

체적이 변하는 흙의 흡-수분 특성곡선식 개발 비교

Development on the Soil-Water Characteristic Curve Equation of Deformable Soils

이 인 모* ¹	Lee, In-Mo	이 형 주* ²	Lee, Hyung-Joo
김 기 섭* ³	Kim, Ki-Seop	김 영 옥* ⁴	Kim, Young-Uk

Abstract

A modified soil-water characteristic curve (SWCC) equation for deformable soils is proposed in this paper, and the validity of the proposed equation is proved through experimental study. For deformable soils which show huge volume change during desaturation, the soil-water characteristic curve should be expressed as a function of void ratio as well as suction. So, the volume change behavior is taken into account in this study. Two experimental approaches are proposed: one is the conventional pressure plate extractor test combined with the shrinkage test; and the other is the modified pressure plate cell test which is devised by the authors. The experimental results are plotted in 3-dimensional view taking the void ratio as well as the suction into account.

요 지

본 논문은 체적이 변하는 흙에 대하여 새로운 흡-수분 특성곡선 이론을 제시하고 이를 실험적으로 규명하였다. 그 결과, 점토와 같이 불포화되는 과정중 체적변형이 발생하는 흙의 흡-수분 특성곡선은 간극비와 흡인력의 함수이므로 체적변화를 무시할 수 없음이 밝혀졌다. 따라서 본 논문에서는 체적변화가 있는 경우 흡-수분 특성곡선을 구하기 위하여 두 가지 실험 방법을 채택하였다. 그 첫째는 전통적인 압력판 추출시험과, 중량함수비와 간극비와의 관계를 알 수 있는 수축함계시험을 실시하여 조합하는 방법이며, 둘째 방법은 압력판 셀을 새로이 고안하여 추출시험시에 체적 수축도 측정할 수 있는 수정된 압력판 셀 시험법을 이용하는 것이다. 이 실험결과를 3차원 상의 면(surface)에서 표현하여, 체적변형을 고려한 흡-수분 특성을 규명할 수 있도록 하였다.

Keywords : Soil-water characteristic curve, Suction, Void ratio, Volumetric water content

1. 서론

전통적인 토질역학이론은 대부분 흙이 완전히 포화되어 있다고 가정한 것에서 출발하였으며, 따라서 토질역학은 흙입자(soil particle)와 물(water)의 2상 역학으로 가정하여 분석하여 왔다. 그러나, 근래에 이르러 불포화토 거동의 중요성이 인식되어, 캐나다 Fredlund 교수 팀을 중심으

로 불포화토 토질역학이 발전되어 왔다. 불포화토의 역학적 성질을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소가 '흡-수분 특성곡선'이다. 흙은 불포화상태로 갈수록, 즉 함수비가 줄어들수록, 흙 내부에 부(-)의 간극수압이 작용된다. 이 부의 간극수압인 흡인력(suction)과 체적함수비를 나타내는 곡선이 흡-수분 특성곡선이다.

지금까지의 흡-수분 특성곡선 이론에서는 흙 모체의

*1 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 교수
 *2 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 박사과정
 *3 현대건설 토목설계실 사원
 *4 정희원, 고려대학교 토목환경공학과 박사 후 연구과정

간극비 변화가 포화상태로부터 건조되어 가는 과정 도중에 발생하지 않는다고 가정하였다. 이는 사질토 또는 세립분의 함량이 적은 흙에 대해서 경험적으로 성립이 된다. Fredlund 등은 이러한 가정하에 흙-수분 특성곡선식을 제안하였으며(Fredlund 와 Xing, 1994), 흙의 입도분포와 체적-질량 관계로부터 흙-수분 특성곡선을 예측할 수 있는 이론을 제안하였다. (Fredlund 등, 1997) 또한, 불포화토의 거동을 예측할 수 있도록 전단강도, 투수계수 등을 Fredlund 등이 제안한 흙-수분 특성곡선식으로부터 예측하기 위한 많은 이론이 전개, 발전되어 왔다.

