

풍화잔적토와 체적이 변하는 흙의 흙-수분 특성곡선 Soil-Water Characteristic Curves of Residual Soils and Deformable Soils

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 이형주²⁾, Huyng-Joo Lee, 김기섭³⁾, Ki-Seop Kim

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea University

²⁾ 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea University

³⁾ 현대건설주식회사 토목설계실, Hyundai Engineering & Construction, Co., Ltd.

SYNOPSIS : This study introduces the current theory of the SWCC and tries to verify the theory by performing laboratory tests for the local soils of Korea. First, the SWCCs of Poi-dong soil and Shinnae-dong soil, the most typical weathered residual soils in Korea, were experimentally obtained and the results were compared among others. Second, a SWCC model for deformable soils was proposed. For deformable soils, which show huge volume change during desaturation, the volume change behavior should be considered, and the SWCC should be expressed as a function of void ratio as well as suction.

Key words : Soil-water characteristic curve, Volumetric water content, Particle size distribution, Packing porosity, Void ratio, Volume change

1. 서론

실제 자연지반의 흙은 불포화상태로 존재하는 경우가 많다. 불포화토는 흙입자, 물, 공기, contractile skin의 4상구조로 이루어지며 포화토와 다른 거동을 보이게 된다. 포화토의 거동은 유효응력($\sigma - u_w$)의 함수로 나타낼 수 있으나 불포화토는 순 수직응력($\sigma - u_a$) 및 흡인력($u_a - u_w$)의 함수로 표현되어진다. (Fredlund et al., 1977)

불포화된 흙 모체내의 수분은 간극크기와 흡인력의 함수로 표현된다. 이러한 흙 모체내 수분과 흡인력간의 관계를 포화도-흡인력, 중량함수비-흡인력, 체적함수비-흡인력 등의 형태로 표현할 수 있으며, 이 관계를 흙-수분 특성곡선이라 정의한다. (Williams, 1982) 즉, 흙-수분 특성곡선이라 함은 어떤 흡인력이 작용할 때 흙 모체가 보유할 수 있는 수분의 양을 의미한다.

불포화토의 거동을 설명하기 위하여 흙-수분 특성곡선을 이용하는 많은 해외 연구들이 진행되어 왔으며, 현재, 체적변형, 전단강도, 투수계수, 열전도도, 증발산 현상과 같은 불포화토의 거동을 흙-수분 특성곡선으로부터 해석, 예측하는 이론이 발달하였다. 따라서, 불포화토 이론의 출발점은 흙-수분 특성곡선이라 할 수 있다.

본 연구에서는 기본적인 흙-수분 특성곡선이론을 설명하고 국내의 대표적인 풍화잔적토를 대상으로 흙-수분 특성곡선을 실험을 통하여 구하고, 실험결과와 이론을 비교, 분석하였다. 또한, 준설매립지반에

서의 해성점토와 같이 건조수축과정에서 그 체적이 변하는 흙의 흙-수분 특성곡선에 대한 이론을 제시하고 실험결과와 비교, 연구하였다.

2. 흙-수분특성곡선

2.1 흙-수분 특성곡선식과 이론적 예측

흙-수분 특성곡선을 어느 흡인력 하에서의 흙의 거동, 즉 흙의 증발 또는 습윤에 따른 투수, 전단강도 및 체적 변화 등과 연관시키려는 연구가 불포화토이론에서 주된 관심 사항으로써 계속적으로 이루어져 왔다. 이를 위해서는 특성곡선의 수식화가 요구되었다. Fredlund와 Xing (1994)은 흙 모체의 간극 크기 분포곡선(pore-size distribution curve)을 고려하여 다음과 같은 이론식을 제안하였다.

$$\theta = C(\psi) \frac{1}{\{\ln[e + (\frac{\psi}{a})^b]\}^c} \quad (1)$$

여기서, $C(\psi) = 1 - \frac{\ln(1 + \frac{\psi}{C_r})}{\ln(1 + \frac{1000000}{C_r})}$, $0 \leq \psi \leq 10^6$ kPa

a, b, c 등의 상수는 회귀분석법을 사용하여 결정하며, C_r 은 잔류 체적함수비 θ_r 와 흡인력의 관계를 나타내는 경험적 상수로 Fredlund는 3000 kPa을 취하였다. $C(\psi)$ 는 흡인력이 10^6 kPa에 접근함에 따라 체적함수비를 0으로 만들기 위한 보정계수로서 특별한 이론적 의미는 없다. Leong, Rahardjo (1997)은 식 (1)을 비롯한 여러 흙-수분 특성곡선 제안식을 비교, 검토한 후 그 중 Fredlund 와 Xing가 제안한 식 (1)이 가장 적합함을 밝힌 바 있다.

