

# 불포화 점성토의 체적변화에 대한 연구

## A Study on the Volume Change in Unsaturated Clayey Soil

장 병 옥\* · 길 상 춘\*  
Chang, Pyoung Wuck · Gil, Sang Choon

### Abstract

This study was performed to evaluate the characteristics of volume change in unsaturated clayey soil. The medium-plastic clay was selected and compacted by 50% of Proctor standard compaction energy at 6% higher moisture content than its OMC. A series of isotropic compression tests and triaxial shear tests were performed.

The results of the study are summarized as follows. At each matric suction, when the matric suction was increased, the yield stress was increased and slope of volume change was decreased. The more net mean stress was, the less the quantity of volume change was. In shear test, the volumetric strain was much rapidly changed in large matric than in low matric suctions. But the effect of matric suction to volume change disappeared under high net mean stress. At lower deviator stress the more matric suction was, the higher volume change was. But As the matric suction was increasing, the behavior of the unsaturated clayey soil was similar to that of saturated clayey soil. Volume change in the unsaturated clayey soil can be represented as a unique plane in three-dimensional space, which is the axes of net mean stress, matric suction and void ratio.

### I. 서 론

흙을 대상으로 하는 여러 구조물에 대한 공학적인 접근은 그 흙에 대한 토질역학적인 성질을 정확히 이해하고 접근하는 것이 중요하다. 그러나 현재 사용하고 있는 각종 토질실험기구나 토질역학적인 성질 등은 포화토를 기준으로 사용되고 있어 불포화토에 대해 일반적으로 과다하게 적용되는 경우가 많다.

불포화토가 포화토와 구별되는 가장 큰 특징은

물을 흡수하려는 성질이다. 이는 공극 사이의 모세관현상, 염분, 화학물질 등의 농도 차에 의하여 발생하는데 이러한 힘에 의해 불포화토는 포화토와 다른 거동을 보이게 된다. 물을 흡수하려는 능력을 전흡인력(total suction)이라고 하며, 전흡인력은 공극 공기압과 공극수압의 차이에 의한 모관압인 흡인력(matric suction)과 염분이나 화학물질의 농도 차에 의해 발생하는 삼투압(osmotic suction)으로 구성된다.

불포화토의 체적변화는 흙 내부의 수분의 증가

\* 서울대학교 농업생명과학대학

키워드 : 불포화토, 간극비, 흡인력, 축변환기법, 순평균응력, 체적변화

또는 감소, 구속응력의 크기, 흙의 종류 등과 관련이 있다.

본 연구의 목적은 불포화 점성토의 함수비에 따른 흡인력의 변화, 축압의 증감에 따른 체적변화, 흡인력의 증감에 따른 체적변화, 전단시의 체적변화 등 축압과 흡인력을 변수로 할 때의 불포화 점성토의 체적변화 특성을 연구하는 것이다.

## II. 시료 및 시험방법

### 1. 시 료

본 시험에 사용된 시료는 통일분류법 상으로 중간소성의 무기질 점토시료이다. 시료의 물리적 성질은 Table 1과 같고 시료의 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. Table 1에서 최대건조밀도와 최적함수비는 Proctor 표준다짐의 50% 다짐에너지로 다짐할 때의 값이다.

Table 1. Physical properties of the soil tested

Gs	LL (%)	PL (%)	PI	Maximum dry density(g/cm <sup>3</sup> )	OMC (%)	U.S.C.S.
2.65	44	20.0	24	1.47	26.0	CL-CH

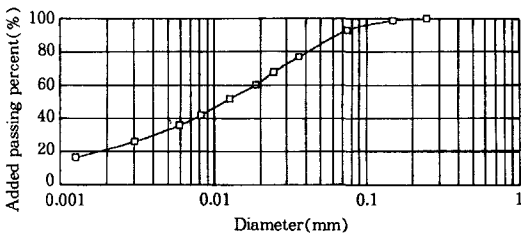


Fig. 1. Grain size distribution

### 2. 공시체의 성형

본 실험에서는 균등한 상태의 공시체를 제작하기 위하여 다음과 같은 방법을 사용하였다. 공시체는 자연건조 또는 건조기에서 건조한 시료에서 적당량을 계량하여 최적함수비보다 약 6% 습윤한 상태가 되도록 증류수를 가하면서 혼합하여 조제된 시료를 습포로 싸서 약 24시간 동안 방

