

# 모래-벤토나이트 혼합물의 투수특성에 관한 연구

## Hydraulic Conductivity of Sand-Bentonite Mixtures

문 석 기\*, 권 무 남\*, 김 현 기\*  
Moon, Seog-ki, Kwon, Moo-nam, Kim, Hyun-ki

### Abstract

This study was performed to evaluate the hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures according to 8 kinds of the bentonite content using the reassembled air-entry permeameter.

Results obtained are as follows:

1. The maximum dry density and optimum moisture content of the sand-bentonite mixtures increased about from 1.60 to 1.67  $\text{gf/cm}^3$ , and from 16.00 to 19.50%, respectively when the bentonite content increased from 4 to 18%.
2. The hydraulic conductivity of the sand-bentonite mixtures decreased approximately from  $1.01 \times 10^{-7}$  to  $7.50 \times 10^{-11}$  when the bentonite content increased from 4 to 18%.
3. The minimum bentonite content of about 6 percent is required to yield a hydraulic conductivity of  $1.00 \times 10^{-8}$  cm/s or less.
4. It was taken about 2~3 days to reach the final hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures.
5. The head difference is not influenced on the variation of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures.
6. The bentonite content of sand-bentonite mixtures can be recommended more than 6 percent in order to use as the bottom liner material of waste landfill.

### 1. 서론

벤토나이트는 점토와 비슷한 화학성분을 갖고 있는 천연 점토 광물로서 물에 침윤되

면 그 체적이 건조중량의 약 15배까지 팽창하는 성질이 있어 흙과 혼합하면 벤토나이트 입자가 팽창작용에 의해 흙의 간극을 채워주므로 최근 선진국에서는 흙과 혼합한 흙-벤

\* 경북대학교 농과대학

키워드 : 투수계수, 모래-벤토나이트 혼합물, 다짐, air-entry permeameter, 라이너, landfill

토나이트 혼합물을 폐기물 매립장의 침출수를 차단 또는 감소시키기 위하여 바닥 차수재나 측벽, 덮개 재료로 또는 담수호, 오수 및 유류나 화학물질의 저장시설 및 각종 토목공사에서 침투수를 차단하거나 조절하기 위하여 많이 사용하고 있다.

특히 폐기물 처리에 따른 지하수의 오염을 방지하기 위하여 폐기물 매립지에서 흙(점토 또는 모래)과 혼합한 차수재로 사용될 때 폐기물에서 발생한 침출수를 차단하거나 침투속도를 느리게 하거나 투수성을 감소시켜 주는 역할을 하여 지하수 및 지반 환경오염 방지에 유용하게 사용될 수 있으며, 흙-벤토나이트 혼합물의 경제성도 입증되고 있어 앞으로 많이 사용될 전망이다.

많은 실험 결과로부터 흙-벤토나이트 혼합물의 투수계수 예측은 흙의 입도분포, 다짐정도, 벤토나이트 함량, 세립토의 함량, 간극을 및 포화도 등의 변수에 따라서 달라지는 것으로 알려져 있다.<sup>7)</sup>

그리고 벤토나이트가 완전히 수화되는데 시간이 걸리기 때문에 여러 가지 투수방법은 투수계수를 결정하는데 장기간이 소요된다. 따라서 흙-벤토나이트 차수재를 설계하거나 시공하기 위해서는 먼저 흙과 벤토나이트를 선정하고, 적합한 불투수성의 정도를 결정하는

적당한 벤토나이트 함량을 찾기 위하여 이에 대한 투수성 시험을 수행하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

이에 본 연구에서는 지반의 투수계수를 측정 평가하는 방법 중 현장 투수계수 측정용으로 많이 사용되는 Air-entry permeameter<sup>1)</sup>를 실내 실험에 사용할 수 있도록 개조한 장치를 이용하여 국내에서 생산되는 Na-벤토나이트를 모래에 혼합한 8종류의 모래-벤토나이트 혼합물에 대한 투수계수를 측정하여 차수(遮水)를 기대하는 각종 토목 구조물 공사의 설계 및 시공 기준 설정에 필요한 자료를 제시하기 위하여 수행되었다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 사용재료

#### 가. 벤토나이트

벤토나이트는 3층 구조의 Montmorillonite계의 천연 점토광물로서 본 실험에서 물에 대한 팽창성과 점착력을 증가시키기 위하여 이온치환한 토목공사용 Na계-벤토나이트를 사용하였다. 그 물리적 성질과 화학적 성분은 <Table 1>과 같으며, <Table 2>는

