

흡-수분 특성곡선 방정식을 이용한 체적함수비의 예측*

송 창 섭¹⁾

¹⁾충북대학교 농업생명환경대학 지역건설공학과

Prediction of the Volumetric Water Content Using the Soil-Water Characteristic Curve on an Unsaturated Soil*

Song, Chang-Seob¹⁾

¹⁾Department of Rural Engineering, Chungbuk National University.

ABSTRACT

The purpose of this paper was to confirm the application of the equation of the soil-water characteristic curve on an unsaturated soil. To this ends, a series of suction test was conducted on the selected 4 kinds of soil which is located in Korea, using the modified pressure extractor apparatus. And it was carried out to analyze the experimental parameters which can 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 was varied according to the grain size distribution, amount of fine grain particle and void ratio. Also it was found that the residual volumetric water content was decreased with the void ratio, but the index related air entry value, the soil parameter related water content and the parameter with residual water content were increased with the void ratio.

And the application of equation of the soil-water characteristic curve was confirmed for the various conditions and the various state by the comparison between the volumetric water content measured by the experiment and the predicted values.

Key Words : *Matric suction, Volumetric water content, Soil-water characteristic curve, Degree of saturation, Pore size distribution index.*

I. 서 론

최근 우리 나라 주변의 강우가 국지적이고 집중적으로 나타나고 있다. 특히, 산간에 내리는

집중호우는 계곡에 많은 피해를 보이고 있다. 더구나 집중호우는 많은 곳에 산사태를 발생시켜 하류에 더욱 피해를 가중시키고 있다. 이와 같이 집중호우가 있을 후에 계곡에서 발생하는 산사

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

태는 지반을 구성하고 있는 흙의 구성성분에도 영향을 받지만 지반의 응력도 중요한 영향인자가 된다. 산사태의 발생가능성을 검토하는 안정 조건에 고려되는 요소 중에는 집중호우로 인하여 지반의 함수상태 변화에 따른 중량의 변화뿐만 아니라 흙 속에 발생하는 강도정수의 변화도 중요하다. 그러나, 이러한 함수상태에 따른 강도정수의 변화는 기존의 포화토 토질역학으로서는 설명이 불가능하므로 흙 속의 흡인력을 고려하는 불포화토 토질역학(unsaturated soil mechanics)으로 해석되어야 한다.

포화토 토질역학은 자연상태의 실트나 점토 등 지하수면 아래에 존재하는 공극수압이 정(+)의 값을 나타내는 지반을 대상으로 하는 반면, 불포화토 토질역학은 자연상태의 잔적토나 운적토 또는 인공적으로 다진 흙 등 공극수압이 부(-)의 값을 가지는 지반을 대상으로 한다(Song, 1994).

지금까지 불포화토 토질역학은 이론 정립을 위한 실험기구의 미비, 기술자의 인식 부족 등 이론적 또는 학문적 발전이 부진하였다. 그러나, 최근 세계 각국에서 팽창성 흙의 피해사태가 보고되면서 불포화토에 대한 연구의 필요성이 다시 대두하게 되었다. Jones and Holtz(1973)는 매년 미국 내의 수축 또는 팽창성 흙에 의한 피해액이 연간 23억 달러에 달하며, 이는 홍수나 허리케인, 토네이도, 지진 등에 의한 피해액의 2배에 해당하는 금액이라고 보고하고 있다. 이러한 추세에 맞추어 캐나다를 중심으로 세계 각국에서 불포화토 토질역학의 연구가 시작되었다. 특히, 새로운 시험기구의 발달과 시험기법의 개발에 따라 흡인력(matric suction)의 측정이 쉬워짐에 따라 불포화토의 연구에 박차를 가하게 되었다(Fredlund and Rahadjo, 1993).

불포화토 토질역학의 이론에 선행되는 것은 흙-수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)을 파악하는 것이다. 이 흙-수분 특성곡선, 일명 수분-보수 곡선(water-retention curve)은 불포화토질역학에 있어서 매우 중요한 구성 관계식(constitutive relationship)이다(Song, 1994; Song and Chang, 1995; 1996). 이는 흡인력에 대한 흙

속의 수분관계를 나타내며, 포화토 토질역학에서의 압밀곡선과 같은 역할을 하게 된다(Song and Kim, 2003).