이러한 흙-수분 특성곡선을 실험적으로 구하는 것은 매우 번거롭고 많은 시간과 비용을 요구하므로 기본적인 흙의 물성치로부터 흙-수분특성곡선을 예측하고자 하는 이론이 연구되어왔다. Fredlund 등 (1997)은 흙의 입도분포와 체적-질량 관계로부터 흙-수분 특성곡선을 예측하는 이론을 제안하였다. 먼저 입도분포 곡선이 흙-수분 특성곡선과 그 형태가 유사함을 이용하여 (Arya, Paris, 1981) 식(1)로부터 입도분포곡선을 식 (2)와 같이 나타내었다.

Fredlund 등은 입도분포를 식 (2)로 수식화한 다음, 분포곡선을 여러 구간으로 나누었다. 각 구간의 입경으로부터 다져진 상태에 따라 주어지는 흙의 간극비, packing porosity를 가정하고 입경에 해당하는 간극크기(pore size)를 구하고 이로부터 모관법칙을 이용, 흡인력 값을 구하였다. 전 구간에 걸쳐 이러한 과정을 반복하여 이론적인 흙-수분 특성곡선을 구할 수 있다. (Fredlund et al.,1997)

$$P_p(d) = \frac{1}{\ln[e + (\frac{g_a}{d})^{g_r}]^{g_m}} \times [1 - [\frac{\ln(1 + \frac{d_r}{d})}{\ln(1 + \frac{d_r}{d_m})}]^7] \quad (2)$$

여기서, $P_p(d)$ = 입경 d를 통과하는 흙의 양(%), g_a, g_n, g_m = 계수, d = 입자크기(mm), d_r = 잔류입자직경 (mm), d_m = 최소입자직경 (mm)

2.2 체적이 변하는 흙의 흙-수분특성곡선식

지금까지의 흙-수분 특성곡선 이론에서는 흙 모체의 간극비 변화가 건조과정 도중에 발생하지 않는다고 가정하였다. 이는 사질토 또는 세립분의 함량이 적은 흙에 대해서 경험적으로 성립이 된다. Fredlund 등은 이러한 가정에 흙-수분 특성곡선식을 제안하였으며(1994), 흙의 입도분포와 체적-질량 관계로부터 흙-수분 특성곡선을 예측할 수 있는 이론을 제안하였다(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. 따라서, 점토의 경우 흙-수분 특성곡선의 이론적인 예측이나 기존의 특성곡선식을 이용한 불포화토 투수계수 예측등은 그 이론적 근거가 취약하다고 할 수 있다.

식 (1)에서 체적함수비 θ 는 다음과 같은 체적-질량 관계식으로 표현되어 진다.

$$\theta = \frac{e_o}{1+e_o} S = \frac{G_s}{1+e_o} \omega \quad (3)$$

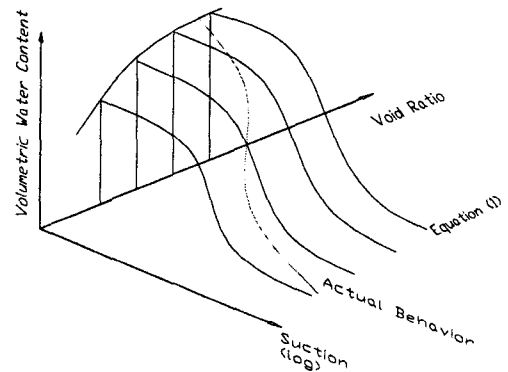
여기서, e_o =초기 간극비로써 일정

그러나, 간극비가 변하는 경우 체적함수비는 식 (3)과 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 하며 이에 따라 식 (1)은 다음과 같이 변경할 수 있다.