<Table 1> Physical properties and chemical components of bentonite used

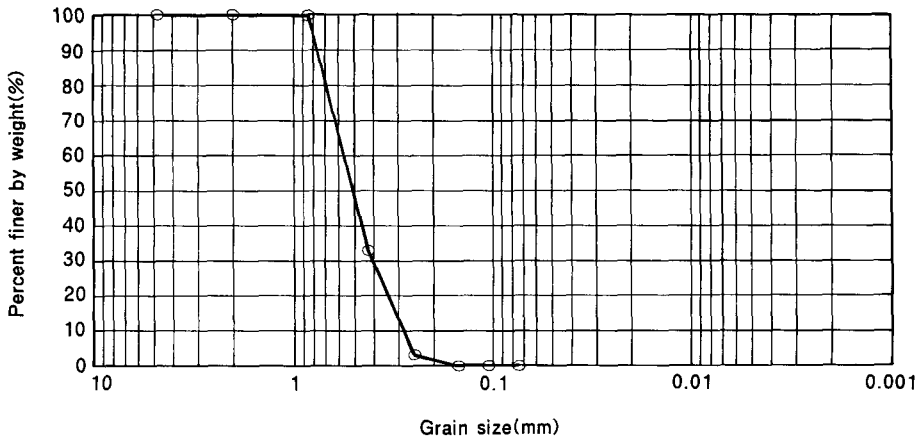
Physical Properties	Sepecific gravity			Swell ndex(ml/gf)			Liquid limit(%)			
	2.60			13.5			400			
Chemical Components (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Others	Total	pH
	63.60	17.00	2.78	2.63	3.43	0.76	3.75	6.05	100	11

<Table 2> Testing items for criteria of bentonite for civil engineering works

Testing items	Criteria
Water content(%)	8~12
Loose bulk density(gf/cm <sup>3</sup> )	0.75~0.85
Passing percent by 0.075 mm sieve(%)	Min. 75
pH	8.5~10.5
Concentration(kg/m)	45
Marsh funnel viscosity(s)	Min. 38
Filtrate loss(cc/30 min)	Max. 15

<Table 3> Physical properties of sand

Specific gravity(G <sub>s</sub> )	Dry density (gf/cm <sup>3</sup> )	Coefficient of permeability(cm/s)	Coefficient of uniformity(C <sub>u</sub> )	Coefficient of curvature(C <sub>c</sub> )
2.62	1.60	1.2 x 10 <sup>-2</sup>	2.0	1.0



<Fig. 1> Grain size distribution curve of sand used

벤토나이트 제조회사에서 제시한 토목공사용 벤토나이트의 성질에 대한 시험항목의 기준을 소개한 것이다.

**나. 모래**

모래-벤토나이트 혼합물 제조에 사용된 모래는 비교적 입도가 균일한 주문진 표준사를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 <Table 3>과 같고, 입도 분포곡선은 <Fig. 1>과 같다.

**2. 실험방법**

**가. 모래-벤토나이트 혼합물의 조제 및 다짐**

모래-벤토나이트 혼합물은 모래 및 벤토나이트를 건조한 상태에서 중량비로 혼합한 후 물을 가하여 제조하는 방법과 습윤한 모래에 건조한 벤토나이트를 섞으면서 물을 가하여 제조하는 방법이 있으나, 두 방법 모두 시험 결과에는 차이가 없다고 한 Kenny et

al.<sup>17)</sup>의 연구 결과에 따라 본 실험에서는 가하는 수량의 조절을 쉽게 하기 위하여 전자의 방법으로 조제하였다.

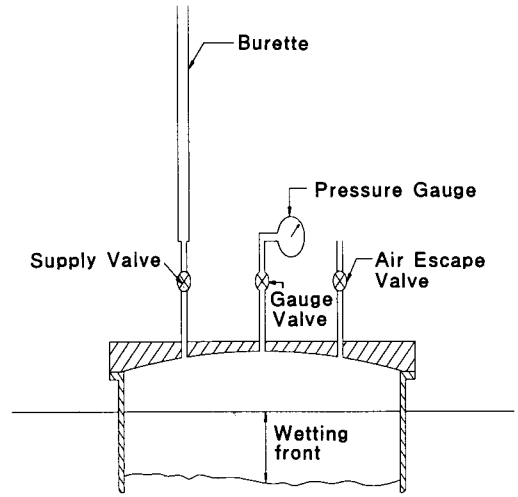
본 연구에 사용된 시료는 모래의 건조중량에 대한 벤토나이트의 건조중량비를 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 및 18%로 변화시킨 8종의 모래-벤토나이트 혼합물로 최대 건조단위중량과 최적 함수비를 결정하기 위하여 KS F 2312의 A다짐 시험방법을 실시하였으며, 다짐시험으로 결정된 최적 함수비 상태를 유지시켜 투수시험에 사용하였다.

**나. Air-entry permeameter를 이용한 투수시험 방법**

본 연구에서는 모래-벤토나이트 혼합물의 투수시험을 실시하기 위한 여러 가지 현장 투수시험방법 중 투수계수 측정에 시간이 비교적 적게 걸리는 것으로 알려진 Bouwer<sup>1)</sup>가 개발한 Air-entry permeameter를 실험실에서 사용할 수 있도록 개조하여 사용하였으며, 이 시험의 이론 및 방법의 개요는 다음과 같다.

Air-Entry Permeameter는 Sealed Single Ring Infiltrometer와 비슷한 투수시험 장치로 <Fig. 2>와 같이 흡속으로의 물의 침투에서 흡인력(Suction)의 영향을 측정하기 위하여 Manometer가 장착된 직경 약 60cm의 금속제 원통(Sealed ring)을 지반 속에 약 10~20cm 정도의 깊이로 매입하고, Marriotte system장치를 한 정수위 투수시험 방법으로 침투수량을 결정하는 제I단계 시험과 Air-Entry Permeameter를 봉합하여 유량 측정장치를 차단하는 제II단계의 시험으로 수행되는 방법이다.

