

불포화토의 흡-수분 특성곡선에 관한 실험적 고찰

Experimental Study for Soil-Water Characteristic Curves of Unsaturated Soil

송창섭* · 김명환**

Song Chang Seob · Kim Myung Hwan

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the soil-water characteristic curves for an unsaturated soil. To this ends, a series of suction measured test was conducted on the selected 4 kinds of soils taken from different sites of Korea, using modified pressure plate apparatus.

Form the test results, the water contents, degree of saturation and volumetric water contents were analyzed with the suction. And the soil-water characteristic curves of unsaturated soil were drawn from the test results for various factors.

The characteristic curves drawn with water content vs matric suction were classified certainly the difference in wet side but were not classified in dry side. The characteristic curves drawn with degree of saturation vs matric suction for unsaturated soil were shown the opposite inclination as compared with the former curve. But the characteristic curve with volumetric water content vs matric suction was described suitably not only in wet side condition but also in dry side. And it was found that the volumetric water contents of loose soil was high at the initial condition but that of dense soil was high at final condition (dry side).

Keywords : Unsaturated soil, Matric suction, Volumetric water contents, Soil-water characteristic curve

I. 서 론

자연상태의 지반은 토립자와 간극으로 지반이 구성되어 있으며, 지하수위의 위치에 따라 포화영역

과 불포화영역으로 나누어진다. 불포화영역 지반의 간극 속에는 물과 공기가 존재하는데, 간극을 차지하는 물과 공기의 압력 차이, 표면장력과 확산이중층의 원리에 의해 모세관 현상과 흡착현상이 발생하며(Fredlund et al, 1993), 이러한 원인으로 불포화영역에는 부(-)의 간극수압이 유발하게 된다. 이 때의 부간극수압은 물을 흡수하려는 능력으로 지반의 유효응력을 증가시키는 역할을 한다(Chandler et al, 1986). 따라서 포화토에 적용하는 이론을

* 충북대학교
** 충북대학교 대학원
* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2578
fax: +82-43-271-5922
E-mail address: cssong@cbu.ac.kr

불포화토 영역에 적용하는 것은 여러 측면에서 불합리하다.

불포화토를 연구하기 위해서는 흡 속의 함수비 변화에 따라 달라지는 흡인력의 크기를 규정하는 것이 중요하다(Craig et al, 1999). 흡 속의 함수비와 흡인력의 관계를 흡-수분 특성곡선(Childs, 1940)이라 하며, 이를 분석하는 것이 불포화토의 연구에 기본이 된다. 특성곡선은 함수비와 흡인력 또는 체적함수비(volumetric water content)와 흡인력과의 관계로 도시하는데, 이들의 관계는 반대수 눈금으로 도시하면 S자 형태의 모양을 나타내는 것이 일반적이다. 그러나, 흙의 종류, 공극의 크기, 공극의 상태, 포화도 등에 따라 모양과 형태가 달라지게 된다. 특히, 흙의 구성성분과 생성과정에 따른 지역적 특성 등에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 그 지역의 흙의 특성을 바탕으로 지역을 대표할 수 있는 특성곡선식을 유도하게 되면, 불포화토의 연구뿐만 아니라 전단강도 및 투수 등의 문제를 해결하는데 아주 유용한 자료가 된다.

포화상태의 흙이 수분의 감소로 흡인력이 증가하면 간극이 비면서 공기가 유입되기 시작하는 일정한 한계값을 초과할 때까지는 아무런 유출이 발생하지 않게 되는데, 이 한계값을 공기투과압(임계흡수력, air entry value)이라 하며, 이 값은 흙의 상태가 주어지면 나타내는 특성값으로 특성곡선의 연구에 아주 중요한 자료를 제공한다. 또한 흡인력의 증가에도 불구하고 더 이상의 물이 유출되지 않는 함수비를 잔류함수비(residual water content)라

하며, 이는 열에 의해서만 제거될 수 있다. 따라서, 특성곡선은 포화상태에서 잔류 함수비까지의 함수비 범위내에서만 규정되는 것이 보통이다(Rahardjo et al, 1999).

