

## 폐기물 매립시설 점토 차수층의 지반 · 환경공학적 특성\*

민덕기 · 황광모

토목 · 환경공학부

### <요약>

본 연구는 폐기물 매립시설 점토-bentonite 혼합 차수층에 대한 지반 · 환경공학적 특성에 관한 연구이다. 차수층의 투수계수에 영향을 미치는 요소는 bentonite의 혼합비, 다짐함수비, 투과수 등이 있으며, 실내시험에서 차수재로써 기준을 만족하는 bentonite의 혼합비를 산정한 후 이 결과를 현장에 적용하였다. 시공이 완료된 각 다짐층에서 현장밀도시험을 실시하여 다짐도를 평가하였으며, 불교란 시료(UD samples)를 채취하여 실내에서 투수시험과 표준 압밀시험(standard consolidation test)을 실시하여 투수계수를 각각 비교하였다.

지정폐기물 매립지의 침출수는 다량의 중금속을 함유하고 있으므로 환경적인 측면에서도 고려해야 할 부분이 많다. 침출수는 투수시험에 사용되는 종류수나 수돗물에 비해 비중이 크므로 실제와 비슷한  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액을 투과수로 사용하여 투수시험을 실시하고, 일반적인 투수계수와 비교하였다. 또한 차수층에 대한 중금속의 흡착능 시험을 실시하고, 여러 등온 흡착식에 대한 비교를 실시하였다.

## A Study on the Geo · Environmental Characteristics of the Clay Liners in the Waste Containment System

Min, tuk-ki, Hwang, kwang-mo

Dept. of Civil & Environment Engineering

### <Abstract>

\* 본 연구는 1998년도 본 대학학술연구비의 지원에 의해서 수행되었음을 밝히고 감사를 드린다.

This study focuses on the geo-environmental characteristics of the bentonite and clay mixtures which have been used as waste containment system clay liners. In the numerous laboratory experiments, the main factors affecting the hydraulic conductivity were bentonite-clay content, compaction water content, and permeant liquids. Permeability tests were performed on the bentonite-clay samples and the freshwater was used as the permeant liquid. Then, the laboratory results were applied to the field work. The compacted clay density by the sand cone method was used as a suitability for a field application. For permeability tests the laboratory permeability and the standard consolidation tests of UD samples were performed.

Adsorption capacity tests for heavy metals were performed and applied to various adsorption isotherm equations.

**Keywords :** hydraulic conductivity, bentonite, clay liners, adsorption, isotherm equation

## 1. 서 론

근래 국내외적으로 지반·환경에 대한 법규가 강화됨에 따라 지반·환경에 대한 인식이 날로 증가되고 있다. 그러나 국내의 경우 폐기물 매립장 관리기준의 강화에 따른 연구 및 근접관리에 관한 보고가 많지 않은 실정이다. 또한 설계와 시공분야에서 지반공학·환경공학 측면에서 확인된 사항이 많지 않다. 따라서 차수재에 대한 중요성은 날로 증가할 것이며, 아울러 이에 대한 현장 근접관리의 중요성 또한 크게 증가할 것으로 판단된다.

폐기물은 중화학 산업의 부산물이 대부분을 차지하므로 점토 차수재에 대한 지반공학적 측면과 환경공학적 측면을 연계한 연구수행이 필요하다. 지반 공학적 측면에서 점토 차수재의 투수계수 산정은 다짐 공시체에 대한 실내 투수시험, 현장에서 채취한 불교란 시료에 대한 실내시험 및 원위치 현장시험으로 나눌 수 있다. 실내시험에는 다짐시험 몰드를 이용하는 변수두 투수시험과 압밀시험(rigid wall), 삼축시험(flexible wall)이 이용되는데, 실내에서 구한 투수계수가 현장의 투수계수보다 5~10,000배나 더 작은 경우도 발생하기도 한다[1]. 환경공학적인 측면에서 실제로 투과되는 침출수는 수돗물보다 비중이나 화학적 특성에 차이가 있으므로 침출수의 화학적 특성을 묘사할 수 있는 투과수를 사용하여야 하며, 또한 점토 및 bentonite는 중금속 및 유해물질을 흡착하는 성질을 가지고 있으므로 이에 대한 연구를 동시에 수행되어야 한다.

본 연구에서는 점토 및 점토-bentonite 혼합물에 대한 투수시험을 실시하여 매립장 관리 기준치를 만족하는 bentonite/clay의 혼합비를 산정하고, 이를 현장에 적용하여 각 다짐층에서 현장밀도시험을 통한 다짐밀도를 확인하였다. 또한 현장의 각 다짐층에 대한 불교란 시료를 채취하여 실내 투수시험 및 표준 압밀시험(standard consolidation test)을 실시하여 각각의 투수계수를 비교·분석하였다. 또한 지반·환경공학적 측면에서 0.5M CaCl<sub>2</sub> 2H<sub>2</sub>O 수용액을 투과수로 사용하여 투수시험을 실시하고, 수돗물에 의한 투수계수와 비교·고찰

하였다. 환경공학적 측면에서 매립장 주변토양과 차수재로 사용되는 점토 및 점토-bentonite 혼합물에 대한 중금속 흡착능 시험을 실시하고, bentonite 혼합비 증가에 따른 흡착능을 비교·분석하였다. 이 때 점토-bentonite 혼합물의 최대 흡착량을 구하기 위하여 Freundlich형과 Langmuir형의 등온 흡착식을 이용하였으며, 혼합차수재의 흡착능 평가에 적합한 흡착식을 결정하였다.