즉 濕潤前線(Wetting front)의 깊이,  $W_f$ 를 식 (1)로 산정하고, 습윤전선 가장자리에서 Air-Entry의 吸引力,  $P_a$ 는 식 (2)로,



<Fig. 2> Schematic diagram of Air-Entry Permeameter (Bouwer, 1978)

투수계수 산정에 필요한 吸引水頭,  $\psi_f$ 를 식 (4)로 계산하여, Darcy의 공식을 적용한 투수계수는 식 (5)로 결정한다.

1) 습윤전선(Wetting front)의 깊이 결정  
 흡속으로 침투된 물의 양과 시료 자체의 함수량의 합은 흡 속의 간극량과 같으므로 흡속으로 침투된 깊이로 정의되는 습윤전선의 깊이는 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$f\gamma_w + \frac{\omega}{100} \gamma_d A W_f = \frac{n}{100} A W_f \gamma_w$$

$$W_f = \frac{f \gamma_w}{n A \gamma_w - \omega \gamma_d A} \tag{1}$$

여기서,

- $W_f$  : 습윤전선의 깊이(cm)
- $f$  : 공급된 수량( $\text{cm}^3$ )
- $\gamma_w$  : 물의 단위중량( $\text{gf}/\text{cm}^3$ )
- $n$  : 흙의 간극율(%)
- $A$  : 시료의 단면적( $\text{cm}^2$ )

$w$  : 흙의 함수비(%)

$r_d$  : 흙의 건조단위중량( $gf/cm^3$ )

2) Air-entry suction( $P_a$ )

$$P_a = -u_w - (W_f + G)\gamma_w \quad (2)$$

여기서,

$P_a$  : 습윤전선 가장자리에서 Air-Entry의 흡인력 ( $gf/cm^2$ )

$G$  : 시료 표면에서 압력계까지의 높이 (cm)

$u_w$  :  $G$  에 있는 압력계로 측정된 최소 수압 ( $gf/cm^2$ )

3) Water-entry suction( $P_w$ )

Water-entry suction은 Bouwer<sup>1)</sup>가 (Fig. 3)에서와 같이  $P_a$ 는 포화토에서 물이 압력수두가 감소하여 흡속으로 공기가 처음 들어갈 때 부(-)의 압력수두로 정의하고,  $P_w$ 는 불포화토에서 물의 침투로 흡 속의 압력수두가 증가할 때 공기가 차지한 간극이 물로 채워질 때의 압력수두로 하여  $P_w$ 와  $P_a$ 의 관계를 식 (4)와 같이 된다고 제안한 것으로 계산한다.

$$P_w = 0.5P_a \quad (3)$$

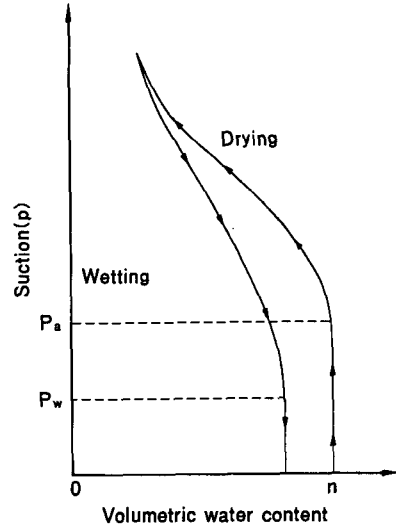
4) 흡인수두(Suction head)<sup>8)</sup>

$$\begin{aligned} \psi_f &= -\frac{P_w}{\gamma_w} = -\frac{0.5P_a}{\gamma_w} \\ &= 0.5 \left[ \frac{u_w}{\gamma_w} + (W_f + G) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,

$\psi_f$  : 습윤전선 바닥에서의 흡인수두(cm)

$P_w$  : 습윤전선의 water-entry 흡인력( $gf/cm^2$ )



<Fig. 3> Definition of Water-Entry Suction ( $P_w$ ) and Air-Entry( $P_a$ ) used with Air-Entry Permeameter (Bouwer, 1978)

5) 투수계수의 결정<sup>8)</sup>

투수계수는 식 (3)과 Darcy의 공식을 이용하여 식 (5)로 계산하여 결정한다.

$$\begin{aligned} k &= \frac{Q}{iA} = \frac{Q}{\frac{h}{W_f} A} = \frac{QW_f}{A(H_t + W_f + \psi_f)} \\ &= \frac{QW_f}{A(H_t + W_f - 0.5P_a)} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$Q$  : 1단계 시험으로부터의 침투수량( $cm^3/s$ )

