

## 흙-수분 특성곡선 방정식을 이용한 포화도의 예측

### Prediction of the Degree of Saturation Using the Soil-Water Characteristic Curves on an Unsaturated Soil

송 창 섭\*

Song, Chang Seob

#### Abstract

The aim of the work described in this paper was to confirm the application of the equation of the soil-water characteristic curves on an unsaturated soil. A series of suction test for unsaturated soils was conducted on the selected 4 kinds of soil using modified pressure extractor apparatus. And it was carried out to analyse the experimental parameters which can be describe the soil-water characteristics, were determined by using the data obtained from the experiment.

From the results, it was found that the matric suction varied according to the grain size distribution, amount of fine grain particles and void ratio. Also it was found that the residual degree of saturation was decreased with in crease of the void ratio, but the pore size distribution index and air entry value were increased with in crease of the void ratio.

And the application of the soil-water characteristic curve equation was confirmed for the various conditions and the various state by the comparison between the measured degree of saturation and the predicted degree of saturation.

*Keywords : soil-water characteristic curve, unsaturated soil, matric suction, degree of saturation, pore size distribution index*

#### I. 서 론

불포화도를 연구하기 위해서는 흙 속의 함수량 및 구조의 변화에 따라 달라지는 흡인력의 크기를

결정하는 것이 중요하다. 흙 속에 발생하는 흡인력은 부(-)의 간극수압을 의미하고 이는 지반의 유효응력을 증가시키는 역할을 한다. 따라서, 흙 속의 함수비와 흡인력의 관계를 나타내는 흙-수분 특성곡선을 분석하는 것은 불포화도 연구의 기본이 될 뿐만 아니라, 불포화도의 전단강도 및 투수 등의 문제를 해결하는데 아주 유용한 자료가 된다.

흙-수분 특성곡선은 흡인력과 함수비의 관계를 직접 또는 간접적인 방법으로 측정된 자료를 바탕

\* 충북대학교 농과대학 지역건설공학과  
\* Corresponding author. Tel.: +82-43-261-2578  
Fax: +82-43-271-5922  
E-mail address: cssong@cbnu.ac.kr

으로 통계처리하여 가장 유사한 곡선을 선정하여 사용하거나 수식으로 제시하였다. 이러한 특성곡선은 3~4개 변수나 상수를 포함하게 되며, 이는 측정자료의 분석과정에서 도출하게 된다. 지금까지 제시된 특성곡선의 도출과정을 분류하면 몇 가지로 대별하게 된다. 첫 번째 접근은 통계학적인 방법을 이용하여, 주어진 흡인력에 대한 함수비를 유추하는 방법이다. 이 방법은 방정식에 포함된 파라미터는 회귀분석에 의하여 구하게 되며, 본 연구에서는 이 방법을 적용하였다. 두 번째 접근은 특성곡선의 도출에 사용되는 회귀분석의 분산뿐만 아니라 흙의 특성도 파라미터의 도출에 적용하는 방법이다. 세 번째 접근은 흙의 입도분포와 공극의 분포에 근거한 물리적인 모델을 통하여 특성곡선을 추정하는 방법이다.

지금도 불포화토의 특성곡선에 대한 연구는 계속 진행되고 있지만, 지금까지 발표된 특성곡선은 흙의 한가지 상태나 특성을 나타내도록 유도되어 광범위한 적용이 어려운 것은 사실이다. 따라서, 흙의 상태를 범용적으로 나타낼 수 있는 특성곡선을 개발하기 위해서는 현재까지 발표된 특성곡선의 적용성을 평가하여 문제점을 파악하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 지금까지 발표된 흙-수분 특성곡선 방정식의 적용성을 검증하기 위하여 포화도를 중심으로 분석하였다. 이를 위해 성질이 서로 다른 4종의 시료를 선정하여 흡인력 시험을 수행하여 측정된 결과를 바탕으로 특성곡선에서 도시하고, 도출된 각각의 계수를 간극비에 따라 비교·분석하였다. 이를 바탕으로 지금까지 제시된 특성곡선 방정식의 파라미터를 도출하여 불포화토의 포화도를 흡인력에 따라 예측하였다.