본 연구에서는 불포화토의 흡-수분 특성곡선을 도출하기 위하여 흙의 분류가 뚜렷이 구분되는 4개의 시료를 선정하고, 다짐상태를 변화시키면서 흡인력에 따른 함수비, 포화도 및 체적함수비의 관계를 비교·분석하여 흡-수분 특성을 규명하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 시 료

시료는 우리나라 전역에 골고루 분포되어 있으며, 흙 분류상 뚜렷이 구분되고 대표성을 가질 수 있는 화강토와 점성토, 사질토 등을 선택하였다. 특히, 방조제 등의 해안 매립지에 적용할 수 있도록 전남의 영산강 하구 부근의 해성점토(시료 A)를 선정하였다. 또한, 축제 또는 성토재로 주로 사용되고 있는 화강토는 풍화상태를 고려하여 전북 부안 근처(시료 B) 및 충북 진천 근처(시료 C)에서 채취하였다. 비점성 흙을 대표할 수 있는 사질토는 전북 새만금 근처의 세립실트질 흙(시료 D)을 시료로 선정하여 흡인력에 따른 함수비의 특성을 분석하였다. Table 1은 사용된 시료의 물리적·역학적 특성을 요약한 것이며, Fig. 1은 사용된 각 시료의 입도분포를 보여준다.

Table 1 The physical and mechanical properties of samples

Sample	Specific gravity	Atterberg limits		Compaction test		Grain size distribution					USCS
		LL(%)	PI(%)	$\gamma_{dmax}(tf/m^3)$	OMC	No.4	No.10	No.40	No.200	0.005	
A	2.68	52.0	16.9	1.56	23.0	100	100	99.9	96.0	42.8	MH
B	2.62	35.0	12.0	1.77	16.8	98.8	94.3	76.8	53.4	28.6	CL
C	2.63	47.4	1.5	1.55	23.9	99.9	95.5	78.4	52.0	20.4	ML
D	2.63	NP	NP	1.50	20.0	100	99.9	99.5	17.2	1.3	SM

