

# 간극비를 고려한 흙-수분특성 방정식의 적용성 평가

## Dynamic Deformation Characteristics of Sands Under Various Drainage Conditions

임 성 윤<sup>1</sup> Lim, Seong-Yoon

송 창 섭<sup>2</sup> Song, Chang-Seob

### Abstract

The soil-water characteristic curve(SWCC) is a useful tool in the prediction of the engineering behavior of unsaturated soils. Several equations are available in the literature to mathematically represent the experimental behavior of the SWCC. Some equations are based on the assumption that the shape of curve is dependent upon pore-size distribution. Other equations assume that SWCC can be estimated from the grain size distribution and the physical properties of soils. This study evaluated the suitability of using two different SWCC equations for defining the relationship between water content and matric suction. Various parameters that influence the SWCC behavior are also briefly discussed.

### 요 지

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. 따라서 본 연구에서는 화강풍화토를 대상으로 함수특성곡선실험을 실시한 결과를 바탕으로 간극비에 따른 흙수분 특성곡선 방정식을 분석하여 간극비에 따른 포화도를 예측하였으며 기존에 제안된 특성식에 대하여 적용성을 검증하였다.

**Keywords** : Matric Suction, SWCC, Void ratio

## 1. 서 론

일반적으로 지반은 건조한 상태와 완전포화된 상태의 중간인 부분적으로 포화된 상태로 존재하며, 이러한 부분 포화된 지반을 불포화지반이라 한다. 불포화 지반의 간극 속에는 물과 공기가 존재하며, 간극을 차지하는

물과 공기의 압력차이, 표면장력과 확산이중층의 원리에 의해 모세관 현상과 흡착현상이 발생하며(Fredlund et al, 1993), 이로 인해 부(-)의 간극수압이 유발하게 된다. 부의 간극수압으로 인해 불포화토는 포화토와 다른 거동을 나타내므로(Blight, 1961; Lee, 1973), 포화토에 사용되는 파괴기준을 불포화토에 적용하기 어렵다.

1 정회원, 한국도로공사 도로교통기술원 연구원, 공학박사 (Member, Researcher, Geotechnical Research Group Express & Transportation Technology Institute, soilab73@naver.com, 교신저자)

2 정회원, 충북대학교 지역건설공학과 교수 (Prof. Dept. of Rural Engrg., Chungbuk National Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

불포화토를 연구하기 위해서는 흙 속의 함수비 변화에 따라 달라지는 흡인력의 크기를 규정하는 것이 중요하다(Craig 등, 1999). 흙 속의 함수비와 흡인력의 관계를 흙수분 특성곡선(Childs, 1940)이라 하며, 이를 분석하는 것이 불포화토의 연구에 기본이 된다.

특성곡선은 함수비와 흡인력 또는 체적함수비(volumetric water content)와 흡인력과의 관계로 도시하는데, 이들의 관계는 반대수 눈금으로 도시하면 S자 형태의 모양을 나타내는 것이 일반적이다. 그러나, 흙의 종류, 공극의 크기, 공극의 상태, 포화도 등에 따라 모양과 형태가 달라지게 된다. 특히, 흙의 특성을 바탕으로 지역을 대표할 수 있는 특성곡선식을 유도하게 되면, 불포화토의 연구뿐만 아니라 전단강도 및 투수 등의 문제를 해결하는데 아주 유용한 자료가 된다. 여기서, 흡인력이란 간극공기압과 간극수압의 차인  $(u_a - u_w)$ 로 표현된다.

포화 상태의 흙이 수분의 감소로 흡인력이 증가하면 간극이 비면서 공기가 유입되기 시작하는 일정한 한계값을 초과할 때까지는 아무런 유출이 발생하지 않게 되는데, 이 한계값을 공기함입저항값(air entry value)라 하며, 이 값은 흙의 상태가 주어지면 나타내는 특성값으로 특성곡선의 연구에 아주 중요한 자료를 제공한다. 또한 흡인력의 증가에도 불구하고 더 이상의 물이 유출되지 않는 함수비를 잔류 함수비(residual water content)라 하며, 이는 열에 의해서만 제거될 수 있다. 따라서, 특성곡선은 포화상태에서 잔류 함수비까지의 함수비 범위내에서만 규정되는 것이 보통이다.(Rahardjo 등, 1999).

지금도 불포화토의 특성곡선에 대한 연구는 계속 진행되고 있지만, 지금까지 발표된 특성곡선은 흙의 한 가지 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.

따라서 본 연구에서는 화강풍화토를 대상으로 함수 특성곡선실험을 실시한 결과를 바탕으로 간극비에 따른 흙수분 특성곡선 방정식을 분석하여 간극비에 따른 포화도를 예측하였으며, 기존에 제안된 특성식에 대하여 적용성을 검증하였다.

## 2. 특성방정식의 이론적 배경

흙수분 특성곡선은 흙 속에 함유된 함수량과 흡인력의 관계를 나타내는 것으로 흡인력과 함수비, 흡인력과 포화도 또는 흡인력과 체적함수비 관계로 도시하는 것이 보통이다. 함수비로 나타낸 특성곡선은 포화상태에 근접한 낮은 흡인력에서 구분이 명확한 반면 포화도로 나타낸 특성곡선은 건조상태에서의 구분이 명확하여 특성곡선을 연구하는 경우에는 체적함수비로 표시하는 것이 일반적이다.

### 2.1 Brooks & Corey(1964)의 제안식

Brooks & Corey는 흡인력과 포화도 사이의 관계를 도출하기 위하여 잔류포화도( $S_r$ )와 유효포화도( $S_e$ ) 개념을 도입하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \text{ for } u_a - u_w < (u_a - u_w)_b \quad (1)$$

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

여기서,  $S_e$ 는 유효포화도,  $S$ 는 포화도,  $S_r$ 는 잔류포화도  $(u_a - u_w)_b$ 는 공기함입저항값,  $\lambda$ 는 흙의 잔류함수비에 관계되는 상수,  $(u_a - u_w)$ 는 흡인력(suction,  $kPa$ )이다.