## II. 특성방정식의 이론적 배경

흙-수분 특성곡선은 흙 속에 함유된 함수량과 흡인력이 관계를 나타내는 것으로 흡인력과 함수비, 흡인력과 포화도 또는 흡인력과 체적함수비의

관계로 도시하는 것이 보통이다. 함수비로 나타낸 특성곡선은 포화상태에 근접한 낮은 흡인력에서 구분이 명확한 반면 포화도로 나타낸 특성곡선은 건조상태에서 구분이 명확한 특장을 보인다. 그러나, 체적함수비로 나타낸 특성곡선은 포화 및 건조의 양측에서의 구분이 명확하여 특성곡선을 연구하는 경우에는 체적함수비로 표시하는 것이 일반적이다.

### 1. Brooks and Corey의 제안식

Brooks와 Corey(1964)는 흡수력과 포화도사이의 관계를 도출하기 위하여 유효포화도( $S_e$ ) 및 잔류포화도( $S_r$ )의 개념을 도입하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad \text{for} \\ U_a - U_w < (U_a - U_w)_b \dots \dots \dots (1)$$

$$S_e = \left[ \frac{(U_a - U_w)_b}{U_a - U_w} \right]^\lambda \quad \text{for} \\ U_a - U_w > (U_a - U_w)_b \dots \dots \dots (2)$$

여기서,  $S_e$ 는 유효포화도,  $S$ 는 포화도,  $S_r$ 는 잔류포화도,  $(U_a - U_w)_b$ 는 공기함입저항값(air entry value, kPa),  $\lambda$ 는 흙의 잔류함수비에 관계되는 상수,  $(U_a - U_w)$ 는 흡인력(suction, kPa)이다.

### 2. van Genuchten의 제안식

Genuchten(1980)은 Mualem(1976)의 이론을 바탕으로 이미 알고 있는 흙-수분 특성곡선과 실험결과를 대입하여 다음과 같은 특성곡선식을 제안하였다. 이는 Brooks 등이 제안한 유효포화도 개념을 대입하여 도출된 특성방정식과 같은 결과를 나타낸다.

$$\theta_w = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + \left(\frac{h}{a}\right)^{bc}\right]} \quad (3)$$

여기서,  $\theta_w$ 는 체적함수비,  $\theta_r$ 는 잔류 체적함수비,  $\theta_s$ 는 포화시의 체적함수비,  $a$ 는 공기유입값에 관계되는 토질상수,  $b$ 는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수,  $c$ 는 잔류함수비에 관계되는 토질상수이다.

### III. 재료 및 시험

#### 1. 시료의 물리적 특성

시료는 우리 나라 전역에 골고루 분포되어 있으며, 축재, 성토재 또는 매립토로 사용되고 있는 화강토와 점성토, 사질토 등을 선택하여 대표성을 부여하였다. 전남의 영산강 하구 부근의 해성점토(A)와 전북 부안 근처의 풍화가 많이 진행된 화강토(B), 충북 진천 근처의 비교적 풍화의 진행이 늦은 화강토(C)와 전북 새만금 지역의 사질토(D) 등을 채취하여 시료로 사용하였다. Table 1은 사용된 시료의 물리적·역학적 특성을 요약한 것이다.

#### 2. 공시체의 제작 및 실험 방법

공시체는 시료의 함수상태와 다짐상태를 고려하여 제작하였다. 특히, 흙의 다짐상태에 따른 간극비에 따른 수분상태를 검토하기 위하여 인위적으로

간극을 조절하여 공시체를 제작하였다. 공시체는 각 시료의 Proctor의 표준다짐 상태를 바탕으로 100%, 90%, 80%, 70% 등으로 다짐률을 조절하였다. 이는 현장의 시공과정에서 다짐률에 따라 직접 적용할 수 있도록 고려하여 선정하였다. Table 2는 각 공시체의 상태를 요약한 것이다.

### IV. 결과 및 고찰

#### 1. 흡인력에 따른 함수비의 변화

측정된 결과를 바탕으로 흡인력에 따른 함수비를 나타내면 Fig. 1과 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 함수특성을 흡인력과 함수비의 관계로 도시하면 초기부분이 명확한 반면 흡인력이 높은 건조측에서는 구분이 명확하지 않는 단점을 보인다. 또한 같은 시료일지라도 다짐상태가 달라지면, 즉 시료의 간극비가 달라지면 특성곡선도 달라지는 것을 알 수 있다.