지금까지 제시된 특성곡선을 분류하면 몇 가지로 대별하게 된다. 첫 번째 접근은 통계학적인 방법을 이용하여, 주어진 흡인력에 대한 함수비를 유추하는 방법이다. 이 방법은 방정식에 포함된 파라메타를 회귀분석에 의하여 구하게 된다. 이러한 부류에 속하는 특성곡선은 Visser (1969), Livneh 등(1970), Gupta & Larson(1979), Rawls 등(1982), Cassel 등(1983), Hutson & Cass(1987), Gregson 등(1987), Rawls 등(1991), Rajkai 등(1992), Williams 등(1992), Reddi 등(1997), Aubertin 등(1998), Mbagwu 등(1998) 등에 의하여 제시된 방정식이 이에 속한다. 두 번째 접근은 특성곡선의 도출에 사용되는 회귀분석의 분산 뿐만 아니라 흙의 특성도 파라메타의 도출에 적용하는 방법이다. 이는 Ghosh(1980), Williams 등(1983), Ahuja 등(1985), Rawls 등(1992), Cresswell 등(1996), Tomasella 등(1998) 등에 의하여 제시된 방정식이 이에 속한다. 그런데, 특성곡선은 흡인력뿐만 아니라 간극의 상태 및 분포 등 입도분포(grain size distribution)도 중요한 역할을 하게 된다. 이러한 견지에서, 세 번째 접근은 물리적인 모델을 통하여 특성곡선을 추정하는 방법이다. 이는 흙의 입도분포와 간극의 분포에 근거한 곡선을 유도하는 방법이다. Arya 등(1981)이 제시한 이래, Haverkamp 등(1986), Mishra 등(1989), Arya 등(1992), Smettem 등(1996), Basile 등(1997), Fredlund 등(1997) 등에 의하여 계속 수정되어 발표되고 있으나, 아직도 개선해야 할 부분이 많이 있는 방법이다.

본 연구에서는 흙-수분 특성곡선 방정식의 적용성을 검증하고자 한다. 이를 위하여 우리 나라에 많아 분포하고 있는 4종의 흙을 선정하여 흡인력 시험을 수행하여 흙-수분 특성곡선을 도출하였다. 도출된 특성곡선을 간극비에 크기에 따른 변화상태를 분석하고, 특성곡선에 사용되는 각 상수의 특징을 분석하였다. 마지막으로 측정된 체적 함수비와 Fredlund 등이 제시한 특성곡선 방정식으로 예측된 체적 함수비를 비교

하여 특성곡선 방정식의 적용성을 검증하였다.

II. 재료 및 방법

1. 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 특징을 보인다. 그러나, 체적함수비로 나타낸 특성곡선은 포화 및 건조의 양측에서의 구분이 명확하여 특성곡선을 연구하는 경우에는 체적함수비로 표시하는 것이 일반적이다(Song and Kim, 2003; Craig and Shackelford, 2001).

1) Brooks and Corey의 제안식

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

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

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

여기서, S 는 포화도, $(U_a - U_w)_b$ 는 공기함입저항값(air entry value in kPa), λ 는 흙의 잔류함수비에 관계되는 상수, $(U_a - U_w)$ 는 흡인력(suction in kPa)이다.

2) Genuchten의 제안식

Genuchten(1980)은 Mualem(1976)의 이론을 바탕으로 이미 알고 있는 흙-수분 특성곡선과 실험결과를 대입하여 다음과 같은 특성곡선 방정식을 제안하였다. 이는 Brooks and Corey(1964)이 제안한 유효포화도 개념을 대입하여 도출된 특성방정식과 같은 결과를 나타낸다.

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

여기서, θ_w 는 체적함수비, θ_r 는 잔류 체적함수비, θ_s 는 포화시의 체적 함수비, a 는 공기유입값에 관계되는 토질상수, b 는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수, c 는 잔류함수비에 관계되는 토질상수이다.

3) Williams et al. 의 제안식

$$\ln \theta_e = A + B \ln h \tag{4}$$

여기서, θ_e 는 정규화된 함수비($=(\theta - \theta_r)/(\theta_s - \theta_r)$), A 및 B 는 적합상수이다.