그러나, 점토와 같이 건조 중 수축이 많이 발생하는 경우에는 그 가정이 성립하지 않는다. 점토의 경우 흙-수분 특성곡선의 이론적인 예측이나 기존의 특성곡선식을 이용한 불포화토 투수계수 예측 등은 그 이론적 근거가 의문시된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 기존의 흙-수분 특성곡선이론으로부터 건조도중 간극비 변화는 흙에 대한 새로운 이론을 제안하고 이를 실험적으로 구하고자 한다.

2. 흙-수분 특성곡선식

흙-수분 특성곡선을 정량적으로 수치화하기 위한 많은 연구들이 수행되었으며 Fredlund 등은 그림 1과 같은 일반적인 흙-수분 특성곡선을 수식으로 표현하기 위해 다음과 같은 식을 제안하였다. (Fredlund 와 Xing, 1994)

$$\theta_i = \theta_s \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \quad (1)$$

여기서, a , n , m 등의 상수는 실험결과로부터 회귀분석법을 사용하여 결정한다. 상수 a 는 흙-수분 특성 곡선에서 공기 침투 압력(air entry value)과 관계가 있으며, n , m 은 곡선의 기울기에 연관된 상수이다. 이들 상수를 구하는 방법은 Fredlund와 Xing(1994)의 논문에서 상세히 설명되어 있으므로 이를 참조하면 될 것이다. 그림 1과 식(1)에 표현된 흙-수분 특성곡선을 살펴보면 포화된 흙에 흡인력이 작용하면서 흡인력의 크기가 증가함에 따라 흙 매체의 가장 큰 간극의 물부터 빠져 나오게 된다. 흡인력이 계속 증가되면 흙 모체의 수분은 계속적으로 감소하게 된다. 즉, 체적함수비는 일정한 간극 크기하에서 흡인력만의 함수로 표현되고 있다. 식(1) 우변의 첫째 항은 초기 간극비에서의 포

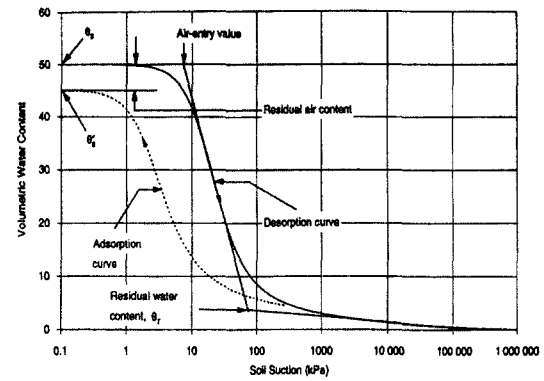


그림 1. 전형적인 흙-수분 특성곡선

화체적함수비로서 특성곡선의 시작점을 정의하고 두 번째 항은 흙의 입도분포 곡선과 관련하여 특성곡선의 형태를 sigmoid 형태로 정의하고 있다.

식(1)에서 초기체적함수비 θ_s 는 다음과 같은 체적-질량 관계식으로 표현되어 진다.

$$\theta_s = \frac{e_0}{1 + e_0} S = \frac{G_s}{1 + e_0} \omega \quad (2)$$

여기서, e_0 =초기 간극비로써 일정

그러나, 간극비가 변하는 경우 체적함수비는 식(2)와 같이 계산할 수 없으며 어떤 흡인력에 해당하는 체적함수비는 이 흡인력에 해당하는 간극비로부터 계산하여야 한다. 즉, 체적함수비는 더 이상 흡인력만의 함수가 아니라 흡인력과 이 흡인력에 해당하는 간극비의 함수로 표현된다. 실제 실험에서 체적함수비는 간극비를 고려하여 구해야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 식(1)을 다음과 같이 변경한 수정식을 제안하였다.

$$\theta_i = \theta_s \left[\frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right\}^m} \right] \quad (3)$$

$$\theta_s = \frac{e(w)}{1 + e(w)} = \frac{e(\psi)}{1 + e(\psi)} \quad (4)$$

식(3)의 우변 첫항은 어떤 흡인력에서 흙이 갖는 포화체적함수비로 더 이상 초기값이 아니며 식(4)에서와 같이 간극비의 함수가 된다. 즉, 식(3)의 흙-수분 특성곡선식은 식(1)과 달리 흡인력만의 함수가 아닌 간극비와 흡인력의 함수이며 그림 2와 같이 3차원 좌표상에서 표현될 수 있을 것이다.