## 2. 매립장 차수재에 관한 고찰

### 2.1 폐기물 매립장 차수시스템

매립장 차수시스템은 독자적인 재료에 의존하지 않고 복합적인 차수층으로 이루어져 있다. 차수시스템 중 geomembrane과 다짐 점토층으로 크게 구분할 수 있으며, geomembrane은 유해폐기물의 성분을 대부분 차폐하는 목적으로 설치된다. 또한 점토차수층은 geomembrane층을 통과한 침출수가 주변지반으로 이동하는 것을 지연하는 목적으로 설치된다.

선진외국의 경우 차수시스템의 설치, 관리에 관하여 엄격하게 규정하고 있으며, 최근에는 지반조건, 폐기물의 종류에 따라 다양한 차수시스템을 채택하고 있다. 국내의 경우, 최근에 관련 규정이 강화되고 차수재 적용에 관한 연구가 이루어지고 있지만 차수재 재질선정, 품질관리 및 시험기준 등에 관한 연구가 미흡한 상태이다. 또한 지역 및 현장여건에 적합한 차수재를 사용하는 것이 아니라 주로 geomembrane이 사용되고 있으며, 일부 점토차수재와 혼합차수재 등이 사용되고 있는 실정이다[2].

### 2.2 실내투수시험의 오차원인과 토수계수에 미치는 영향

매립지 현장에서 점토차수층의 토수계수를  $k = 1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하로 시공하는 것은 매우 어려우며, 시공에서 엄격한 관리가 필요하다. 현장에서 시공된 점토 차수층의 토수계수는 흙의 종류, 흙의 입도분포, 점토( $2 \mu\text{m}$  이하)의 함량, #200체(0.074mm) 통과 점토의 함량, 점토의 소성 등의 재료특성과 함수비, 다짐두께, 다짐 에너지, 다짐 장비, 다짐층 사이의 경계면 처리, 차수층 내 뎅어리 흙의 존재여부 등의 현장 시공방법과 시공 중 혹은 시공 후 건조 수축 및 동상/융해 등의 현장 조건에 영향을 받는다. 또한 침출수의 종류 및 농도 등의 많은 화학적 인자에 영향을 받는다[3][4].

### 2.3 다짐시료에 대한 토수계수

Terzaghi & Peck의 연구에 따르면 자연상태 점토의 토수계수는  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하라고 한다. 그러나 실제 국내의 차수재로써의 육성점토는 토수계수가  $1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$  cm/sec 정도이므로 매립장 차수재의 기준을 만족하는 자연시료가 많지 않다. 따라서 자연상태의 점토 또는 화강토와 bentonite를 혼합하여 다짐으로써 차수재로 이용하는 것이 일반적이다.

표 2.1 다짐 시료에 대한 투수계수

흙의 분류	투수계수	흙의 분류	투수계수
GM	$>5 \times 10^{-1}$	ML	$>5 \times 10^{-6}$
GC	$>5 \times 10^{-3}$	ML-CL	$>2 \times 10^{-7}$
SM	$>2 \times 10^{-5}$	CL	$>5 \times 10^{-7}$
SM-SC	$>1 \times 10^{-6}$	MH	$>2 \times 10^{-7}$
SC	$>2 \times 10^{-7}$	CH	$>5 \times 10^{-8}$

Source : U.S. Department of the Navy, 1982, ASTM D 1557

## 2.4 화학용액에 대한 투수성

현장에서 실제 투과되는 침출수는 종류수나 수돗물보다 비중이 크며, 화학적 반응을 하므로 투과성은 극단적인 경우 100배의 크기를 갖는 것으로 보고되고 있다(Daniel et al, 1993). 따라서 가능하면 현장 침출수와 같은 화학적 특성을 지닌 투과수(chemical solution)를 사용함이 바람직하다. 연구보고에 따르면 chemical solution의 투과를 침출수 모의시험으로써 사용하여 동일한 다짐특성과 혼합물에 투과한 경우의 투수계수가 상당히 큰 차이를 나타났음을 밝혔다[5]. Gipson은 다짐 soil-bentonite(7.5, 10, 15%) 혼합물에 금속을 포함한 pH=2.2의 산성 침출수로 투수시험을 실시한 결과와 물을 침투시킨 초기 투수계수와 비교한 결과 각각 7, 13, 44배 증가한다고 보고하였다[6]. 또한 Alter[7]와 Shackelford[8]의 보고에 따르면 8%의 bentonite를 함유한 soil-bentonite 혼합물에 대한 2% CaCl<sub>2</sub> solution에 대한 투수계수는 일반적인 경우에 비해 700배, Na-bentonite를 16% 함유한 다짐 점토-bentonite 혼합물의 칼슘수용액에 대한 투수계수는 물에 의한 투수계수보다 676 크게 나타났다. Stern & Shackelford는 그의 연구에서 permeant liquids를 PTW(a processed tap water), 0.05M, 0.1M, 0.5M CaCl<sub>2</sub> 수용액을 사용하여 attapulgite clay-bentonite-sand 혼합물에 대한 투수시험을 실시하였다. 그 결과 attapulgite clay의 량이 증가함에 따라 투수계수가 작아졌으며, bentonite의 량이 증가함에 따라 투수계수의 감소 폭이 보다 큰 폭으로 감소하였다. Attapulgite clay(10%)-bentonite(10%)-sand 혼합물에 대한 투수시험에서 0.05M CaCl<sub>2</sub> 수용액에 대한 투수계수와 0.5M CaCl<sub>2</sub> 수용액에 대한 투수계수가 약 150배 가량 차이가 있음을 보고하였다[5].