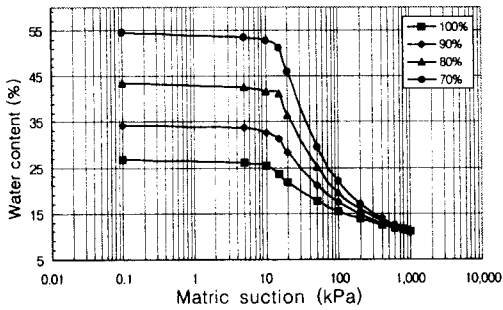
초기 포화상태의 함수비는 흙의 종류에 따라 많은 차이를 보이나, 건조과정을 통하여 흙 속의 수분이 감소됨에 따라 잔류함수비 근처에서는 간극비에 관계없이 거의 같은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 지금까지 흙의 특성곡선을 유도함에 있어 흙의 함수비, 입도 뿐만 아니라 시료의 간극상태도 고려해야 한다는 것을 의미한다.

Table 1 The physical and mechanical properties of samples

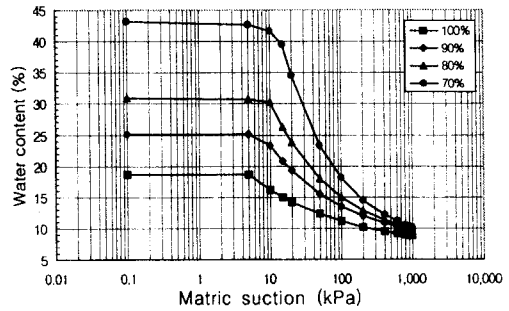
sample	Specific gravity	Atterberg limits		Compaction test		Grain size distribution (%)					USCS
		LL (%)	PI (%)	$\gamma_{dmax}$ (tf/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200	0.005	
A	2.68	52.0	16.9	1.56	23.0	100	100	99.9	96.0	42.8	MH
B	2.62	35.0	12.0	1.77	16.8	98.8	94.3	76.8	53.4	28.6	CL
C	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

Table 2 Initial conditions of samples used

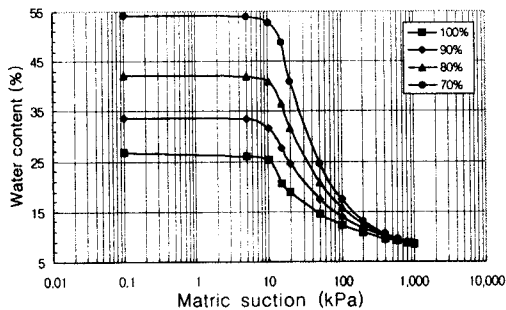
samples	compaction ratio (%)	void ratio	dry unit weight (tf/m <sup>3</sup> )	saturated water content (%)	volumetric water content (%)
A	100	0.720	1.558	26.86	0.418
	90	0.911	1.402	33.99	0.478
	80	1.149	1.246	42.90	0.534
	70	1.456	1.091	54.37	0.593
B	100	0.485	1.765	18.50	0.327
	90	0.650	1.589	24.80	0.394
	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



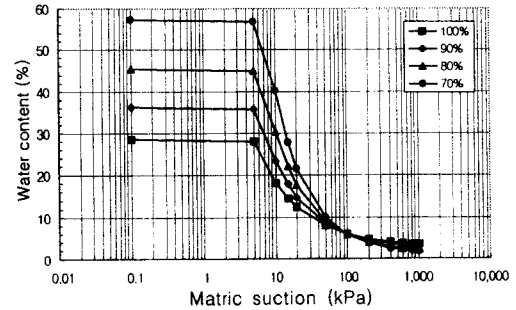
(a) Soil A



(b) Soil B



(c) Soil C



(d) Soil D

Fig. 1 Variation of water content and suction with compaction ratio

## 2. 흡인력에 따른 포화도의 변화

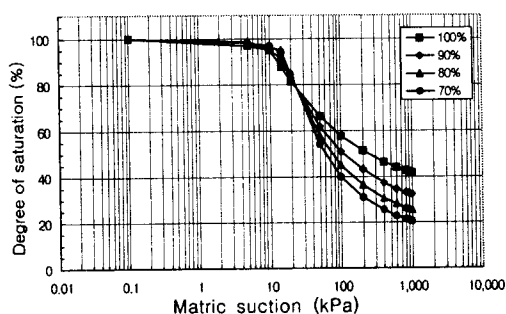
함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하기 때문에 흡인력에 따른 함수비의 개념은 초기 부분이 명확한 반면 고건조측에서의 구분이 명확하지 않는 단점이 있다. 또한 특성곡선은 위에서 언급한 바와 같이 간극에도 영향을 받게 되므로 이러한 효과를 나타내기 위하여 특성곡선을 포화도로 도시하면 Fig. 2와 같다. 포화도의 개념은 함수비와는 달리 초기부분이 명확하지 않은 반면 고건조측에서의 구분이 명확하다. 따라서, 건조측에서의 수분상태를 고려한 불포화도의 특성을 규명하기 위해서는 포화도의 개념으로 도시한 특성곡선을 활용하여야 할 것이다.

