

# 유기투과물이 자연점토의 투수성에 미치는 영향에 대한 연구

## A Study on the Effect of Organic Permeant on Permeability of a Natural Clay

전 상 옥\* · 장 병 옥\*\* · 우 철 응\*\*\* · 박 영 곤\*\*\*  
Jeon, Sang Ok · Chang, Pyoung Wuck · Woo, Chull Woong · Park, Young Kon

### Summary

Compacted clay materials are often used to form barriers for waste disposal by means of landfill. The performance of clay barrier depends on its permeability characteristics under the site environments. The study discusses permeability characteristics of 4 types of permeants through a compacted clayey soil. Permeabilities are measured using the modified rigid-wall permeater and with water, PEG, Ethanol, and TCE, ranging 80 to 3.4 of dielectric constants. Results of the study are as follows :

1) Absolute permeabilities of Ethanol and TCE that their dielectric constants are lower than that of water are  $K=1.0 \times 10^{-12} \text{cm}^2$ , and  $5.8 \times 10^{-12} \text{cm}^2$ , respectively, that is, 1.67, and 9.67 times of permeability of water, respectively. Absolute permeability and dielectric constant of water are  $K=6 \times 10^{-13} \text{cm}^2$  and 80, respectively.

2) Changes in absolute permeability of Ethanol and TCE converge to a constant after 3.5 pore volume of permeant flows through the clay sample. This can be explained that diffuse double layer of clay is no longer reacted with permeants and contracted their pores. However there is no change in absolute permeability when water is used as a permeant.

3) It is found that absolute permeability is reversely proportional to the value of dielectric constant of the permeants. Change in absolute permeability of the permeants with 40 or over of dielectric constant is not significant. However change in absolute permeability of the permeant with 30 or lower dielectric constant is abruptly increased.

4) A lower absolute permeability of PEG is found because of its high viscosity.

\* 농어촌진흥공사 농어촌연구원  
\*\* 서울대학교 농업생명과학대학  
\*\*\* 서울대학교 대학원

키워드 : 절대투수계수, 유기물, 자연점토, 수정  
강성벽 투수시험기, 유전상수

## I. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 커지고 환경보전에 대한 문제가 사회적인 문제가 됨에 따라서 종래의 쓰레기 및 산업폐기물의 처리방식인 노천투기 방식은 위생매립(sanitary landfill) 방식으로 바뀌고 있다. 특히, 매립장에서 발생한 침출수가 주변환경으로 누출되면 지하수의 오염을 일으킨다. 따라서 침출수에 의한 오염을 방지하기 위하여 투수계수가 매우 낮은 차단층인 라이너(liner)를 설치해야 한다. 매립지의 바닥 측면의 차수에 이용되는 재료는 경제적이며 장기간 불투수성을 유지할 수 있어야 한다. 이러한 불투수층의 재료로는 다점점토, 점토-모래 혼합물, 모래-벤토나이트 혼합물, 보강점토(geosynthetic clay liner), 지오멤브레인(geomembrane) 등이 이용되고 있다. 특히, 산업폐기물 매립장의 차단층에는 매립물의 특성상 지오멤브레인 등의 이용이 어려우며 대부분의 경우 다져진 자연점토나 모래-벤토나이트 혼합물로 시공되고 있다.

침출수 차단층에서 가장 중요한 공학적 특성은 투수계수이며 매립장에서 발생하는 침출수가 차단층을 투과하는 투과물이다. 침출수는 매립된 물질에 따라서 달라지며 도시의 고형폐기물의 경우에는 유기물과 무기물이 혼합된 오염된 물이며 산업폐기물의 경우 폐기물이 곧바로 침출수가 된다. 따라서 이 경우의 투수성은 오염되지 않은 물의 경우와는 다르게 나타난다.

외국의 연구자들이 유기물로 포화되고 투과되는 점토질 흙의 투수성은 물로 포화되고 투과되는 경우보다 크다는 연구결과를 발표한 바 있다. 물이 투과물인 고전적인 토질역학의 문제에서 점토질 흙의 투수성에 미치는 영향을 미친다고 알려진 요인은 입자크기, 입자의 조직이나 배열, 포화도, 공극비 등이다. 투과물이 유기물일 경우에는 유기물의 물리화학적

인 특성이 추가되는데 이에 대한 영향은 명확하게 알려져 있지 않다. 이것은 매립장에서의 유기물의 종류가 매우 다양하며 이들 사이의 상호작용이 존재하기 때문이다.