화학용액에 대한 점토차수재의 투수특성 변화에 따른 연구보고에 따르면 순수한 acetic acid를 투과한 경우 자연점토의 투수성이 10배 증가하였으며(Simons et al, 1984), 미국 죠지아 점토는 2배 정도 투수성이 증가하였다(Bowders, 1985). 순수한 metanol에 대한 투수시험의 결과 자연점토의 투수성은 7.5~44배 증가하였다[9][10].

## 3. 재료특성

본 연구에 사용된 시료는 울산광역시 울주군 두서면 일대에 분포하고 있는 육성점토로 폐기물 매립장 차수재의 주재료로 사용하기 위하여 입도분포, 비중, 아티버그 한계시험을

실시하였으며, 혼합재인 bentonite에 대해서 #200체 통과율 및 팽윤도시험을 실시하였다.

### 3.1 점토의 특성

매립장 차수총의 재료인 점토와 bentonite에 대한 물성은 흙의 비중( $G_s$ )이 2.67~2.7의 범위에 있고, 액성한계(liquid limit,  $\omega_L$ )는 50% 이상, 소성지수(plastic index,  $I_P$ )는 20% 이상이다. 입도분포시험과 아터버그 한계(Atterberg Limits) 시험의 결과로 볼 때 시료는 점토광물 중 kaolinite를 많이 함유하고 있으며, 점토의 consistency index( $I_c$ )가 1에 가까운 매우 안정적인 점토로 나타났다. 흙의 분류에서 입자의 크기가  $2\mu$  이하인 경우가 25~55%의 범위에 있어 ASTM의 분류에서는 세립토, KSF 2301 분류에서 실트 크기의 입자를 포함한 점토질 흙이다.

### 3.2 bentonite

시험에 사용된 bentonite는 자연퇴적상태로 존재하는 Ca-bentonite를 Na-bentonite로 치환(cation exchange)시킨 것으로 치환과정은 아래와 같다.



본 연구에 사용된 bentonite는 montmorillonite를 70%이상 포함하고 있으며, #200체 통과율이 95%이상, #230체 잔량분이 25%이하인 미립자 재료이다. 특히 팽윤도가 20ml/g로 팽윤성이 높고, 이온교환량이 커서 중금속 및 기타 지반오염물질을 흡착하는 성질을 가지고 있다.

사용된 bentonite 제품은 pH가 10.0~11.0의 범위에 있었으며, 자연상태에서 함수비가 최대 6~11%까지 포함하고 있어 시험 전에 함수비가 0%가 될 때까지 건조하여 사용하였다.

## 4. 차수총의 투수특성

### 4.1 실내투수시험

본 연구에서 실내투수시험은 KSF 2322를 기준으로 시험을 실시하였으며, 투수계수를 온도 15°C에 대한 투수계수로 보정하였다.

점토에 대한 실내투수시험의 결과  $2.0 \times 10^{-5}$  cm/sec 이상으로 폐기물 매립지 차수총 기준을 만족하는 투수계수를 얻을 수 없었다. 따라서 투수계수를 낮추기 위하여 점토와 bentonite를 중량 배합하여 투수시험을 실시하였다. 다짐 및 투수시험의 결과는 표 5.1에 나타내었다. 시험결과 bentonite 첨가량이 증가할수록 최적 함수비는 증가하고, 최대 건조 단위중량은 커짐을 알 수 있었다. 또한 실내시험의 결과 bentonite 함유량이 증가할수록 투

수계수는 감소하며, bentonite의 함량이 12.5% 일 때 매립지 차수층의 투수계수의 관리기준인  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하가 되었다.

표 4.1 Bentonite 함량의 증가에 따른 투수계수

구 분 B/C 혼합비	최적 합수비, $\omega$ (%)	최대 건조단위중량, $\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	투 수 계 수, $k$ (cm/sec)
Bentonite/Clay			
5/95	25.00	1.56	$9.00 \times 10^{-7}$
10/90	25.34	1.50	$1.61 \times 10^{-7}$
15/85	26.10	1.51	$6.80 \times 10^{-8}$

## 4.2 현장 공시체에 대한 투수성

현장에서 채취한 시료에 대하여 변수두 투수시험과 표준 암밀시험으로 투수계수를 산정할 때 채취한 시료가 세립토일 경우 좋은 결과를 얻을 수 있으므로 본 시료는 이를 만족한다. 따라서 현장에서 시료를 채취하여 변수두 투수시험과 표준 암밀시험을 실시하고, 각각의 투수계수를 비교·확인하였다. 그림 4.1에 나타낸 것과 같이 현장시료에 대한 변수두 투수시험의 경우 투수계수가  $1.61 \times 10^{-7} \sim 7.08 \times 10^{-8}$ 으로 대부분의 시료에서 차수층의 기준을 만족하였다.