## 3. 특성곡선 방정식의 파라미터 분석

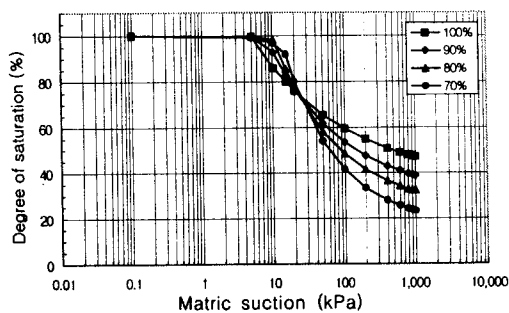
Table 3은 Brooks and Corey(1964)의 방정식에 사용되는 각 상수를 도출하여 정리한 것이다. 공극비의 변화에 따라 각 상수는 서로 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, Brooks 등의 방법에 의하면 한 종류의 시료에서는 한 종류의 특성곡선이 나타나기 때문에 다짐의 영향을 반영할 수 없음을 쉽게 알 수 있다.

또한 공극비가 증가할수록 즉, 다짐률이 저하되면 잔류 포화도는 감소하는 경향을 보이는 반면, 간극크기의 분포에 관계되는 계수( $\lambda$ )와 공기함입저항치( $(U_a - U_w)_b$ )는 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 간극비의 영향을 분석하기 위하여 간극에 따라 각각의 상수를 도시하면 Fig. 3과 같다.

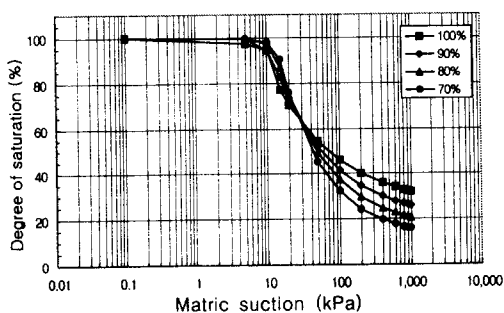
Fig. 3(a)는 간극크기의 분포에 관계되는 지수



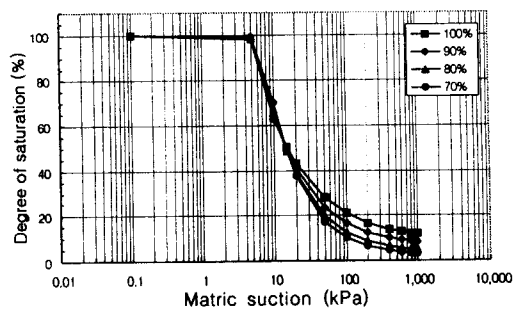
(a) Soil A



(b) Soil B



(c) Soil C

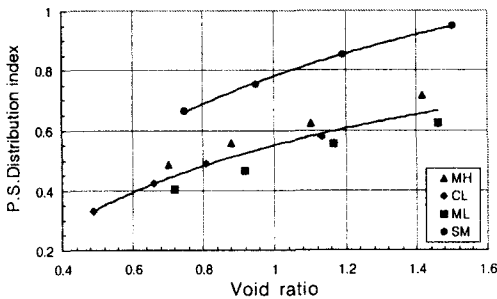


(d) Soil D

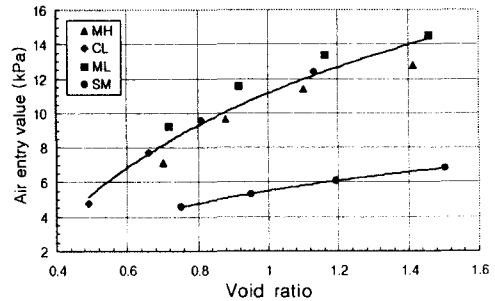
Fig. 2 Variation of degree of saturation and suction with compaction ratio

