

폐기물매립장에서 다짐에너지와 팽윤도에 의한  
토양-벤토나이트 혼합토의 투수계수 특성에 관한 연구

이종민·이재영\*

상원 EnC · \*서울시립대학교 환경공학부

**A Study on Characteristics of Hydraulic Conductivity in the Soil-Bentonite  
Mixed Soils with Compaction Energy and Swelling in the Landfill**

**Jong-Min Lee · Jai-Young Lee\***

*Sangwon EnC*

*\*Dept. of Environmental Eng., University of Seoul*

**ABSTRACT**

A barrier liner system is placed at the bottom and side slope in landfill to protect a leaking of leachate that the hydraulic conductivity of this system should be less than  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec.

In this study, the soil-bentonite mixture for the bottom liner system was evaluated in two point of views ; changing characteristics of the hydraulic conductivity according to the different mixing ratio of soil-bentonite with the effect of bentonite swelling and the difference method (A & D type) of compaction on the hydraulic conductivity.

As the results, maximum dry density ( $\gamma_{dmax}$ ) of SC group mixture was higher than of CL group mixture. However, the result of optimum moisture contents (OMC) of both groups were the contrary. In case of  $\gamma_{dmax}$  by different compaction method, D type was higher than A. But the OMC were the contrary.

The difference of  $\gamma_{dmax}$  according to the compaction energy, "SC" group mixture was higher than the "CL" group. In case of OMC of "CL" group was higher than "SC" group. The effecting of swelling was a little bit different on the two factors.

According to the result of compaction test, the use of site soil only could not meet the criteria on hydraulic conductivity, but could find a solution for the mixing ratio of bentonite mixture were satisfied to the standard of barrier.

The increased in bentonite mixing ratio and degree of swelling, the values of hydraulic conductivity were decreased. Especially the "CL" group with "D" type compaction measured the lowest value with the same conditions. Also, the bentonite mixing ratio has more influenced on the hydraulic conductivity compare with swelling effect. The "SC" group mixture with "A" type compaction got a big difference from others.

The evaluation of economic for the construction cost on the two cases, the lower bentonite mixing ratio of soil-bentonite mixed soil is more economically because of bentonite cost.

**Key words** : landfill, bentonite, swelling, maximum dry density, compaction, optimum moisture contents, hydraulic conductivity

## 요약문

폐기물 매립장에는 발생하는 침출수의 유출을 방지하기 위하여 매립장의 바닥 또는 측면에 투수계수가  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec이하인 차수재를 설치한다.

본 연구는 폐기물 매립장 차수재인 토양-벤토나이트 차수재(혼합토)를 대상으로 하여 현장토의 토성에 따른 벤토나이트의 배합비와 투수계수의 특성을 파악하고 벤토나이트의 팽윤도 및 다짐방법이 차수층의 투수특성에 미치는 영향을 파악하였다.

연구결과 동일조건에서 최대건조밀도는 SC계열의 혼합토가 CL계열의 혼합토보다 높게 나타났고, 최적함수비는 그 반대의 경향을 나타냈으며, 다짐방법별로는 최대건조밀도의 경우 D다짐시가 높게 나타났고, 최적함수비는 A다짐시의 경우가 높게 나타났다.

다짐에너지에 따른 최대건조밀도의 차이는 SC계열의 혼합토가 더 큰 것으로 나타났고, 최적함수비의 경우는 CL계열의 혼합토가 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타났으며 팽윤도에 따른 최대건조밀도 및 최적함수비의 차이는 미미하였다.

벤토나이트의 배합비 및 팽윤도가 증가함에 따라 투수계수는 낮은 값을 나타내었고 동일조건에서는 CL계열의 혼합토와 D다짐시 낮은 투수계수를 나타내었다. 그러나 투수계수는 팽윤도보다는 벤토나이트의 배합량에 의해 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났고 동일조건에서 SC계열의 혼합토와 A다짐시 더 큰 차이를 나타내었다.

투수시험결과에 따른 시공시 경제성을 검토한 결과 팽윤도가 낮은 벤토나이트를 배합한 경우가 더 경제적인 것으로 나타났는데 이는 팽윤도별 재료단가의 큰 차이에 비해 투수계수 감소효과가 기대에 미치지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

**주제어** : 매립장, 벤토나이트, 팽윤도, 최대건조밀도, 최적함수비, 다짐, 투수계수

## 1. 서론

최근 급격한 경제성장과 인구의 증가에 의해 폐기물의 발생량이 크게 증가하고 있어 이들의 처리문제가 국가적인 당면과제로 등장하였다. 특히 우리나라는 발

생된 생활폐기물의 약 52%(1999년도 기준)를 매립에 의존하고 있는 실정으로서 폐기물 매립장의 설치 및 유지관리는 중요한 관심사항이 되고 있다.

폐기물 매립장에는 발생하는 침출수의 유출을 방지하기 위하여 매립장의 바닥 또는 측면에 차수재를 설

치하는데 국내의 폐기물관리법에 의하면 관리형 매립 시설의 경우 점토·점토광물혼합토 등 점토류 라이너, 고밀도폴리에틸렌 또는 이에 준하는 재질의 토목합성 수지라이너를 사용하여 차수시설을 설치하며 이때 점토류 라이너의 투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하가 되도록 설치하거나 이와 동등한 차수효과를 가진 차수시설을 설치하도록 규정하고 있다.

그러나, 투수계수가  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  이하를 만족하는 양질의 점토를 구하는 것은 쉽지 않고 경제성면에서도 타당하지 않으므로 현장주변의 흙과 벤토나이트를 혼합한 흙-벤토나이트 혼합토로 차수층을 시공하여 투수계수를 저감시키는 방법이 많이 적용되고 있다.