4) Fredlund and Xing의 제안식

Fredlund and Xing(1994)은 1,000,000 kPa이던 체적함수비가 0이 된다는 가정 하에서 타 연구자의 결과를 분석하여 다음과 같은 특성곡선 방정식을 제안하였다.

$$\theta_w = C(h) \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left\{ \exp(1) + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right\} \right]^c} \right] \tag{5}$$

$$C(h) = \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left(1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right]$$

여기서, θ 는 체적 함수비, θ_s 는 포화시의 체적 함수비, a 는 공기함입저항값에 관계되는 토질상수, b 는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수, c 는 잔류함수비에 관계되는 토질상수, h 는 흡인력, h_r 은 잔류 함수비일 때의 흡인력을 의미한다.

2. 재료

재료는 우리 나라 전역에 골고루 분포되어 있으며, 축제, 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 풍

표 1. 사용된 재료의 물리적·역학적 특성.

종 류	비 중	애터버어그한계		다짐시험		입도분포					통 일 분 류
		LL(%)	PI(%)	γ_{dmax}	OMC	No.4	No.10	No.40	No.200	0.005	
Soil A	2.68	52.0	16.9	1.56	23.0	100	100	99.9	96.0	42.8	MH
Soil B	2.62	35.0	12.0	1.77	16.8	98.8	94.3	76.8	53.4	28.6	CL
Soil C	2.63	47.4	1.5	1.55	23.9	99.9	95.5	78.4	52.0	20.4	ML
Soil D	2.63	NP	NP	1.50	20.0	100	99.9	99.5	17.2	1.3	SM

화의 진행이 낮은 화강토(C)와 전복 새만금 지역의 사질토(D) 등을 채취하여 시료로 사용하였다. 표 1은 사용된 시료의 물리적·역학적 특성을 요약한 것이다.

3. 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 최대다짐 상태를 바탕으로 100%, 90%, 80%, 70% 등으로 다짐률을 조절하였다. 이는 현장의 시공과정에서 다짐율에 따라 직접 적용할 수 있도록 고려하여 선정하였다. 표 2는 각 공시체의 상태를 요약한 것이다. 실험은 토양수분채취기(soil moisture extractor)를 개조하여 흡인력 시험을 수행했으며, 그림 1은 실험기구의 모식도를 보여준다.

표 2. 공시체의 초기조건.

종 류	다짐률 (%)	간극비	건조단위 중량(tf/m ³)	포화함 수비(%)	체적함 수 비
Soil 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
Soil 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
Soil 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
Soil 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