### 2.2 Fredlund & Xing(1994)의 제안식

Fredlund & Xing은 1,000,000kPa이면 체적함수비가 0이 된다는 가정 하에서 타 연구자의 결과를 분석하여 다음과 같은 특성곡선식을 제안하였다.

$$\theta_w = C(h) \left[ \frac{\theta_s}{\left[ \ln \left\{ \exp(1) + \left( \frac{h}{a} \right)^b \right\} \right]^c} \right] \quad (3)$$

$$C(h) = \left[ 1 - \frac{\ln \left( 1 + \frac{h}{h_r} \right)}{\ln \left( 1 + \frac{10^6}{h_r} \right)} \right] \quad (4)$$

여기서,  $\theta_w$ 는 최적함수비,  $\theta_s$ 는 포화시의 체적함수비,  $a$ 는 공기함입값에 관계되는 토질상수,  $b$ 는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수,  $c$ 는 잔류함수비에 관계되는 토질상수,  $h_r$ 는 잔류함수비일때의 흡인력이다.

### 3. 재료 및 실험방법

#### 3.1 재료

사용된 흙은 경기도 양주시 장흥면에서 채취하였으며, 시료는 7가지로 통일분류법상 SC에 해당되고 #200 체 통과량이 50%이하이며, 저소성의 사질토 성분이 함유된 흙으로 J-1부터 J-7까지로 표시하였다. 이외에도 경기도 수원지역에서 채취한 SM에 해당하는 시료(S로 표시), 전라북도 부안군에서 채취한 CL에 해당하는 시료(C로 표시), 충청북도 진천군에서 채취한 ML에 해당하는 시료(M으로 표시) 등을 사용하였다. Table 1은 10개 시료에 대한 물리적 성질을 나타낸 것이며, Fig. 1은 입도분포를 도시한 것이다.

#### 3.2 공시체의 제작

공시체의 규격을 크게 하는 것이 다른 인자에 의한 영향을 최소화시킬 수 있지만, 공시체가 너무 크면 흡인력의 측정 및 평형상태에 도달하는데 요하는 시간이 오래 걸리게 된다. 평형도달시간이 너무 길게 되면 시험조건 및 상태가 달라질 가능성이 크다. 이(2000)는 “체적변하는 흙의 흙-수분 특성곡선식 개발 비교”에서 체적변화를 고려하여 공시체 몰드를 직경 10cm, 높이 1cm로 제작하여 사용하였으나 평형도달시간이 너무 길다는 것과 흡인력의 측정시 셀을 열고 공시체의 무게를 측정해야 하는 단점을 가지고 있었으며, 강(2003)은 “불포화 점성토의 압밀 및 전단특성”에서는 몰드의 크기를 직경 6cm, 높이 2cm의 규격을 사용하였으나 공시체의

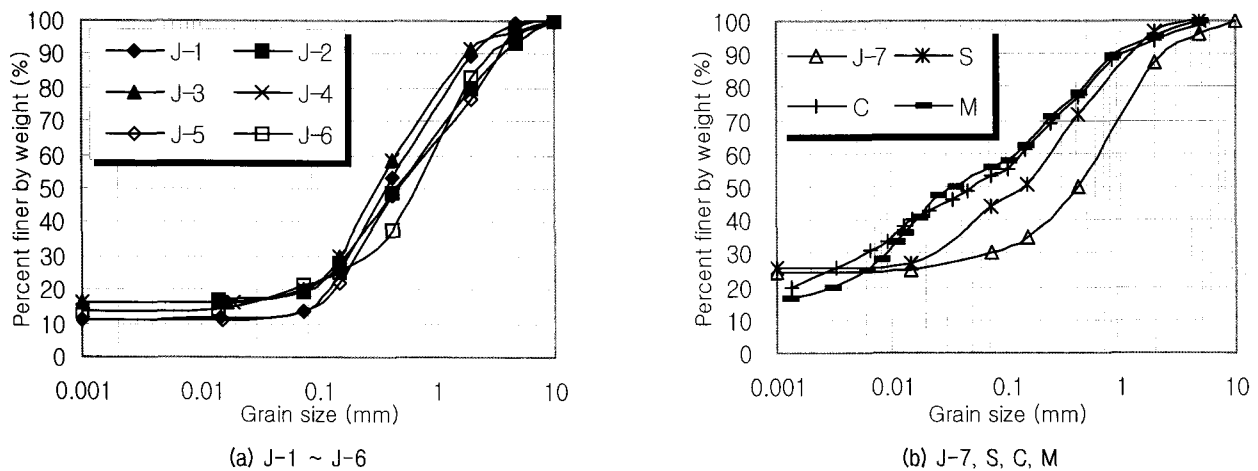


Fig. 1. Grain size distribution of samples used

Table 1. Physical properties of soil samples

Sample	LL (%)	PI (%)	$G_s$	Grain size distribution (%)				$\gamma_d$ (tf/m <sup>3</sup> )	e	USCS
				4.76 mm	2.0 mm	0.42 mm	0.074 mm			
J-1	42.9	12.9	2.75	99.1	89.9	53.1	13.7	1.52	0.802	SC
J-2	32.7	10.0	2.69	93.2	80.0	48.9	19.7	1.30	1.075	SC
J-3	32.3	10.1	2.55	96.6	91.4	56.5	20.0	1.30	0.962	SC
J-4	43.0	8.6	2.83	99.3	88.8	54.7	23.8	1.50	0.884	SC
J-5	30.5	10.4	2.66	97.7	76.6	48.3	13.5	1.58	0.696	SC
J-6	41.7	15.6	2.63	95.6	83.4	56.8	21.2	1.45	0.818	SC
J-7	33.6	10.5	2.65	96.3	87.2	49.9	29.9	1.34	0.979	SC
S	34.6	25.3	2.73	100.0	100.0	72.0	43.9	1.59	0.684	SM
C	35.0	12.0	2.62	98.8	94.3	76.8	53.4	1.77	0.485	CL
M	47.4	1.5	2.63	99.9	95.5	78.4	52.0	1.55	0.698	ML