$H_t$  : 1단계 시험기간중 Air-Entry

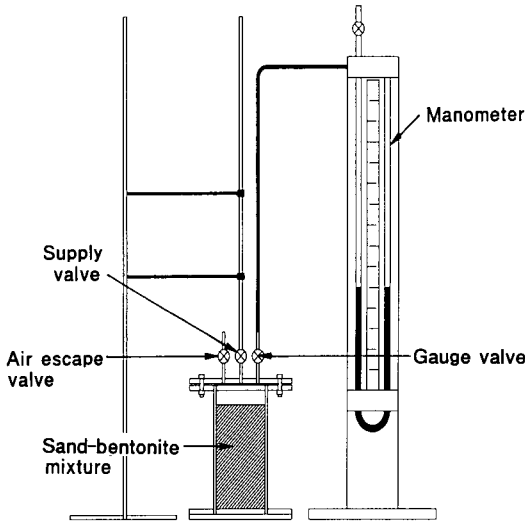
Permeater 내부표면의 압력수두(cm)

다. 모래-벤토나이트 혼합물의 투수시험

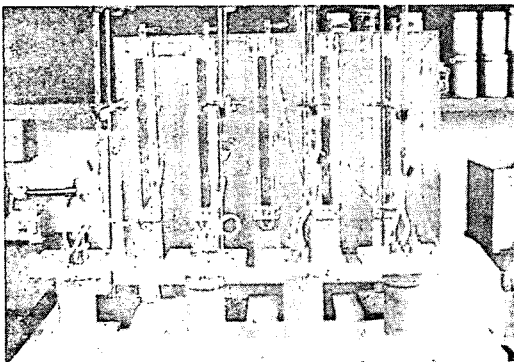
Air-entry permeameter를 실내 실험용으로 개조한 투수시험 장치의 구조는 (Fig. 4)와 같이 내경 90mm, 높이 200mm의 아크릴 원통으로 제작한 투수 원통과 수위변화 및 침투수량을 측정하기 위한 뷰렛과 압력 측

정용 Mercury manometer 및 Air vent valve를 설치하였으며, <Photo 1>과 같이 4개를 제작하여 실험에 사용하였다.

시험 과정은 모래-벤토나이트 혼합물과 투수시험 원통의 벽면 투수오차를 줄이기 위하여 벽면에 Grease를 얇게 도포한 후 시료를 다져 넣고, Burette에 물을 공급하여 수위를 일정하게 하고, 침투수량과 최저 압력을 측정한 후, 식 (1)과 식(4)를 이용하여 습윤전선의 깊이와 투수계수를 계산하였다.



<Fig. 4> Schematic diagram of testing apparatus

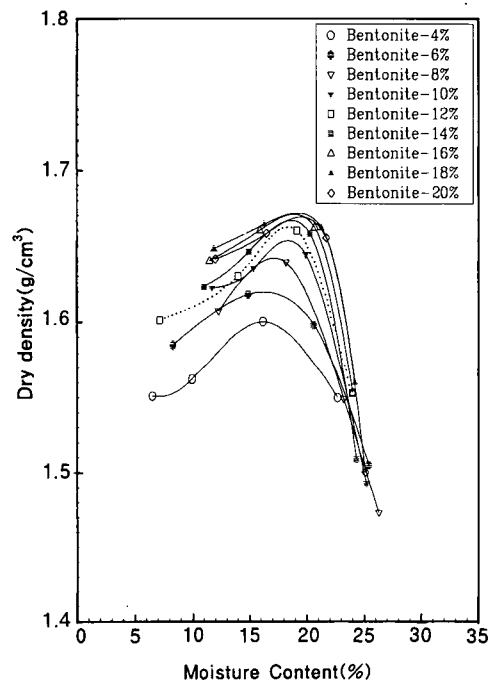


<Photo 1> View of permeability test set up

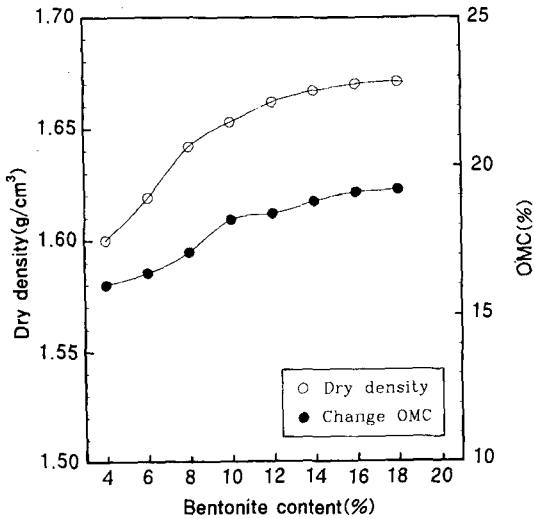
### III. 결과 및 고찰

#### 1. 모래-벤토나이트 혼합물의 다짐특성

<Fig. 5>는 벤토나이트 함량에 따른 모래-벤토나이트 혼합물의 최대 건조단위중량과 최적 함수비를 결정하기 위한 다짐곡선들로서 벤토나이트의 함량이 4%에서 18%로 증가함에 따라 모래-벤토나이트 혼합물의 최대 건조단위중량은 약 1.60gf/cm<sup>3</sup>에서 1.67gf/cm<sup>3</sup>로, 최적 함수비는 약 16.00%에서 19.50%로 각각 증가하는 것으로 측정되었다. 이것은 모래의 간극이 벤토나이트의 간극보다 상대적으로 크기 때문에 그 간극이 벤토나이트와 물로 채워져 벤토나이트의 수화작용에 의한 팽창작용으로 인하여 건조단위중량이 증가된 것으로 판단된다.