국내에서는 최근에 와서야 일부연구자들이 이와 관련된 연구를 하였다.<sup>10,11,12)</sup> 이것은 우리나라의 폐기물 매립장의 위생처리가 최근에 와서야 시작되었으며, 매립장 주변환경의 오염에 대해서 관심을 갖기 시작했기 때문이다. 현재의 폐기물 매립장의 설계와 시공은 오염물과 흙의 상호작용을 고려하지 않기 때문에 많은 문제가 발생할 가능성을 가지고 있다. 따라서 라이너 재료로 쓰일 수 있는 자연점토의 순수 유기물에 의한 투수성의 변화에 대한 연구는 큰 의의를 가진다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 강성벽 투수시험기와 연성벽 투수시험기의 단점을 개량한 수정 강성벽 투수시험기를 제작하여 매립지 현장의 상재응력 상태를 재현하였다. 시험에 사용된 유기물은 유전상수(dielectric constant)의 크기에 따라 물, PEG, Ethanol, TCE의 4가지를 선정하였고, 라이너 재료로 사용가능한 자연점토에서 이와같은 유기물이 통과할 때 투수계수의 변화양상을 구명하고자 한다.

## II. 시료 및 시험방법

### 1. 시 료

본 시험에 사용된 시료는 자연점토로, No. 200체 통과량이 35% 이상인 흙에서 체가름하여 No. 60체를 통과하는 시료로 조제하였으며 체분석시험을 실시한 결과 No. 200체 통과량이 62.72%로서 Fig. 1과 같은 입도분포곡선을 가진다. 시료의 물리적인 성질은 Table-1과 같고 Bagchi<sup>1)</sup>의 라이너로서의 재료조건을 만족하였다.

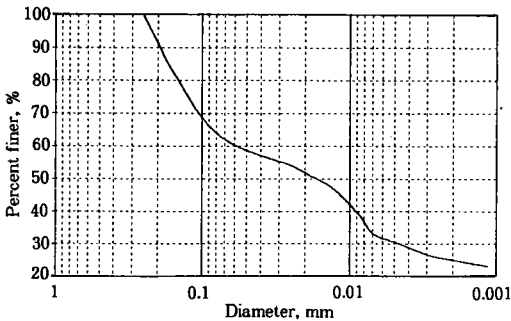
**Table-1. Physical properties of a natural clay used in the test**

Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index	U.S.C.S
2.635	36.2	19.58	16.62	CL

**Table-2. Physical and chemical properties of permeant used**

Permeant	D	Formula	$\gamma$	$\mu$
Water	80	H <sub>2</sub> O	0.98	1.004
TCE	3.4	C <sub>2</sub> HCl <sub>3</sub>	1.465	0.58
Ethanol	25	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0.789	1
PEG	37.7	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	1.125	8.21

D : Dielectric constant  
 $\gamma$  : unit weight(g/cm<sup>3</sup>)  
 $\mu$  : viscosity(centipoise)



**Fig. 1. Grain size distribution of a natural clay**

**2. 시험방법**

**가. 시료의 다짐**

투수시험을 위한 공시체는 다짐시험의 결과

를 이용하여 최대건조밀도의 90% 이상, 함수비는 최적함수비에 3%를 더한 습윤축으로 제작하였다. 본 시험에 사용된 시료의 초기조건은 Table-3과 같다. 함수비를 최적 함수비에서 습윤축으로 3%를 더한 것은 일반적으로 흙의 다짐시 최소투수계수는 최적함수비에 2~4%를 더한 함수비에서 생긴다고 보고되었기 때문이다.<sup>10)</sup> 공시체 제작시에 무게 1.11kgf, 낙하높이 153mm의 다짐봉을 이용하였고 투수시험몰드(H=30mm,  $\phi$ =45mm)에서 2층으로 다지며 각각 8회씩 타격하였다. 이 때 시료에 적용된 다짐에너지는 KS 표준인 5.625kgf.cm/cm<sup>3</sup>이다.

**나. 시험기구 및 방법**

시험은 수정 강성벽 투수시험기를 사용하였다. 투수시험 몰드의 재질은 황동이며 유기물이 흐르는 반투명관은 유기물에 저항성이 강한 테프론(teflon)재질의 관을 이용하였다. 동수경사를 높이기 위해 질소(N<sub>2</sub>) 가스를 이용하여 압력을 주었고, 정밀한 압력 조절로 동수경사를 일정하게 유지시키기 위해서 수은을 사용한 마노미터(manometer)와 압력조절기(regulator)를 부착하였다. 투수시험장치는 Fig. 2와 Fig. 3과 같다.