$$\theta_i = \theta_{s_i} \left[\frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right]} \right]^m \quad (4)$$

$$\theta_{s_i} = \frac{e(w)}{1+e(w)} = \frac{e(\psi)}{1+e(\psi)} \quad (5)$$

식 (4)의 우변 첫항은 어떤 흡인력에서 흙이 갖는 포화체적함수비로 더 이상 일정한 크기의 초기값이 아니며 식 (5)에서와 같이 간극비의 함수가 된다. 식 (4)의 흙-수분 특성곡선식은 식 (1)과 달리 흡인력만의 함수가 아닌 간극비와 흡인력의 함수이며 그림 1과 같이 3차원 좌표상에서 표현된다. 식 (4)와 그림 1의 관점에서 볼 때, 기존의 흙-수분 특성곡선은 체적이 변하는 흙의 경우, 3차원 공간상의 좌표를 2차원 평면상에 투영하여 얻어낸 곡선이 된다. 그림 1에서 개개의 곡선은 간극비 변화가 없다고 가정할 때 어떤 초기 간극비에서 식 (1)로 표현되는 흙-수분 특성곡선을 의미한다.



3. 흙-수분 특성곡선 실험

3.1 시료

본 실험에서는 서울의 신내동, 포이동 지역에서 채취한 풍화잔적토와 울촌 산업단지 조성 매립준설 현장에서 채취한 슬러리 형태의 해성점토를 이용하였다. 각각의 시료의 물리적 특성을 파악하기 위해서 액·소성시험, 체분석 시험, 비중시험 및 다짐시험, X-Ray Diffraction 및 X-Ray Fraction 시험을 실시하였다. 시료의 물리적 성질은 표 1과 같고, 표 2는 울촌 점토의 주요광물을 나타낸다. 각 시료의 입도

그림 1. 체적이 변할 때의 흙-수분특성곡선

분포는 그림 2와 같다.

표1. 각 시료의 물성치

soil	Specific Gravity	Atterberg Limits (%)			Clay and Silt Size (%)	OMC(%)	USCS
		LL	PL	PI			
Yulchon	2.66	53	20	33	90.97		MH
Poi-dong	2.686	34	20	14	47.36	16	SW-SM
Shinnae-dong	2.633	NP			13.33	10	SC

표 2. 울촌 점토의 주요 10대 광물

Element	Percentage
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
Total	99.91

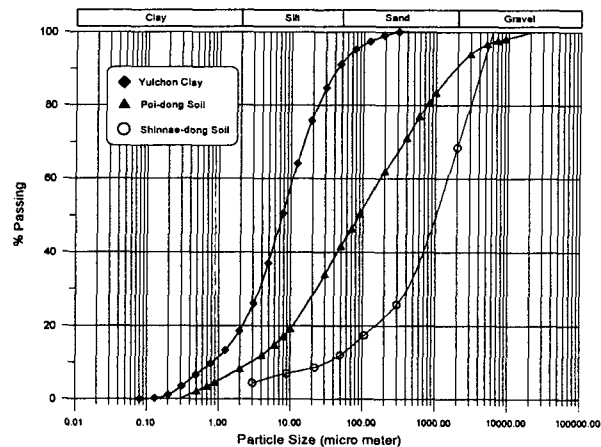


그림 2. 각 시료의 입도분포

3.2 실험 장비 및 방법

풍화잔적토의 흡-수분 특성곡선을 구하기 위해 캐나다 Saskatchewan 대학에서 개발한 템피셀과 압력판 추출시험기(Soilmoisture Equipment Corp., USA)를 이용하였다. 흡인력은 간극공기압과 간극 수압의 차인 매트릭 흡인력($u_a - u_w$)을 가하여 작용시키는데 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 빠짐에 따라 u_w 가 (-)가 되면서 흡인력이 발생하나 실험에서는 $u_w=0$ 을 기준으로 하여 u_a 을 변화시키면서 흡인력을 발생시킨다. (axis-translation technique, Hilf, 1956) 그림 3,4는 각각 템피셀과 압력판 추출시험기를 보여준다. 0-500 kPa의 범위에 대하여서는 템피 셀을 이용하였으며, 포이동 시료의 경우 추가적으로 500 kPa를 넘는 범위에 대하여 압력판 추출시험기를 이용하여 실험하였다. 시료는 직경 64 mm, 높이 25mm로 정적으로 다짐을 하였다.