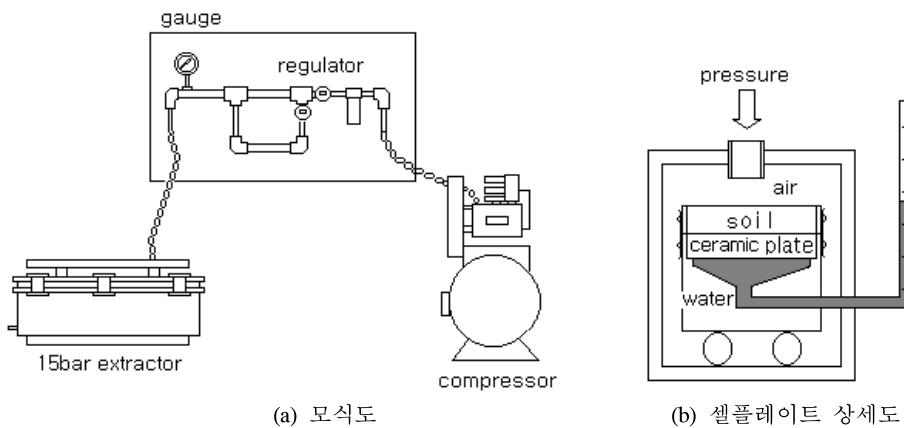


그림 1. 개조된 토양수분 채취기의 모식도

III. 결과 및 고찰

1. 흡인력에 따른 체적 함수비의 변화

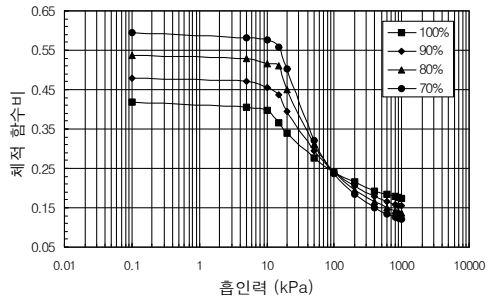
함수비는 흙의 수분상태를 무게를 중심으로 표시하기 때문에 흡인력에 따른 함수비의 개념은 초기부분이 명확한 반면 고건조층에서의 구분이 명확하지 않는 단점이 있다. 또한 포화도는 흙의 수분상태를 부피개념으로 나타내기 때문에 흡인력에 따른 포화도의 개념은 함수비와는 달리 초기부분이 명확하지 않은 반면 고건조층에서의 구분이 명확하다. 따라서, 흙 속에 함유되는 수분상태를 정확하게 나타내기 위해서는 이러한 양자의 관계를 전부 포함하여 흙의 수분상태를 무게와 부피의 개념을 동시에 고려한 체적 함수비 개념을 도입하는 것이 필요하다. 이러한 측면에서 흡인력에 따른 체적 함수비를 도시하면 그림 2와 같다.

흡인력에 따라 체적 함수비를 도시하면 초기의 포화상태에서부터 고건조층까지의 변화과정이 명확하게 나타나게 된다. 따라서, 앞으로는 흡-수분 특성곡선을 흡인력과 체적 함수비의 관

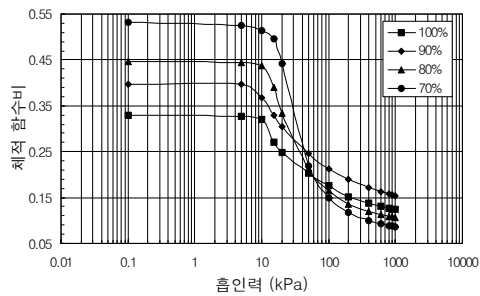
계로 도시하면 전 과정에서 일어나는 변화를 쉽게 파악할 수 있을 것이다.

전체적으로 시료는 초반에는 느슨한 흙이 조밀한 흙보다 체적함수비가 높게 나타난다. 그러나, 약 100 kPa 근처에서 조밀한 시료와 느슨한 시료의 체적함수비가 역전되는 경향을 보여 고건조층(1000 kPa)에서는 명확하게 조밀한 흙이 느슨한 흙에 비하여 높은 체적 함수비 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 점성토나 비점성토나 동일하게 나타나고 있다. 반면 비점성 흙은 경향이 역전되는 흡인력이 점성토보다 훨씬 적은 층에서 달라지게 된다.

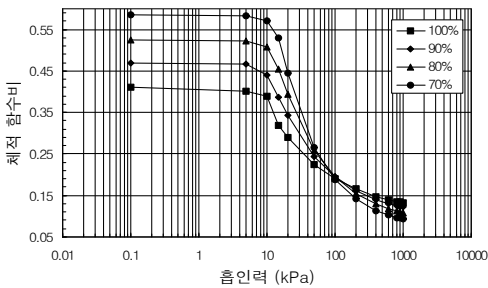
또한, 흙이 포화상태에서 건조과정으로 넘어가면서 간극 속에 공기가 유입되는 공기함입저항값의 크기가 달라지는 것을 알 수 있는데, 세립분의 함유량이 가장 많은 시료 A가 가장 큰 값을 보이고, 시료 B와 시료 C의 경우는 비슷한 값을 보이고 있다. 반면 세립분이 거의 없는 시료 D의 경우는 가장 작은 값을 나타내며 특성곡선의 경향도 급격하게 변화하는 것을 볼 수 있다.