<Fig. 5> Compaction curves of sand-bentonite mixtures by bentonite content



<Fig. 6> Variations of dry density and optimum moisture content by bentonite content

또한 본 연구에서 모래-벤토나이트 혼합물의 최대 건조단위중량과 최적 함수비는 <Fig. 6>과 같이 벤토나이트의 함량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있으나, 그 함량이 14% 이상에서는 거의 증가되지 않는 것으로 나타났다. 이것은 벤토나이트에 의한 단위중량의 증가보다 벤토나이트 양의 증가에 따라 흡수되는 수량이 많아져 수화시간이 길어짐에 따라 혼합물의 체적이 팽창되는 현상에 의한 것으로 추정된다.

Garlanger et al.<sup>15)</sup>의 연구에서도 본 연구 결과와 비슷한 결과를 제시하고 있으며, Kenny et al.<sup>17)</sup>이 Na-벤토나이트를 사용하여 연구한 결과에서도 최대 건조단위중량과 최적 함수비는 벤토나이트 함량의 증가에 따라 증가하고, 최적 다짐에 필요한 벤토나이트의 함량은 20%정도라고 보고하였다.

그러나 본 연구에서는 모래-벤토나이트 혼합물의 최적 다짐에 적합한 Na-벤토나이트 함량은 12~14% 정도로 나타났으며, 위 결과와 다른 것은 사용된 사용재료의 화학성분

과 물리적 성질의 차이점 때문이라 판단된다.

## 2. 모래-벤토나이트 혼합물의 투수특성

벤토나이트 함량과 혼합물의 단위중량에 따른 투수계수의 변화를 측정하고 뷰렛의 수위( $H_1$ )를 각각 100, 120, 140, 160(cm)로 한 경우 투수계수 변화를 측정 분석하였다.

### 가. 벤토나이트 함량에 따른 투수특성

모래-벤토나이트 혼합물의 투수계수 변화는 <Fig. 7~Fig. 10>과 같이 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 그 값이 대체로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 그 값이 최종 투수계수에 도달하는데 소요되는 시간은 벤토나이트 함량의 다소에 관계없이 약 48~72시간(2~3일) 정도 걸리는 것으로 측정되었다.

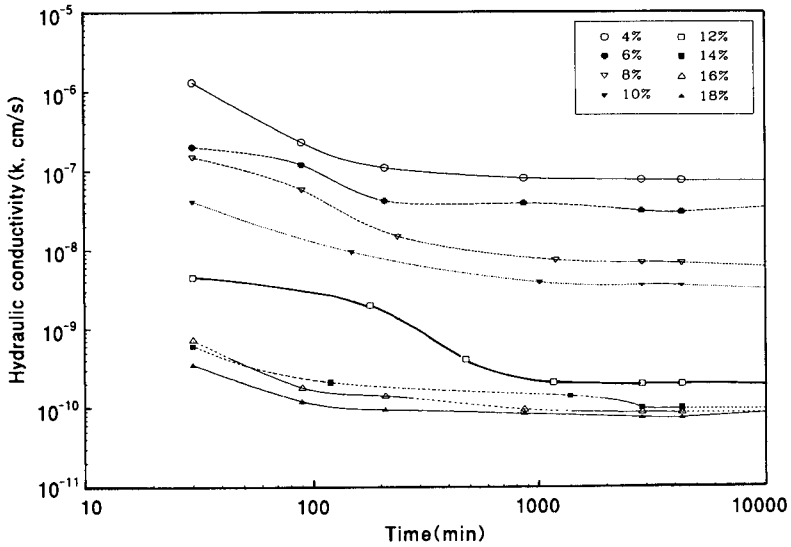
이것은 Rigid wall permeameter나 Flexible wall permeameter의 경우 7~12일이 소요되는 것<sup>5)</sup>에 비하여 비교적 신속하게 요구되는 투수계수의 값을 결정할 수 있음이 확인 되었다. 그리고 벤토나이트 함량 4~18%의 범위에서 최종 투수계수의 값은  $1.01 \times 10^{-7} \sim 7.50 \times 10^{-11}$  cm/s의 범위가 되는 것으로 측정되었다. 이 현상은 일반적인 경향으로 생각되며, 적당한 투수계수를 얻는데 요구된 벤토나이트 함량의 초기 예측에 도움을 줄 것으로 기대할 수 있다.<sup>5)</sup> 이것은 증가되는 벤토나이트 함량이 모래-벤토나이트 혼합물에 대한 투수계수를 현저하게 감소시키지 않을 것이라는 것을 시사한다.