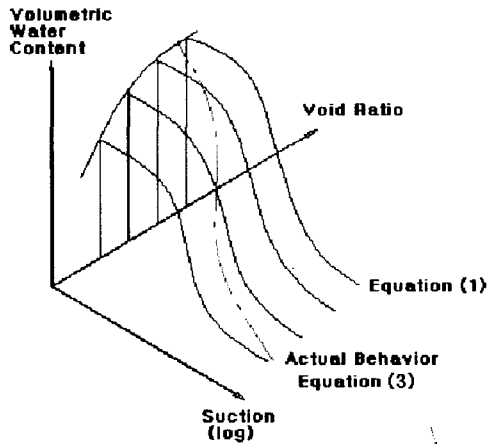


그림 2. 체적이 변할때의 흡-수분특성곡선

식 (3)와 그림 2의 관점에서 볼 때, 기존의 흡-수분 특성 곡선은 체적이 변하는 흡의 경우, 3차원 공간상의 좌표를 2차원 평면상에 투영하여 얻어낸 곡선이 된다. 그림 2에서 개개의 곡선은 간극비 변화가 없다고 가정할 때 어떤 초기 간극비에서 식(1)로 표현되는 흡-수분 특성곡선을 의미한다.

3. 실험

체적변형을 고려한 흡-수분 특성곡선을 얻기 위한 실험으로 두가지 방법을 채택하였다. 흡의 간극비 변화를 측정하지 않는 기존 실험의 중량함수비-흡인력 관계와 수축한계 시험으로부터 구한 중량함수비-간극비 관계를 결합하는 방법과 기존의 실험 방법을 변형하여 새로이 제작한 기구를 사용하여 각 흡인력 단계에서의 함수비와 간극비를 직접 측정하는 변형실험을 각기 독립적으로 수행하였다.

3.1 시료

본 실험에서는 울촌 산업단지 조성 현장에서 채취한 슬러리 형태의 해성점토를 이용하였다. 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해서 액·소성시험, 입도분석 시험, 비중시험, X-Ray Diffraction 및 X-Ray Fraction 시험을 실시하였다. 표 1은 XRF 시험으로부터 구한 울촌 점토의 10대 주요 원소를, 표 2는 물리적 특성을 보여준다. 그림 3은 Malvern Particle Size Analyzer로 구한 울촌 점토의 입도분포 곡선을 보여준다. 울촌 점토는 SiO₂성분이 많은 일라이트로 2 μm이하의 세립분이 약91%에 달하였으며 통일분류상으로 MH로 판명되었다.

표 1. 울촌 점토의 주요 10대 광물

원소	퍼센트(%)
SiO ₂	50.09
Al ₂ O ₃	16.85
Fe ₂ O ₃	6.30
TiO ₂	0.75
MnO	0.11
CaO	1.51
MgO	3.17
K ₂ O	2.81
Na ₂ O	5.26
P ₂ O ₅	0.10
L.O.I	12.97
합계	99.91