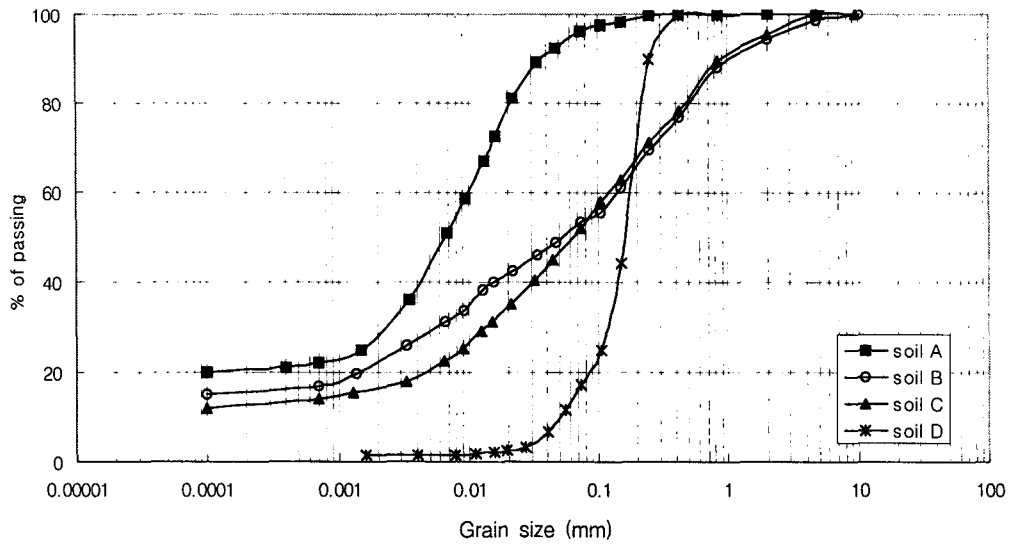


Fig. 1 Grain size distribution curve

Table 2 Initial condition of samples

Samples	Compaction ratio (%)	Void ratio	Dry unit weight (tf/m ³)	Saturated water content (%)	Volumetric water content
A	100	0.720	1.558	26.86	0.418
	90	0.911	1.402	33.99	0.478
	80	1.149	1.246	42.90	0.534
	70	1.456	1.091	54.37	0.593
B	100	0.485	1.765	18.51	0.327
	90	0.650	1.589	24.80	0.394
	80	0.856	1.649	32.67	0.461
	70	1.121	1.236	42.79	0.529
C	100	0.698	1.550	26.72	0.414
	90	0.887	1.395	33.69	0.470
	80	1.123	1.240	42.66	0.529
	70	1.426	1.085	54.18	0.588
D	100	0.753	1.498	28.67	0.430
	90	0.958	1.348	36.09	0.487
	80	1.191	1.198	45.36	0.544
	70	1.504	1.049	57.28	0.601

2. 공시체의 제작

공시체는 시료의 함수상태와 다짐상태를 고려하

여 제작하였다. 특히, 흙의 다짐상태에 따라 간극비가 달라지며, 흙 속에 동일한 수분량을 포함하더라도 간극비가 다르면 흡수력이 다른 경향을 나타내

게 된다(Song, 1994 ; Song et al., 1994). 따라서, 간극비가 흡인력에 미치는 영향을 검토하기 위하여 인위적으로 다짐조건을 조절하여 공시체를 제작하였다.

공시체는 각 시료의 최대다짐(100%) 상태를 바탕으로 90%, 80%, 70% 등으로 다짐률을 조절하였는데, 이는 현장의 시공과정에서 직접 다짐률에 따라 적용할 수 있도록 하기 위함이다. Table 2는 각 공시체의 상태를 요약한 것이다.

공시체의 규격은 가능한 크게 하는 것이 다른 인자에 의한 영향을 최소화시킬 수 있지만, 공시체가 너무 크면 흡인력의 측정 및 평형상태에 도달하는데 요하는 시간이 오래 걸리게 된다(Song et al., 1994, 1995, 1996). 평형도달시간이 너무 길게 되면 시험조건 및 상태가 달라질 가능성이 크기 때문에 본 실험에서는 황동제 몰드를 별도 제작하여 사용하였다. 몰드의 규격은 직경 5.0 cm, 높이 1.0 cm이며, 공시체는 표준다짐에너지에 해당하는 정압을 가하여 제작하였다.

3. 실험방법

가. 시험기구

본 연구는 불포화토의 흡-수분 특성을 측정하기 위하여 Pressure Plate Apparatus (Moisture 제품)를 개조하여 사용하였다. 원래 이 시험기구는 상부에서 가해지는 공기압을 변화시켜 흡인력을 조절하도록 고안되었으며, 한 단계의 실험이 끝나면 상판을 열어 시료의 무게를 측정하여 함수비와 흡인력의 관계를 도출하도록 만들어져 있다. 그러나, 이 기구는 한 단계의 시험이 끝난 후, 상부에서 감압하여 상판을 제거하는 동안 세라믹 디스크(ceramic disk)의 수분이 흡 속으로 유입되는 단점을 가지고 있으며, 많은 연구자들이 이러한 결과를 그대로 수용하여 흡-수분 특성곡선을 유도하였기 때문에 현장 적용과정에 상당한 오차를 보이고 있다(Fredlund et al(1994), Craig et al(2001), Leong et al(1995)).

따라서, 본 연구에서는 이러한 단점과 오차를 보완하기 위하여 Fig. 2에 보인 바와 같이 기구를 개조하여 사용하였다. 그림에서 보인 바와 같이 Tempe pressure cell을 개조하여 황동제 프레임에 세라믹