다진 벤토나이트-모래의 투수성에 대한 Kenny et al.<sup>17)</sup>의 연구, 흙-벤토나이트 Slurry의 투수성에 대한 D'Appolonia<sup>9)</sup> 및 Chan<sup>4)</sup>의 연구, Edil et al.<sup>11)</sup>의 연구 그리고 모래-벤토나이트 차수재에 대한

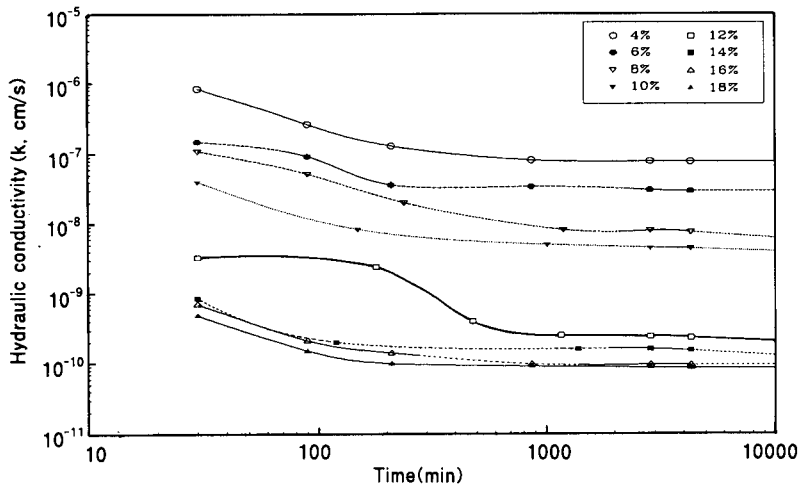
Chapuis<sup>5)</sup>, Garlanger et al.<sup>15)</sup>의 연구에서도 벤토나이트 함량의 증가에 따라 투수 계수가 감소한다고 보고하였다.

특히 Garlanger et al.<sup>15)</sup>은 벤토나이트 함량 4.5~12.5%(평균 12%) 범위에서

$1.5 \times 10^{-8} \sim 1.2 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 의 범위로 측정되었다는 보고와 Haug et al.<sup>16)</sup>의 모래-벤토나이트에 관한 연구에서 벤토나이트 함량 5~10%에서 투수계수가  $5 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-9}$ 이었다는 보고는 본 연구 결과인 벤토나

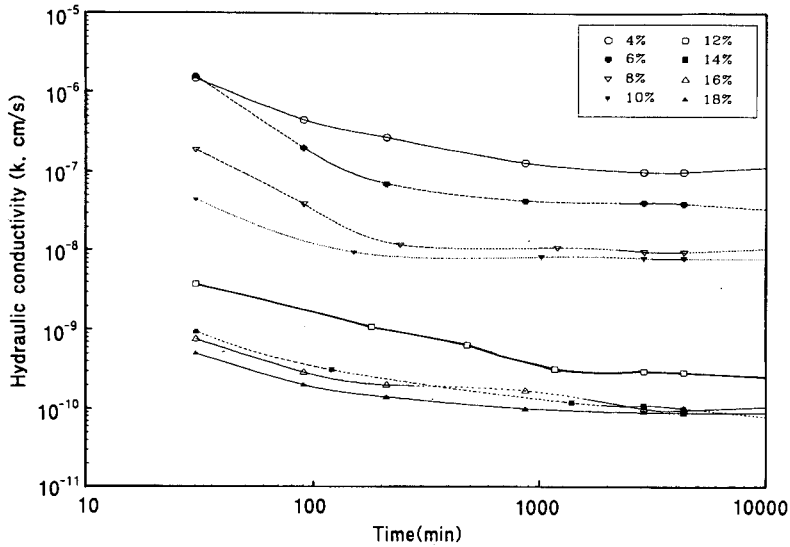


<Fig. 7> Variations of hydraulic conductivity by bentonite content and elapsed time( $H_i=100\text{cm}$ )

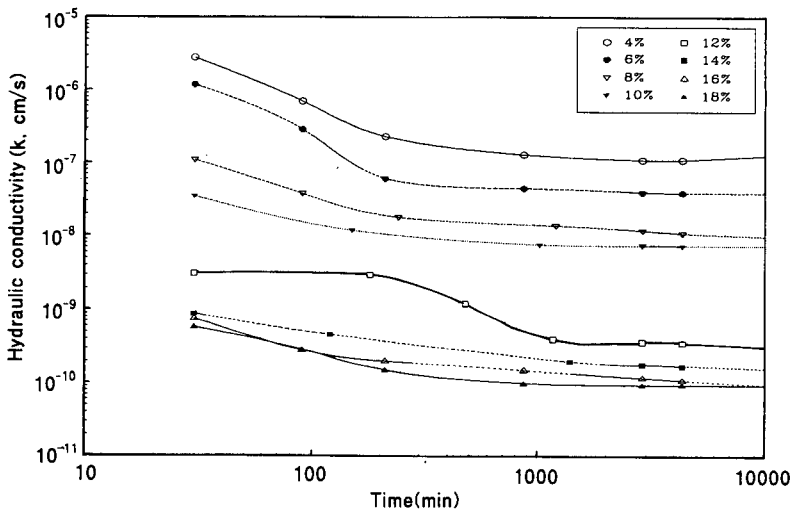


<Fig. 8> Variations of hydraulic conductivity by bentonite content and elapsed time( $H_i=120\text{cm}$ )