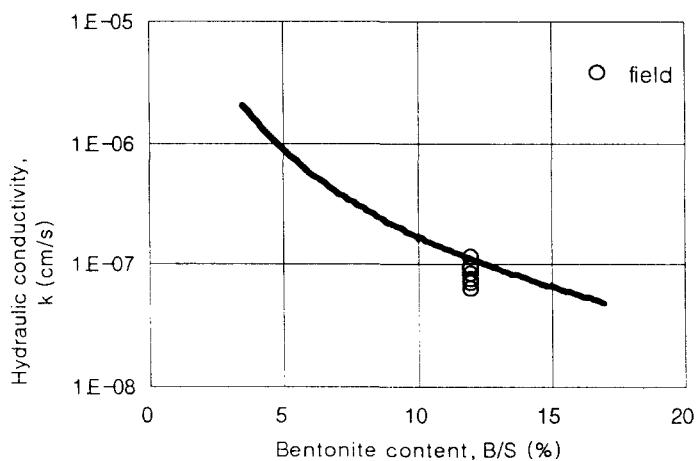


그림 4.1 bentonite 첨가에 따른 투수계수와 현장시료 투수계수

#### 4.2.1 압밀시험에 의한 투수성

일반적으로 압밀시험은 연약지반의 침하특성을 해석하기 위한 방법의 하나이다. 아무리 잘 다져진 점토라 하더라도 흙은 압축성을 가지며, 또한 흙은 하중을 받으면 체적이 감소 한다. 공학적으로 흙 입자와 물은 비압축성이므로 이러한 체적변화는 흙 입자 사이의 공기가 압축되거나 또는 간극 속에서 물이 빠져나가기 때문이다. 점토는 모래에 비하여 간극이 크고 압축성이 크다. 또한 투수계수가 작아서 압축에 소요되는 시간은 상대적으로 길다.

압밀기본 미분방적식  $C_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t}$  은 시공하는 순간 구조물 전체의 하중이 작용한다는 가정에서 유도되었다. 그러므로 매립장의 경우 하중이 점차적으로 작용할 때의 하중에 대하여 계산한 침하량과 투수계수를 사용하여야 한다. 그럼 4.2는 표준 압밀시험의 각 하중단계와 투수계수와의 관계를 나타낸 것이다.

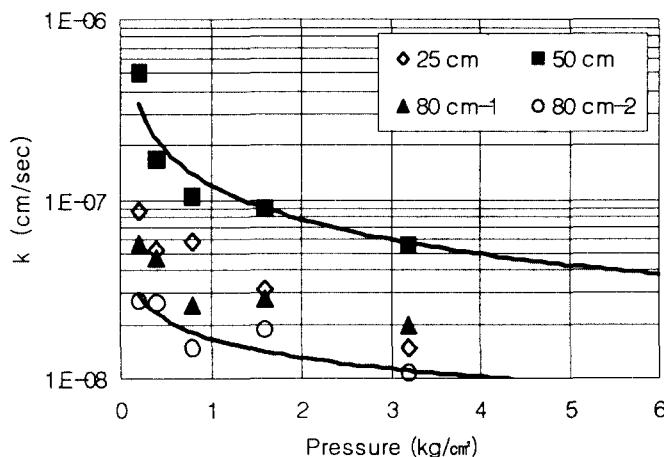


그림 4.2 표준 압밀시험에 의한 하중-투수계수의 관계

#### 4.2.2 표준 압밀시험 결과

차수총을 시공할 때 가장 중요한 부분은 토취장에서 옮겨진 점토를 고르게 분쇄하고, bentonite를 고르게 혼합하는데 있다. 현장에서 사용되는 막서의 경우 매 순간마다 함수비와 bentonite 분말의 배합량을 결정하기가 쉽지 않은 실정이다. 이는 현장에서 채취한 시료에 대한 투수시험 및 표준 압밀시험의 결과에서 잘 나타난다. 투수시험의 결과 각 층에서 투수계수 값이 약 4배까지 차이를 보이고, 표준 압밀시험에서는 6배까지 차이를 나타내었다. 또한 bentonite의 함량이 증가할수록, 다짐 함수비가 증가할수록 강도가 작아짐을 알 수 있었다. 따라서 연약지반에서 차수총을 시공할 경우 지반강도를 증가시킬 수 있는 최적의 bentonite 혼합 및 적절한 개량이 필요하다.

표준 압밀시험의 결과 간극비-하중(log scale) 곡선은 정규 압밀 점토의 거동을 보였으며, 압축지수( $C_c$ ) 값이 거의 일정하였다. 표준 압밀시험에 대한 간극비-하중(log scale) 곡선은 그림 4.3과 같다.

변수두 투수시험에 의한 투수계수와 표준 압밀시험에 의한 투수계수는 5~10배 차이를 보였는데, 이는 표준 압밀시험에서 구한 값이 투수계수 이외의 다른 항목들을 많이 포함하기 때문인 것으로 판단된다. 본 시험의 결과에서 현장시료에 대한 투수시험의 결과가 표준 압밀시험으로부터 계산한 투수계수에 비하여 실내투수시험의 투수계수에 잘 일치하는 것으로 나타났다.

본 시험의 결과에서 그림 4.4에 나타나 있듯이 간극비-투수계수 관계는 모든 시료에 대하여 선형관계가 있는 것으로 나타났으며, 간극비가 증가할수록 투수계수는 커짐을 알 수 있다. 이는 다짐점토 및 점토-bentonite 혼합물에서도 간극비의 변화가 투수계수에 큰 영향을 주는 것을 의미한다[11][12][13].