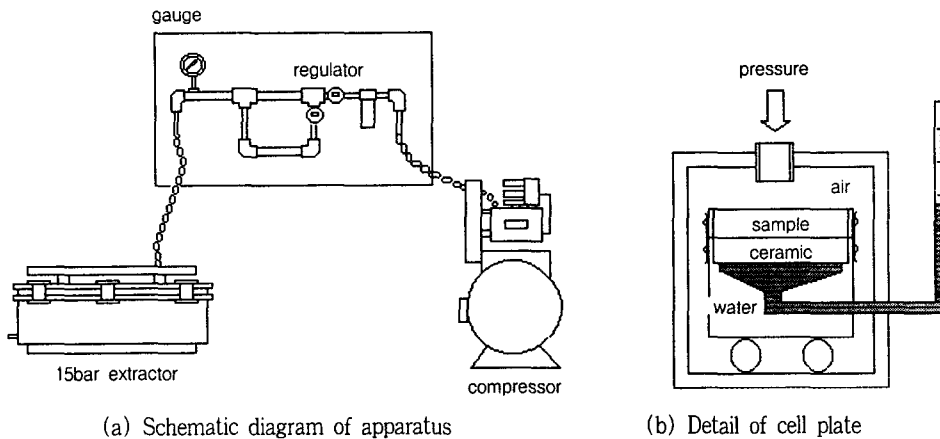


Fig. 2 Modified pressure plate apparatus

디스크를 부착하고 하부로 유출되는 수량을 측정할 수 있는 뷰렛을 연결할 수 있도록 시험기구를 제작하여 사용하였다. 개조된 본 기구의 가장 큰 장점은 상판을 열지 않고도 연속적으로 흡인력의 변화에 따른 수분의 이동량을 측정할 수 있는 것이며, 감압에 따른 디스크의 수분이 흡 속으로 유입되는 단점을 보완한 것이다(Song, 1994 ; Song et al, 1994, 1995, 1996). 또한, 고압하에서도 아주 미소한 흡인력의 변화에도 쉽게 수분의 이동과 유출량을 측정할 수 있도록 고안된 것이 특징이다.

나. 시험방법

시험은 공시체를 제작한 후, 쉘의 상부에 있는 세라믹 디스크와 잘 접촉되도록 세심한 주의를 기울여 설치한다. 이 때 하부의 측정 쉘은 사전에 내

부에 공기가 없도록 증류수로 충전시킨다. 쉘과 공시체의 접촉을 확인한 후, 튜브를 통하여 하부로부터 물을 공급하면서 포화시킨다. 이 때 흡의 체적과 함수비는 계산된 결과를 바탕으로 함수비의 변화를 고려하여 공급될 수량을 사전에 계측하여 정한다. 뷰렛의 눈금을 통하여 공급된 수량이 충분히 포화된 것으로 나타나면 시험을 시작한다. 정해진 흡인력이 되도록 상부에서 공기압을 조절하면서 뷰렛의 눈금변화를 측정한다. 본 시험에서 사용된 간극공기압의 범위는 0.1 kPa ~ 1000 kPa이며, 14 단계로 공기압을 달리하여 시험하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