<Fig. 9> Variations of hydraulic conductivity by bentonite content and elapsed time( $H_1=140\text{cm}$ )



<Fig. 10> Variations of hydraulic conductivity by bentonite content and elapsed time( $H_1=160\text{cm}$ )

이트 함량 4~18%의 범위에서 최종 투수계수 값인  $1.01 \times 10^{-7} \sim 7.50 \times 10^{-11} \text{cm/s}$ 와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다. 또한 Chapuis<sup>7)</sup>는 모래-벤토나이트 혼합물의 투수계수  $2 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 이하의 값을 얻기 위하여는 벤토

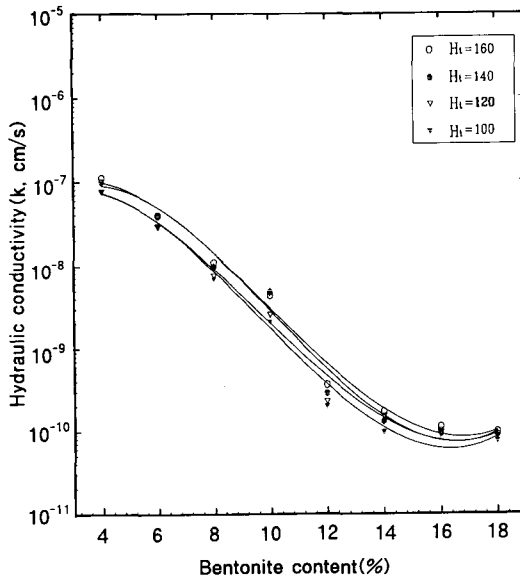
나이트함량이 최소 7% 이상이 필요하다고 보고하였다.

따라서 본 연구의 결과 모래-벤토나이트 혼합물을 폐기물 매립지의 침출수 투수계수의 일반적인 기준인  $a \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 이하로

<Table 4> Values of hydraulic conductivity of sand-bentonite mixtures by bentonite content

Bentonite content(%)	Hydraulic conductivity(cm/s)				
	H=100cm	H=120cm	H=140cm	H=160cm	Average
4	$7.70 \times 10^{-8}$	$7.70 \times 10^{-8}$	$1.01 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$3.90 \times 10^{-8}$
6	$3.10 \times 10^{-8}$	$2.90 \times 10^{-8}$	$4.00 \times 10^{-8}$	$4.00 \times 10^{-8}$	$1.75 \times 10^{-8}$
8	$7.00 \times 10^{-9}$	$7.50 \times 10^{-8}$	$9.90 \times 10^{-9}$	$1.10 \times 10^{-8}$	$6.13 \times 10^{-9}$
10	$3.50 \times 10^{-9}$	$4.40 \times 10^{-9}$	$8.30 \times 10^{-9}$	$7.50 \times 10^{-9}$	$5.93 \times 10^{-9}$
12	$2.00 \times 10^{-10}$	$2.30 \times 10^{-10}$	$2.90 \times 10^{-10}$	$3.61 \times 10^{-10}$	$2.70 \times 10^{-10}$
14	$1.01 \times 10^{-10}$	$1.50 \times 10^{-10}$	$1.08 \times 10^{-10}$	$1.69 \times 10^{-10}$	$1.32 \times 10^{-10}$
16	$8.90 \times 10^{-11}$	$9.40 \times 10^{-10}$	$1.02 \times 10^{-10}$	$1.10 \times 10^{-10}$	$7.61 \times 10^{-10}$
18	$7.50 \times 10^{-11}$	$8.50 \times 10^{-11}$	$9.00 \times 10^{-11}$	$9.40 \times 10^{-11}$	$8.60 \times 10^{-11}$

하기 위한 차수재 또는 각종 침투수를 차단하기 위한 토목공사 또는 수로의 라이닝 재료로 사용할 때 현장 시공시 정확한 혼합의 어려움을 고려한다면 벤토나이트의 함량을 6~10%를 혼합하여 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 그리고 <Table 4>는 벤토



<Fig. 11> Variations of hydraulic conductivity by bentonite content and head difference of sand-bentonite mixtures

나이트 함량에 따라 수두별로 결정된 투수계수의 값들이다.

#### 나. 수두차에 따른 투수계수의 변화

<Fig. 11>은 Burette의 수위를 160, 140, 120 및 100cm로 하여 투수계수를 측정된 결과로서 수두차에 의한 투수계수의 변화는 거의 변화가 없는 것으로 측정되었으며, 벤토나이트 함량 변화에 따른 투수계수의 변화가 커서 상대적으로 수위의 변화는 혼합물의 투수계수의 변화에 크게 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

## IV. 결론

모래-벤토나이트 혼합물의 투수특성을 평가하기 위하여 현장 투수계수 측정용 Air-Entry Permeameter를 실내 실험용으로 개조한 실험장치를 이용하여 8종류의 혼합물에 대한 투수시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 최대 건조단위중량의 증가에 따라 모래-벤토나이트 혼합물의 투수계수는 감소하는 경

향을 보였으며, 벤토나이트의 함량이 14% 이상에서는 그 값이 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다.