Table 2. Initial condition of samples for SWCC

Samples	Void ratio	Dry unit weight(tf/m <sup>3</sup> )	Saturated water content(%)	Volumetric water content
J-1	0.802	1.52	29.2	0.44
J-2	1.075	1.30	39.9	0.52
J-3	0.962	1.30	37.7	0.49
J-4	0.884	1.50	31.2	0.47
J-5	0.696	1.58	26.2	0.41
J-6	0.818	1.45	31.0	0.45
J-7	0.979	1.34	36.9	0.49
S	0.684	1.59	23.5	0.37
C	0.485	1.77	18.7	0.33
M	0.698	1.55	26.7	0.41

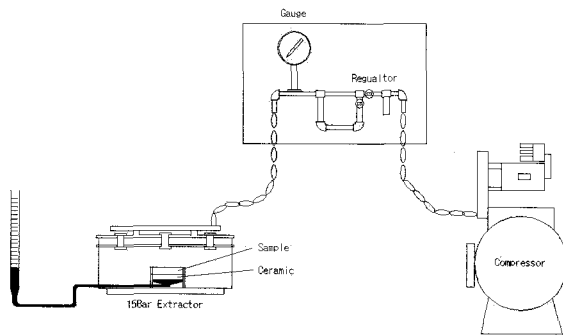


Fig. 2. Schematic diagram of apparatus

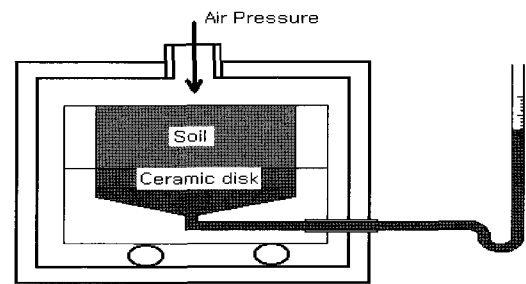


Fig. 3. Detail of cell plate

평형도달시간이 길다는 단점을 가지고 있었다. 따라서 본 연구에서는 흡인력의 측정 및 평형도달시간을 최소화하기 위하여 불교란 시료를 성형하기 위한 구속링(높이 : 1cm, 직경 : 5cm)에 불교란 상태로 성형하였으며, Table 2는 제작된 공시체의 초기조건을 나타낸 것이다.

### 3.3 실험장치 및 방법

#### 3.3.1 실험장치

실험장치는 압력판 추출시험기를 개량하여 사용하였다. 압력추출기의 원리는 셀에 공기함입저항치가 큰 세라믹 디스크를 설치한 후 불포화토를 올려놓고 셀내에 공기압을 가해주어 셀에서 추출되는 물의 양을 측정하여 부의 간극수압을 측정하는 방법이다.

흙이 가지는 흡인력 값은 흙이 가지는 흡인력이 대기중의 조건과 같은 상황으로 유지되기 때문에 셀이 받는 공기압과 같다. 이때 가해진 공기압이 부의 간극수압이 되고, 이 압력으로 추출된 물의 양을 측정하면 체적함수비

가 얻어진다. 압력판 추출기의 모식도는 Fig. 2와 같다.

압력판 추출시험기는 상부에서 가해지는 공기압을 변화시켜 흡인력을 조절하도록 고안되었으며, 한 단계의 시험이 끝난 후, 상부에서 감압하여 상판을 제거하는 동안 세라믹 디스크의 수분이 흙 속으로 유입되는 단점을 가지고 있으며, 많은 연구자들이 이러한 결과를 수용하여 흡수분 특성곡선을 유도하였기 때문에 현장 적용 과정에 상당한 오차를 보이는 경우가 있었다. 이러한 단점과 오차를 보완하기 위하여 셀을 Fig. 3과 같이 개조하였다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 템퍼셀(Tempe pressure cell)을 개조하여 황동제 프레임에 세라믹 디스크를 부착하고 하부로 유출되는 수량을 측정할 수 있도록 뷰렛을 연결하여 시험기구를 개조하였다. 본 기구의 가장 큰 장점은 상판을 열지 않고도 연속적으로 흡인력의 변화에 따른 수분의 이동량을 측정할 수 있는 장점이 있으며, 감압에 따른 디스크의 수분이 흙 속으로 유입되는 문제점을 보완한 것이다. 고압에서도 미소한 흡인력의 변화에도 쉽게 수분의 이동과 유출량을 측정할 수 있다.

### 3.3.2 실험방법

공시체를 성형한 후, 셀의 상부에 있는 세라믹 디스크와 잘 접촉되도록 세심한 주의를 기울여 설치하였다. 이때 하부의 측정 셀은 사전에 내부에 공기가 없도록 물로 충전시켰다. 셀과 공시체의 접촉을 확인한 후, 튜브를 통하여 하부로부터 물을 공급하면서 포화시켰다. 이때 흙의 체적과 함수비는 계산된 결과를 바탕으로 함수비의 변화를 고려하여 공급될 수량을 사전에 예측하여 결정하였다. 뷰렛의 눈금을 통하여 공급된 수량이 충분히 포화된 것으로 나타나면 시험을 시작하였으며, 정해진 흡인력이 되도록 상부에서 공기압을 조절하면서 뷰렛의 눈금변화를 평형상태에 도달할 때까지 측정하였다. 본 시험에서 사용된 간극공기압의 범위는 0.1kPa~1000kPa이며, 10단계로 공기압을 달리하여 시험하였다.