Table 2. Initial conditions of samples tested

Specimen no.	Initial conditions			
	$r_d(t/m^3)$	$w(\%)$	$e_0$	$S_r(\%)$
Sn-1	1.375	32.27	0.891	94.12
Sn-2	1.380	31.82	0.884	93.63
Sn-3	1.378	31.90	0.887	93.50
Sn-4	1.366	32.28	0.904	92.87
Sn-5	1.370	32.22	0.893	93.85
Sn-6	1.394	30.11	0.865	91.06
Sn-7	1.373	31.42	0.894	91.38

치하여 물과 입자가 평형상태에 이르도록 한 후, 몰드(H=37.5mm,  $\phi=35$ mm)에서 Proctor 표준다짐에너지의 50%로 다져 가능한 한 균등한 상태의 공시체를 제작하였다. Proctor 표준다짐의 50%로 다지는 이유는 단위중량을 낮춤으로서 평형상태 도달을 용이하게 하고, 흡인력의 재현 범위를 높이기 위함이다. 다진 공시체의 건조밀도( $r_d$ ), 초기함수비( $w$ ), 공극비( $e_0$ ) 및 포화도( $S_r$ )는 Table 2 와 같다.

### 3. 시험방법

체적변화 영향인자에 따른 체적변화 양상을 파악하기 위해서는 함수비와 포화도 및 흡인력의 측정이 필요하다. 이를 위하여 삼축압축시험기를 개조하여 사용하였으며 공시체의 체적변화량 및 공극수의 유출입량을 측정하기 위해서 Fig. 2와 같은 체적변화측정장치를 사용하였다.

Fig. 3(a)는 개조한 삼축압축셀을 나타내며,

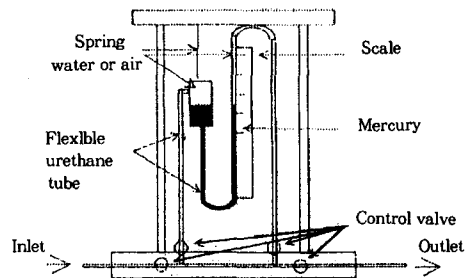


Fig. 2. An apparatus of measurement of volume change

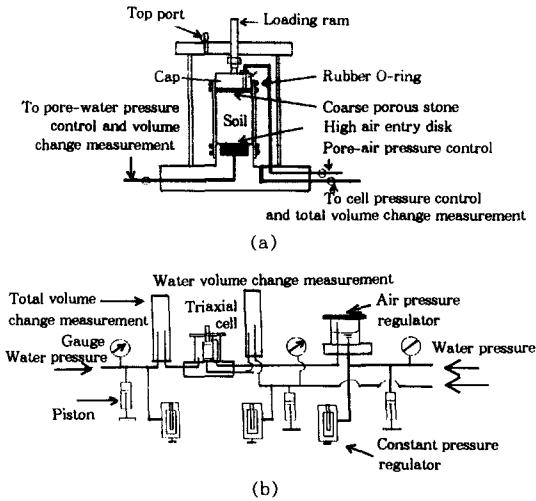


Fig. 3. Modified triaxial Compression apparatus. (a) Modified triaxial cell. (b) Schematic diagram of modified triaxial compression apparatus

Fig. 3(b)는 개조된 삼축압축시험기구의 모식도이다.

본 실험에서는 소정의 흡인력을 재현하기 위하여 축변환기법(axis translation technique)을 사용하였다. 축변환기법은 공기압과 공극수압의 사이에서 경계역할을 하는 고압공기투과판(high air entry ceramic disk)의 성질을 이용하여 흡인력을 재현시키는데, 고압공기투과판은 일단 포화되면 제조 당시에 조절된 공기투과압(air entry value)에 해당되는 공기압까지 공기의 투과를 막고 물만을 통과시키는 성질을 가지고 있기 때문에 흡인력의 재현이 가능하다.