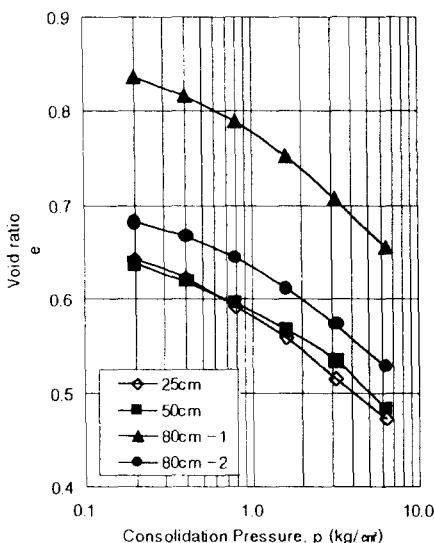


그림 4.3 압밀시험에 의한  
간극비-하중(e-log p)곡선

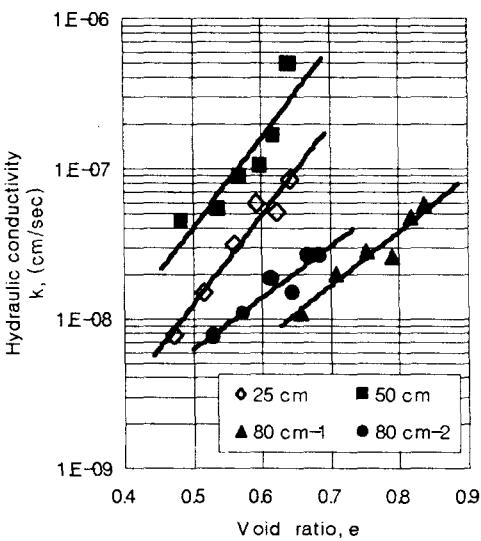


그림 4.4 간극비 변화에 따른 투수계수

### 4.3 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 수용액에 대한 투수성

본 연구에서는 0.5M  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액을 투과수로 하여 투수시험을 실시하였으며, 일반적인 투수계수와 비교하였다.  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액을 투과수로의 조제방법은 아래와 같다.

0.5 mol/l  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액 조제법 ;  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  7.35g + 증류수  $\rightarrow$  100ml 수용액

본 연구에서 실내 투수시험에 사용된 다짐시료는 bentonite를 15% 함유한 점토-bentonite 혼합물로 최적 함수비는  $\omega=26\sim28\%$  범위에 있으며, 실내 투수시험은 증류수를 투과수로 사용하거나 수돗물을 투과수로 사용하는 것이 일반적이므로 수돗물에 의한 투수시험 결과와  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액을 투과수로 사용할 경우 투수계수의 변화를 비교하였다. 그림 4.5는 수돗물과  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액에 대한 투수시험의 일반적인 결과와 그 경향을 나타내었다

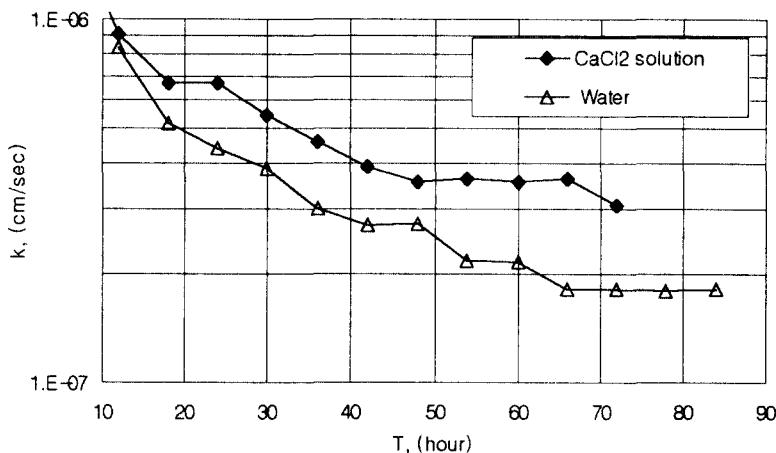
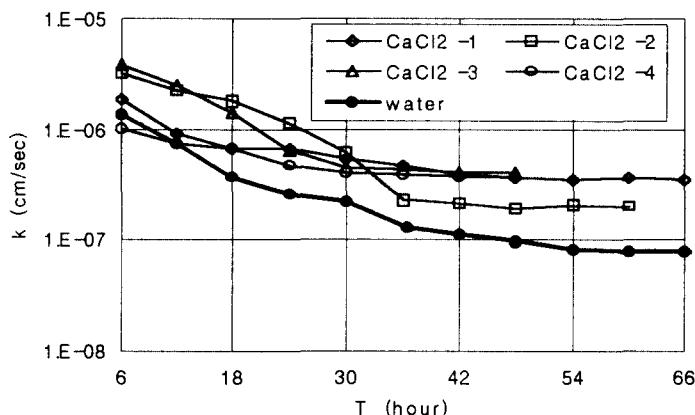
그림 4.5  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액에 대한 투수계수의 변화

그림 4.5에서와 같이 수돗물과  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액을 투과수로 사용하여 투수시험을 실시하였다. 각각의 시간에 따른 투수계수의 변화를 비교한 결과 초기에는 투수계수의 값이 수돗물에 의한 투수계수와  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액에 의한 투수계수가 비슷하였다. 그러나 시간이 경과함에 따라 투수계수의 값은  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액을 투과수로 사용한 경우는 수돗물을 투과수로 사용한 경우에 비하여 투수계수 값이 커짐을 알 수 있었으며, 투수계수의 수령시간 또한 수돗물을 투과한 경우 보다 짧게 나타났다.  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액의 경우 투수계수 값이 수령된 후 시험을 계속 실시한 경우에서 수령 후에 투수계수가 급격하게 감소하는 경향이 있었다. 이는 장기간 시험이 진행됨에 따라 투과수의 침전 및 흡착으로 인하여 흙 속의 간극을 막아 투수성이 감소하는 것으로 판단된다.