표 2. 울촌점토의 물리적 성질

비중	아터버그 지수 (%)			2μm 이하 세립분 함량 (%)	통일 분류
	LL	PL	PI		
2.66	53	20	33	90.97	MH

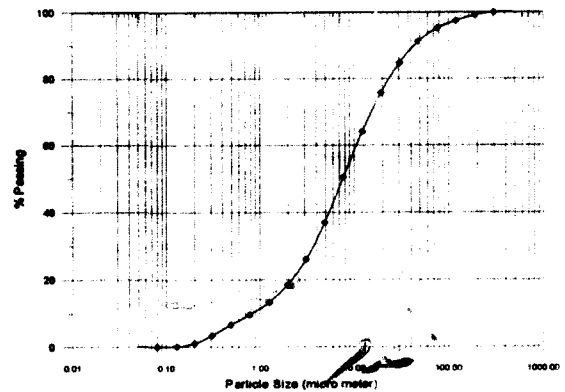


그림 3. 울촌 점토의 입도분포 곡선

3.2 실험 장비 및 방법

3.2.1 간극비-함수비 관계실험

매립현장의 조건과 동일한 함수비 150%의 슬러리 상태인 울촌 점토의 간극비-중량함수비 관계를 구하기 위하여 ASTM D427 (ASTM, 1990b)을 근거로 한 수축한계실험을 실시하였다. ASTM D427의 방법은 시료 크기가 작아 상대적으로 오차가 큰 것으로 판단되어 그림 4와 같은 기구를 제작하였다. 직경 10 cm, 높이 1 cm의 용기에 슬러리 시료를 넣은 후 자연건조시켜 간극비를 측정하였다.

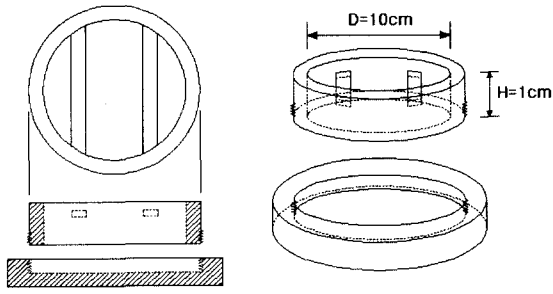


그림 4. 간극비-함수비 관계를 구하기 위한 수축한계실험

3.2.2 흡인력-함수비 관계실험

기존의 전통적인 흡-수분 특성곡선, 즉 흡인력-함수비 관계를 구하기 위하여 압력판 추출시험과 데시케이터 실험을 실시하였다. 1500 kPa 까지의 흡인력 범위에서는 ASTM D2325-68 (ASTM, 1990a)에 따라 그림 5의 압력판 추출기 (Soilmoisture Equipment Corp.)를 이용하였다. 물리적으로 적용하기 불가능한 그 이상의 범위에 대해서는 데시케이터 실험을 이용하여 삼투흡인력(osmotic suction)을 적용하였다. 압력판 추출기는 그림 5와 같은 밀폐된 용기 안에 특정한 값의 공기침투압력(air entry value)을 갖는 다공질판 위에 시료를 설치하고, 흡인력을 작용시킨다. 간극공기압과 간극 수압의 차인 매트릭 흡인력($u_a - u_w$)은 수압을 (-)로 가하는 것이 곤란하므로 수압을 대기압 상태로 두고 공기압을 증가시켜 흡인력을 작용시켰다. 실제 건조 현상에서는 $u_a=0$ 을 기준(reference)로 하여 수분이 빠져짐에 따라 u_w 가 (-)가 되면서 흡인력이 발생하나 실험에서는 $u_w=0$ 을 기준으로 하여 u_a 를 변화시키면서 흡인력을 발생시킨다. (axis-translation technique; Hilf, 1956)

데시케이터 실험에서는 포화된 염용액을 밀폐된 데시케이터내에 넣어 두어 용기내의 상대습도와 수증기압이 어느 특정값을 가지게 됨에 따라 흡 시료에 삼투흡인력을 가하도록 하였다. (Young, 1967; Richards, 1965) 본 실험에 사용한 염용액과 작용 흡인력은 표 3과 같다.

위의 두 실험으로부터 중량함수비-흡인력관계의 흡-수분 특성곡선을 구할 수 있었다. 앞서 설명한 바와 같이 이 결과에 3.2.1에서의 간극비-함수비 관계실험결과를 연계함으로써 건조도중의 흡의 간극비변화를 고려한 흡-수분 특성곡선을 구할 수 있었다.

한편, 본 연구에서는 위와 같이 독립된 두 가지 실험결과를 결합하여 흡-수분 특성곡선을 구한 방법에 대하여 아래의 실험방법을 변형하여 각 흡인력 단계마다 간극비 변