본 실험에서는 공기투과압이 약 1.5kgf/cm<sup>2</sup>인 것을 사용하였다.

체적변화에 대한 흡인력과 순평균응력의 영향을 파악하기 위하여 동일한 조건에서 제작된 여러 개의 공시체에 대해 축압과 흡인력을 달리하면서 다음과 같은 등방압축시험을 행하였다.

축압에 따른 체적변화양상을 파악하기 위하여 흡인력 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8kgf/cm<sup>2</sup> 각각에 대하여 순평균응력을 0.1~4.1kgf/cm<sup>2</sup> 범위에서

재하 및 제하를 시키며 공시체의 체적변화 및 공시체내부로의 물의 유출입량을 측정하였다.

흡인력에 따른 체적변화 양상을 파악하기 위하여 공극수압을 조절하여 흡인력의 범위를 변화시키며, 순평균응력 0.0, 0.1, 0.6, 1.6kgf/cm<sup>2</sup> 각각에 대하여 흡인력의 크기를 0.0~0.8kgf/cm<sup>2</sup> 범위에서 변화시키는 방법으로 실시하였다.

전단시의 체적변화를 파악하기 위하여 0.1, 0.6, 1.1kgf/cm<sup>2</sup>의 순축압에 대하여 흡인력을 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.8kgf/cm<sup>2</sup>인 상태로 재현시킨 후 전단시키면서 공시체의 체적변화량과 공시체 내부로의 물의 유출입량을 측정하였다.

### III. 시험결과 및 분석

#### 1. 초기상태 및 평형도달 시간

원하는 흡인력과 축압을 가하면 세라믹 디스크를 통해 서서히 물이 유출입하여 원하는 상태의 흡인력 상태에 도달한다. 이때의 시간을 평형상태도달시간이라 하며, 그 크기는 다짐시의 초기 함수비에 의한 흙의 구조, 다짐에너지, 흙의 종류 등에 의해 좌우된다. 공시체 내부로의 물의 유출입과 공시체 체적변화의 예를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 축압이 0.6kgf/cm<sup>2</sup>일 때 흡인력을 0.4kgf/cm<sup>2</sup>에서 0.7kgf/cm<sup>2</sup>으로 변화시킨 경우로서 평형도달시간은 약 4시간임을 보여주고 있으며, 또한 체적은 감소하고 물은 유출되고 있음을 보여주고 있다. 여기서 공시체 내부로부터의 공극수의 유입과 공시체의 압축을 정(+)으로 보았다.

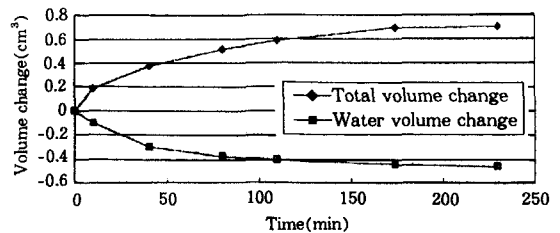


Fig. 4. Curves of volume changes versus time

**Table 3. Soil properties at initial equilibrium states**

Specimen no.	Suction (kgf/cm <sup>2</sup> )	Net mean stress	Initial conditions			
			$r_d$ (t/m <sup>3</sup> )	$w$ (%)	$e_0$	$S_r$ (%)
Sn-1	0.0	0.1	1.392	33.385	0.868	100.00
Sn-2	0.3	0.1	1.401	31.06	0.853	94.67
Sn-3	0.5	0.1	1.395	30.02	0.868	92.30
Sn-4	0.8	0.1	1.398	29.75	0.860	89.97
Sn-5	0.1	0.0	1.339	33.22	0.870	92.56
Sn-6	0.1	0.6	1.419	29.46	0.833	91.97
Sn-7	0.1	1.6	1.458	29.83	0.783	99.06

Table 3은 초기 평형상태에 도달한 공시체의 상태를 나타낸 것이다.