투수성 저감을 위해 혼합되는 벤토나이트는 물과 반응시 높은 부피팽창율을 가지고, 입자의 비표면적이 크며, 양이온치환능력(CEC)으로 인한 오염물질 차폐, 정화기능을 가지고 있어 매립장 차수재의 혼합재료로 널리 사용되고 있다.

본 연구는 폐기물 매립장 차수재인 흙-벤토나이트 차수재(혼합토)를 대상으로 하여 현장토의 토성에 따른 벤토나이트의 배합비와 투수계수의 특성을 파악하고 벤토나이트의 팽윤도 및 다짐방법이 차수층의 투수 특성에 미치는 영향을 파악하여 폐기물 매립장 차수층의 현장적용에 기초자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험개요

본 연구는 입도분포가 다른 토양과 팽윤도가 다른 벤토나이트를 배합하여 다짐방법에 따른 투수계수를 실험한 것으로 그 절차는 다음과 같다.

### 2.2 실험재료

#### 1) 현장토

본 시험에 사용된 현장토는 경기도 Y지역에서 채취하였으며 토성에 대한 기본 물성을 파악하기 위하여 한국공업규격의 규정에 준하여 비중, 자연함수비,

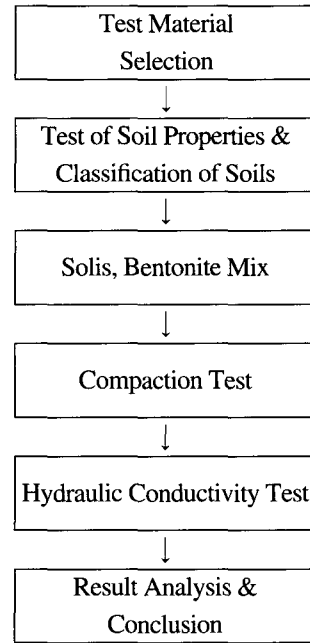


Fig. 1. Schematic Flow Chart of Test

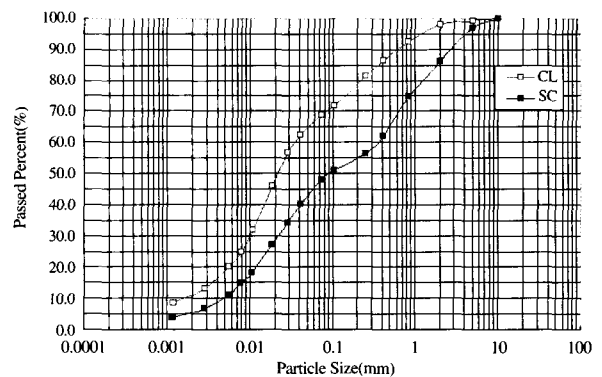


Fig. 2. Particle Size Distribution Curves of Soils

액·소성한계, 입도분석을 실시하여 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

토성시험결과 토양의 분류상 사질토계열(SC)과 점토계열(CL)로 구분되었으며 입도분석에 따른 입도분포곡선을 Fig. 2에 나타내었다.

#### 2) 벤토나이트

벤토나이트는 천연 점토광물로서 물속에서 자체 중

Table 1 The Physical Properties of Soils

Test Items	Test Contents	Soil 1	Soil 2	Remarks
Specific Gravity Test	Specific Gravity	2.674	2.696	
Natural Moisture Content Test	Moisture Content(%)	11.7	18.0	
Atterberg Limit Test	Liquid Limit (%)	36.4	44.0	
	Plastic Limit (%)	22.1	28.3	
	Plasticity Index (%)	14.3	15.7	PI=LL-PL
Particle Size Test	D10 (mm)	0.005	0.0018	
	D30 (mm)	0.022	0.010	
	D60 (mm)	0.370	0.033	
	Coefficient of Uniformity (Cu)	74.0	18.33	
	Coefficient of Curvature (Cc)	0.26	1.68	
	Maximum Particle Size(mm)	10	10	
	P10(%)	86.3	98.1	
	P40(%)	62.0	86.6	
	P200(%)	48.0	68.9	
	Classification of Soil	SC	CL	USCS

Table 2. The Chemical Composition of Bentonite

Chemical Components	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	NavO	K <sub>2</sub> O	others
Contents(%)	60.6	17.7	2.89	2.64	3.60	4.46	0.84	6.52

량의 몇 배가 되는 물을 흡수하는 특유의 분자구조를 가지고 있으며, 완전히 수화되었을 때 건조중량의 약 15배까지 팽창하는 성질이 있어 토양 속의 공극을 채움으로서 투수성을 아주 낮게 하고, 매립장의 차수층을 형성하여 하층의 일부를 분담하는 재료로 사용되고 있다.

벤토나이트는 스멕타이트(smectite)가 주성분이고 그 거동이 스멕타이트 광물의 특성에 지배받는 점토류를 말하며, 점토입자 표면의 치환가능한 이온의 종류에 따라 나트륨(Na)계, 칼슘(Ca)계 벤토나이트로 구분되는데 Na계 벤토나이트가 Ca계 벤토나이트보다 전단강도는 작으나, 오염물질 차폐재로서 필요한 팽창성과 투수계수 측면에서 월등히 우수하고 화학물질에 대한 재료의 내구성에서 동등한 성능을 보인다.