## 4. 결과 및 고찰

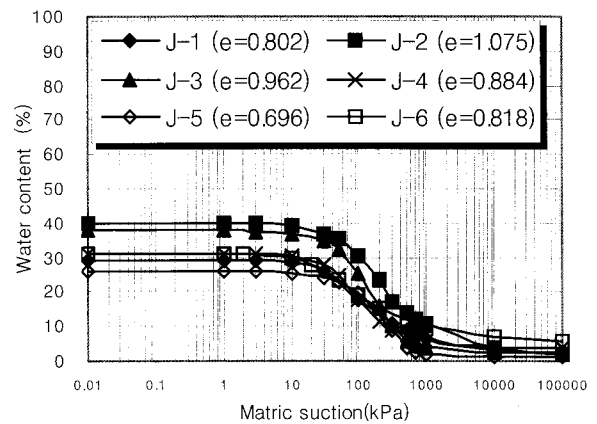
선정된 시료중 J-1에서 J-6까지의 시료에 대하여 흡수분 특성시험을 실시하였으며, 포화도와 체적함수비의 예측을 위하여 간극비와 관련된 계수를 도출하였고, 도출된 관계식을 J-7, S, C, M시료에 적용하여 적용성을 검증하였다. 개조된 압력조절장치(Pressure Plate Apparatus)를 사용하여, 10단계로 공기압을 변화시키면서 측정된 수분의 이동량을 바탕으로 각 시료의 함수비, 포화도 및 체적함수비를 분석하여 흙-수분 특성곡선을 도출하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

### 4.1 흡인력에 따른 함수비의 변화

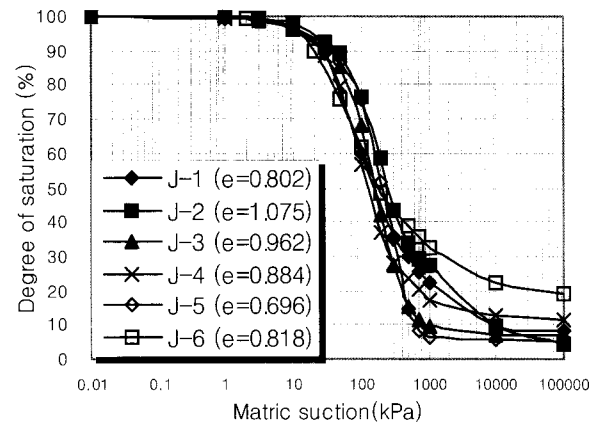
사질계열 6개 시료의 흡인력에 따른 함수비를 도시하면 Fig. 4(a)와 같다. 초기의 포화상태의 함수비는 흙의 종류에 따라 많은 차이를 보이나 건조과정을 통하여 흡속의 수분이 감소됨에 따라 잔류 함수비는 흙의 종류에 관계없이 거의 같은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 개략적인 형태는 비슷하지만, 간극비에 따라 동일한 흡인력의 범위에서 나타내는 함수비의 범위가 크게 달라지는 것을 볼 수 있다. 조밀한 시료에서는 함수비가 약 20% 이내이지만, 느슨한 시료인 경우에는 약 35% 이상 차이를 보였다. 이것은 간극의 크기가 작아지면서 흡인력에 따른 수분의 이동량이 적기 때문이라 판단된다.

Fig. 4(a)에서 초기 포화상태의 함수비는 흙의 종류와

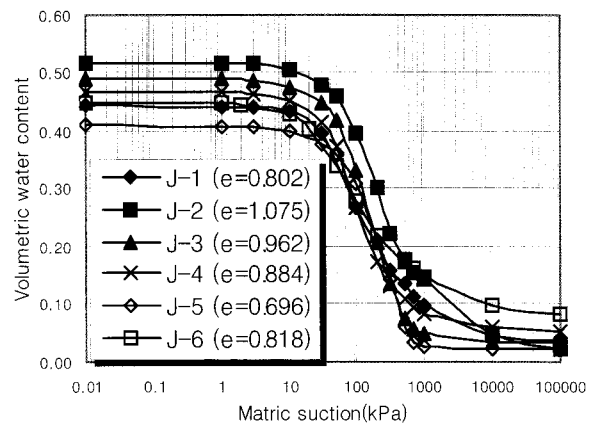
간극비의 크기에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 함수비로 나타낸 특성곡선은 포화상태 부근에서 흡인력에 따른 함수상태를 명확하게 구별되는 것을 알 수 있다. 따라서 포화상태 부근의 함수상태를 구명하기 위해서는 함수비로 나타내는 특성곡선을 사용하는 것이 유리하다는 것을 알 수 있었다.



(a) Water content vs. matric suction



(b) Degree of saturation vs. matric suction



(c) Volumetric water content vs. matric suction

Fig. 4. Soil-water characteristic curve

위의 결과로 부터 지금까지 제시된 특성 곡선은 시료가 같을 경우에는 동일한 흡인력을 나타내게 되므로 간극비가 달라지는 경우에는 정확한 값을 예측하기 곤란하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 흙의 특성곡선을 유도함에 있어 흙의 함수비뿐만 아니라 흙이 가지는 간극의 상태도 고려해야 할 것으로 판단된다.

#### 4.2 흡인력에 따른 포화도의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 중량 개념으로 고려하기 때문에 흙의 수분중량을 나타낸다. 그러나 흙 속에 함유되는 수분은 흙의 간극과도 관계가 있으므로 이러한 영향을 표시하기 위하여 흙의 수분상태는 부피와 관련시켜 포화도의 변화에 따라 도시하여야 한다.

