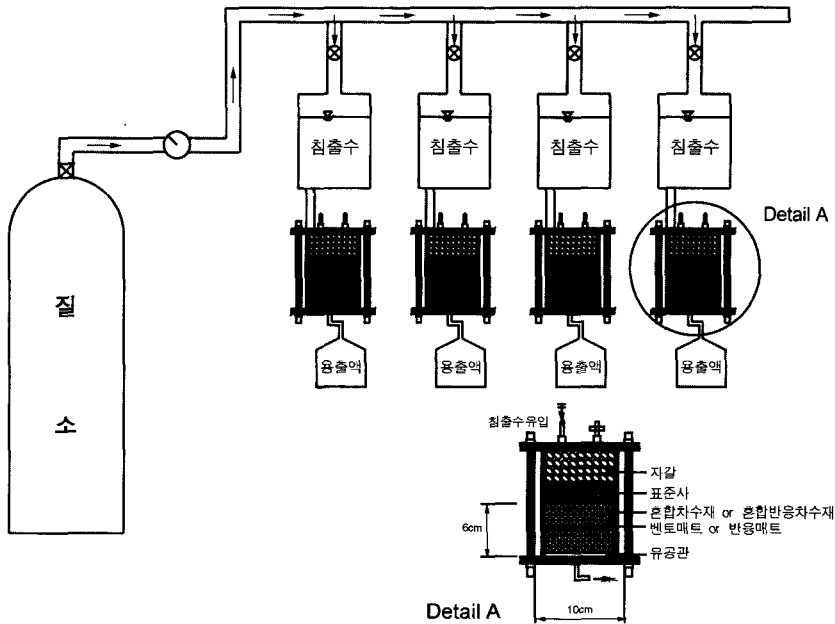


그림 3. 칼럼식 용출시험기

실험에 사용된 침출수는 잔존물질로 인한 투수계수의 저하를 최대한 방지하기 위하여 거름종이로 한번 거른 침출수를 사용하여 시험을 수행하였다. 낮은 투수계수를 갖는 세립토에서 침출수에 의한 차수제의 오염정화 특성을 분석하기 위하여 적어도 3~4간극체적(pore volume) 이상의 침출수를 사용하였다. 투수압은 고압력 질소탱크를 통해 포화시의 0.2 kg/cm²에서 최고 3.5 kg/cm²의 질소압을 가하였다. 가압기체를 공기대신 질소가스를 사용한 것은 실험중 투수용액인 침출액과 사용공기와의 반응으로 인한 침출수의 변질을 최소화하기 위한 때문이다. 특히 고압을 갑자기 가할 경우 시료 자체 및 몰드와의 경계부분에서 균열이 일어날 수 있으므로 압력을 120시간에 걸쳐 단계별로 증가하여 가하였다. 투수시험은 4연식 투수장치를 이용하여 4개의 시료에 대한 투수시험을 동시에 수행하였으며 투수시험시 동수경사는 최대 500까지로 하였다.

3. 실험결과 및 분석

기존의 혼합차수제의 정화특성을 향상시키기 위한 벤토매트적용에 따른 영향을 분석하기 위해 칼럼식 용출 시험을 수행하여 다음과 같은 항목으로 분석을 하였다.

3.1 혼합 차수제와 혼합매트차수제의 오염물질 제거

3.1.1 암모니아성 질소(NH₃-N)의 제거율

기존에 적용되는 혼합차수제와 매트 내에 제올라이트가 0%, 5%, 10% 함유된 혼합매트차수제의 암모니아성 질소의 제거율을 다음 그림 4와 같이 나타내었다.

그림 4의 결과를 보면 혼합차수제와 혼합매트차수제는 간극체적이 증가함에 따라 제거율이 증가하였고 증가율이 안정한 값을 나타내었다. 혼합차수제의 경우 간극체적이 증가함에 따라 제거율이 증가하다가 3 간극체적이 지나면서 제거율이 점차적으로 감소한다. 이것은 시료의 토립자에 오염물질인 암모니아성 질소의 흡착으로 인해 공극내에 포화상태가 된 3 간극체적에서 한계에 도달함으로써 오염물질을 정화하지 못하고 그대로