벤토나이트의 팽윤도는 2g의 시료가 증류수 100ml 내에서 팽창하는 용적을 나타내는 것으로, 팽윤도는

교환성 양이온의 종류, 입도분포, 결정의 내부구조, 공극의 크기 및 분포양상에 따라 크게 영향을 받는다.

따라서, 폐기물 매립장의 차수재로 사용되는 벤토나이트는 팽윤도가 높은 Na형 벤토나이트가 많이 사용된다.

본 시험에서는 국내 S사에서 제조된 Montmorillonite계통으로서 팽윤도가 10cc/2g, 20cc/2g, 30cc/2g로 서로 다른 3종류의 Na계 벤토나이트 제품을 사용하였다.

### 2.3 실험방법

#### 1) 다짐시험

토양의 다짐은 인위적으로 토양의 간극비를 감소시킴으로써 토양의 공학적특성을 개량하는 방법으로 다짐효과는 입도분포, 함수비등의 지반조건과 다짐장비

가 가진 다짐에너지의 영향을 받는다.

다짐시험은 시료에 함수비를 증가시키면서 다짐을 수행하여 건조밀도가 최대가 되는 함수비, 즉 최적함수비를 찾으며, 이를 위하여 함수비를 변화시키면서 다짐시험을 실시하여 함수비-건조밀도 관계곡선을 구하여 최대건조밀도와 이에 대응하는 최적함수비를 구한다.

본 실험에서는 토양-벤토나이트 혼합토에 대한 벤토나이트의 팽윤도별 함량변화에 따른 다짐특성을 분석하기 위하여 KS F 2312에 준한 다짐방법을 이용하였는데 이중 차수재의 재료로 쓰이는 토양의 입경이 19mm 이상은 곤란하므로 B, E다짐방법을 배제하고 대별될 수 있는 A, D 다짐방법을 선택하여 실험하였다.

2) 투수시험

토양-벤토나이트 혼합토의 투수계수를 측정하기 위하여 투수계수가 비교적 낮은 세립질의 시료(점성토)에 많이 이용되는 변수위투수시험기로 KS F 2322규정에 준하여 실시하였다.

변수위 투수시험용 공시체를 직경 10cm, 높이 10cm의 규격으로 제작하여 실험하였고 측정된 값의 평균값을 해당공시체의 투수계수로 산정하였으며 투수계수 산정식은 다음 식을 이용하였다.

$$k=2.3 \frac{aL}{A(t_2-t_1)} \frac{h_1}{h_2} \log \text{---} \quad \text{식-(1)}$$

- 여기서,  $k$  : 투수계수 (cm/sec)
- $a$  : 수위관의 단면적 (cm<sup>2</sup>)
- $L$  : 시료길이 (cm)
- $A$  : 시료 단면적 (cm<sup>2</sup>)
- $t$  : 시간 (sec)
- $h$  : 수위 (cm)

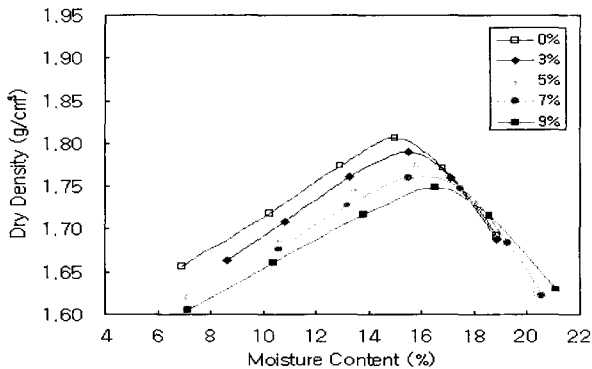
3. 실험결과 및 고찰

3.1 다짐시험결과

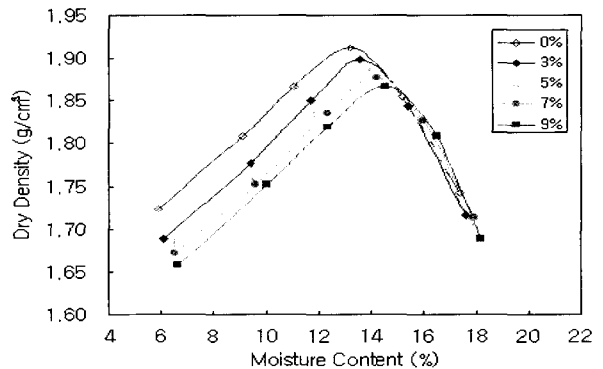
현장토에 각각의 팽윤도가 10, 20, 30cc/2g인 벤토나이트를 중량비 0, 3, 5, 7, 9%로 혼합한 후 각 혼합도별, 벤토나이트 팽윤도별로 A, D 다짐시험하여 건조밀도와 함수비의 관계를 나타내는 다짐곡선을 Fig. 3~Fig. 8에 나타내었고 이로부터 혼합토의 최대건조밀도( $\gamma_{dmax}$  : Maximum dry density)와 최적함수비(OMC : Optimum Moisture Content)를 결정하여 Table 3에 나타내었다.

다짐시험결과를 보면 동일조건에서 SC혼합토의 최대건조밀도는 CL혼합토보다 높게 나타났으며 최적함수비는 반대의 경향을 나타냈다.