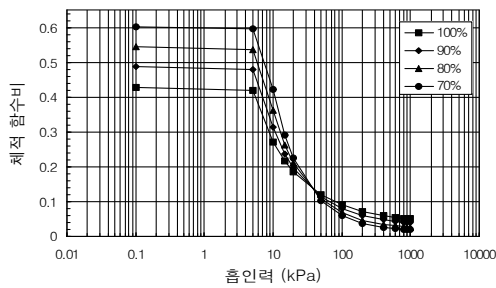
(a) Soil A



(b) Soil B



(c) Soil C



(d) Soil D

그림 2. 다짐률에 따른 흡인력과 체적함수비의 관계.

2. 특성곡선 방정식의 계수 도출

체적 함수비를 추정하기 위해서, 지금까지 발표된 방정식 중에서 측정치와 가장 근접한 결과를 나타내는 Fredlund and Xing(1994)이 제안한 방정식을 사용하였다. 표 3은 각 시료의 실험 결과를 바탕으로 도출된 계수를 정리한 것이다. 표에서 볼 수 있듯이 다짐 즉, 간극비의 변화에 따라서 각 계수가 변화는 것을 알 수 있다. 즉, 계수 a , b 및 c 는 간극비에 따라 증가하는 반면, h_r 은 감소하는 알 수 있다. 이러한 결과를 간극비에 따라 각각의 계수를 도시하면 그림 3과 같다. 흙의 종류 및 간극비에 따라 각 계수가 달라짐을 확인할 수 있다. 특히, 점질성 흙(MH, CL, ML)은 비슷한 경향을 나타내는 반면, 사질성 흙(SM)은 점질성 흙과 경향이 확연하게 구별된다. 이는 흙의 체적 함수비를 추정함에 있어서 흙의 종류 및 간극비에 따라 달라지는 각각의 계수를 고려해야 함을 입증한다.

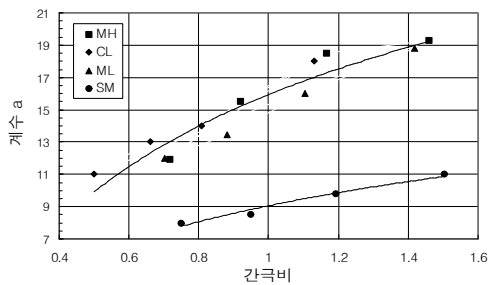
그림 3으로부터 점질성 흙의 각 계수를 추정하기 위한 조건식을 도출하면 다음과 같다.

표 3. Fredlund and Xing의 식 적용시 특성곡선 방정식의 계수.

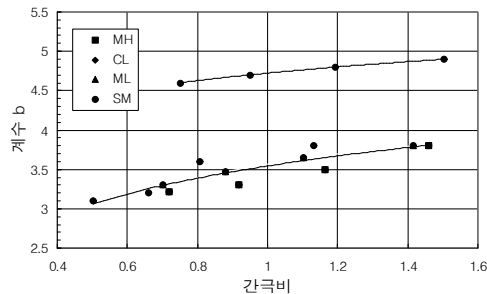
종 류	다짐률(%)	a	b	c	h_r
Soil A	100	11.94	3.22	0.31	2670
	90	14.64	3.38	0.40	2000
	80	17.50	3.55	0.48	1420
	70	19.32	3.75	0.57	1020
Soil B	100	8.07	2.91	0.25	3550
	90	11.00	3.15	0.34	2800
	80	13.50	3.36	0.40	2220
	70	16.80	3.58	0.52	1400
Soil C	100	12.00	3.30	0.37	2550
	90	13.47	3.47	0.44	1880
	80	16.00	3.65	0.52	1360
	70	18.81	3.80	0.65	910
Soil D	100	8.00	4.60	0.64	900
	90	8.50	4.70	0.75	700
	80	9.80	4.80	0.88	500
	70	11.00	4.90	1.00	380

$$a=8.720 \cdot \ln(VR)+15.941 \dots\dots\dots (7)$$

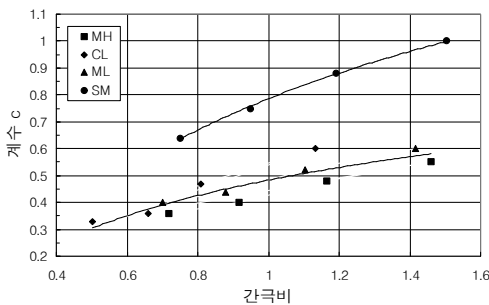
$$b=0.696 \cdot \ln(VR)+3.543 \dots\dots\dots (8)$$