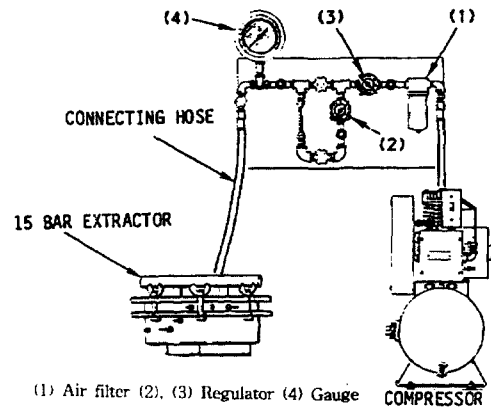


그림 5. 실험장치 개요

표 3. 염용액과 osmotic suction

염용액	상대습도 (%)	온도 (°C)	흡인력 (kPa)
Magnesium Chloride $MgCl_2 \cdot 6H_2O$	45	20	108067
Magnesium Nitrate $Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	62	20	64696
Sodium Chloride NaCl	76	20	37141

화, 즉 체적변화를 측정할 수 있는 기구를 제작하여 실험하였다.

그림 6은 새로이 고안한 압력판 셀(pressure plate cell)로써 기존의 실험방법과 달리 시료의 체적변화를 측정하도록 하였다. 그림 7은 그림 6의 셀을 그림 5의 압력 챔버 안에 설치한 것이다. 체적변화는 수축한계실험 방법을 이용하여 구하였다. 즉, 체적을 아는 셀의 내부에 시료를 넣은 후, 흡인력을 가하면 평형상태에 이르기까지 시료내의 수분은 배수관을 따라 대기압상태의 바깥부분으로 빠져나간다. 시험이 종료된 후 시료의 체적은 수축한계실험에서 처럼 수은을 이용하여 측정하였다. 시료의 함수비를 측정함으로써 흡인력-중량함수비-간극비 관계로부터 흡인력-체적함수비의 흡-수분 특성곡선을 구할 수 있다.

4. 실험 결과

압력판 추출기를 이용한 실험은 총 17회, 데시케이터 실험은 총 3회 실시하였으며, 이를 정리하면 표 4와 같다. 한편 수정 압력판 셀을 이용한 실험은 총 9회 실시하였으며 표 5에 정리되어 있다.

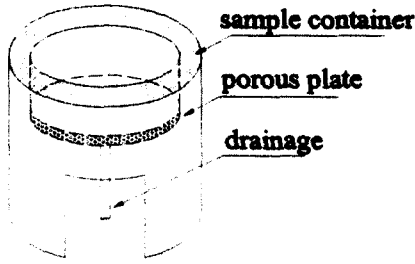


그림 6. 수정 압력판 셀

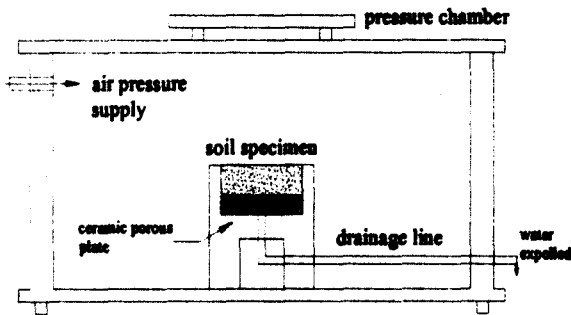


그림 7. 수정 압력판 셀 시험기

그림 8은 수축한계실험 결과로 울촌 점토의 간극비-중량함수비 관계를 나타내며, 그림 9는 간극비 변화를 측정하지 않는 기존의 실험방법으로 구한 울촌 점토의 흡인력-중량함수비 관계이다.

그림 10은 그림 8과 그림 9의 결과로부터 구한 울촌 점토의 흡인력-체적함수비, 흡인력-포화도 관계의 흡-수분 특성곡선을 보여주고 있다. 즉, 앞서 설명한 바와 같이 중량함수비-간극비 관계를 알고 실험에서 구한 흡인력-중량함수비 관계에 중량함수비에 대응하는 간극비를 대입하여 체적함수비와 포화도를 계산함으로써 얻어진 흡-수분 특성곡선을 그림 10에 나타내었다. 그림 10의 흡-수분 특성곡선과 건조 도중의 간극비변화를 고려하지 않고 초기 간극비가 일정($e=e_0=4.123$)하다고 간주한 흡-수분 특성곡선을 비교하면 그림 11과 같다. 그림 11에서 알 수 있듯이 두 결과는 매우 상이하여 간극비가 일정하다고 가정한 경우, 곡선의 형태가 뚜렷한 변곡점을 보이지 않으며 간극비 변화를 고려한 흡-수분 특성곡선은 흔히 알려진 흡-수분 특성곡선의 전형적인 형태를 보여주고 있다.