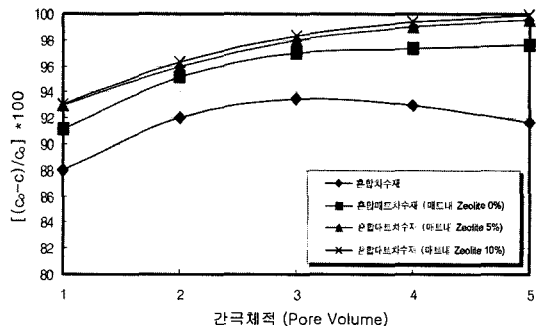


그림 4. 혼합차수제와 혼합매트차수제에 따른 암모니아성 질소의 제거율

시료를 통과하여 제거율이 감소한 것으로 판단된다. 혼합차수재 벤토매트 내 제올라이트가 0%, 5%, 10% 함유된 혼합매트차수재의 경우 제올라이트의 혼합비가 높을수록 제거율이 크게 나타났다. 혼합차수재의 경우 1 간극체적에서 침출수의 초기농도에 비해 88%정도 제거되었고 5 간극체적이 지날 때까지 최대 93%정도의 제거율을 나타내었다. 벤토매트가 삽입된 혼합매트차수재의 경우 혼합차수재에 비해 제거율이 상당히 큰 것으로 나타났으며 벤토매트 내에 제올라이트가 10%함유된 혼합매트차수재에서의 제거율이 5 간극체적에서 99%로서 가장 효과적인 것을 알 수 있었다.

3.1.2 납(Pb)의 제거율

기존에 적용되는 혼합차수재와 벤토매트 내에 제올라이트가 0%, 5%, 10% 함유된 혼합매트차수재의 납의 제거율을 그림 5와 같이 나타내었다.

그림 5의 결과를 보면 혼합차수재와 혼합매트차수재 모두 간극체적이 증가함에 따라 제거율이 증가하였고 안정한 값을 나타내었다. 혼합차수재의 경우 제거율이 지속적으로 증가하였고 초기증가에 비해 1 간극체적에서 55%정도 제거율이 증가되었고 최종적으로 5 간극체적이 지날 때까지 70%이상 제거되었다. 혼합매트차수재의 경우에는 벤토매트가 없는 혼합차수재에 비해 1 간극체적에서 20%정도의 제거효과가 나타났고, 벤토매트 내 제올라이트가 10% 함유한 혼합매트차수재의 경우 5 간극체적이 지날 때까지 90% 이상이 제거되었다. 벤토매트 내에 제올라이트의 함유율이 높을수록 제거율이 증가되는 것으로 보아 제올라이트가 오염물질인 납의 제거에 매우 효과적인 역할을 수행하였으리라 판단된다.

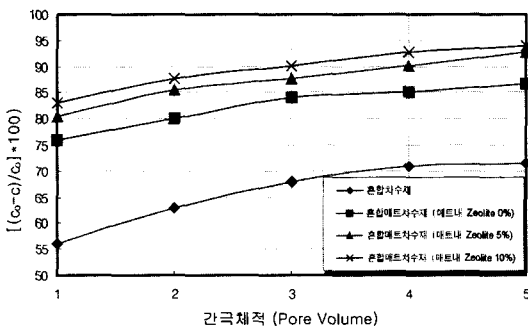


그림 5. 혼합차수재와 혼합매트차수재에 따른 납의 제거율

3.1.3 구리(Cu)의 제거율

기존에 적용되는 혼합차수재와 벤토매트 내에 제올라이트가 0%, 5%, 10% 함유된 혼합매트차수재의 구리의 제거율을 그림 6과 같이 나타내었다.

그림 6의 결과를 보면 구리의 제거율도 역시 납과 같이 혼합차수재와 혼합매트차수재 모두 간극체적이 증가

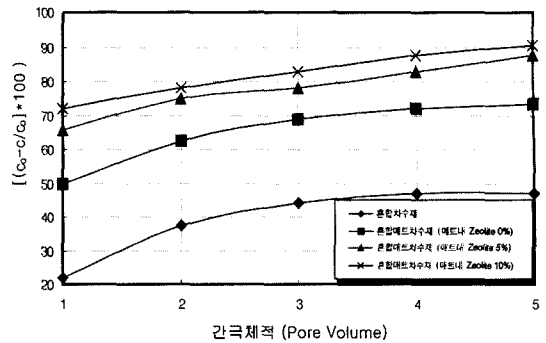


그림 6. 혼합차수재와 혼합매트차수재에 따른 구리의 제거율

함에 따라 제거율이 지속적으로 증가하였다. 혼합차수재의 경우 초기농도에 비해 1 간극체적에서 20% 이상 제거되었고 5 간극체적에 이르러서는 50%정도까지 제거율이 증가하였다. 벤토매트가 삽입된 혼합매트차수재의 경우에는 최종적으로 75%정도의 제거율을 보였으며 벤토매트를 삽입하지 않은 혼합차수재에 비해 25%의 제거효과가 있었으며 제올라이트를 10% 함유한 반응벤토매트는 최종적으로 5 간극체적에서 90%이상의 제거효과가 있었다. 이는 벤토매트 내에 함유되어 있는 제올라이트의 흡착성분이 오염물질인 구리의 농도를 감소시키는데 탁월한 효과가 있는 것으로 판단된다.