또한, SC혼합토의 경우 동일한 조건에서 A, D다짐시 최대건조밀도는 0.106~0.117g/cm<sup>3</sup>정도 D다짐의 경우가 높게 나타났으며, 최적함수비는 1.8~2.9%정도 A다짐의 경우가 높게 나타났고, CL혼합토의 경우

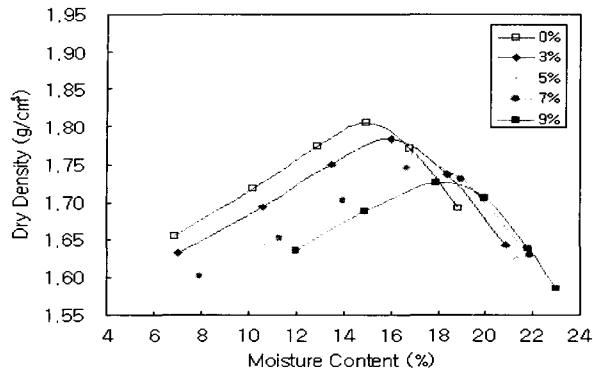


(a) A compaction

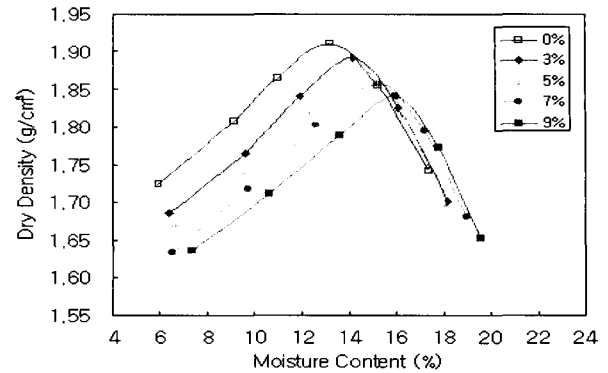


(b) D compaction

Fig. 3. Compaction Curve (SC + Bentonite(10cc/2g))