6개 시료의 흡인력에 따른 포화도를 도시하면 Fig. 4(b)와 같다. 그림에서 보듯이 시료가 포화상태에서 건조상태로 수분이 감소함에 따라 포화도가 급격하게 달라지는 것을 볼 수 있다. 특히, 흡인력이 증가함에 따라 차이가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 건조상태에서의 특성을 분석하는 과정에는 포화도의 개념을 사용하면 쉽게 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4.3 흡인력에 따른 체적함수비의 변화

함수비는 흙의 수분상태를 중량개념으로 표시하고, 포화도는 부피개념으로 나타내기 때문에 흙 속에 함유되는 수분상태를 정확하게 나타내기 위해서는 이러한 양자의 관계를 전부 포함하여야 할 것이다. 따라서, 흙의 수분상태를 무게와 부피의 개념을 동시에 고려하여 나타내기 위하여 체적함수비로 도시하여야 한다. 6개 시료의 흡인력에 따른 체적함수비를 도시하면 Fig. 4(c)와 같다. 함수비로 나타내면 흡인력이 큰 경우에는 구분이 명확하지 못하고, 포화도로 표시하면 포화상태 부근의 차이를 구분하기 어려운 단점을 가지고 있다. 그러나, 체적함수비로 나타내면 이러한 단점을 보완하여 흡인력의 변화에 따른 수분상태를 보다 명확하게 구분할 수 있는 장점이 있다. 또한 실험 결과에 의하면 사질시료의 경우 초반에는 느슨한 시료가 조밀한 시료보다 체적함수비가 높게 나타났고 흡인력이 증가함에 따라 체적함수비의 변화가 크게 나타났으며 점성시료는 체적함수비의 변화가 작게 나타났다.

#### 4.4 흙-수분 특성 분석

본 연구에서는 Brooks & Corey(1964)과 Fredlund & Xing(1994)이 제안한 예측식을 개조된 압력조절장치를 사용하여 도출된 시험결과와 각각의 예측식이 흙에 따라 가지는 계수들을 구해 실험결과와 비교하였다.

Table 3은 Brooks & Corey의 방정식에 사용되는 각 계수를 도출하여 정리한 것이다. 표에서 알 수 있듯이 간극비의 변화에 따라 각 계수는 서로 다른 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, Brooks 등의 방법에 의한 한 종류의 시료에서는 한 종류의 특성곡선이 나타나기 때문에 간극비의 영향을 반영할 수 없음을 알 수 있다.

포화도 예측을 위한 계수 도출 결과에 의하면, 흡인력을 증가시키면 각 단계값에 따라 수분 이동량이 증가하여 잔류포화도는 감소하는 경향을 보이며, 잔류함수비에 관계되는 계수( $\lambda$ )와 공기함입저항치는 증가하는 경향을 보이고 있다.

체적함수비를 추정하기 위해서 Fredlund & Xing이 제안한 방정식을 바탕으로 실험치와 비교하여 각 계수를 도출하여 요약하여 Table 4에 정리하여 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 간극비의 변화에 따라서 이미 제안된 방정식은 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 특성 방정식을 유도하면, 특성 방정식에 영향을 미치는 입도,

Table 3. Soil parameters for Brooks's equation

Sample	e	$S_r$	$\lambda$	$(u_a - u_w)_b$
J-1	0.80	7.31	1.25	17.68
J-2	1.08	4.48	1.48	30.08
J-3	0.96	5.14	1.42	26.32
J-4	0.88	6.72	1.34	21.74
J-5	0.70	8.25	1.21	15.83
J-6	0.82	7.05	1.28	19.94

Table 4. Soil parameters for Fredlund & Xing's equation

Sample	e	a	b	c	$h_r$
J-1	0.80	17.68	1.25	1.79	1800
J-2	1.08	30.08	1.48	3.64	1100
J-3	0.96	26.32	1.42	2.93	1300
J-4	0.88	21.74	1.34	2.64	1500
J-5	0.70	15.83	1.21	1.35	2100
J-6	0.82	19.94	1.28	2.16	1700

세립분, 중량비, 간극비 등을 고려하게 되어 현장 적용성이 뛰어나게 된다. 계수  $a$ ,  $b$ , 및  $c$ 는 간극비에 따라 증가하는 반면,  $h_r$ 은 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.4.1 잔류포화도의 변화

Fig. 5는 간극비에 따른 잔류포화도의 변화를 흙의 종류에 따라 도시한 것이다. 잔류포화도는 간극비가 증가함에 따라 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다. 잔류포화도와 간극비의 관계를 수식으로 나타내면 식(5)와 같다.

$$S_r = -9.14 \cdot \ln(e) + 5.16 \quad (5)$$

#### 4.4.2 잔류함수비 계수의 변화

Fig. 6은 간극비에 따른 잔류함수비 계수를 흙의 종류에 따라 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 잔류함수비 계수는 간극비가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 잔류함수비 계수와 간극비의 관계를 수식으로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\lambda = 0.67 \cdot \ln(e) + 1.43 \quad (6)$$

#### 4.4.3 공기함입저항치의 변화

Fig. 7은 공기함입저항치의 변화를 간극비와 흙의 종류에 따라 도시한 것이다. 공기함입저항치는 간극비가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 공기함입저항치와 간극비의 관계를 수식으로 나타내면 식(7)과 같다.

$$(u_a - u_w)_b = 34.69 \cdot \ln(e) + 26.98 \quad (7)$$

#### 4.4.4 Fredlund & Xing 계수의 변화

체적함수비의 예측에 사용되는 계수를 Fredlund & Xing의 제안식으로부터 도출하여 간극비에 따라 도시하면 Fig. 8에서 Fig. 11과 같다. Fig. 8은 계수  $a$ 와 간극비의 관계, Fig. 9는 계수  $b$ , Fig. 10은 계수  $c$  그리고 Fig. 11은 계수  $h_r$ 의 관계를 도시한 것이다. 여기서 계수  $a$ 는 공기함입값에 관계되는 토질상수, 계수  $b$ 는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수, 계수  $c$ 는 잔류함수비에 관계되는 토질상수, 계수  $h_r$ 는 잔류함수비 일때의 흡인력이다. 그림에서 보는 바와 같이 계수  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 는 간극비가 증가함에 따라 비선형적으로 증가하는 반면 계수  $h_r$ 는 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 이들의 관계를 수식으로 나타내면 식(8)에서 식(11)까지와 같다.