그림 4.6  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  수용액에 의한 투수계수의 변화

그럼 4.6에 나타난바와 같이 시험은 연속적으로 이루어졌으며,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액에 대한 초기 투수계수는 물을 투과수로 사용한 경우의 투수계수 값과 비슷하게 나타났고, 시간이 경과함에 따라  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액에 대한 투수계수의 값은 물을 투과시킬 경우 보다 커진 후 평형상태를 유지함을 알 수 있다. 그럼 4.6에서와 같이 투수계수 값을 결정하기 위한 수렴시간은 수돗물에 의한 투수시험의 경우에 비하여  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액을 투과수로 사용한 경우가 대부분 짧은 시간에 평형을 나타내었다.

투과수로 사용된  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액은 수돗물보다 비중이 크므로 투수계수가 증가하는데,  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액에 의한 투수시험의 결과 투수계수가  $4.18 \times 10^{-7} \sim 2.11 \times 10^{-7}$  cm/sec로 수돗물에 의한 투수계수( $1 \times 10^{-7} \sim 6 \times 10^{-7}$  cm/se)보다 약 2~7배 크게 나타남을 알 수 있었다.

## 5. 흡착

### 5.1 흡착능

흡착능에 영향을 미치는 것으로는 비표면적, 공극의 크기와 분포 등 흡착제의 물리·화학적 특성이 중요하며, 피흡착제의 분자량, 극성, 화학적 조성 그리고 용액의 pH, 온도, 농도 등이 있다. 일정한 온도에서 흡착량과 평형농도 사이의 관계를 식으로 표현하는 등온 흡착식(adsorption isotherm equation)은 Freundlich형과 Langmuir형 등이 있다.

Freundlich형의 등온식: 수처리 활성탄의 흡착능시험에 주로 사용되는 경험식

$$q = kC^{1/n} \quad (식 5.1)$$

여기서,  $q$  : 흡착량(mg/g)  
 $C$  : 평형농도  
 $k$  : 흡착제의 흡착능  
 $1/n$  : 흡착강도

Langmuir형의 등온식 : 단분자 흡착층에서 흡착분자의 용축과 증발사이의 평형에 기초한 식

$$q = \frac{abC}{1+bC} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} C \quad (식 5.2)$$

여기서,  $a$  : 최대 흡착량에 대한 상수  
 $b$  : 흡착에너지 상수

## 5.2 점토, 점토-bentonite 혼합물에 대한 흡착능

그림 5.1은 산지 및 구릉에 분포하고 있는 풍화토와 차수재로 쓰인 점토 및 점토-bentonite에 대하여 200rpm, 진폭 4~5cm로 7시간 교반하고, 원심분리기에서 원심분리한 후 ICP로 평형농도를 측정한 것이다. 이 흡착시험의 결과에서 매립장 주변에 쉽게 볼 수 있는 풍화토는 차수재로 쓰이는 점토와 점토-bentonite 혼합물에 비하여 중금속을 흡착하는 능력이 떨어지므로 차수재 보다는 복토재로 사용하는 것이 옳을 것이다. 본 연구에 사용된 점토 및 점토-bentonite 혼합물은 풍화토에 비하여 흡착능이 우수함을 알 수 있었다. 그림 5.1에서와 같이 Cu, Pb의 초기농도(Co)가 100ppm일 때 점토-bentonite 혼합물의 평형농도(Ce)는 풍화토의 평형농도에 비하여 Cu의 경우 22%, Pb은 34%까지 작게 나타났다. 그림 5.2는 점토와 점토-bentonite 혼합물에 대하여 Cu 및 Pb에 대한 흡착능을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 Pb의 경우 평형농도의 차이를 발견할 수 없었지만, Cu의 경우에는 bentonite를 첨가한 경우 그 흡착능이 커짐을 알 수 있다.