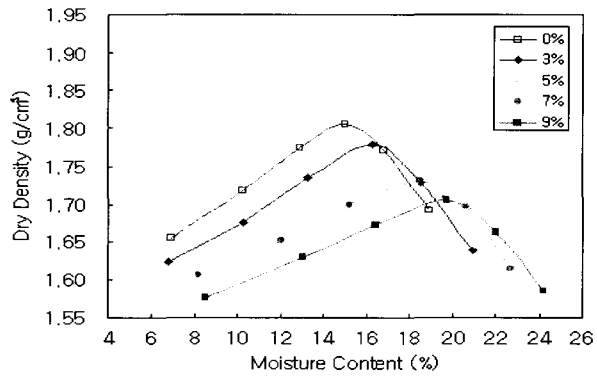


(a) A compaction

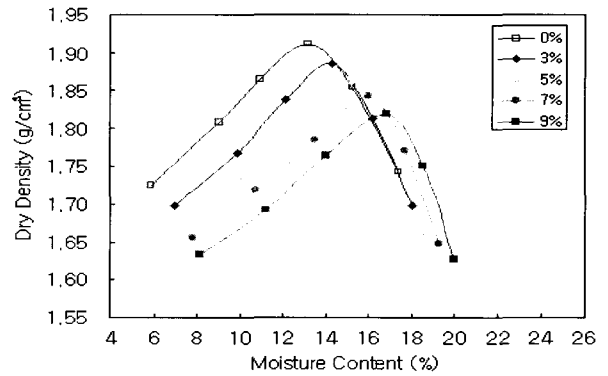


(b) D compaction

**Fig. 4. Compaction Curve(SC + Bentonite(20cc/2g))**

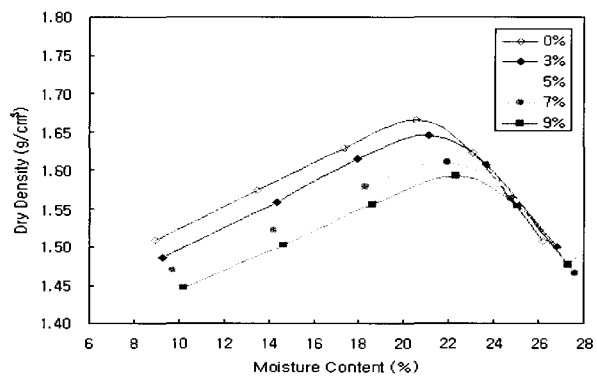


(a) A compaction

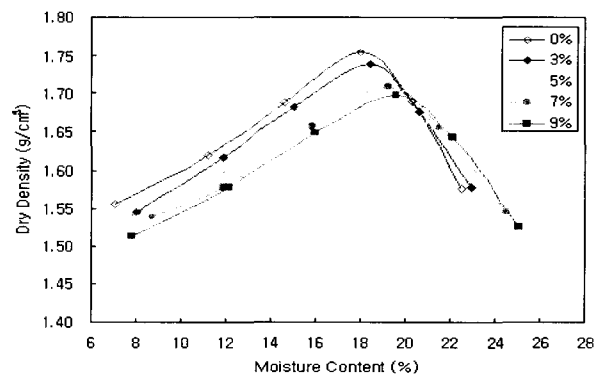


(b) D compaction

**Fig. 5. Compaction Curve(SC + Bentonite(30cc/2g))**

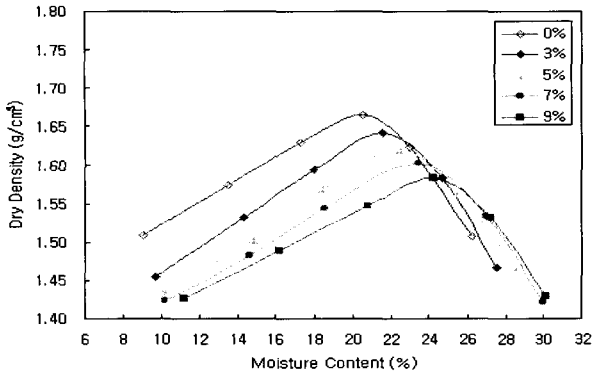


(a) A compaction

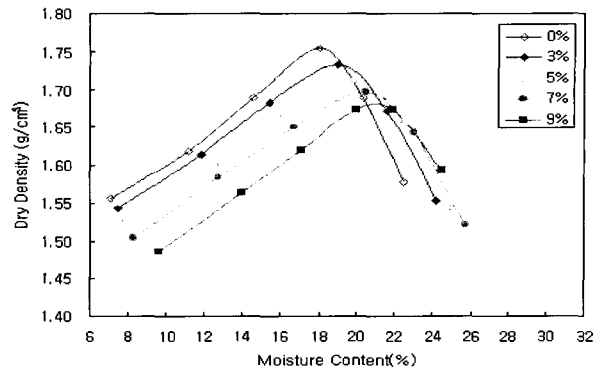


(b) D compaction

**Fig. 6. Compaction Curve(CL + Bentonite(10cc/2g))**

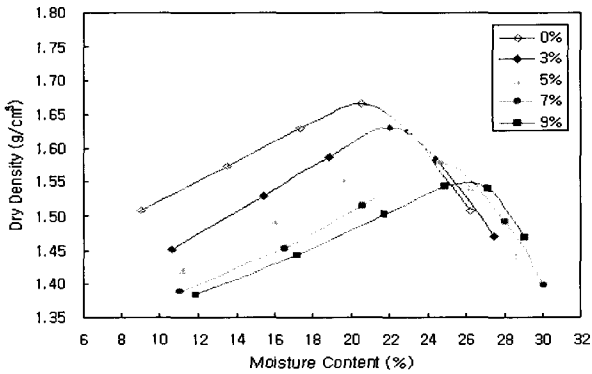


(a) A compaction

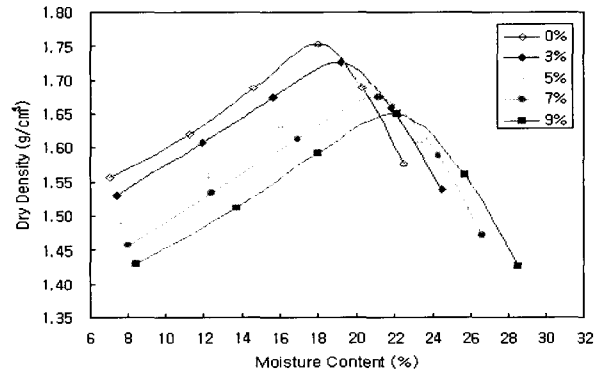


(b) D compaction

Fig. 7. Compaction Curve(CL + Bentonite(20cc/2g))



(a) A compaction



(b) D compaction

Fig. 8. Compaction Curve(CL + Bentonite(30cc/2g))

동일한 조건에서 A, D다짐시 최대건조밀도는 0.089~0.105g/cm³정도 D다짐의 경우가 높게 나타났으며, 최적함수비는 2.5~3.8%로 A다짐의 경우가 높게 나타나 SC혼합토가 CL혼합토보다 다짐도에 따른 최대건조밀도의 차이가 큰 것으로 나타났으며, 최적함수비의 차이는 CL혼합토가 더 큰 것으로 나타났다.

따라서, 상대적으로 SC혼합토가 최대건조밀도가 높고, 다짐곡선의 변화폭이 크며, CL혼합토가 최대건조밀도가 낮고, 다짐곡선의 변화폭도 작다는 것을 알 수 있으며 다짐에너지가 클수록 최대건조밀도가 크고 최적함수비는 낮으며 다짐곡선의 변화폭이 크다는 것을 알 수 있다.

다음에, 벤토나이트의 배합비에 따른 혼합토의 최대건조밀도변화를 살펴보면 벤토나이트의 배합비가 증가할수록 최대건조밀도는 감소함을 알 수 있는데 이는 현장토보다 비중이 작은 벤토나이트 첨가에 따른 혼합차수재의 상대적인 비중감소와 벤토나이트의 침수에 따른 부피팽창으로 인한 밀도감소 때문이다<sup>2,3</sup>.

여기서, 시료토양의 토성에 따른 최대건조밀도의 변화형태를 살펴보면 SC혼합토의 변화량이 CL혼합토의 변화량보다 A, D다짐시 모두 높게 나타났는데 이것은 SC의 입도분포가 CL의 입도분포보다 더 느슨하기 때문인 것으로 보인다.

또한, 벤토나이트의 팽윤도가 증가할수록 최대건조

Table 3. The Compaction Test Result

Classification	Bentonite Content (%)	Soil 1(SC)				Soil 2(CL)			
		$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )		OMC (%)		$\gamma_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )		OMC (%)	
		A	D	A	D	A	D	A	D
Swelling Index 10cc/2g	0	1.806	1.912	15.0	13.2	1.665	1.754	20.5	18.0
	3	1.790	1.899	15.5	13.6	1.645	1.738	21.1	18.5
	5	1.776	1.888	15.8	13.9	1.627	1.724	21.5	18.8
	7	1.765	1.877	16.1	14.2	1.610	1.710	21.9	19.2
	9	1.752	1.869	16.5	14.5	1.592	1.697	22.3	19.6
Swelling Index 20cc/2g	0	1.806	1.912	15.0	13.2	1.665	1.754	20.5	18.0
	3	1.784	1.891	16.0	14.2	1.641	1.733	21.6	19.0
	5	1.765	1.875	16.8	14.8	1.621	1.715	22.5	19.8
	7	1.747	1.858	17.6	15.3	1.602	1.696	23.4	20.5
	9	1.728	1.841	18.3	16.0	1.582	1.678	24.3	21.3
Swelling Index 30cc/2g	0	1.806	1.912	15.0	13.2	1.665	1.754	20.5	18.0
	3	1.779	1.886	16.3	14.3	1.631	1.727	22.0	19.2
	5	1.755	1.864	17.4	15.1	1.604	1.700	23.3	20.0
	7	1.730	1.842	18.5	16.0	1.578	1.675	24.7	21.2
	9	1.705	1.819	19.7	16.8	1.550	1.650	26.0	22.2