선정된 4종류의 시료에 대하여, 다짐상태를 4단

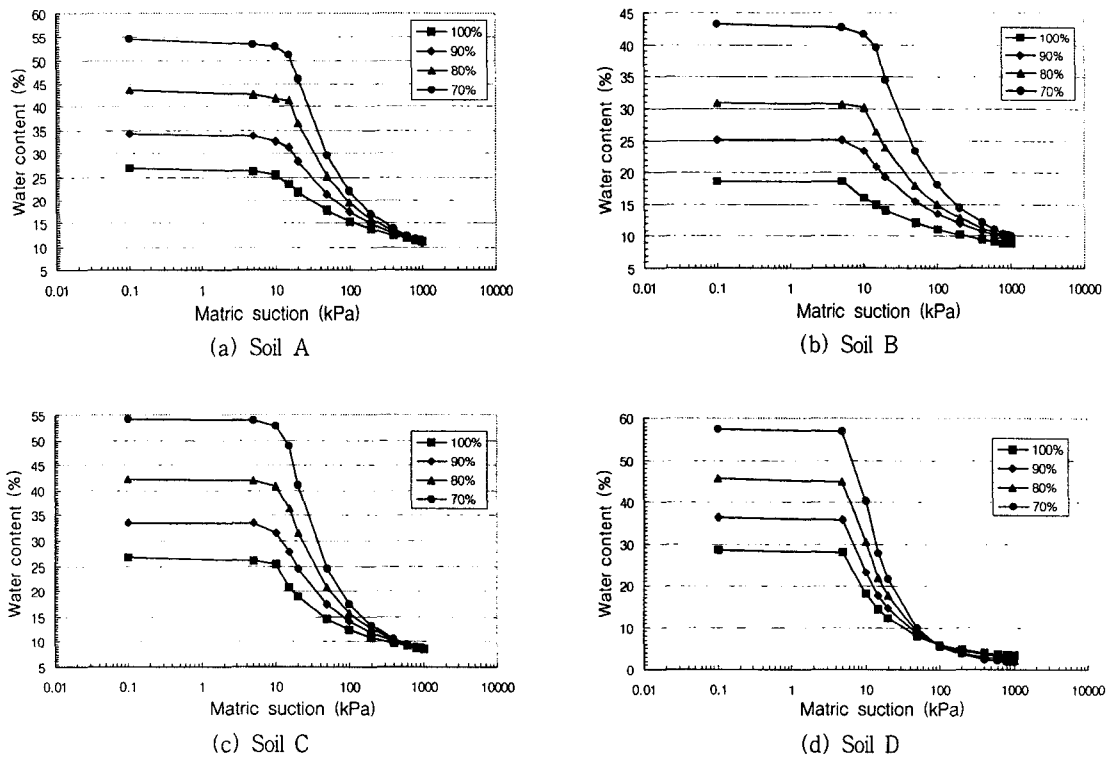


Fig. 3 Variation of water contents and suction with various compaction ratio

계로 구분하여 만든 공시체를 약 14단계의 공기압을 달리하여 측정된 수분의 이동량을 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흡-수분 특성곡선을 도출하고 이들의 특성을 고찰하였다.

1. 흡인력에 따른 함수비의 변화

각 시료의 흡인력에 따른 함수비를 도시하면 Fig. 3과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 개략적인 형태는 비슷하지만, 같은 시료일지라도 다짐상태에 따라 즉, 흙의 간극비에 따라 동일한 흡인력의 범위(0~1000 kPa)에서 나타내는 함수비의 범위가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 조밀한 시료에서는 함수비가 약 20 % 이내이지만, 느슨한 시료인 경우에는 약 45% 이상 차이를 보이고 있는데, 이러한 경향은 사질토에서 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

초기의 포화상태의 함수비는 흙의 종류와 다짐상태에 따라 큰 차이를 보이거나 건조과정을 통하여 흙 속의 수분이 감소되는데, 잔류 함수비는 간극비에 관계없이 거의 비슷한 값을 보이는 것을 알 수 있다. 그러나, 시료 D처럼 사질토인 경우에는 점성토와는 달리 함수비가 거의 0에 가까워지는 것을 알 수 있다.

이는 지금까지 발표된 결과와는 달리 흙의 특성곡선을 유도함에 있어 흙의 함수비, 입도상태 뿐만 아니라 흙이 가지는 공극의 상태도 고려하는 것이 타당함을 증명한다. 지금까지 제시된 특성 곡선은 시료가 같을 경우에는 동일한 흡인력을 나타내고 있지만, 실험의 결과에 의하면 다짐이 다른 경우에는 흡인력이 달라지므로 동일한 곡선을 적용할 수 없다는 것을 의미한다.

2. 흡인력에 따른 포화도의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시

하기 때문에 흙 속의 간극과의 관계를 설명하기에는 부족한 부분이 있다. 흙이 가지는 흡인력은 흙 속에 함유된 수분 뿐만 아니라 흙의 간극에도 관계가 있으므로 이러한 영향을 고려하기 위하여 흙의 수분상태를 부피와 관련시켜 포화도의 개념으로 나타내면 Fig. 4와 같다.