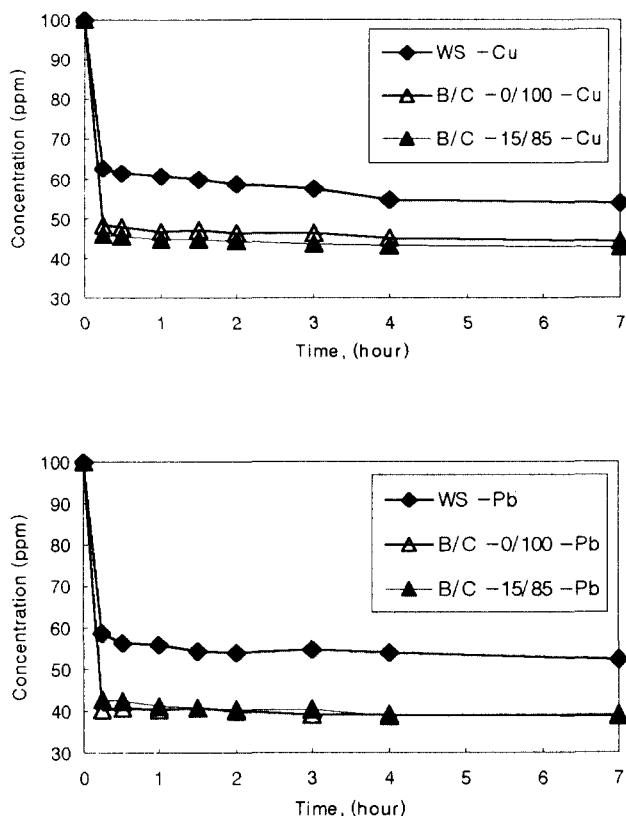


그림 5.1 Cu, Pb에 대한 풍화토, 점토, 점토-bentonite의 흡착

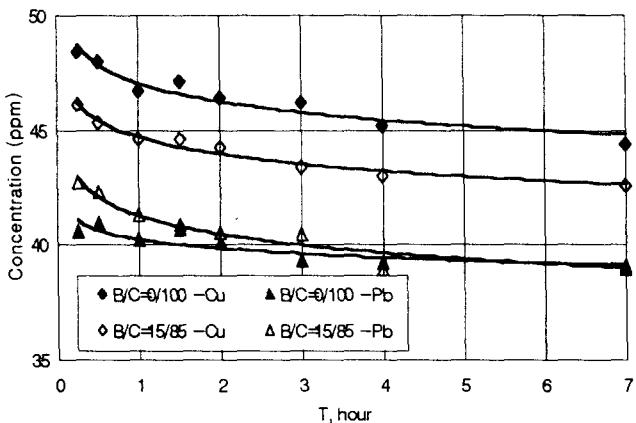


그림 5.2 흡착속도를 구하기 위한 흡착시험

### 5.3 흡착능 시험 결과

흡착능 시험에 사용된 시료는 #100체(0.149mm)를 통과한 점토 및 점토-bentonite 혼합물 1g을 사용하였으며, 시험액은 초기농도 5, 10, 20, 50ppm, pH = 7인 중금속 시험액 100ml를 사용하였다. 또한 그림 5.2의 결과에 따라 교반시간(흡착속도)을 7시간 이상으로 하였다.

흡착능 시험의 결과 그림 5.3에서와 같이 bentonite의 첨가량이 증가할수록 Cu의 경우 Clay 1과 Clay 3에서 각각 흡착량이 점차 증가함을 알 수 있었다. 그러나 Pb의 경우 Clay 3에서는 bentonite의 첨가량이 증가할수록 흡착량이 증가하는 경향을 보였지만, Clay 1에서는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았다. 이는 더 많은 시험과 분석을 행함으로서 경향을 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

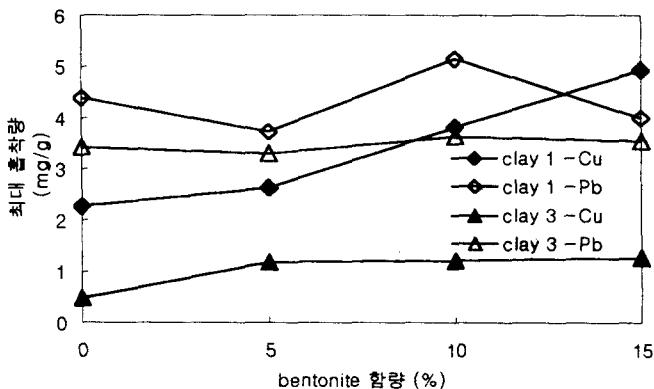


그림 5.3 bentonite 첨가에 따른 최대흡착량

표 5.1 Adsorption capacity - Freundlich형 등온식으로 구한 상수 및 상관계수

금속	Bentonite + Clay	Freundlich형 등온흡착식		
		k	1/n	상관계수 $R^2$
Clay 1	Cu	0/100	0.712	0.439
		5/95	0.590	0.501
		10/90	1.008	0.800
		15/85	1.109	0.805
	Pb	0/100	4.436	0.608
		5/95	2.052	0.298
		10/90	2.364	0.575
		15/85	1.643	0.568
Clay 3	Cu	0/100	0.027	1.131
		5/95	0.078	1.046
		10/90	0.282	0.580
		15/85	0.302	0.597
	Pb	0/100	0.595	0.680
		5/95	0.462	0.756
		10/90	1.288	0.468
		15/85	0.993	0.498

표 5.1은 점토 및 점토-bentonite에 대한 Cu와 Pb의 흡착시험 결과로 Freundlich형의 등온 흡착식을 사용하여 최대 흡착량을 결정한 것이다. 시험의 결과에서 점토 1을 피흡착재로 사용한 경우 Cu에 대한 상관계수는 0.87~0.97로 높게 나타났으며, Pb에서는 0.52~0.98로 비교적 높게 나타났다. 점토 3을 피흡착재로 사용한 경우 Cu 및 Pb에 대한 상관계수는 0.72~0.93, 0.97~0.99로 나타났다. 따라서 Freundlich형의 등온흡착식이 점토 및 점토-bentonite 혼합 차수재의 흡착능을 평가하는데 적용성이 높다고 하겠다.