Table 3 Soil parameters for Brooks's equation

samples	comp'n ratio (%)	void ratio	Sr (%)	$\lambda$	$(U_a-U_w)_b$ (KPa)
A	100	0.718	31.43	0.404	9.20
	90	0.918	23.40	0.465	11.56
	80	1.165	18.01	0.552	13.38
	70	1.460	14.37	0.622	14.51
B	100	0.490	36.00	0.330	4.74
	90	0.660	29.80	0.422	7.69
	80	0.808	24.30	0.487	9.60
	70	1.132	16.80	0.578	12.40
C	100	0.701	25.40	0.485	7.08
	90	0.880	20.00	0.559	9.62
	80	1.103	15.50	0.624	11.40
	70	1.417	12.00	0.715	12.75
D	100	0.750	9.15	0.663	4.56
	90	0.949	6.38	0.754	5.28
	80	1.192	3.67	0.852	6.09
	70	1.503	2.38	0.950	6.82



(a) Pore size distribution index ( $\lambda$ )



(b) Air entry value  $((U_a-U_w)_b)$

Fig. 3 Variation of the parameter of Brooks and Corey's equation

( $\lambda$ )를 간극비에 따라 도시한 것이고, Fig. 3(b)는 공기함입저항치를 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 점성질 흙과 사질성 흙의 종류에 따라 명확하게 지수의 분포가 달라짐을 알 수 있다. 따라서, 흙 속에 함유된 수분에 따른 흡인력을 예측하기 간극의 크기도 고려하여 계수를 도출하여야 한다.

그림에서 도출하면 점성질 흙에 적용되는 간극크기 분포지수와 공기함입저항치는 식(4) 및 식(5)

와 같고, 사질성 흙은 식(6) 및 식(7)과 같다.

$$\lambda = 0.305 \cdot \ln(VR) + 0.549 \dots \dots \dots (4)$$

$$(U_a - U_w)_b = 8.396 \cdot \ln(VR) + 11.127 \dots (5)$$

$$\lambda = 0.415 \cdot \ln(VR) + 0.780 \dots \dots \dots (6)$$

$$(U_a - U_w)_b = 3.273 \cdot \ln(VR) + 5.489 \dots (7)$$

4. 포화도의 예측 및 특성방정식의 적용성 평가

도출된 각 계수를 바탕으로 포화도를 예측하면 Fig. 4와 같다. (a)는 시료 A에 대하여 다짐률에 따라 포화도를 예측한 결과이고, (b)는 시료 B의 포화도를 예측한 결과이며, (c)는 시료 C의 예측결과이고, (d)는 시료 D의 포화도 예측결과이다.

예측결과에서 볼 수 있듯이 공극비의 변화를 고려하여 도출된 계수를 바탕으로 예측된 포화도는 실험결과와 잘 부합되는 것을 볼 수 있다. 즉, Brooks 등의 특성곡선을 이용한 포화도의 예측은 시료의 조건 중에서 간극비가 일정한 경우에는 예측의 결과가 측정된 결과치와 거의 유사하게 나타나지만 간극비가 달라지는 경우에는 계수가 달라져서 정확한 예측을 할 수 없게 된다.

따라서, 특성곡선을 이용하여 시료의 포화도를

예측하는 경우에는 시료의 여러 조건을 고려하여 발표된 특성곡선 방정식에 간극비의 조건을 고려하여 계수를 도출할 수 있도록 고려하여야 할 것이다.

V. 결 론

우리나라에 주로 분포하는 4종류의 흙을 시료로 선정하여 일련의 시험을 통하여 물리적, 역학적 특성을 규명하고, Pressure Extractor 기구를 개량하여 불포화토의 간극비에 따른 흡인력 변화를 측정하여 도출된 흙-수분 특성곡선을 분석하고, 이를 바탕으로 특성곡선 방정식의 각 계수를 분석하였다. 또한 제시된 특성곡선 방정식을 이용하여 예측된 포화도를 측정치와 비교분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 흡인력의 변화는 입도분포, 세립분의 함량 뿐