체적변형을 고려한 흡-수분 특성곡선을 얻기 위한 실험으로는 두가지 방법을 채택하였다. 흡의 간극비 변화를 측정하지 않는 기존 실험(압력판 추출시험기)의 중량함수비-흡인력 관계와 수축한계 시험으로부터 구한 중량함수비-간극비 관계를 결합하는 방법과 기존의 실험 방법에 시료의 체적을 측정하는 단계를 추가하도록 새로이 제작한 기구를 사용하여 각 흡인력 단계에서의 함수비와 간극비를 직접 측정하는 실험을 각기 독립적으로 수행하였다. 압력판 추출시험기 실험에서 물리적으로 적용하기 불가능한 1,500 kPa 이상의 범위에 대해서는 데시케이터 실험을 이용하여 osmotic suction을 적용하였다. 데시케이터 실험에서는 포화된 염용액을 밀폐된 데시케이터에 두어 용기내의 상대습도와 수증기압이 어느 특

그림 8,9에 입도분포와 표 1, 4의 시료조건으로부터 이론적으로 예측한 흡-수분 특성곡선을 실험결과와 함께 나타내었다. 범례의 P_c 는 예측에 사용한 packing porosity값을 나타낸다. packing porosity는 흙의 다져진 상태에 따라 결정되는 것으로 동일한 흙이라도 그 상태에 따라 그 값이 달라지게 되며, 몇 개의 실험 결과가 있다면 그로부터 그 흙의 packing porosity를 회귀분석으로부터 구할 수 있다. 그림 8,9로부터 흡-수분 특성곡선의 예측 결과는 packing porosity에 크게 의존하며, 보다 정확한 특성곡선의 예측을 위해서는 packing porosity를 실험결과로부터 구하여야 함을 알 수 있다. 실험에 사용한 신내동 시료 및 포이동 시료에 대하여 실험값에 가장 근접하는 예측 곡선은 packing porosity가 각기 0.6440, 0.8703일 때였다.

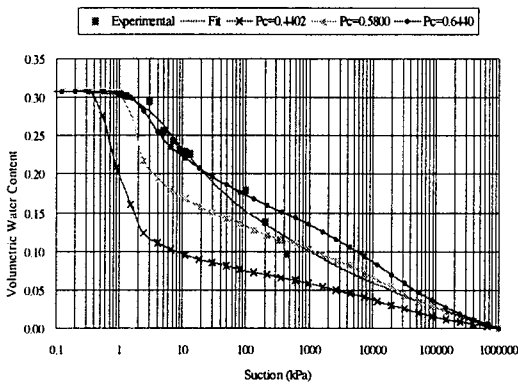


그림 8. 신내동 시료의 흡-수분 특성곡선

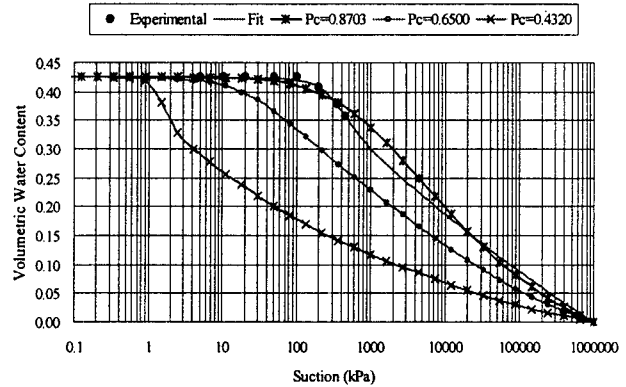


그림 9. 포이동 시료의 흡-수분 특성곡선

그림 10은 수축한계실험의 결과로 율촌 점토의 간극비-중량함수비 관계를 나타내며, 그림 11은 간극비 변화를 측정하지 않는 기존의 실험방법으로 구한 율촌 점토의 흡인력-중량함수비 관계이다.