한편, 그림 12는 새로이 제안한 수정압력판 셀을 이용하여 구한 흡-수분 특성곡선을 보여준다. 그림 13은 그림 10과 그림 12의 결과를 비교하기 위하여 두 실험으로부터 각각 구한 흡인력-체적함수비 관계의 흡-수분 특성곡선을

표 4. 함수비와 흡인력 관계

	흡인력 (kPa)	중량 함수비w	간극비 e	부피 함수비 θ	포화도 s
압력판 추출 시험	7	0.922	2.45	0.710	1.00
	10.12	0.894	2.38	0.704	1.00
	17	0.759	2.02	0.668	1.00
	17.7	0.756	2.01	0.668	1.00
	35.3	0.688	1.83	0.646	1.00
	50	0.639	1.70	0.629	1.00
	70	0.615	1.64	0.620	1.00
	100	0.577	1.54	0.605	1.00
	150	0.527	1.40	0.583	1.00
	300	0.465	1.24	0.553	1.00
	400	0.427	1.14	0.532	1.00
	500	0.412	1.10	0.523	1.00
	700	0.387	1.03	0.507	1.00
	900	0.338	0.91	0.472	0.99
	1100	0.334	0.90	0.469	0.99
1400	0.331	0.89	0.466	0.99	
1450	0.327	0.88	0.463	0.99	
대시게이터 시험	33548	0.089	0.68	0.141	0.34
	64696	0.066	0.68	0.105	0.26
	107816	0.038	0.68	0.060	0.15

표 5 수정압력판 실험 결과

	흡인력 (kPa)	중량 함수비w	간극비 e	부피 함수비 θ	포화도 s
수정 압력판 시험	0.01	1.550	4.123	0.805	1.00
	17	0.776	1.960	0.697	1.00
	70	0.622	1.610	0.634	1.00
	100	0.584	1.550	0.609	1.00
	150	0.540	1.430	0.591	1.00
	300	0.465	1.210	0.559	1.00
	400	0.435	1.134	0.542	1.00
	1000	0.353	0.930	0.486	1.00
	1450	0.332	0.915	0.461	0.97
	33548	0.089	0.680	0.141	0.35
	64696	0.067	0.680	0.105	0.26
대시게이터 시험	107816	0.038	0.680	0.061	0.15

비교하고 있다.

그림 13에서 알 수 있듯이 새로이 제안한 수정 압력판 셀 시험으로부터 구한 흡-수분 특성곡선과 종래의 실험과 수축한계 실험결과를 조합하여 얻은 흡-수분 특성곡선은 거의 일치하는 경향을 보여준다. 울촌 점토의 공기침투압력(air entry value)은 대략 1,000 kPa로 일반적으로 알려

