

# 불포화의 흡-수분 특성곡선 방정식의 개발

## Development of Equation of the Soil-Water Characteristic Curve for an Unsaturated Soil

송 창 섭 · 임 성 윤\* · 김 명 환(충북대)  
Song, Chang Seob · Lim, Seong Yoon · Kim, Myung Hwan

### Abstract

The purpose of this paper was to derive soil-water characteristic curve equation for unsaturated soil. To this end, a series of suction measured test was conducted on the selected 4 kinds of soil which is located in Korea, used the modified pressure plate apparatus.

From the test results, it was proved that characteristic curve changes according to grain size distribution, size of void and fine grained soil contents.

Residual degree of saturation( $S_r$ ) was decreased with void ratio and changed with fine grained soil contents, parameter  $\lambda$  and  $h_r$  was increased with void ratio.

Soil-water characteristic curve equation based on the test result was suggested by void ratio or grain size distribution.

### I. 서 론

불포화토를 연구하기 위해서는 흙 속의 함수량 및 구조의 변화에 따라 달라지는 흡인력의 크기를 규정하는 것이 중요하다. 흙 속의 함수비와 관계를 흡-수분 특성곡선(Childs,1940)이라 하며, 이를 분석하는 것이 불포화토 연구의 기본이 된다. 특성곡선은 함수비와 흡인력 또는 체적함수비(Volumetric water content)와 흡인력과의 관계를 도식한다. 특성곡선은 불포화토의 연구뿐만 아니라 전단강도 및 투수 등의 문제를 해결하는데 아주 유용한 자료가 된다.

본 연구에서는 불포화토의 흡-수분 특성곡선 방정식을 유도하기 위하여 4개의 시료를 선정하여 흡인력 시험을 수행하여 흡인력에 따른 특성방정식을 도출하였다. 이를 바탕으로 특성곡선에 영향을 주는 인자를 고려하여 흡-수분 특성곡선 방정식을 유도하고 적용성을 검증하였다.

### II. 이론적 배경

#### 1. Brooks and Corey(1964)의 제안식

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \text{ for } U_a - U_w < (U_a - U_w)_b \cdot (1), \quad S_e = \left[ \frac{(U_a - U_w)_b}{U_a - U_w} \right]^\lambda \text{ for } U_a - U_w > (U_a - U_w)_b \cdot (2)$$

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

#### 2. Fredlund and Xing(1994)의 제안식

Fredlund 등(1994)은 1,000,000 kPa이면 체적함수비가 0이 된다는 가정 하에서 타 연구자의 결과를 분석하여 다음과 같은 특성곡선식을 제안하였다.

$$\theta_w = C(h) \left[ \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left\{ \exp(1) + \left( \frac{h}{a} \right)^b \right\} \right]^c} \right] \cdot \dots \cdot (4) \quad C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right] \cdot \dots \cdot (5)$$

여기서,  $h_r$ 은 잔류함수비일때의 흡인력을 의미한다.

### III. 재료 및 방법

#### 1. 시료의 채취 및 물리적·역학적 특성

시료는 우리나라 전역에 골고루 분포되어 있으며, 축제 또는 성토재로 주로 사용되고 있는 화강토와 점성토, 사질토 등을 선택하여 대표성을 부여하였다. Table 1은 사용된 시료의 물리적·역학적 특성을 요약한 것이다.

Table 1. The physical and mechanical properties of samples.

soil type	Specific Gravity	Atterberg Limits		Compaction test		Grai size distribution					USCS
		LL(%)	PI(%)	$\gamma_{dmax}$	OMC	No.4	No.10	No.40	No.200	0.005	
A	2.679	52.0	16.9	1.56	23.0	100	100	99.9	96.0	42.8	MH
B	2.621	35.0	12.0	1.77	16.8	98.8	94.3	76.8	53.4	28.6	CL
C	2.632	47.4	1.5	1.55	23.9	99.9	95.5	78.4	52.0	20.4	ML
D	2.626	NP	NP	1.50	20.0	100	99.9	99.5	17.2	1.3	SM

#### 2. 공시체의 제작

공시체는 시료의 함수상태와 다짐상태를 고려하여 제작하였다. 특히, 흙의 다짐상태에 따른 간극비의 대소에 의한 수분상태를 검토하기 위하여 인위적으로 간극을 조절하여 공시체를 제작하였다. 공시체는 현장의 시공과정에서 다짐율에 따라 직접 적용할 수 있도록 각 시료의 최대다짐 상태를 바탕으로 90%, 80%, 70% 등으로 다짐율을 조절하였다.