3.1.4 혼합차수재와 혼합매트차수재의 오염물질 제거 효과

침출수의 칼럼식 용출시험시 혼합차수재의 제거율을 기준으로 혼합매트차수재 내 벤토매트의 정화효과를 분석하기 위해 표 5와 같이 나타내었다.

표 5의 결과를 보면 혼합매트 차수재에 제올라이트의 혼합비가 높을수록 제거율이 증가되고 있다. 암모니아성 질소의 경우 벤토매트 내에 제올라이트가 없는 경우에 비해 제올라이트가 존재하는 경우 제거율이 효과가 컸으며 중금속인 납과 구리도 벤토매트 내에 제올라이트가 함유되지 않은 벤토매트보다 제올라이트가 10%

표 5. 혼합차수재와 혼합매트차수재의 제거효과

종류 분석항목	혼합 차수재	혼합매트차수재		
		벤토매트내 제올라이트 0%	벤토매트내 제올라이트 5%	벤토매트내 제올라이트 10%
암모니아성 질소	100%	125%	150%	154%
납	100%	148%	161%	175%
구리	100%	150%	161%	165%

함유된 반응벤토매트가 제거율이 높았다. 또한 구리에 비해 납의 제거율이 상대적으로 높음을 알 수 있었다.

4. 결 론

기존의 혼합차수재의 정화특성을 향상시키기 위하여 벤토매트 및 벤토매트 내 제올라이트를 적용한 차수시스템에 대하여 침출수의 여러 성분중에서 오염물질인 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$)와 중금속인 납(Pb), 구리(Cu)의 오염정화특성을 침출수에 대한 칼럼식 용출시험을 수행하였으며, 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 혼합차수재와 벤토매트내에 제올라이트가 적용된 차수재는 용출시험 결과, 간극체적이 증가함에 따라 침출수의 오염물질인 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$), 납(Pb), 구리(Cu)의 제거율이 증가하였고, 최종제거율은 수렴되는 경향을 나타냈으며, 혼합차수재에 비해 벤토매트내 제올라이트가 적용된 차수재의 오염물질 제거율은 25~75%정도 효과적임을 알 수 있었다.

(2) 벤토매트 내에 제올라이트가 10% 함유된 혼합매트차수재의 오염물질 제거율이 가장 지속적이고 효과적으로 나타났다. 이는 제올라이트가 함유되어 있는 벤토매트에 효과적이며 벤토매트 내에 함유되어 있는 제올라이트의 흡착성분이 오염물질을 제거하는데 탁월한 효과가 있는 것으로 판단된다.

(3) 토양의 흡착면에 있어서 흡착력이 매우 우수한 제올라이트를 소량이라도 첨가하는 것이 첨가하지 않은 경우 보다 훨씬 유리하므로 기존의 벤토나이트혼합차수재 및 벤토매트에 제올라이트 등의 흡착반응제를 첨가

하는 것을 고려할 필요성이 있다.

참고문헌

- [1] 건설교통부, “폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서, KICT/95-GE-1202”, 한국건설기술연구원, 1995.
- [2] 장연수와 1인, “지반환경공학”, 구미서관, 2000.
- [3] 정하익·장연수, “폐기물 매립장의 차폐재와 침출화학 성분과의 상호작용분석”, 한국지반공학회지, pp.49-60. 1993.
- [4] 정하익, 이용수, 심한인, 우제윤, “불량매립지 차폐방안 및 차폐재와 침출수의 반응성에 관한 연구”, 한국지반공학회 '95 봄학술발표회 논문집, pp.191-198. 1995.
- [5] Anderson, D., and Brown, K.W., “Organic Leachate Effect on the Permeability of Clay Liner”, Proc. Land Disposal of Hazardous Waste, U.S. EPA., Philadelphia, pp. 119-130, 1981.
- [6] Ruhl, J.L., Daniel, D.E., “Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123(4), 369-381, 1997.
- [7] Samuel, H., Boyle, W.C., Ham, R. K., “Chemical Treatment of Leachates from Sanitary Landfills”, Journal of WPCF, Vol. 46, No. 7. pp. 1776-1779, 1974.
- [8] Shan, H.Y., Daniel, D.E., “Results of laboratory tests on a geotextile/bentonite liner material”, Proceedings of the Geosynthetics 91, Vol. 2, pp. 517-535, 1991.
- [9] Stark, T.D., “Bentonite migration in geosynthetic clay liners”, Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics, Vol. 1, Atlanta, pp. 315-320, 1998.