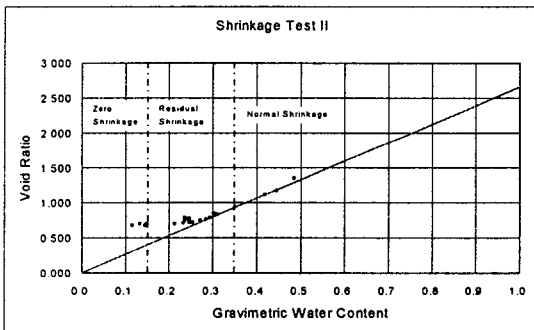


그림 10. 율촌 점토의 간극비-중량함수비 관계

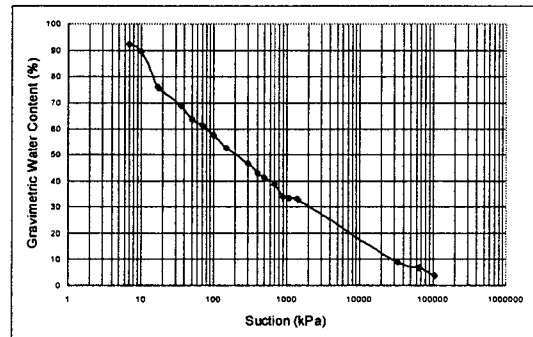


그림 11. 중량함수비 흡-수분 특성곡선

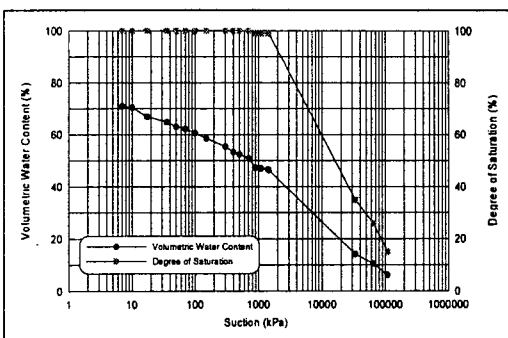


그림 12. 율촌 점토의 흡-수분 특성곡선

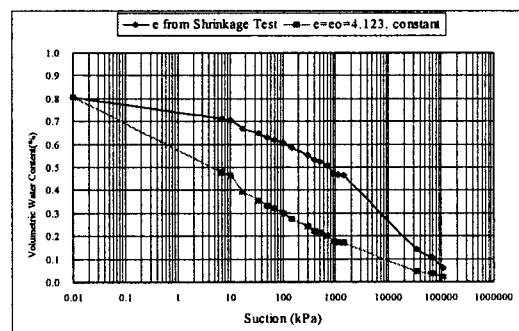


그림 13. 간극비 고려에 따른 특성곡선비교

그림 12는 그림 10과 그림 12의 결과로부터 구한 율촌 점토의 흡인력-체적함수비, 흡인력-포화도 관

계의 흡-수분 특성곡선을 보여주고 있다. 그림 12의 흡-수분 특성곡선과 같이 건조 도중의 간극비변화를 고려하지 않고 초기 간극비가 일정($e=e_0=4.123$)하다고 간주하는 흡-수분 특성곡선을 계산하여 비교하면 그림 13과 같이 주어진다. 그림 13에서 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 14는 새로이 제안한 압력판 셀을 이용하여 구한 흡-수분 특성곡선을 보여준다. 그림 15는 그림 12와 그림 14의 결과를 비교하기 위하여 두 실험으로부터 각각 구한 흡인력-체적함수비 관계의 흡-수분 특성곡선을 비교하고 있다.