그림에서 보듯이 함수비로 나타낸 경우에는 초기부분(습윤측)이 명확하게 구분되는 반면, 포화도로 나타내면 흡인력이 증가할수록(건조측) 구분이 명확해지는 것을 알 수 있다. 특히, 점성분을 많이 함유하고 있는 흙의 그림이 더욱 명확하게 달라지는 것을 볼 수 있다. 또한, 다짐이 양호한 시료는 느슨한 시료에 비하여 건조측에서 함수비는 비슷하지만 훨씬 높은 포화도를 나타내고 있다. 이는 조밀한 시료의 경우에는 간극이 작은데 이는 함수상태에 따라 포화도는 크게 변화됨을 의미한다.

따라서, 건조측에서의 특성을 분석하는 과정에는 포화도의 개념을 사용하면 쉽게 구분할 수 있다. 그러나, 포화도의 개념은 포화상태인 초기부분에서의 구분이 거의 없는 단점을 가지고 있다.

3. 흡인력에 따른 체적 함수비의 변화

흡인력에 따른 함수비의 개념은 초기부분이 명확한 반면 건조측에서의 구분이 명확하지 않은 단점이 있다. 또한 포화도의 개념은 함수비와는 달리 초기부분이 명확하지 않은 반면 건조측에서의 구분이 명확하다. 따라서, 흙 속에 함유되는 수분상태를 정확하게 나타내기 위해서는 이러한 양자의 관계를 전부 포함하여 흙의 수분상태를 무게와 부피의 개념을 동시에 고려한 체적함수비 개념을 도입하는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 흡인력에 따른 체적함수비를 도시하면 Fig. 5와 같다.

그림에서 보는 바와 같이 흡인력에 따라 체적함수비를 도시하면 초기의 포화상태에서부터 고건조측까지의 변화과정이 명확하게 나타나게 된다. 따라서, 앞으로는 흡-수분 특성곡선을 흡인력과 체적

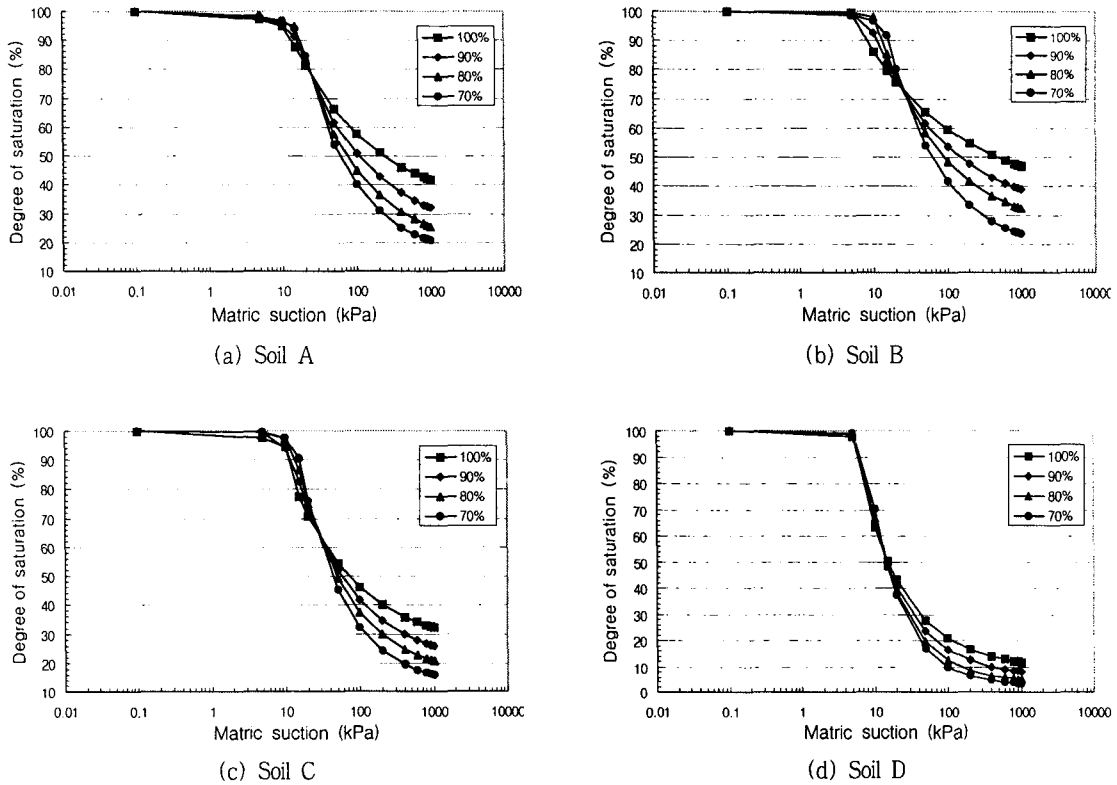


Fig. 4 Variation of degree of saturation and suction with various compaction ratio