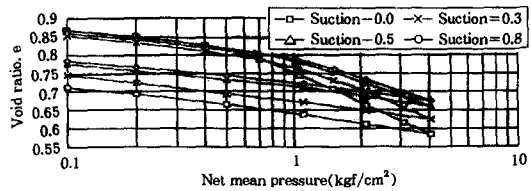
**2. 등방압축시험**

**가. 측압에 따른 체적변화**

Fig. 5는 흡인력의 영향을 고려하기 위해 각각의 흡인력에 대한 순평균응력과 공극비와의 관계를 e-log(p) 평면상에 나타낸 것이다. 흡인력에 상관없이 항복응력점 이전의 체적변화 기울기는 동일한 값을 보였으며 하중을 제거할 때의 체적변화 기울기와 같은 값을 나타냈다. 항복응력 이후의 기울기는 흡인력이 클수록 항복응력점이 커지고, 체적변화기울기는 작아지는 경향을 나타내었다. 실험에서 나타난 경향으로 보아 재현한 흡인력의 범위를 크게 할 경우 항복응력의 크기 증가는 뚜렷하게 나타날 것으로 예상된다. 흡인력의 증가에 따라 항복응력의 증가가 커지는 사실로부터 흡인력이 클수록 외부하중에 저항하는 힘

**Table 4. Slopes of loading and unloading and yield pressures**

Suction (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\lambda(s)$	k	Po (kgf/cm <sup>2</sup> )	Remarks
0.0	0.3890	0.0681	0.65	Saturated
0.3	0.3034	0.0548	0.86	Unsaturated
0.5	0.2881	0.0697	0.92	"
0.8	0.2668	0.0565	1.1	"



**Fig. 5. e-log(p) curves for different soil suctions**

이 크다는 것을 알 수 있다.

Table 4는 항복응력 이후의 재하시의 기울기( $\lambda$ ), 재하시의 기울기(p), 항복응력을  $P_0$ 라 할 때의 값을 나타낸 것이며, Fig. 5는 재하시의 기울기와 흡인력의 관계를 나타낸 것이다.

**나. 흡인력에 의한 체적변화**

Fig. 6은 시험결과를 e-log(p) 평면상에 나타낸 것이다. 초기의 공극비는 평형상태로 할 때의 순평균응력의 영향으로 각각 다르게 나타나고 있다. 측압이 클수록 동일한 흡인력의 변화에 대해 작은 체적변화량을 보이고 있는데 이는 측압이 크면 소정의 원하는 흡인력 상태로 평형시킬 때 압축되는 양이 많아지기 때문에 순평균응력이 작을 때 보다 흡인력의 변화에 대한 체적변화의 여지가 적기 때문인 것으로 생각된다.

순평균응력의 크기와는 상관없이 체적변화율이 변하는 점인 항복흡인력은 동일했는데 이는 순평균응력이 큰 상태에서도 항복흡인력이 변하지 않는 것을 의미한다.

측압에 의한 체적변화에서와 같이 흡인력에 의한 체적변화에서도 흡인력을 초기의 상태로 변화시켜도 회복되지 않는 소성변형 부분이 존재했다. 그 크기는 순평균응력이 클수록 작은 값을 나타냈는데 이는 하중을 많이 받고 있는 높은 흡인력의 변화에 대한 체적변화가 적음을 의미한다.

Table 5는 각각의 순평균응력에 대한 항복흡인력 이전의 기울기( $\lambda_s$ )와 항복흡인력 이후의 기울기( $k_s$ ) 및 항복흡인력의 값( $S_0$ )을 나타낸 것이다. 순평균응력이 증가할수록 항복흡인력 이후의 기울기가 감소함을 알 수 있다.