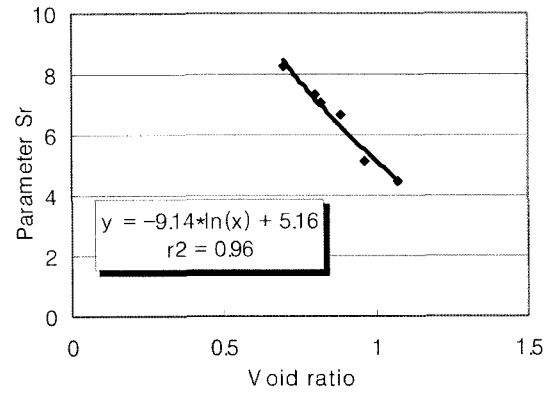


Fig. 5. Relationship between  $e$  and  $S_r$

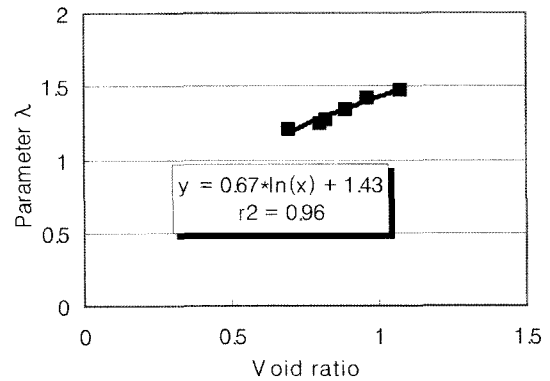


Fig. 6. Relationship between  $e$  and  $\lambda$

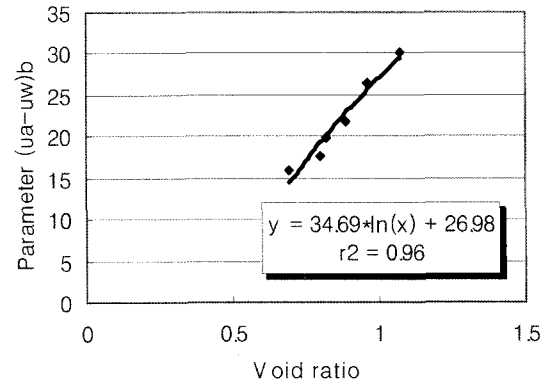


Fig. 7. Relationship between  $e$  and  $(u_a - u_w)_b$

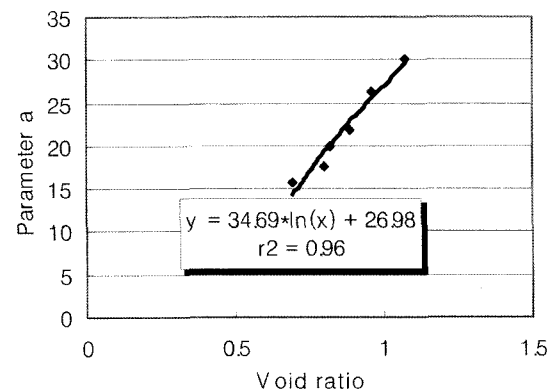


Fig. 8. Relationship between void ratio and  $a$

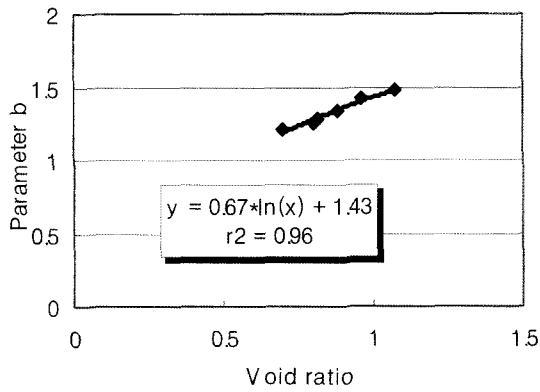


Fig. 9. Relationship between void ratio and  $b$

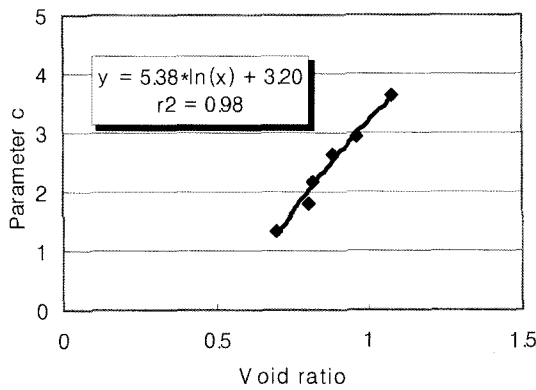


Fig. 10. Relationship between void ratio and  $c$

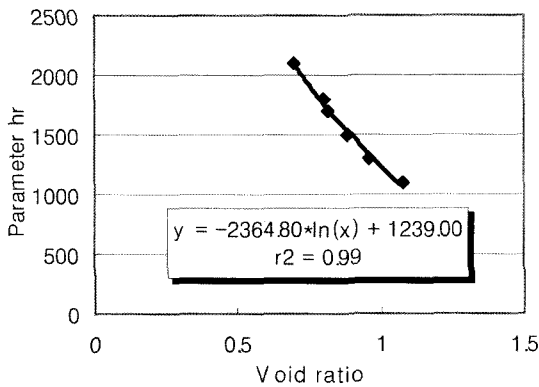
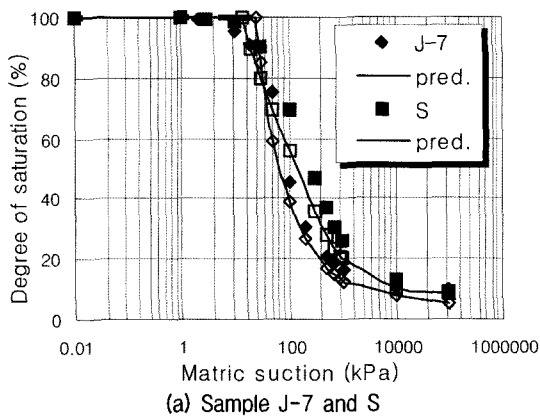


Fig. 11. Relationship between void ratio and  $h_r$



(a) Sample J-7 and S

$$a = 34.69 \cdot \ln(e) + 26.98 \quad (8)$$

$$b = 0.67 \cdot \ln(e) + 1.43 \quad (9)$$

$$c = 5.38 \cdot \ln(e) + 3.20 \quad (10)$$

$$h_r = -2364.80 \cdot \ln(e) + 1239.00 \quad (11)$$

간극비의 변화에 따른 함수특성 변화 예측에 사용되는 계수들과의 관계 결정계수( $r^2$ )는 0.96이상의 높은 상관관계를 나타냈다.

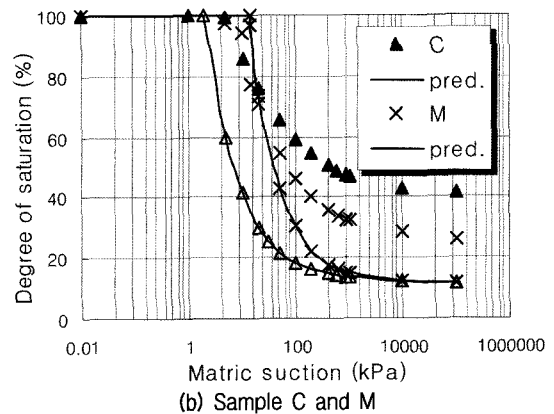
#### 4.5 특성곡선식 예측의 적용성 평가

이미 제안된 기존의 방정식은 간극비가 달라지는 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다는 것이 위의 시험결과로부터 입증되었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 각 계수의 변화를 간극비에 따라 도시하여 이들의 관계로부터 특성 방정식을 유도하면, 특성 방정식에 영향을 미치는 입도, 세립분, 중량비, 간극비 등을 고려하게 되어 현장 적용성이 뛰어나게 된다.

본 연구에서는 포화도 및 체적함수비 예측을 위하여 사질계열(SC)시료 6가지에 대하여 간극비와 각 계수들과의 관계식을 증명하였으며, 이 관계식에 대한 유의성 검증도 실시하였다. 또한 간극비와 각 계수들과의 관계식을 J-7시료, S, C, M시료에 대하여 적용성을 검증하였다.