시료의 초기 포화도는 최적함수비의 습윤축에서 다졌기 때문에 90% 이상이었으며 투수시험을 하기 전에 포화를 시키기 위해 유입구 쪽에 초기 0.12kgf/cm<sup>2</sup> 정도의 압력을 주고 24시간 경과 후에 서서히 0.2, 0.3, 0.4kgf/cm<sup>2</sup>

**Table-3. Initial conditions of specimens used in the test**

specimen		initial conditions					
soil	permeant	Dry density $\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Water content $\omega$ (%)	void ratio $e_o$	Deg. of saturation, $S_o$ (%)	Pore volume $V_v$ (cm <sup>3</sup> )	Relative compaction, R(%)
natural clay	water	1.52	25.28	0.73	91.44	20.38	94.69
	Ethanol	1.55	25.62	0.70	96.24	19.67	96.19
	TCE	1.54	25.57	0.71	94.66	19.84	95.62
	PEG	1.57	24.34	0.68	94.31	19.57	97.42

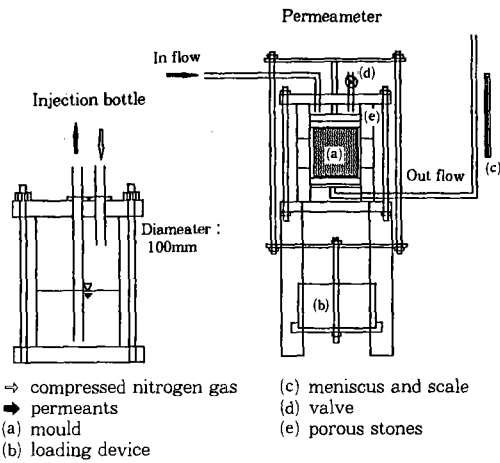


Fig. 2. Schematic views of permeameter and setup

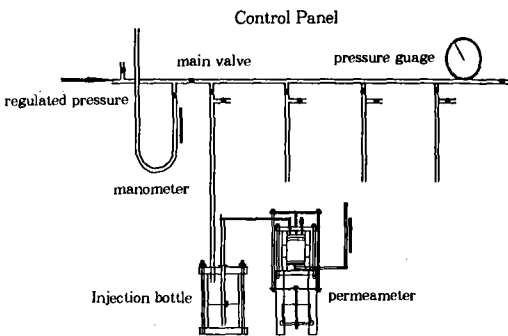


Fig. 3. Schematic view of setup of permeability tester

의 순서로 증가시켰다. 유출구의 끝부분에서 유기물이 유출하는 것을 확인한 후에 투수시험을 실시하였는데, 유기물의 흐름은 하향이고 투과 공극부피의 3배 이상이 흐를 동안 압력조절기와 수은 마노미터에 의해 압력을 일정하게 유지시킨 상태에서 약 24시간 마다 유출 유체의 양을 측정하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 투과물에 따른 투수성의 변화

점토질 흙의 부피변화와 내부의 구조변화는 구조적 안정성에 영향을 미치기 때문에 점토

라이너의 투수성에 유기물이 미치는 영향을 평가할 때 투과된 유기물 부피와 함께 투수계수를 기록하는 것이 필요하다. 모든 시험결과는 투과 공극부피를 독립변수로 하여 투수계수와와의 관계를 나타내었다. 여기서 공극부피란 전체 흡시료의 부피중 흙만의 부피를 제외한 공극만의 부피를 말하는 것으로, 공극 부피를 기준으로 공극 부피만큼 투과물이 통과하면 1로 나타내었다. 투과물의 점성과 단위중량이 투수계수에 미치는 영향을 배제하고 흙 자체의 투수성을 나타내기 위한 절대투수계수로 투수성의 변화를 설명하였다.