Table 5. Soil properties for change of suction

P (kgf/cm <sup>2</sup> )	$\lambda(s)$	$k_s$	$S_o$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
0.1	0.3966	0.02989	0.435
0.6	0.2759	0.02889	0.435
1.6	0.1207	0.02934	0.435

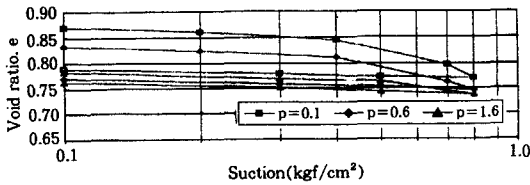


Fig. 6. Curves of void ratio changes versus suction

### 3. 전단에 따른 체적변화

흡인력의 여부와 상관없이 전단 시 뚜렷한 파괴점을 보이지는 않았으며 약 15%의 축변형률을 기준으로 축차응력을 산정하였다. 동일한 축압상태에서 흡인력이 증가하면 축차응력이 증가하였다. 축차응력이 증가할 때에도 축차응력의 크기는 증가하였다.

축압이 낮은 상태에서는 흡인력이 증가하면 체적변화가 증가하나, 축압이 어느 정도 커지면 흡인력에 의한 체적변화율의 증가는 없었다. 이는 축압이 증가할수록 평형상태 도달 과정 중에 공시체내부의 공기 압축 등 압축이 일어나기 때문에 전단 시에 내부공기의 압축에 의한 영향이 적기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7은 0.1kgf/cm<sup>2</sup>의 낮은 축압상태에서의 축변형률에 대한 축차응력과 전체체적변화율을 도시한 것이다. 흡인력이 증가할수록 체적변화율이 증가하였는데 이는 공시체 내부의 공기의 압축에 기인한 것으로 생각된다. 송(1994)에 의해 실험된 사질토에서와는 달리 점성토에 행한 본 실험에서는 낮은 축압상태에서 뚜렷한 다이러턴 시 현상은 나타나지 않았다.

Fig. 8은 순축압이 0.6kgf/cm<sup>2</sup>인 경우, 흡인력에 따른 축차응력과 체적변화율을 나타낸 것이다. 축압이 0.1kgf/cm<sup>2</sup>의 경우와는 달리 흡인력

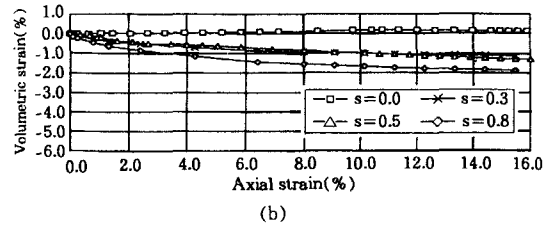
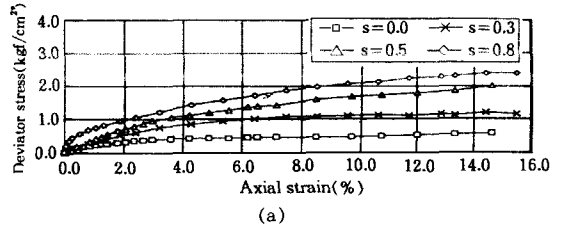


Fig. 7. Results of triaxial compression test for clay with different suctions at  $(\sigma_3 - U_a) = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$

(a) deviator stress versus axial strain  
(b) volumetric strain versus axial strain

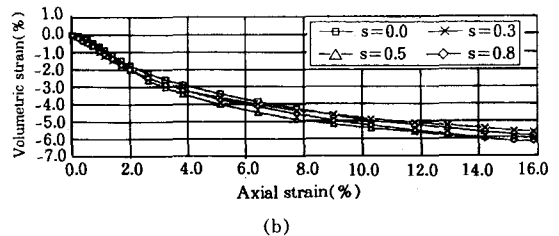
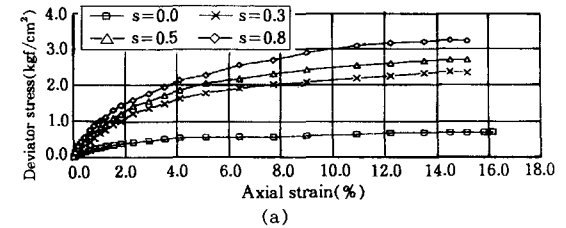
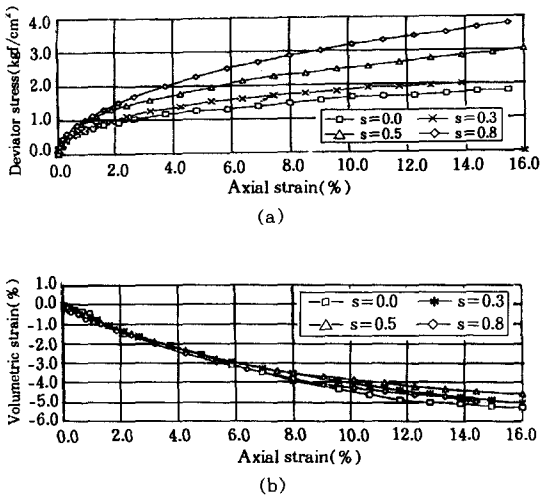