함수비의 관계로 도시하면 전 과정에서 일어나는 변화를 쉽게 파악할 수 있을 것이다.

전체적으로 시료는 초반에는 느슨한 흙이 조밀한 흙보다 체적함수비가 높게 나타난다. 그러나, 약 100 kPa 근처에서 조밀한 시료와 느슨한 시료의 체적함수비가 역전되는 경향을 보여 고건조축(1000 kPa)에서는 명확하게 조밀한 흙이 느슨한 흙에 비하여 높은 체적함수비 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 점성토나 사질토나 동일하게 나타나는 반면, 사질토에서는 경향이 역전되어 흡인력이 점성토보다 훨씬 적은 축에서 달라지게 된다.

또한, 흙이 포화상태에서 건조과정으로 넘어가면서 간극 속에 공기가 유입되는 공기투과압의 크기가 달라지는 것을 알 수 있는데, 세립분의 함유량이 가장 많은 시료 A가 가장 큰 값을 보이고, 시료

B와 시료 C의 경우는 비슷한 값을 보이고 있다. 반면 세립분이 거의 없는 시료 D의 경우는 가장 작은 값을 나타내며 특성곡선의 경향도 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다.

IV. 요약 및 결론

흙 분류상 명확하게 구분되는 4종류의 시료를 선정 후, 다짐상태를 달리하여 간극상태를 4단계로 조절한 공시체를 만들고, 이를 개조된 Pressure Plate Apparatus를 사용하여 약 14단계의 공기압을 다르게 가하면서 흡인력 시험을 수행하여 공시체의 수분 이동량을 측정하였다. 측정된 결과를 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적 함수비를 분석하여 흙-수분 특성곡선을 도출하였다. 이들