##### 4.5.1 포화도의 예측

사질계열(SC)시료 6가지에 대하여 간극비와 잔류포화도( $S_r$ ), 잔류함수비 계수( $\lambda$ ) 및 공기함입저항치( $(u_a - u_w)_b$ )의 관계식을 바탕으로 J-7, S, C, M시료에 대하여 적용성을 검증한 결과를 도시하면 Fig. 12와 같다. (a)는 J-7, S시료의 실험에서 얻어진 포화도와 예측된 포화도를 비교한 것이며, (b)는 C, M시료의 실험에서 얻어진 포화



(b) Sample C and M

Fig. 12. Comparison of experiment results and the degree of saturation



도와 예측된 포화도를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 사질계열의 시료, 즉 J-7과 S시료는 실험치와 예측치가 비슷하게 나타나지만 점성계열의 C, M시료는 큰 차이를 보이고 있었다. 따라서 동일한 종류에서 간극비에 따른 포화도의 예측은 비교적 가까운 값을 얻을 수 있으나 흙의 종류가 틀린 경우에는 간극비에 따른 포화도의 예측은 어려울 것이라 판단된다. 이는 기존에 제시된 흡수분 특성곡선 방정식이 종류가 같은 흙에서는 잘 구현할 수 있으나, 보다 일반적인 경우에는 잘 나타내지 못한다는 것을 의미한다. 따라서, 새로운 흡수분 특성곡선 방정식의 유도가 요구될 것으로 판단된다.

#### 4.5.2 체적함수비의 예측

사질계열(SC)시료 6가지에 대하여 간극비와 체적함수비의 예측에 사용되는 계수, 즉  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $h_r$ 을 바탕으로 J-7시료, S, C, M시료에 대하여 적용성을 검증한 결과를 도시하면 Fig. 13과 같다. (a)는 J-7, S시료의 실험에서 얻어진 체적함수비와 예측된 체적함수비를 비교한 것이며, (b)는 C, M시료의 실험에서 얻어진 체적함수비와 예측된 체적함수비를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 사질계열의 시료, 즉 J-7과 S시료는 실험치와 예측치가 비슷하게 나타나지만 점성계열의 C, M시료는 큰 차이를 보이고 있었다. 따라서 동일한 종류에서 간극비에 따른 체적함수비의 예측은 비교적 가까운 값을 얻을 수 있으나 흙의 종류가 틀린 경우에는 간극비에 따른 체적함수비의 예측은 어려울 것이라 판단된다. 이는 제시된 흡수분 특성곡선 방정식이 종류가 같은 흙에서는 잘 구현할 수 있으나, 보다 일반적인 경우에는 잘 나타내지 못한다는 것을 의미한다. 따라서, 새로운 흡수분 특성곡선 방정식의 유도가 요구될 것으로 판단된다.