Fig. 8. Results of triaxial compression test for clay with different suctions at  $(\sigma_3 - U_a) = 0.6 \text{ kgf/cm}^2$

(a) deviator stress versus axial strain  
(b) volumetric strain versus axial strain

이 증가해도 체적변화율의 증가가 미소하였다. 이는 위에서 언급했듯이 압밀과정 중에서의 공극



**Fig. 9. Results of triaxial compression test for clay with different suctions at  $(\sigma_3 - U_a) = 1.1 \text{ kgf/cm}^2$**   
**(a) deviator stress versus axial strain**  
**(b) volumetric strain versus axial strain**

공기의 압축에 의한 것으로 생각된다.

Fig. 9는 순측압이  $1.1 \text{ kgf/cm}^2$ 인 경우의 축변형률에 대한 축차응력과 체적변화량을 보여주고 있다.

#### IV. 요약 및 결론

개조한 삼축압축시험기와 체적변화측정기를 사용하여 등방압축시험과 삼축압축시험을 행하여 불포화 점성토의 체적거동의 특성을 연구하였다. 공시체의 성형은 Proctor 표준다짐의 50%로 최적함수비에서 6% 습윤축으로 조제하였다. 흡입력 재현은 축변환기법을 사용했다.

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 흡입력이 클수록 항복응력이 증가하는 경향을 보였고, 항복흡입력은 흡입력의 변화와 상관없이 동일하였다. 체적변화는 축압에 의한 영향이 흡입력에 의한 영향보다 더 컸으며, 소성변형

이 일어나는 항복응력점 이후의 기울기는 흡입력이 클수록 작아져서 동일한 하중 재하에 대해 포화토보다 체적변화량이 적음을 알 수 있다.

2. 흡입력에 의한 체적변화는 순평균응력이 클수록 작아지는 경향을 나타냈다.

3. 낮은 축압상태에서는 흡입력이 클수록 체적변화량이 컸으나, 축압이 커지면 불포화토의 체적거동은 포화토의 거동과 뚜렷한 차이점은 없었다.

4. 순평균응력과 흡입력에 의한 체적거동을 공극비와 관련지어 나타낼 경우 공간상에서 구성평면을 얻을 수 있으며, 흙의 종류 및 상태 등에 따른 구성평면의 특성값 등을 구하면 흡입력 및 하중변화에 대한 불포화토의 체적거동 예측이 가능할 것으로 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa, 1990, A Constitutive Model for Partially Saturated Soil. *Geotechnique*, 40(3), pp.405-430.
2. Fredlund, D. G., 1977. Stress Variables for Unsaturated Soils. *J. of Geotech. Eng. Div., ASCE*, 103(GT5), pp.447-466.
3. Fredlund, D. G., and H. Rahardjo, 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York, John Wiley & Sons Inc.
4. Matyas, E. L. and H. S. Radhakrishna, 1968. Volume Change Characteristics of Partially Saturated Soils. *Geotechnique*, 18(4), pp.432-448.
5. 손영환, 1995, 불포화토의 재성형 방법과 압밀특성, 서울대학교 대학원 석사학위 논문
6. 송창섭, 1994, 불포화토의 거동 예측을 위한 구성식 개발, 서울대학교 대학원 박사학위 논문