#### 가. 물(water)

물을 투과물로 사용할 때의 투수계수의 변화는 Fig. 4와 같다. 공극부피의 2.66배를 투과할 동안에 절대투수계수는 최대  $6.5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ 에서 최소  $5.2 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ 까지의 범위를 나타냈으며, 평균  $6 \times 10^{-13} \text{ cm}^2$ 의 절대투수계수를 나타냈다. 최대와 최소투수계수의 비는 1.25배로서 거의 변동이 없었다. 즉, 물의 유전상수는 80으로 대단히 큰 유체이므로 물이 점성토를 투과하는 경우에는 분산이중층에 영향을 주지 않는다는 사실을 보여주었다.

#### 나. 에탄올(Ethanol)

에탄올은 유전상수가 25로 Fig. 5에서 보는

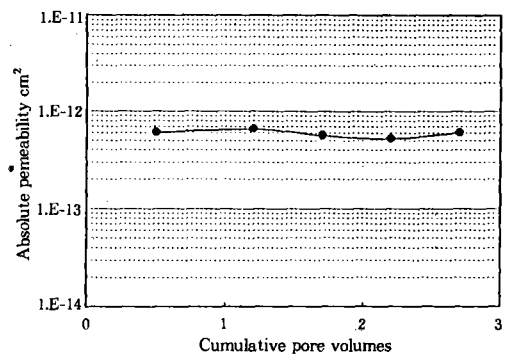


Fig. 4. Change in absolute permeability for a natural clay permeated with water

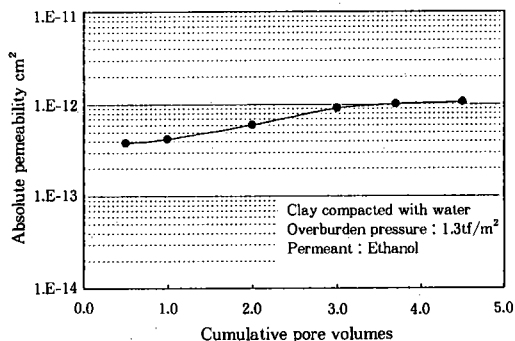


Fig. 5. Change in absolute permeability for a natural clay permeated with Ethanol

것과 같이 절대투수계수가 초기  $3.8 \times 10^{-13} \text{cm}^2$ 에서 말기  $1.0 \times 10^{-12} \text{cm}^2$ 으로 약 2.6배가 되었다. 절대투수계수는 3.5 투과공극부피 이상이 되었을 때 안정된 값을 나타내었는데 이는 자연점토의 분산이중층 두께의 변화 때문으로 판단된다.

다. TCE (TriChloroEthylene)

TCE는 유전상수가 3.4로 매우 작은 유기물이다. 따라서 TCE에 대한 시험은 Broderick과 Daniel<sup>3)</sup>의 방법을 이용하여 먼저 물로 다져진 시료의 공극을 물에 용해하는 에탄올로 먼저 포화시키고 다시 에탄올에 용해하는 TCE를 다시 투과시키는 방법을 사용하였다. 투수시험에서 동수경사 200/1은 강성벽 시험

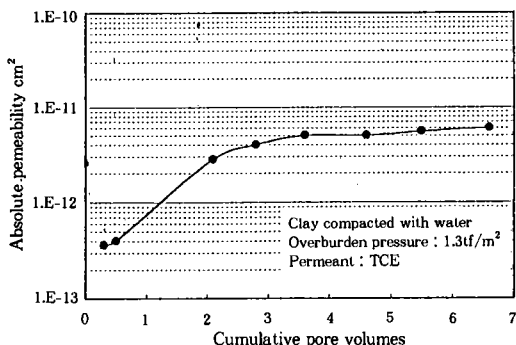


Fig. 6. Change in absolute permeability for a natural clay permeated with TCE

에서 큰 공극지름을 가진 시료에서는 충분하지만 연성벽(또는 수경 강성벽)시료에 대해서는 작다. 그러나 에탄올로 먼저 투과한 경우에 130/1 정도의 동수경사로도 투수시험이 가능하였다. Fig. 6은 TCE의 투수계수의 변화로, 절대투수계수는 초기  $3.6 \times 10^{-13} \text{cm}^2$ 에서 말기  $5.8 \times 10^{-12} \text{cm}^2$ 으로 약 16.1배가 되었다. 투과공극부피가 3.5 이상이 되면 일정한 값으로 수렴하였다.