### IV. 결과 및 고찰

#### 1. 흡인력에 따른 체적 함수비의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하게 때문에 흡인력에 따른 함수비의 개념은 초기부분이 명확한 반면 고건조층에서의 구분이 명확하지 않는 단점이 있다. 또한 포화도는 흙의 수분상태를 부피개념으로 나타내기 때문에 흡인력에 따른 포화도의 개념은 함수비와는 달리 초기부분이 명확하지 않은 반면 고건조층에서의 구분이 명확하다. 따라서 흙속에 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 대표적으로 도시하면 Fig.1과 같다.

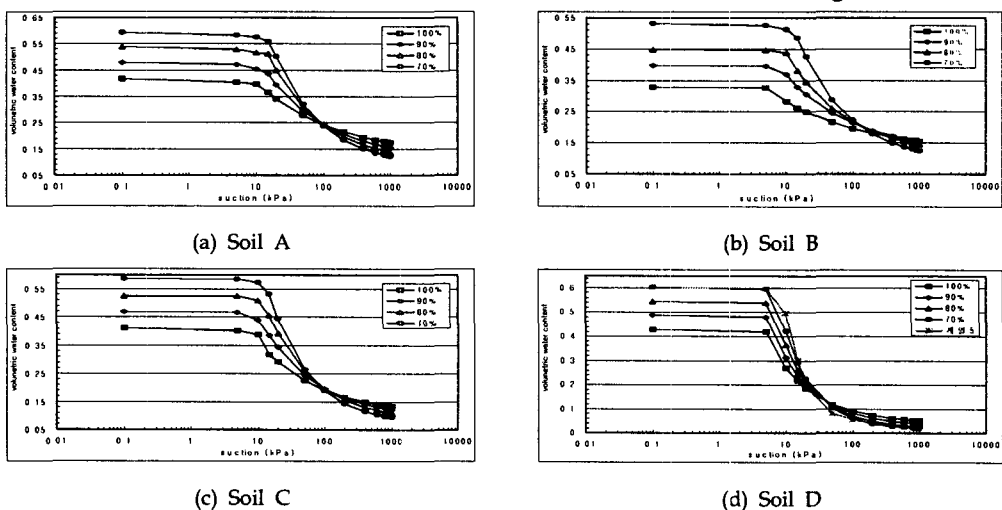


Fig. 1 Volumetric water content

2. 특성방정식의 유도 및 적용

Table 2. Soil parameters for Brooks's equation.

samples	comp'n ratio	void ratio	Sr	$\lambda$	$(U_a-U_w)_b$
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

1) 포화도의 예측

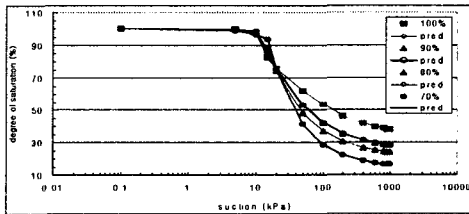
가. 계수의 도출

포화도의 예측을 위하여 실험결과로 도출된 잔류함수비에 따른 계수( $\lambda$ )와 잔류포화도( $S_r$ )계수를 공극비에 따른 관계는 Table.2와 같다.

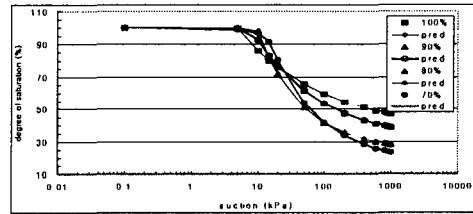
나. 포화도의 예측

위에서 도출된 각 계수를 바탕으로 포화도를 예측하면 Fig.2와 같다.

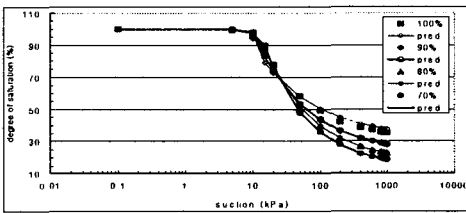
예측결과에서 볼 수 있듯이 공극비의 변화를 고려하여 도출된 계수를 바탕으로 예측된 포화도는 실험결과와 잘 부합되는 것을 볼 수 있다.