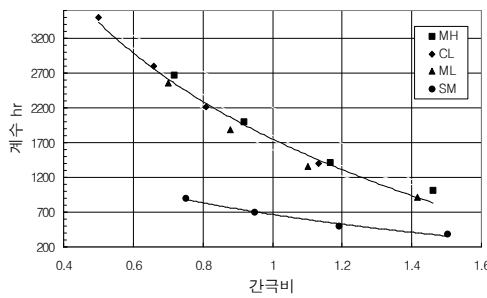
(a) 계수 a



(b) 계수 b



(c) 계수 c



(d) 계수 h_r

그림 3. Fredlund and Xing의 식 적용시 특성곡선 방정식의 각 계수의 변화.

$$c=0.259 \cdot \ln(VR)+0.483 \dots\dots\dots (9)$$

$$h_r=-2421.9 \cdot \ln(VR)+1751.8 \dots\dots\dots (10)$$

여기서, VR은 간극비(void ratio)를 의미한다. 또한, 사질성 흙인 경우는 다음과 같다.

$$a=4.448 \cdot \ln(VR)+9.055 \dots\dots\dots (11)$$

$$b=0.432 \cdot \ln(VR)+4.724 \dots\dots\dots (12)$$

$$c=0.523 \cdot \ln(VR)+0.786 \dots\dots\dots (13)$$

$$h_r=-760.85 \cdot \ln(VR)+666.23 \dots\dots\dots (14)$$

3. 특성방정식의 적용성 평가

이미 제안된 방정식은 다짐 등의 인공적인 방법에 의한 간극비가 달라지는 경우에는 예측할 수 없는 단점이 있다는 것이 위의 시험결과로부터 입증되었다.

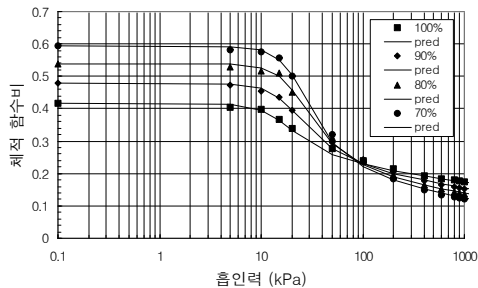
따라서, 이러한 단점을 보완하기 위하여 각 계수의 변화를 간극비에 따라 도시하여 이들의 관계로부터 특성곡선 방정식을 유도하면, 특성곡선 방정식에 영향을 미치는 입도, 세립분 중량비, 간극비 등을 고려하게 되어 현장 적용성이 뛰어나게 된다.

이 상의 결과를 바탕으로 사용된 시료의 간극비에 따른 체적함수비를 예측하여 실험결과와 비교하면 그림 4와 같다.

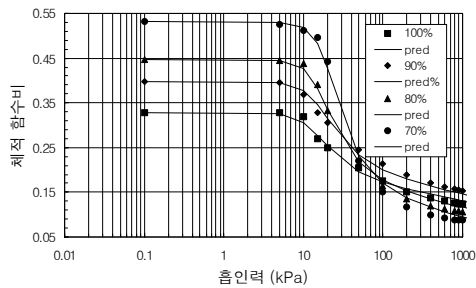
IV. 결 론

우리나라에 많이 분포하고 있는 주요 흙을 시료로 선정하여 일련의 시험을 통하여 물리적, 역학적 특성을 규명하고, 토양수분채취기를 개조하여 불포화토의 간극비에 따른 흡인력 변화를 측정하여 도출된 흡-수분 특성곡선 방정식 검증한 결과를 요약하면 다음과 같다.