라. PEG (PolyEthyleneGlycol)

PEG에 대한 시험은 물에 용해되는 성질을 가지고 있어 표면장력의 문제는 없으나 점성계수의 크기에 반비례하는 투수특성 때문에 동수경사를 300/1으로 높여 시험을 수행하였다. 시료를 포화하는데에는 일주일 정도의 기간이 소요되었고 계속 300/1의 동수경사를 유지시키면서 투과를 시킨 결과 24시간 동안  $0.44 \text{cm}^3$ 의 극소량의 PEG가 통과하는 양상을 보였다. PEG의 투수계수 및 절대투수계수의 변화는 Fig. 7과 같다. 그림에서 다른 유기물은 모두 말기에 투수성이 증가하는 경향을 나타냈으나 PEG만은 초기  $1.9 \times 10^{-13} \text{cm}^2$ 에서 말기  $8.2 \times 10^{-14} \text{cm}^2$ 으로 0.42배로 감소하는 경향을 나타냈다. 이것은 PEG가 점성이 크기 때문에 투과가 어려우며 시험기간을 단축하기

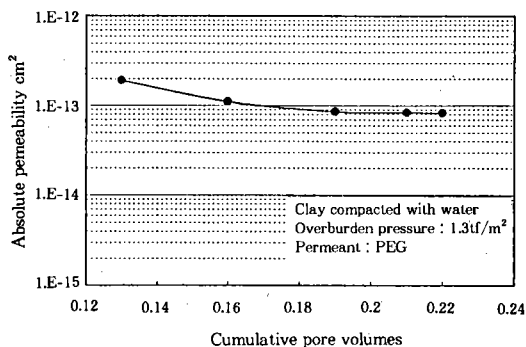


Fig. 7. Change in absolute permeability for a natural clay permeated with PEG

Table-4. Change of absolute permeability

Permeant	Pore volume vs absolute permeability							
	Pore Volume	0.5	1.2	1.7	2.2	2.7	-	-
Water	Pore Volume	0.5	1.2	1.7	2.2	2.7	-	-
	Absolute Permeability(cm <sup>2</sup> )	6×10 <sup>-13</sup>	6.5×10 <sup>-13</sup>	5.6×10 <sup>-13</sup>	5.2×10 <sup>-13</sup>	6×10 <sup>-13</sup>	-	-
Ethanol	Pore Volume	0.5	1.0	2.0	3.0	3.7	4.5	-
	Absolute Permeability(cm <sup>2</sup> )	3.8×10 <sup>-13</sup>	4.2×10 <sup>-13</sup>	6×10 <sup>-13</sup>	9×10 <sup>-13</sup>	1×10 <sup>-12</sup>	1×10 <sup>-12</sup>	-
TCE	Pore Volume	0.3	0.5	2.1	2.8	3.6	4.6	6.6
	Absolute Permeability(cm <sup>2</sup> )	3.6×10 <sup>-13</sup>	4×10 <sup>-13</sup>	2.8×10 <sup>-12</sup>	4×10 <sup>-12</sup>	5×10 <sup>-12</sup>	4.9×10 <sup>-12</sup>	5.8×10 <sup>-12</sup>
PEG	Pore Volume	0.13	0.16	0.19	0.21	0.22	-	-
	Absolute Permeability(cm <sup>2</sup> )	1.9×10 <sup>-13</sup>	1.1×10 <sup>-13</sup>	8.5×10 <sup>-14</sup>	8.3×10 <sup>-14</sup>	8.2×10 <sup>-14</sup>	-	-

위해 가한 높은 동수경사(300/1)로 인해서 압밀현상과 clogging현상이 발생하여 공극의 크기의 영향을 미친 것으로 사료된다.

이상의 각 투과물의 투과 공극부피에 대한 투수성의 변화를 Table-4와 같이 정리하였다.

## 2. 유전상수에 따른 투수성의 변화

각 유기물에 대한 자연점토의 절대투수계수와 유전상수의 관계는 Fig. 8과 같다. 그림에서 아래의 직선 부분은 투과 직후의 초기 절대투수계수(K<sub>i</sub>)의 값들이고 위의 곡선은 시험이 끝났을 때의 종료 절대투수계수(K<sub>f</sub>) 값들이다. 유전상수가 작아짐에 따라서 K<sub>f</sub>와 K<sub>i</sub>의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이것으로 유기물의 유전상수가 작을수록 절대투수계수의 변화가 큰 것을 알 수 있다. 이 변화는 자연점토의 입자의 바깥에 위치한 분산이중층의 수축으로 인한 결과로 볼 수 있다. 물(유전상수 80)이 투과할 때의 절대투수계수 6.0×10<sup>-13</sup>cm<sup>2</sup>를 기준으로 에탄올(유전상수 25)이 투과할 때까지는 유전상수의 변화에 대해서 절대투수계수가 1.67배 증가하였다. 하지만 TCE(유전상수 3.4)가 투과했을 때는 9.67배 정도로 절대투수계수가 증가하였다. 이것으로부터 30이하의 유전상수에서는 투수계수의 증가율이 갑자기 커지는 경향을 알 수 있었다. Bowders와 Daniel<sup>2)</sup>은 유전상수가 40 이상에서는 투수계수에 거의 영향을 미치지