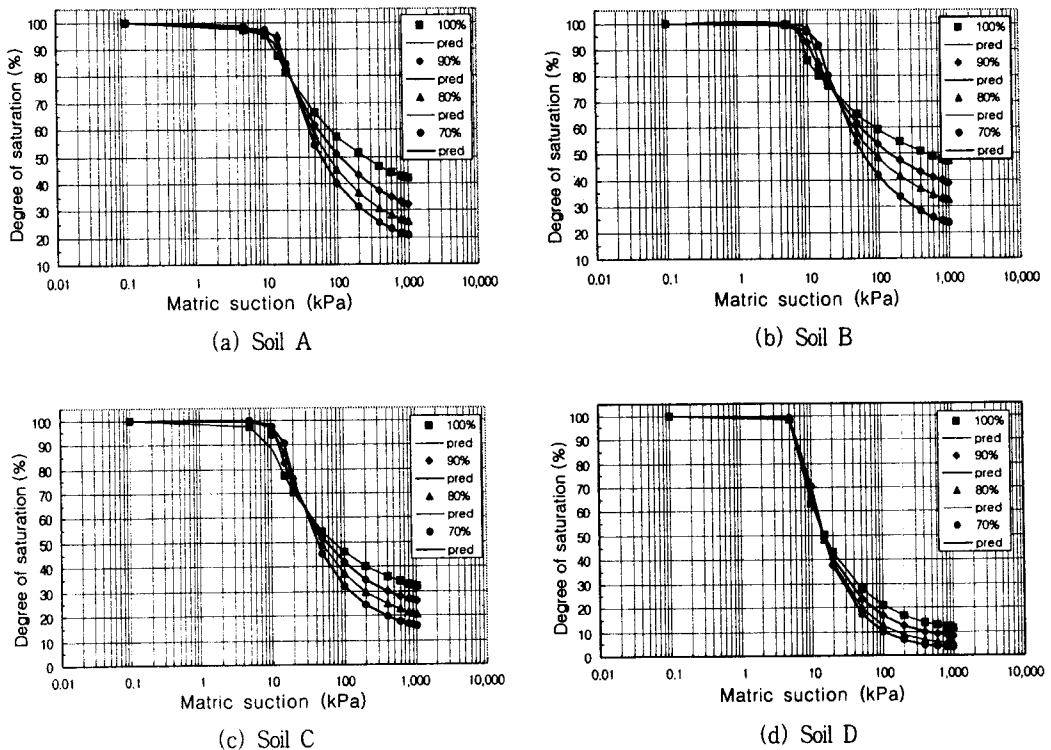


Fig. 4 Comparison between measured and predicted results for degree of saturation

만 아니라 간극의 대소에 따라서도 특성곡선이 변하는 것을 실험을 통하여 입증하였다.

2. 함수비로 도시된 특성곡선은 초기의 포화상태 근처의 흡인력 상태를 명확하게 나타내는 반면 포화도로 도시한 특성곡선은 건조측에서 구분이 명확하게 나타났다.

3. 잔류포화도( $S_r$ )는 간극비의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이는데 세립분의 함량에 따라 크기가 달라진다. 반면 간극크기분포지수( $\lambda$ )와 공기함입저항치는 간극비의 증가에 따라 로그함수 관계로 증가하는 것으로 나타났다.

4. Brooks and Corey이 제안한 특성곡선 방정식은 간극비가 일정한 경우에는 포화도의 예측이 가능하지만, 흙의 다짐상태나 간극비가 달라지는 경우에는 이를 고려하여 계수를 도출하여 적용하여야 함을 실험을 통하여 입증하였다.

5. 실험결과를 바탕으로 간극비나 다짐상태에 따른 포화도를 예측할 수 있는 수정된 특성곡선 방정식의 계수를 도출할 수 있는 방정식을 제안했으며, 그 적용성은 측정치와 비교하여 검증하였다.

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 Agricultural 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. Song, C. S. and P. W. Chang. 1997. Yield surface and hardening laws of unsaturated clayey soils for isotropic compression. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 39(1) : 93-101. (in Korean)
7. Song, C. S. and M. H. Kim. 2003. Experimental Study for Soil-Water Characteristic Curves of Unsaturated Soil. *Journal of the Korea Society of Agricultural Engineers* 45(6) : 153-161. (in Korean)
8. Craig, A. B. and C. D. Shackelford. 2001. Soil-water characteristic curves and dual porosity of sand-diatomaceous earth mixtures. *J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg. ASCE* 127(9) : 790-800.
9. Craig H. B. and M. Gribb. 1999. Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field. *ASCE Geotech. Special Pub.* 68 : 113-168.
10. Fredlund D.G. and H. Rahardjo. 1993. Soil mechanics for unsaturated soils. John Wiley & Sons Inc.
11. Fredlund D. G. and A. Xing. 1994. Equation for the soil-water characteristic curve. *Can.*



- Geotech. J.* 31 : 521-531.
12. 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.
13. Rahardjo H. and E. C. Leong. 1999. Soil-water characteristic curve and flux boundary problem. *ASCE Geotech. Special Pub.* 68 : 89-111.