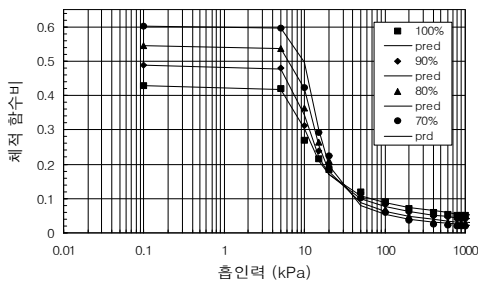
1. 체적함수비의 변화는 입도분포, 세립분의 함량 뿐만 아니라 간극의 대소에 따라서도 특성곡선이 변하는 것을 실험을 통하여 입증하였다.
2. 잔류 체적 함수비는 간극비에 따라 감소하는 경향을 보이는데 세립분의 함량에 따라 크기가 달라진다. 계수 a, 계수 b 및 계수 c는 간극비에 따라 증가하는 반면, 계수 h_r은 간극비에 따라 감소하는 것으로 나타났다.



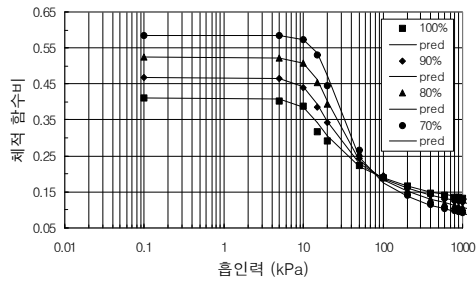
(a) Soil A



(b) Soil B



(c) Soil C



(d) Soil D

그림 4. 체적 함수비에 대한 측정치와 예측치의 비교.

3. 체적 함수비로 도시된 특성곡선은 초기의 포화상태뿐만 아니라 건조측에서도 흡인력의 구분이 명확하게 나타났다.

4. Fredlund and Xing이 제시한 특성곡선 방정식에 의한 동일한 조건의 간극을 가지는 시료에 대하여 체적 함수비의 추정이 가능하지만, 간극비나 다짐상태가 달라지는 경우에는 이를 보정할 수 있는 추가조건이 따라야 함을 실험을 통하여 입증하였다.

5. 불포화토의 간극상태를 고려하여 체적 함수비를 예측할 수 있는 조건식을 제시하였으며, 이를 예측치와 실험치를 비교하여 그 적용성을 입증하였다.

인 용 문 헌

- Ahuja. L. R., J. W. Naney. and R. D. Williams. 1985. Estimated Soil Water Characteristics from Simpler Properties or Limited Data. Soil Science Society of America Journal, 49(5) : 1100-1105.
- Arya L. M. and J. F. Paris. 1981. A Physicoempirical Model to Predict the Soil Moisture Characteristic from particle-size Distribution and Bulk Density. Soil Science Society of America Journal 45(6) : 1023-1030.
- Arya L. M. and T. S. Dierolf. 1992. Predicting Soil Moisture Characteristics from Particle-Size Distributions : An Improved Method to Calculate Pore Radii from Particle Radii. Proceedings of the International Workshop on indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. University of California Riverside. CA. pp. 115-124.
- Aubertin M., J. F. Richard. and R. P. Chapuis. 1998. A Predictive Model for the Water Retention Curve : Application to Tailings from Hard-Rock Mines. Canadian Geotechnical Journal 35(1) : 55-69.
- Basile A. and G. D'Urso. 1997. Experimental Corrections of Simplified Methods for Predicting Water Retention Curves in Clay-Loamy Soils from Particle-Size Distribution. Soil Science Society of America Journal 10(3) : 261-272.
- Cassel D. K., I. F. Ratliff. and J. T. Ritchie. 1983. Models for Estimating In-Situ Potential Extractable Water Using Soil Physical and Chemical Properties. Soil Science Society of America Journal 47(4) : 764-769.
- 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.
- Cresswell H. P. and Z. Paydal. 1996, Water Retention in Australian Soils 1. Description and Prediction Using Parametric Functions. Australian Journal of Soil Research 34(2) : 195-212.
- Fredlund D. G. and A. Xing. 1994. Equation for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnique 31(1) : 521-531.
- Fredlund M., D. Fredlund. and G. Wilson. 1997. Prediction of the Soil-Water Characteristic Curve from Grain-Size Distribution and Volume-Mass Properties. Proceedings of the Third Brazilian Symposium on Unsaturated Soils. NONSAT'97, Rio de Janeiro. pp. 521-531.
- Ghosh R. K. 1980. Estimation of Soil-Moisture Characteristics from Mechanical Properties of Soils. Soil Science 130(2) : 60-63.
- Gregson K., D. J. Hector. and M. McGowan. 1987. A One-parameter Model for the Soil Water Characteristic. Soil Science 38 : 483-486.
- Gupta S. C. and W. E. Larson. 1979. Estimating Soil Water Retention Characteristics from Particle Size Distribution, Organic Matter Percent and Bulk Density. Water Resources Research 15(6) : 325-339.
- Haverkamp R. and J. Y. Parlange. 1986. Predicting