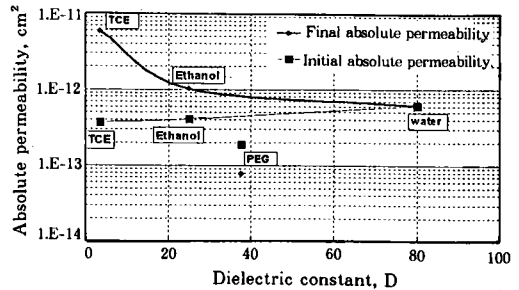


Fig. 8. Relationship between dielectric constant of permeants and absolute permeability of a natural clay

않으며 35이하에서 약간의 영향을 미친다고 발표하였는데 본 연구의 결과도 비슷한 경향을 보여주었다.

PEG는 Ethanol, TCE의 경향을 벗어나는 결과를 보였주었는데 이는 유전상수의 차이에 의한 분산이중층의 변화로 투수성이 변한 것이 아니고 높은 동수경사로 인한 수리적인 압밀(hydroconsolidation)과 clogging 효과 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 9는 투수계수비와 유전상수비 사이의 관계를 나타낸 것으로 유전상수비(물의 유전상수에 대한 투과물의 유전상수비, D<sub>p</sub>/D<sub>w</sub>)가 증가함에 따라서 투수계수비(물의 절대투수에 대한 투과물의 투수계수비(K<sub>p</sub>/K<sub>w</sub>)가 감소하는 경향이 있음을 보여주고 있다. 특히 TCE에서 Ethanol 사이의 낮은 유전상수비에서 감소하는 경향이 더 큼을 알 수 있다. Fig. 10

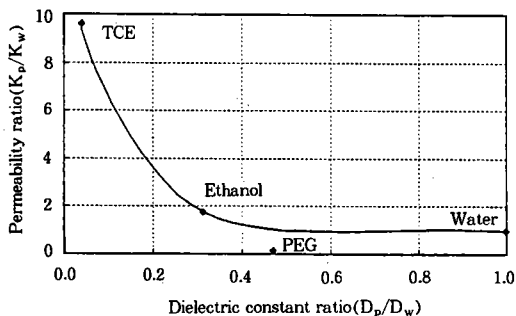


Fig. 9. Permeability ratio ( $K_p/K_w$ ) vs. dielectric constant ratio ( $D_p/D_w$ )

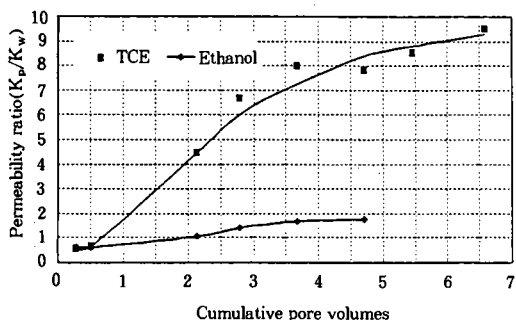


Fig. 10. Pore volume vs. permeability ratios ( $K_p/K_w$ )

은 TCE와 Ethanol에 대한 투과공극부피와 투수계수비의 관계를 보여준다. 공극부피가 증가하면 투수계수비는 증가함을 알 수 있으며 임의의 투과 공극비를 지나면 일정한 투수계수비로 수렴하는 특성을 보인다. TCE는 Ethanol보다 투수계수비의 변화가 크며 이것은 유전상수의 차이에 의해 분산이중층에 미치는 영향이 더 크기 때문인 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 매립지의 라이너 재료로서 자연점토를 사용할 때 유기물에 따른 투수성의 변화를 알아보기 위하여 강성벽 투수시험기의 단점을 개량하여 만든 수정 강성벽 투수시험기를 사용하였다. 공시체 제작은 투수물

드에서 자연점토를 표준다짐에너지로 다지며 함수비는 최적함수비의 습윤층 3%에서 물로 다진 후 물, 에탄올, TCE는 동수경사 130/1, PEG는 동수경사 300/1으로 투수시험을 하여 흙과 유기물의 조합에서 유전상수에 의한 반응으로 인한 절대투수계수의 변화를 비교, 검토하였다.