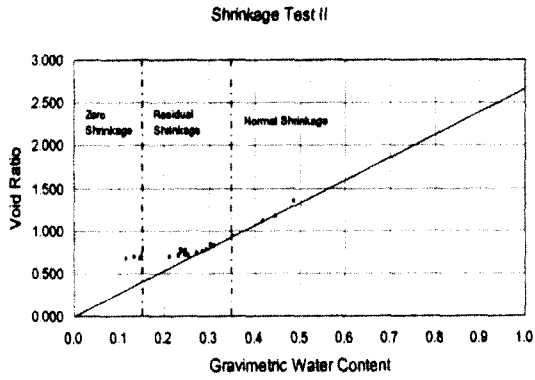


그림 8. 율촌 점토의 간극비-중량함수비 관계

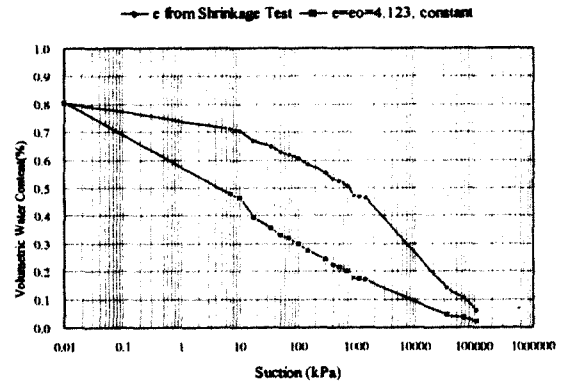


그림 11. 간극비 변화를 고려하는 경우와 고려하지 않는 경우의 특성곡선 비교

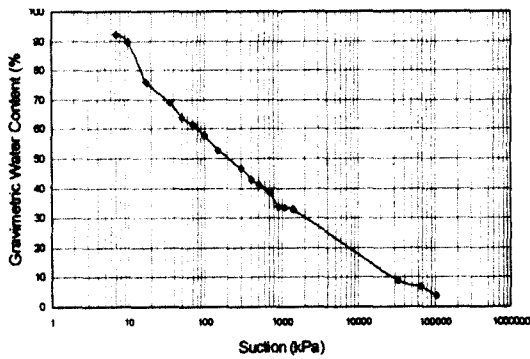


그림 9. 중량함수비 흡-수분 특성곡선

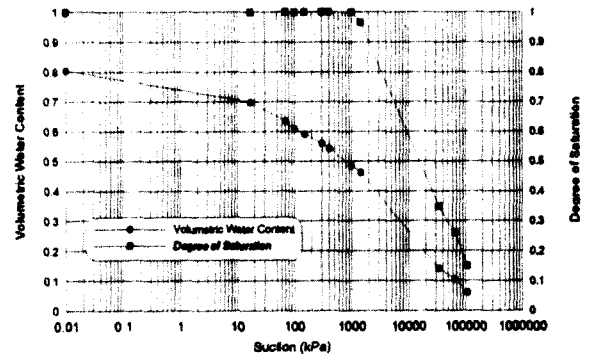


그림 12. 수정 압력판 셀 시험으로부터 구한 흡-수분 특성곡선

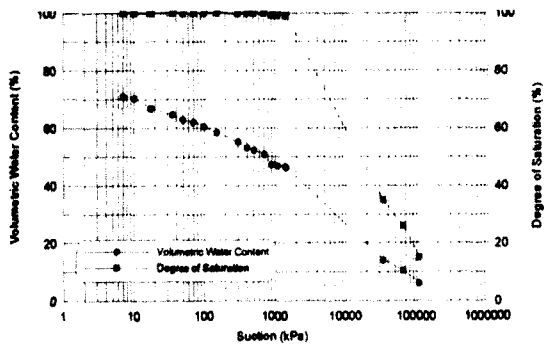


그림 10. 율촌 점토의 흡-수분 특성곡선

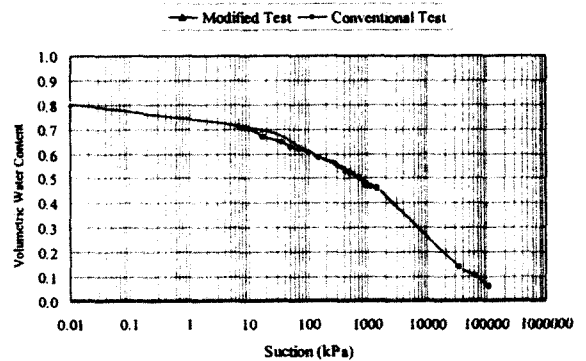


그림 13. 흡-수분 특성곡선의 비교

진 풍화잔적토나 사질토의 그것보다 상당히 높았으며 중량함수비 35%에 이르기까지 포화상태를 유지하고 있다. 또한, 체적함수비로 표현된 흡-수분 특성곡선은 흡의 공기침투압력 (air entry value)인 1,000 kPa을 명확히 나타내지 못하고 있다. 그림 8의 간극비-중량함수비 관계와 그림 13의 흡-수분 특성곡선으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. (1) 율촌 점토는 건조 과정중 간극비가 점차 작아짐에 따라 공기침투압력(air entry value)이 일반적인 값보다

훨씬 크게 된다. (2) 즉, 큰 흡인력에 이르기까지 흡은 포화상태를 유지하며 공기침투압력(air entry value)에 이르기까지의 체적변화는 유출된 수분의 체적변화와 동일하다. (3) 따라서, 체적함수비로 표현한 흡-수분 특성곡선은 정확한 공기침투압력(air entry value)을 표현하지 못하고, 포화도-흡인력관계로 나타내야 한다. (4) 간극비 변화를 고려하지 않는 경우의 흡-수분 특성곡선은 흡의 실제 거동과 매우 상이한 형태를 보여지게 된다.