2. 벤토나이트의 함량을 4~18%의 범위로 증가시킨 벤토나이트 혼합물의 최대 건조 단위중량은  $1.60 \sim 1.67 \text{ gf/cm}^3$ 로 최적 함수비는 16.00~19.50%로 증가되었다.

3. 벤토나이트 함량의 증가에 따른 모래-벤토나이트 혼합물의 투수계수 값은 감소하는 경향을 보였으며, 최종 투수계수의 값에 도달하는 시간은 벤토나이트 함량에 관계없이 약 2~3일 소요되었다.

4. 벤토나이트 함량을 4~18%로 증가시킨 모래-벤토나이트 혼합물의 투수계수는 약  $0.01 \times 10^{-7} \sim 7.50 \times 10^{-11} \text{ cm/s}$  범위로 감소되었다.

5. 수두차에 따른 투수계수는 거의 변화하지 않는 것으로 나타났다.

6. 모래-벤토나이트 혼합물을 차수용 재료로 사용하기 위하여 적당한 벤토나이트 함량은 6% 이상으로 하는 것이 적당하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. Bouwer Herman, 1966. Rapid Field Measurement of Air Entry Value and Hydraulic Conductivity of Soil as Significant Parameters in Flow System Analysis, Water Resources Research, Vol. 2, No. 4, pp.729~738.
2. Bouwer Herman, 1967. Planning and Interpreting Soil Permeability Measurements, Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 95, No. IR3, pp.391~402.
3. Bouwer Herman, 1978. Groundwater Hydrology, McGraw-Hill Book Co.Ltd., pp.124~126.
4. Chan, Wah-Tak and C. Daniel, Hsu, 1994. First International Congress on Environmental Geotechnics, pp. 161~166.
5. Chapuis, R.P., 1990. Sand-bentonite Liners: Predicting Permeability from Laboratory Tests, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No.1 pp.47~57.
6. Chapuis, R.P., 1990. Sand-Bento-Nite Liners: Field Control Methods, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No.2 pp.216~223.
7. Chapuis, R.P., Jacques Lavoie, and Doris Girard, 1992. Design, Construction, Performance, and Repair of the Soil-Bentonite Liners of Two Lagoons, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, No.1 pp.638~649.
8. Daniel, D. E., 1989. In Situ Hydraulic Conductivity Tests For Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 115, No. 9, pp.1205~1226.
9. D'Appolonia, D.J., 1979. Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT4, pp.399~417.
10. Edil, T.B. and A.E. Erickson, 1985. Procedure and Equipment Factors Affecting Permeability Testing of a Bentonite-Sand Liner Material, Hydraulic Barr-

- iers in Soil and Rock, ASTM STP 874, pp.155~170.
11. Edil, T.B. and A.S.H, Muhanna, 1992. Charateristics of a Bentonite Slurry as a Sealant, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 1, pp.3~13.
  12. Fernuik, N.H., 1987. In-situ Permeability Testing of Soil Liners with Low Hydraulic Conductivity, thesis presented to the University of Saskatchewan, at Saskatoon, Canada, in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Science.
  13. Fernuik, N.H., M.D. Haug, and J.P. Haile, 1989. Comparison of Laboratory and In-Situ Field Soil Liner Permeability Measurements, 42nd Canadian Geotechnical Conference of Canadian Geotechnical Society, pp.134~142.
  14. Fernuik, N.H., M.D. Haug, 1990. Evaluation of In Situ Permeability Testing Methods, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 2, pp.1205~1226.
  15. Garlanger, J.E., F.K. Cheung, and B.S. Tannous, 1987. Quality Control Testing for a Sand-Bentonite Liner, Geotechnical Practice for Waste Disposal, Geotechnical Special Publication, No.13, pp.488~ 499.
  16. Haug, M.D. and Lionel C. Wong, 1992. Impact of Molding-Water Content on Hydraulic Conductivity of Compacted Sand-Bentonite, Canadian Geotechnical Journal, No. 29, pp.253~262.
  17. Kenny, T.C., W.A. Veen, and M.A. Swallow, M.A. Sungaila, 1991. Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand, 44th Canadian Geotechnical Conference of Canadian Geotechnical Society, Vol. 2, pp.63-1~63-10.
  18. Reschke, A.E. and M.D. Haug, 1991. The Physio-Chemical Properties of Bentonites and the Performance of Sand-Bentonite Mixtures, 44th Canadian Geotechnical Conference of Canadian Geotechnical Society, Vol. 2, pp.62-1~62-10.
  19. Sai, J.O. and D.C. Anderson, 1990. Field Hydraulic Conductivity Tests for Compacted Soil Liners, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 13, No. 3, pp.215-225.
  20. Van Ree C.C.D.F., F.A. Weststrate, C.G. Meskers and C.N. Bremmer, 1992. Design Aspects and Permeability Testing of Natural Clay and Sand-Bentonite Liners, Geotechnique 42, No.1, pp.49~56.