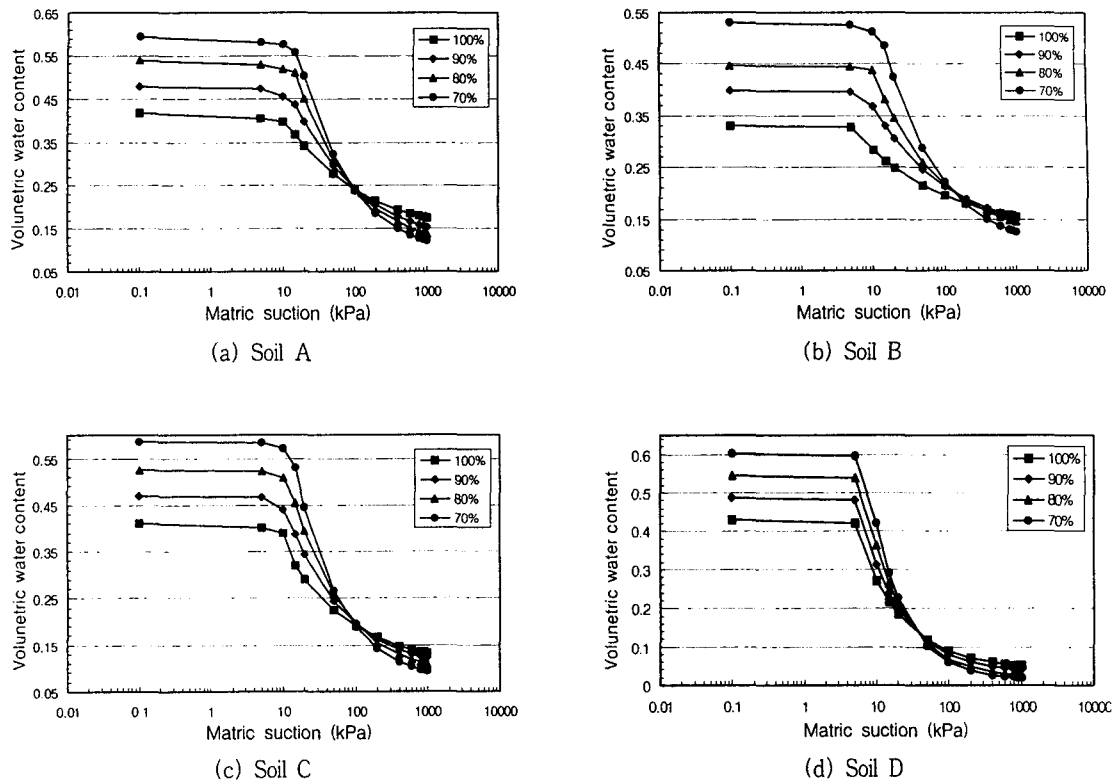


Fig. 5 Variation of volumetric water content and suction with compaction ratio

의 특성을 요약하면 다음과 같다.

1. 흡인력과 함수비로 도시한 특성곡선에서, 흡인력의 변화에 따른 함수비의 특성은 습윤측(초기 부분)에서는 명확하게 구분이 되는 반면 건조측에서는 뚜렷하게 구분이 되지 않았고, 다짐상태에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었다.

2. 흡인력에 따른 포화도 특성은 초기 부분에서는 구분이 거의 되지 않는 반면 건조측에서는 명확하게 구분이 되므로 비교적 건조한 시료의 흡-수분 특성곡선을 파악하는데 적용할 수 있다.

3. 흡인력에 따른 특성곡선을 체적함수비로 나타내면 초기 포화부분뿐만 아니라 건조측에서도 구분이 명확하게 나타났다. 또한, 흡인력의 변화에 따른 체적함수비의 변화 폭은 조밀한 흙보다 느슨한 흙이 훨씬 큰 범위를 가지는 것으로 나타났다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2002-000-00484-0(2003))지원으로 수행되었음.

References

1. Song, C. S. 1994. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated soil. Ph.D Thesis. Seoul National University. (in Korean)
2. Song, C. S. and P. W. Chang. 1994. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated soil (I)-study of characteristics of unsaturated soil-. *Journal of the Korea Society of Agri-*

- cultural Engineers* 36(4) : 87-94. (in Korean)
3. Song, C. S. and P. W. Chang. 1994. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated soil (II)-development and application of constitutive model-. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 37(1) : 81-98. (in Korean)
 4. Song, C. S. and P. W. Chang. 1995. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated granular soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 11(3) : 43-54. (in Korean)
 5. Song, C. S. and P. W. Chang. 1996. Development of constitutive model for the prediction of behaviour of an unsaturated clayey soil. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 38(3) : 101-110. (in Korean)
 6. Chandler R. J. and C. I. Gutierrez. 1986. The filter-paper method of soil suction measurement. *Geotechnique* 36 : 265-268.
 7. Craig, A. B. and C. D. Shackelford. 2001. Soil-water characteristic curves and dual porosity of sand-diatomaceous earth mixtures. *J. of Geotech. and Geoenvir. Engrg. ASCE* 127(9) : 790-800.
 8. Craig H. B. and M. Gribb. 1999. Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field. *ASCE Geotech. Special Pub.* 68 : 113-168.
 9. Fredlund D.G. and H. Rahardjo. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc.
 10. Fredlund D. G. and A. Xing. 1994. Equation for the soil-water characteristic curve. *Can. Geotech. J.* 31 : 521-531.
 11. Leong E. C. and H. Rahardjo. 1995. Typical soil-water characteristic curves for two residual soils from granitic and sedimentary formations. *Preceeding of the International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT'95, Paris, France* : 519-524.
 12. Rahardjo H. and E. C. Leong. 1999. Soil-water characteristic curve and flux boundary problem. *ASCE Geotech. Special Pub.* 68 : 89-111.