- the Water-Retention Curve from Particle-Size Distribution 1 : Sandy Soils without Organic Matter. *Soil Science* 142(6) : 325-339.
- Huston J. L. and A. Cass. 1987. A Retentivity Function for Use in Soil-Water Simulation Models. *Soil Science Journal* 38(1) : 105-113.
- Jones D. E. and W. G. Holtz. 1973. Expansive Soils-The Hidden Disaster. *J. of Civil Engrg. ASCE* 17 : 87-89.
- Leong E. C. and H. Rahardjo. 1995. Typical Soil-Water Characteristic Curves for Two Residual Soils from Granitic and Sedimentary Formations. *Proceeding of the International Conference on Unsaturated Soils. UNSAT'95, Paris, France.* pp. 519-524.
- Livnch M., J. Kinsky and D. Zaslavsky. 1970. Correlation of Suction Curves with the Plasticity Index of Soils. *Journal of Materials* 5(1) 209-220.
- Mbagwn J. S. and C. N. Mbah. 1998. Estimating Water Retention and Availability in Nigerian Soils from Their Saturation Percentage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 29(7) : 913-922.
- Mishra S., L. C. Parker. and N. Singhal. 1989. Estimation of Soil Hydraulic Properties and their Uncertainty from Particle Size Distribution Data. *Journal of Hydrology* 108 : 1-18.
- Rahardjo H. and E. C. Leong. 1999. Soil-water characteristic curve and flux boundary problem. *ASCE Geotch. Special Pub.* 68 : 89-111.
- Rajkai K. and G. Varallyay. 1992. Estimating Soil Water Retention from Simpler Properties by Regression Techniques. *Proceeding of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils.* University of California Riverside. CA. pp. 417-426.
- Raws W. J. and D. I. Brakensiek. 1982. Estimating Soil Water Retention from Soil Properties. *Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE* 108(IR2) : 166-171.
- Raws W. J., T. J. Gish. and D. I. Brakensiek. 1991. Estimating Soil Water Retention from Soil Physical Properties and Characteristics. *adv. in Soil sci.* 16 : 213-234.
- Raws W. J., L. R. Ahuja. and D. I. Brakensiek. 1992. Estimating Soil Hydraulic Properties from Soils Data. *Proceeding of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils.* University of California Riverside. CA. pp. 329-340.
- Reddi L. N. and R. Poduri. 1997. Use of Liquid Limit State to Generalize Water Retention Properties of Fine-Grained Soils. *Geotechnique* 47(5) : 1043-1049.
- Smettem K. R. and P. J. Gregory. 1996. The Retention between Soil Water Retention and Particle Size Distribution Parameters for Some Predominantly Sandy Western Australian Soils. *Australian Journal of Soil Research* 34(5) : 695-708.
- 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).
- Song, C. S. and P. W. Chang. 1994. Development of constitutive model for the 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).
- 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).

- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- Tomasella J. and M. G. Hodnett. 1998. Estimating Soil Water Retention Characteristics from Limited Data in Brazilian Amazonia. *Soil Science* 163(3) : 190-202.
- Visser W. C. 1969. An Empirical Expression for the Desorption Curve. *Preceeding of UNESCO IASH Symposium, Wageningen, Netherlands.* pp.329-335.
- Williams J., R. Prebble, W. Williams and C. Hignett. 1983. The Influence of Texture, Structure and Clay Mineralogy on the Soil Moisture Characteristics. *Australian Journal of Soil Research* 21 : 15-32.
- Williams R. D. and L. R. Ahuja. 1992. Estimating Soil Water Characteristics Using Measured Physical Properties and Limited Data. *Proceeding of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils.* University of California Riverside. CA. pp. 329-340.

接受 2004年 9月 16日