밀도는 감소폭이 커지는 것으로 나타났으나 동일조건에서 SC혼합토와 CL혼합토의 감소폭차이는 미미하였다.

한편, 벤토나이트의 첨가량에 따른 혼합토의 최적함수비 변화를 살펴보면 벤토나이트의 배합비가 증가할수록 최적함수비는 증가함을 알 수 있는데 이는 벤토나이트가 친수력이 크기 때문에 벤토나이트의 함량이 증가함에 따라 보유되는 물의 양이 많아지기 때문이다.<sup>2,3</sup>

여기서, 시료토양의 토성에 따른 최적함수비의 변화 형태를 살펴보면 CL혼합토의 변화량이 SC혼합토의 변화량보다 A다짐시는 5.5~6.3%, D다짐시는 4.8~5.4%정도 높게 나타났다.

또한, 벤토나이트의 팽윤도가 증가할수록 최적함수비는 증가폭이 커지는 것으로 나타났으나 동일조건에서 SC혼합토와 CL혼합토의 증가폭 차이는 미미하였다.

### 3.2 투수시험결과

#### 1) 현장토의 투수계수

변수위투수시험법에 의한 현장토(SC, CL)의 A, D다짐에 의한 투수시험결과를 Table 4.에 나타내었다.

그 결과 두 종류의 현장토중에 #200 통과율이 높고 입도분석결과에서 미립자가 더 많은 CL의 투수계수가 더 낮고 D다짐방법이 A다짐방법보다 더 낮은 투수계수를 나타내었으나 어떠한 경우라도 현장토만으로는 국내 폐기물관리법의 매립장 차수기준인 투수계수  $1 \times 10^{-7}$ cm/sec이하를 만족하지 못하였다.

#### 2) 벤토나이트 팽윤도별, 배합비별, 다짐방법별 투수시험

두 종류의 현장토(SC, CL)에 팽윤도가 다른 벤토나이트(10, 20, 30cc/2g)를 배합하여 시험한 다짐시험 결과로부터 최적함수비에서의 시험용 공시체를 제작하여 변수위투수법으로 투수시험을 하여 측정된 투수계수를 다음 Table 5에 나타내었다.

SC혼합토의 시험결과를 보면 A다짐시 10cc/2g의 팽윤도를 가진 벤토나이트를 배합하였을 때를 제외하



**Table 4. The Hydraulic Conductivity with Bentonite Swelling, Mixed ratio, Compaction method**

Classification	Bentonite Content (%)	Soil 1(SC)		Soil 2(CL)	
		Hydraulic Conductivity (cm/s)		Hydraulic Conductivity (cm/s)	
		A	D	A	D
Soil	0	$2.33 \times 10^{-6}$	$9.49 \times 10^{-7}$	$7.94 \times 10^{-7}$	$5.69 \times 10^{-7}$
Swelling Index 10cc/2g	3	$8.69 \times 10^{-7}$	$6.05 \times 10^{-7}$	$5.62 \times 10^{-7}$	$3.35 \times 10^{-7}$
	5	$5.26 \times 10^{-7}$	$2.93 \times 10^{-7}$	$3.05 \times 10^{-7}$	$1.35 \times 10^{-7}$
	7	$2.67 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.44 \times 10^{-7}$	$7.47 \times 10^{-8}$
	9	$1.21 \times 10^{-7}$	$7.22 \times 10^{-8}$	$8.68 \times 10^{-8}$	$5.04 \times 10^{-8}$
Swelling Index 20cc/2g	3	$7.27 \times 10^{-7}$	$5.32 \times 10^{-7}$	$4.09 \times 10^{-7}$	$2.55 \times 10^{-7}$
	5	$3.82 \times 10^{-7}$	$2.11 \times 10^{-7}$	$1.47 \times 10^{-7}$	$8.91 \times 10^{-8}$
	7	$1.41 \times 10^{-7}$	$9.20 \times 10^{-8}$	$7.34 \times 10^{-8}$	$4.92 \times 10^{-8}$
	9	$7.82 \times 10^{-8}$	$6.25 \times 10^{-8}$	$4.80 \times 10^{-8}$	$2.87 \times 10^{-8}$
Swelling Index 30cc/2g	3	$5.92 \times 10^{-7}$	$4.48 \times 10^{-7}$	$2.93 \times 10^{-7}$	$2.05 \times 10^{-7}$
	5	$2.49 \times 10^{-7}$	$1.69 \times 10^{-7}$	$8.55 \times 10^{-8}$	$7.10 \times 10^{-8}$
	7	$9.04 \times 10^{-8}$	$6.85 \times 10^{-8}$	$5.40 \times 10^{-8}$	$3.47 \times 10^{-8}$
	9	$6.11 \times 10^{-8}$	$4.76 \times 10^{-8}$	$3.43 \times 10^{-8}$	$1.86 \times 10^{-8}$