## 5. 결론

10개의 시료를 사용하여 흡수분 특성실험을 실시하였다. 그리고 포화도와 체적함수비의 예측을 위하여 J-1~J-6의 6개 시료를 기존의 Brooks & Corey(1964)와 Fredlund & Xing(1994)의 제안식에 언급되었던 각 계수와 간극비와의 관계를 도출하였으며, 이 도출된 계수를 이용하여 J-7, S, C, M 등 4개 시료에 대하여 적용성을 검토하였다.

- (1) 흡인력의 변화는 입도분포, 세립분의 함량 뿐만 아니라 간극의 크기에 따라라도 특성곡선이 변화한다는 것을 실험을 통하여 입증하였다.
- (2) 함수비와 흡인력에 대한 특성곡선은 흡인력이 큰 경우에는 구분이 명확하지 못하고, 포화도와 흡인력에 대한 특성곡선은 흡인력이 작은 경우에는 구분하기 어려운 단점을 가지고 있었다. 따라서, 체적함수비와 흡인력에 대한 특성곡선은 흡인력의 변화에 따른 수분상태를 보다 명확하게 구분할 수 있다.
- (3) Brooks & Corey와 Fredlund & Xing이 제안한 특성곡선 방정식은 간극비가 일정한 경우에는 포화도 및 체적함수비의 예측이 가능하지만, 흙의 간극비가 달라지는 경우에는 이를 고려하여 계수를 도출하여 적용하여야 함을 실험을 통하여 입증하였다.
- (4) 실험결과를 바탕으로 간극비에 따른 포화도 및 체적함수비를 예측할 수 있는 수정된 특성곡선 방정식의 계수를 도출할 수 있는 방정식을 제안하였으며, 그 적용성 측정치와 비교하여 검증하였다.

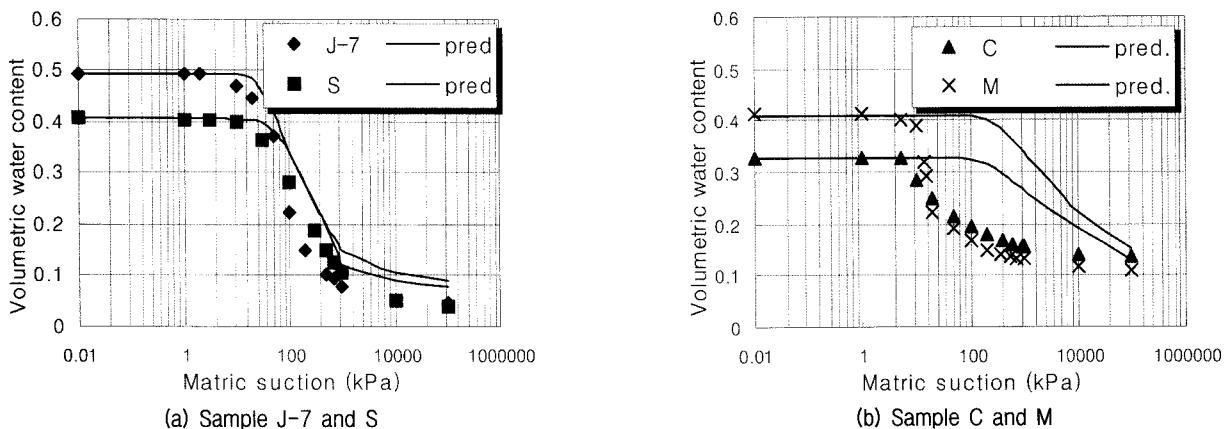


Fig. 13. Comparison of experiment results and the predicted volumetric water content with the variation of matric suction

## 참 고 문 헌

1. 강중범 (2003), “불포화 점성토의 압밀 및 전단특성”, 대한토목학회논문집, 제23권 5C호 pp.289-298.
2. 임성운 (2006), 흙-수분 특성곡선을 이용한 불포화 사질토의 강도 특성, 박사학위논문, 충북대학교.
3. 송창섭 (1995), “불포화 사질토의 거동 예측을 위한 구성식 개발”, 한국지반공학회지, 제11권 3호, pp.43-54.
4. Brooks, R. H, and A. T. Corey (1964), “Hydraulic properties of porous media”. Colorado State Univ. Hydrol.Paper, No.3, pp.27.
5. Childs, E. C. (1969), “An introduction to the physical basis of soil water phenomena”, wiley-Interscience, London.
6. Craig, H. B. and M. Gribb (1999), “Measuring unsaturated hydraulic conductivity in the laboratory and field”, ASCE Geoth. special pub. 68, pp.113-168.
7. Fredlund D. G., and A. Xing (1994), “Equation for the Soil-Water Characteristic Curve.”, Can. Geotech. J., Vol.31, pp.521-531.
8. Fredlund, D. G., and Xing, A., and Fredlund, M. D., and Barbour, S. L.,(1995). “The relationship of the unsaturated soil shear strength to soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol.32, pp.440-448.
9. Lee, I. M., S. G. Sung, and I. S. Yang (2000), “Characteristics and Prediction of shear strength for unsaturated residual soil.”,Korean Geotechnical Society, Fall National Conference, pp.377-384.
10. Rahardjo, H and E. C. Leong (1999), “Soil-water characteristic curve and flux boundary problem”, ASCE Geoth. special pub. 68, pp.89-111.

(접수일자 2007. 3. 8, 심사완료일 2007. 10. 16)