본 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 자연점토에 물을 투과시켰을 경우 투과공극부피의 변화에 상관없이 일정한 절대투수계수값을 나타내는 것으로 보아 물은 자연점토의 분산이중층에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

2. 유전상수가 물보다 작은 에탄올과 TCE를 투과시켰을 때는 절대투수계수가 변화하는 양상을 볼 수 있었는데 물에 비교해서 TCE는 9.67배, 에탄올은 1.67배 정도로 절대투수계수가 커졌다.

3. PEG는 절대투수계수가 감소하는 경향을 보였는데 이것은 높은 점성을 가진 PEG의 투수시험의 시간을 단축하기 위해서 에탄올이나 TCE 보다 큰 300/1의 동수경사로 인한 수리적 압밀(hydroconsolidation)현상과 clogging 현상 때문인 것으로 사료된다.

4. 유기물의 유전상수가 작을수록 유기물에 의한 자연점토의 절대투수계수의 변화가 크다. 유기물에 의한 절대투수계수의 증가는 자연점토의 입자의 흠착수층의 외측에 있는 분산이중층이 수축하기 때문에 생긴 공극의 확대에 의한 결과로 볼 수 있다.

5. 유전상수와 절대투수계수의 관계는 반비례하는 결과를 보였다. 즉, 유전상수가 40이상인 경우에 절대투수계수의 변화가 작았으나 특히, 30이하의 유전상수에서는 절대투수계수의 증가율이 갑자기 커지는 경향을 볼 수 있었다.

6. 에탄올, TCE에 대한 투수계수 및 절대투수계수의 변화는 투과공극부피가 3.5이상인

경우에 투과되면 일정한 값으로 수렴하였다. 이때 자연점토의 내부에서 점토와 유기물의 반응은 투과공극부피가 3.5정도에서 분산이중층의 수축으로 인한 공극의 증가반응은 더 이상 일어나지 않는 안정상태에 이르는 것을 알 수 있다.

이 논문은 1995년도 한국과학재단의 목적기초연구과제 연구비에 의하여 연구 되었음

### 참 고 문 헌

1. Bagchi, A., 1990, Design, construction and monitoring of sanitary landfill, John Wiley & Sons.
2. Bowders, J. J., & D. E. Daniel, 1987, Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals, J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 113, No.12, pp. 1432-1448.
3. Broderick, G. P. and D. E. Daniel, 1990, Stabilizing compacted clay against chemical attack, J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 116, No.10, pp. 1549-1567.
4. Budhu, M., R. F. Giese, G. Campbell & L. Baumagass, 1991, The permeability of soils with organic fluids, Can. Geotech. J., Vol. 28, pp. 140-147.
5. Fernandez, F. & R. M. Quigley, 1985, Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple hydrocarbon, Can. Geotech. J., Vol. 22, pp. 205-214.
6. Foreman, D. E. & D. E. Daniel, 1986, Permeation of compacted clay with organic chemicals, J. of Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol 112, No.7, pp. 669-681.
7. Mesri, G., and R. E. Olson, 1971, Mechanisms controlling the permeability of clays, Clay and clay minerals, pp. 151-158.
8. Das, B. M., Principles of geotechnical engineering, 구미서관.
9. Lambe, T. W. & R. V. Whitman, 1969, Soil Mechanics, John Wiley & Sons.
10. 강병희, 장경수, 1995, 해성점토의 투수성에 대한 폐기물 침출수의 영향, 韓國地盤工學會誌 第11권 3호, pp. 37-42.
11. 손준익, 정하익, 장연수, 1992, 폐기물 매립장을 위한 혼합 차수재의 물성에 관한 연구, 韓國地盤工學會誌 제8권 제3호, pp. 51-60.
12. 정하익, 장연수, 1993, 폐기물 매립장의 차폐재와 침출 화학성분과의 상호작용 분석, 韓國地盤工學會誌 제9권 제3호, pp. 49-60.

(접수일자 : 1997년 5월 6일)