**Table 5. The Cost Comparison**

Classification	Swelling Index (cc/2g)	Compaction Method	Bentonite Content*(%)	Bentonite Cost
Soil 1(SC)	10	A	9.4	1.57
		D	7.5	1.34
	20	A	8.2	2.27
		D	6.9	2.04
	30	A	6.8	2.82
		D	6.2	2.74
Soil 2(CL)	10	A	8.6	1.31
		D	6.1	1.0
	20	A	6.1	1.57
		D	4.8	1.31
	30	A	4.8	1.84
		D	4.5	1.84

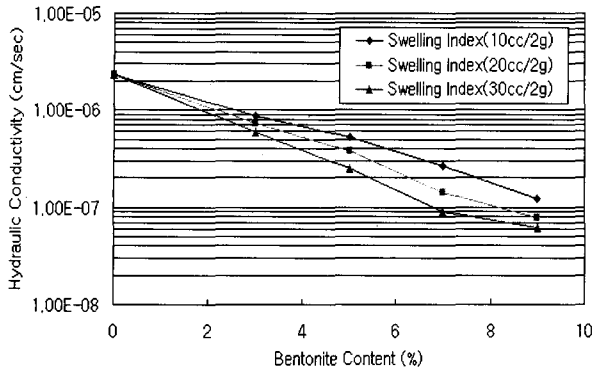
\* Calculation on Hydraulic Conductivity Curve( $1 \times 10^{-7}$ cm/sec)

고는 20cc/2g인 경우에는 9%, 30cc/2g인 경우에는 7%에서  $1 \times 10^{-7}$ cm/sec이하의 투수계수를 만족하였다.

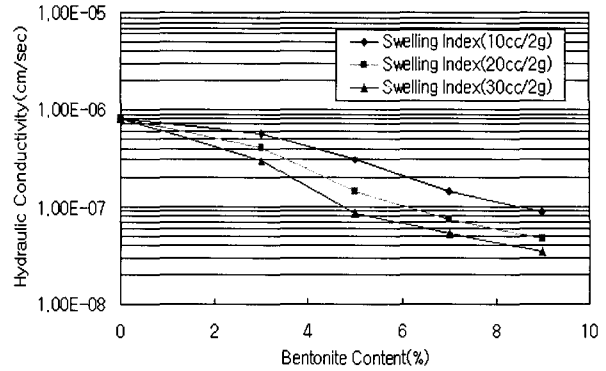
또한 D다짐시에는 10cc/2g의 팽윤도를 가진 벤토나이트를 배합하였을 때에는 9%, 20cc/2g인 경우에는

7%, 30cc/2g인 경우에도 7%에서  $1 \times 10^{-7}$ cm/sec이하의 투수계수를 만족하였다.

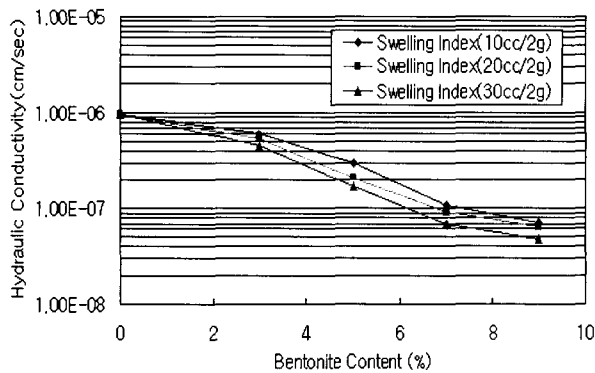
한편 CL혼합토의 시험결과를 보면 A다짐시 10cc/2g의 팽윤도를 가진 벤토나이트를 배합하였을 때



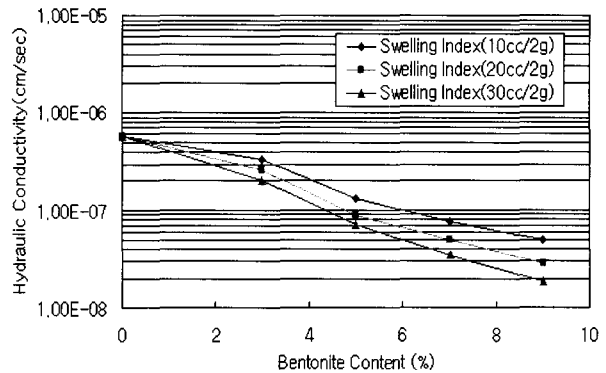
(a) A compaction



(a) A compaction



(b) D compaction



(b) D compaction

**Fig. 9. Hydraulic Conductivity Curve(SC + Bentonite)**

에는 9%, 20cc/2g인 경우에는 7%, 30cc/2g인 경우에는 5%에서  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec이하의 투수계수를 만족하였다.

또한 D다짐시에는 10cc/2g의 팽윤도를 가진 벤토나이트를 배합하였을 때 7%, 20cc/2g인 경우에는 5%, 30cc/2g인 경우에도 5%에서  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec의 투수계수를 만족하고 있었다.

상기 시험결과를 살펴보면 먼저 벤토나이트 배합량이 증가함에 따라 투수계수가 감소함을 알 수 있는데 이는 벤토나이트가 물과 만나게 되면 부피가 팽창하기 때문이며<sup>3, 4</sup>, 팽윤도가 높은 벤토나이트를 사용할 때 투수계수가 감소하는 것은 벤토나이트의 팽창정도가 클수록 공시체내의 공극폐쇄 현상이 커져서 차수층의 투수계수를 감소시킨다는 것을 의미한다.