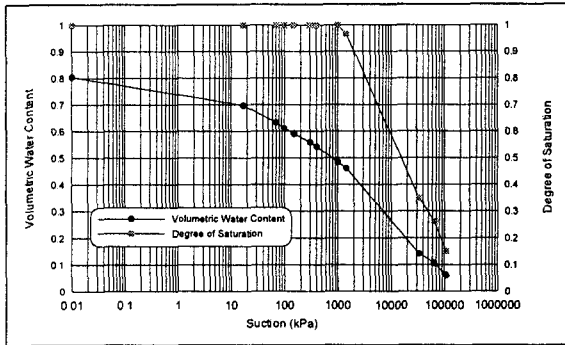


그림 14. Pressure Plate Cell로 구한 특성곡선

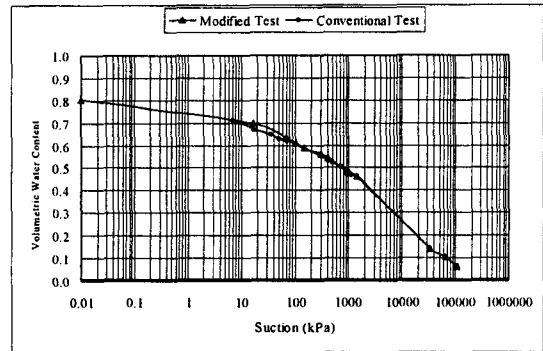


그림 15. 흡-수분 특성곡선의 비교

그림 15에서 알 수 있듯이 새로이 제안한 압력판 추출기 시험으로부터 구한 흡-수분 특성곡선과 종래의 실험과 수축한계실험결과를 조합하여 얻은 흡-수분 특성곡선은 거의 일치하는 경향을 보여준다. 울촌 점토의 air entry value는 대략 1,000 kPa로 일반적으로 알려진 풍화잔적토나 사질토의 그것보다 상당히 높았으며 중량함수비 35%에 이르기까지 포화상태를 유지하고 있다. 또한, 체적함수비로 표현된 흡-수분 특성곡선은 흡의 air entry value인 1,000 kPa를 명확히 나타내지 못하고 있다. 이로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. (1) 울촌 점토는 건조 과정중 간극비가 점차 작아짐에 따라 air entry value가 일반적인 값보다 훨씬 크게 된다. (2) 즉, 큰 흡인력에 이르기까지 흡은 포화상태를 유지하며 air entry value에 이르기까지의 체적변화는 유출된 수분의 체적변화와 동일하다. (3) 따라서, 체적함수비로 표현한 흡-수분 특성곡선은 정확한 air entry value를 표현하지 못하고, 포화도-흡인력관계로 나타내야 한다. (4) 간극비 변화를 고려하지 않는 경우의 흡-수분 특성곡선은 흡의 실제 거동과 매우 상이한 형태를 보여주게 된다.

그림 16은 식 (4)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 15의 흡-수분 특성곡선은 그림 16의 실험값을 흡인력-체적함수비의 2차원 평면상에 투영하여 연결한 곡선이 된다.

5. 결론

풍화잔적토와 건조 과정 중 체적이 변하는 울촌 점토의 흡-수분 특성곡선을 실험적으로 구한 후, 각 특성곡선을 상호 비교하고, 실험결과와 이론적 예측 곡선을 비교, 검토하였으며 그 결과를 요약하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

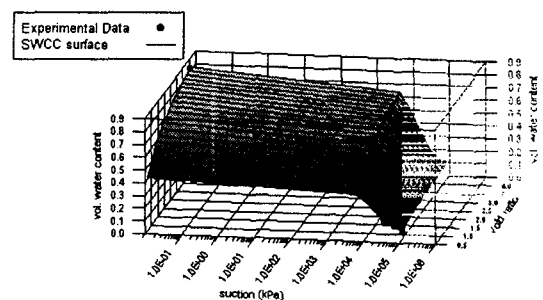


그림 16. 3차원 공간에서의 흡-수분 특성곡선

- 1) 이론적으로 예측하는 흙-수분 특성곡선은 packing porosity에 의해 좌우되며 정확한 예측을 위해서는 최소한의 실험이 불가피하다.
- 2) 풍화잔적토의 흙-수분 특성곡선은 세립분의 함량에 따라 그 거동 및 형태가 달라지며 다짐 정도에 큰 영향을 받는다.
- 3) 체적이 변하는 흙의 air entry value는 일반적으로 알려진 값보다 크다. 율촌 점토의 경우, 간극은 중량함수비 35%에 이르기까지 포화도 100%를 유지한 채 계속 감소하며 1,000 kPa의 air entry value를 갖게 된다.
- 4) 체적함수비는 식 (4), (5)에서와 같이 간극비와 흡인력의 함수로 표현되며 3차원 공간상에 표현할 수 있다.
- 5) 종래의 실험방법과 수축한계실험을 조합한 결과와 새로이 제안한 압력판 셀시험의 결과는 거의 일치하며 체적이 변하는 흙의 흙-수분 특성곡선을 구할 수 있다.

6. 감사의 글

본 연구는 현대건설(주)과 교육부의 BK21 사업에 의하여 이루어진 결과로써 두 기관에 감사드립니다.

7. 참고문헌

1. Arya, L.M., and Paris J.F. (1981), A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, Soil Science Society of America Journal, Vol. 45, pp. 1023-1030
2. Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1993), Soil mechanics for unsaturated soils, John Wiley & Sons, Inc., New York
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., Fredlund, G.D. (1997), Prediction of the soil-water characteristic curve from grain-size distribution and volume-mass properties, 3rd Brazilian Symposium on Unsaturated Soils, Rio de Janeiro, Brazil
5. Huang, S.Y., Barbour, S.L., and Fredlund, D.G. (1998), Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable, unsaturated soil, Canadian Geotechnical Journal, 35: 411-425
6. Leong, E.C., and Rahardjo, H. (1997), Review of soil-water characteristic curve equations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 123(12), 1106-1117