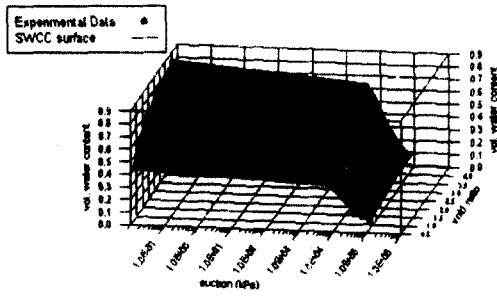


그림 14. 3차원 공간에서의 흡-수분 특성곡선

그림 14는 식 (3)의 형태에 따라 울촌 점토의 흡-수분 특성곡선을 흡인력-간극비-체적함수비의 3차원 공간 상에 표현한 것이다. 그림에서 보여주는 3차원 곡면은 식 (1)로 표현되는 간극비가 일정한 경우의 흡-수분 특성곡선이 연결되어 형성된 것으로 실험값들은 이 곡면에 위치한다. 그림 12 또는 그림 13의 흡-수분 특성곡선은 그림 14의 실험값을 흡인력-체적함수비의 2차원 평면상에 투영하여 연결한 곡선이 된다.

5. 결론

건조 과정 중 체적이 변하는 울촌 점토의 흡-수분 특성곡선을 각기 다른 두가지 실험방법으로 구한 후, 각 특성곡선을 상호 비교하고, 실험결과와 이론을 비교, 검토하였으며 그 결과를 요약하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 체적이 변하는 흙의 공기침투압력(air entry value)은 일반적으로 알려진 값보다 크다. 울촌 점토의 경우, 간극은 중량함수비 35%에 이르기까지 포화도 100%를 유지한채, 계속 감소하며 1,000 kPa의 공기침투압력(air entry value)을 갖게 된다.

- (2) 체적함수비는 식 (3)에서와 같이 간극비와 흡인력의 함수로 표현되며 3차원 공간상에 표현할 수 있다.
- (3) 종래의 실험방법과 수축한계실험을 조합한 결과와 새로이 제안한 수정 압력판 셀 실험의 결과는 거의 일치하며 두 방법 중 어느 방법을 사용하여도 체적이 변하는 흙의 흡-수분 특성곡선을 구할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 현대건설(주)와 교육부(BK 인력양성사업)의 지원에 의하여 이루어진 것으로 두 기관에 감사드립니다.

참고 문헌

1. ASTM (1990a), Test method for capillary-moisture relationships for coarse- and medium-texture soils by porous-plate apparatus, ASTM D2325-68, American Society for Testing and Materials, Philadelphia
2. ASTM (1990b), Standard test method for shrinkage factors of soils, ASTM D427-83, American Society for Testing and Materials
3. Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994), Equations for the soil-water characteristic curve, Canadian Geotechnical Journal, 31: 521-532
4. Fredlund, M.D., Wilson, G.W. and Fredlund, G.D. (1997), Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties, 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soil, Rio de Janeiro, Brazil.
5. Hilf, J.W. (1956), An investigation of pore-water pressure in compacted cohesive soils, Ph. D. thesis, Tech. Memo. No. 654, U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Div., Denver, Colo.
6. Richards, B.G. (1965), Measurement of the free energy of soil moisture by the psychometric technique using thermistors, In Moisture equilibria and moisture changes in soils beneath covered areas, Edited by G.D. Aitchison, Butterworths, Australia, pp. 39-46
7. Young, J.F. (1967), Humidity control in the laboratory using salt solutions, Journal of Applied Chemistry, Vol. 17, pp. 241-245

(접수일자 2000. 4. 21)