**Fig. 10. Hydraulic Conductivity Curve(CL + Bentonite)**

또한 D다짐방법으로 다짐한 경우에 더 낮은 투수계수를 나타내는데 이는 다짐에너지가 공시체내부의 공극을 제거하여 차수층의 투수계수를 낮추는 역할을 하는데 있어 A다짐방법보다 D다짐방법의 다짐에너지가 더 크기 때문인 것으로 사료된다.

3) 경제성 검토

투수시험의 결과를 토대로 재료비의 차이에 의한 시공시 경제성을 개략적으로 검토해 보았다.

검토 항목중 다짐에너지차이에 따른 시공단가의 차이는 미미한 것으로 조사되어 배제하였고 벤토나이트의 팽윤도 종류별 재료비의 관점에서만 비교검토해 보았다.

경제성에 대한 검토결과 SC와 CL의 경우 모두 팽

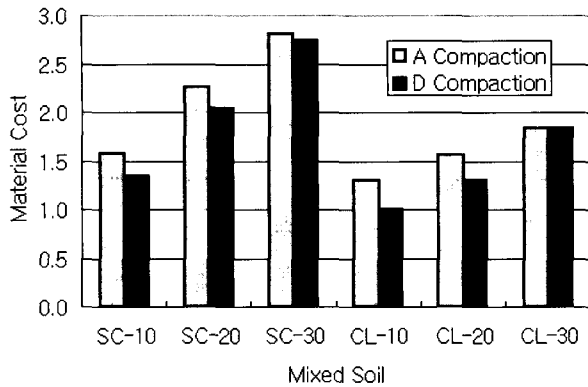


Fig. 11. The Cost Comparison

윤도가 10cc/2g인 벤토나이트를 사용하여 D다짐한 차수재가 가장 경제적이고, 30 cc/2g을 사용하여 A다짐한 차수재가 가장 비경제적인 것으로 나타났으며 토양 종류중에는 같은 재료와 다짐방법을 사용한 경우 CL이 더 경제적인 것으로 검토되었다.

따라서, 투수계수를 저감시키기 위하여 단순히 재료비가 비싼 팽윤도의 벤토나이트를 배합하는 것은 비경제적으로써 적정 팽윤도의 벤토나이트를 실내시험을 통해 배합후 현장에 적용하는 것이 경제적인 시공방안이 될 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

폐기물 매립장에서 침출수의 차수에 사용되는 토양-벤토나이트 혼합토에 대하여 토성에 따라 벤토나이트의 팽윤도, 배합비를 변화시키고 다짐방법을 달리하여 최대건조밀도, 최적함수비와 투수계수의 변화특성을 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다짐시험결과 동일조건에서 최대건조밀도는 SC혼합토가 CL혼합토보다 높게 나타났고, 최적함수비는 반대의 경향을 나타냈다.
2. SC혼합토와 CL혼합토 모두 동일한 조건에서 A, D다짐시 최대건조밀도는 D다짐의 경우가 높게 나타났고, 최적함수비는 A다짐의 경우가 높게 나타났다.
3. 다짐에너지에 따른 최대건조밀도의 차이는 SC혼

합토가 더 큰 것으로 나타났고, 최적함수비의 경우는 CL혼합토가 더 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

4. 팽윤도에 따른 SC혼합토와 CL혼합토의 최대건조밀도 및 최적함수비 차이는 미미하였다.
5. 투수시험결과 현장토 자체로서는 매립장 차수재의 투수계수 기준인  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하를 만족하지 못하였으나 SC혼합토의 경우 벤토나이트 팽윤도 10cc/2g에서는 배합비 9%로 D다짐시, 20cc/2g에서는 배합비 9%로 A다짐시, 배합비 7%로 D다짐시, 30cc/2g에서는 배합비 7%로 A, D다짐시 차수기준을 만족하였다.  
또한, CL혼합토의 경우 벤토나이트 팽윤도 10cc/2g에서는 배합비 9%로 A다짐시, 배합비 7%로 D다짐시, 20cc/2g에서는 배합비 7%로 A다짐시, 배합비 5%로 D다짐시, 30cc/2g에서는 배합비 5%로 A, D다짐시 차수기준을 만족하였다.
6. 벤토나이트의 배합비 및 팽윤도가 증가함에 따라 투수계수는 낮은 값을 나타내었고 동일조건에서는 CL혼합토와 D다짐시 낮은 투수계수를 나타내었다.  
그러나 투수계수는 팽윤도보다는 벤토나이트의 배합량에 의해 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났고 동일조건에서 SC혼합토와 A다짐시 더 큰 차이를 나타내었다.
7. 투수시험결과에 따른 시공시 경제성을 검토한 결과 팽윤도가 낮은 벤토나이트를 배합한 경우가 더 경제적인 것으로 나타났는데 이는 팽윤도별 재료단가의 큰 차이에 비해 투수계수 감소효과가 기대에 미치지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

이러한 결과로 판단할 때 차수재의 현장적용시 실내시험을 통해 적정 팽윤도 및 배합비를 산정하고 적합한 다짐방법을 선정함으로써 시공비를 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 최대호, 토질역학, 형설출판사
2. 폐기물 매립시설의 설계·시공 기술에 관한 연구,  
한국건설기술연구원, (1998)
3. 폐기물 매립지 차수재 개발, 한국건설기술연구원,  
(1995)
4. Daniel, D.E., Geotechnical Practice for Waste Disposal,  
pp137-160(1995)
5. Das, B.M., "Principles of Geotechnical Engineering",  
pp67(1994)

〈원고접수일 : 2001. 11. 1〉