## 6. 결 론

폐기물 매립시설 차수층 재료로 사용되는 점토에 bentonite를 첨가재로 사용하여 bentonite의 첨가에 따른 점토-bentonite 혼합물의 다짐특성 및 투수계수의 변화를 분석하

고, bentonite의 첨가에 따른 중금속에 대한 흡착능을 비교·분석하였다. 그리고 현장에서 채취한 불교란 시료에 대한 실내투수시험 결과와  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액을 투과수로 사용한 투수시험의 결과를 비교하여 지반공학 및 환경공학의 측면에서 그 적용성에 대한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내다짐 시험에서 점토-bentonite 혼합물의 최적 함수비 및 최대건조밀도는 bentonite의 함량이 증가함에 따라 최적 함수비는 커지고, 최대건조밀도는 비슷하거나 감소하였다. 따라서 다짐 재료로 사용되는 혼합물은 강도가 목적일 때는 최적 함수비의 건조축 다짐을 실시하고, 차수가 목적일 경우에는 최적 함수비의 습윤축으로 다짐을 적용하여야 할 것이다.
- (2) 폐기물 매립장 차수재로써 투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$  이하를 만족하는 bentonite 혼합비 산정을 위하여 bentonite의 혼합 비율을 증가시키면서 투수시험을 실시하였다. 그 결과 bentonite의 혼합비가 증가할수록 투수계수가 감소함을 알 수 있었으며, bentonite의 혼합비가 증가할수록 중금속에 대한 흡착능은 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 실제 매립장의 침출수는 각종 유기화합물 및 중금속을 함유한 오염물질이므로 화학적 특성을 지닌  $0.5M CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액에 대한 투수시험을 실시하였으며, 그 결과 투수계수는 수돗물에 의한 투수계수 값보다 2~7배 크게 나타났다. 이는  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  수용액이 수돗물보다 비중이 크기 때문이며, 차수재 혼합물과 투과수의 화학적 특성에 기인한 것으로 판단된다.
- (4) 흡착능에 영향을 미치는 것으로는 물리·화학적 특성으로 나눌 수 있으며, 평형농도와 흡착량 사이의 상관관계를 표현하는 등온 흡착식은 Freundlich형과 Langmuir형 등이 있다. 본 연구는 pH를 7로 고정한 상태에서 점토 및 점토-bentonite 혼합물에 대한 흡착능 시험을 실시하고, Freundlich형과 Langmuir형의 등온식으로 Cu와 Pb에 대한 흡착능을 비교하였다. 그 결과 Freundlich형이 bentonite의 증가에 따른 흡착량의 증가 경향을 잘 나타낼 수 있었다. 향후 흡착능 시험을 실시한 후 최대 흡착량을 보다 정확하게 구하기 위하여 Freundlich형 등온식을 사용함이 바람직할 것이다.

## 참고문헌

1. Danel, D. E.(1984), "Predicting Hydraulic Conductivity of Compacted Clay Liners", Journal of Geotechnical engineering, Vol. 110, No. 2, pp.285~300.
2. 건설교통부(1995), "폐기물 매립지 차수재 개발" 한국건설기술연구원.
3. Hari D. Sharma., and Sangeeta P. Lewis.(1994), "Waste Containment System, Waste Stabilization, and Landfills : Design and Evaluation", John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.158~218.
4. Olson, R. E. and Daniel, D. E.(1981), "Measurement of Hydraulic Conductivity of Fine-Grained Soils", Permeability and Groundwater Contaminant Transport, ASTM STP 746. ASTM, Philadelphia, pp.18~64.
5. Roslyn, T. Stern and C. D. Shackelford,(1998), "Permeation of Sand-Processed Clay Mixtures with Calcium Chloride Solutions", Journal of Geotechnical & Geoenviromental Eng March, pp.231~240.
6. Gipson, A. H. Jr.(1985), "Permeability Testing on Clayey Soil and Silty Sand-Bentonite Mixture using acid liquor," Hydraulic barriers in soil and rock, ASTM STP 874, A. I. Johnson et al., eds. ASTM, West Conshohocken, pp. 140~154.
7. Alther, G. R.(1987), "The Qualifications of Bentonite as a Soil Sealant," Engrg. Geol., 23(2/3). pp. 177~191.
8. Shackelford, C. D.(1994), "Waste-Soil Interactions that alter Hydraulic Conductivity," Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil, ASTM STP 1142, D. E. Daniel and S. J. Trautwein, eds. ASTM, West Conshohocken, pp. 111~168.
9. Bowders, J. J., and Daniel, D. E.(1987), "Hydraulic Conductivity of Compacted Clay to Dilute Organic Chemicals," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 113(12), pp. 1432~1448.
10. Bowders, J. J., Daniel, D. E., Broderick, G. P., and Liljestrand, H. M.(1986), "Methods for Testing the Compatibility of Clay Liners with Landfill Leachate," Hazardous and Industrial Solid Waste Testing : 4th Simposium, ASTM STP 886, J. K. Petros, et al., eds. ASTM, West Conshohocken, pp. 233~250.
11. Hvorslev, M. J.(1960), "Physical Components of the Shear Strength of Saturated Clays," Proceedings, Research Conference on Shear Strength of Soils, Boulder, Co, ASCE, New York, pp. 169~273.
12. Balasubramaniam, A. S. and Chowdary, A. R.(1978), "Determination and Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 104, No. 9, pp. 1153~1167.
13. Olson, R. E.(1985), "State of the Art : Consolidation Testing," Consolidation of Soils : Testing and Evaluation, ASTM STP 892, pp.7~70.