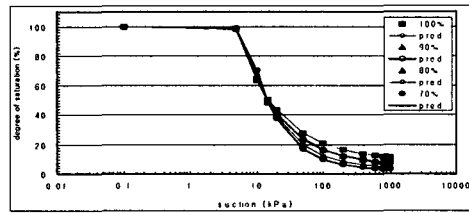
(a) Soil A



(b) Soil B



(c) Soil C



(d) Soil D

Fig.2 Prediction of degree of saturation

2) 체적함수비의 예측

가. 특성 방정식의 유도

체적함수비의 예측에 사용되는 계수를 도출하여 공극비에 따라 계수 a, 계수 b, 계수 c, 계수 hr의 관계를 수식으로 나타내면 식(6) ~ 식(13)과 같다.

$$a = 10.389 \cdot \ln(VR) + 15.389 \cdot \dots (6), \quad b = 0.784 \cdot \ln(VR) + 3.4995 \cdot \dots (7)$$

$$c = 0.3302 \cdot \ln(VR) + 0.4769 \cdot \dots (8), \quad h_r = -2.447 \cdot \ln(VR) + 1753.6 \cdot \dots (9)$$

사질성 흙인 경우는 다음과 같다.

$$a = 4.448 \cdot \ln(VR) + 9.0547 \quad \dots (10), \quad b = 0.432 \cdot \ln(VR) + 4.7237 \quad \dots (11)$$

$$c = 0.5229 \cdot \ln(VR) + 0.7857 \quad \dots (12), \quad h_r = -760.85 \cdot \ln(VR) + 666.28 \quad \dots (13)$$

여기서, VR은 공극비(void ratio)를 의미한다.

#### 나. 체적함수비의 예측

이 상의 결과를 바탕으로 사용된 시료의 공극비에 따른 체적함수비를 예측하여 실험결과와 비교하면 Fig. 3과 같다.

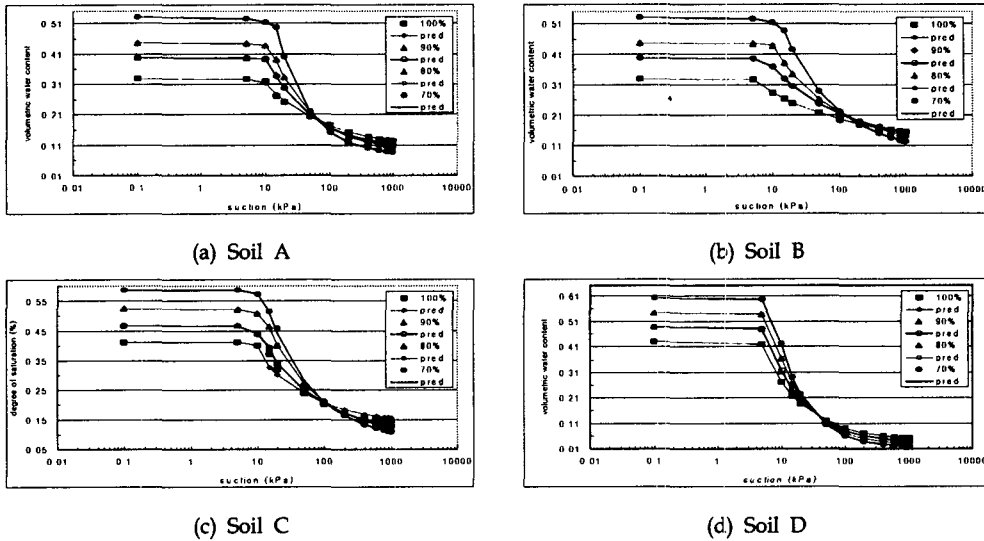


Fig.3 Prediction of volumetric water content

#### IV. 결 론

국내의 대표적인 주요 흙을 시료로 선정하여 일련의 시험을 통하여 물리적, 역학적 특성을 규명하고, Pressure Plate 기구를 개량하여 불포화토의 공극비에 따른 흡인력 변화를 측정하여 도출된 흙-수분 특성곡선식을 검증한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 흡인력의 변화는 입도분포, 세립분의 함량 뿐만 아니라 공극의 대소에 따라서도 특성곡선이 변하는 것을 실험을 통하여 입증하였다.
2. 잔류포화도(Sr)는 공극비에 따라 감소하는 경향을 보이는데 세립분의 함량에 따라 크기가 달라진다. 계수  $\lambda$ 와  $h_r$ 은 공극비에 따라 증가하게 되는데,  $\lambda$ 는 극격한 변화를 보이는 반면  $h_r$ 은 비교적 완만하게 변하는 것으로 나타났다.
3. 실험결과를 바탕으로 공극비나 다짐상태에 따른 함수특성을 나타낼 수 있는 특성곡선식을 제안하였으며, 실험결과치와 비교하여 적용성을 검증하였다.

#### 참고문헌

1. 송창섭, 1994, 불포화토의 거동예측을 위한 구성식 개발, 서울대학교 박사학위논문.
2. Fredlund D.G. and H. Rahardjo, 1993, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc.
3. Fredlund D. G., and A. Xing, 1994, "Equation for the Soil-Water Characteristic Curve", Can. Geotech. J., Vol. 31, pp.521-531.