

## 국내 화강풍화토의 불포화 특성에 관한 연구

### A Study for Unsaturated-Character of Weathered Granite Soil in Korea

이형규<sup>1)</sup> · 이인<sup>†</sup>

Lee, HyoungKyu · Lee, In

**ABSTRACT** : Generally, soil is regarded as fully saturated in Geotechnical Engineering and under ground structure design. Because it is in convenience and safety. But soils treated in field are almost in unsaturated state. Design in unsaturated state is difficult comparing with saturated soil. In unsaturated soil mechanics, parameters are usually not constant unlike saturated soil mechanics. Additionally lab or field tests in unsaturated soil mechanics are required more cost, time and theoretical difficulty. One of essential requisites for examination about unsaturated soil is Soil-Water Characteristic Curve (SWCC). It show the relation between soil suction and soil water content. Through many studies in and out of country, computation and testing methods for SWCC were introduced. But in this the country, most soil is granite soil that is widely spread in Korea. And the studies for granite soil's SWCC are not enough yet. In this paper, through studying for existing proposal methods about computation SWCC and collection data for domestic granite soils, It was determined the suitable method for domestic granite soils, and computed each granite soil's SWCC. The purpose of this paper is establishing database for domestic granite soil's SWCC as each region to convenience for applying to actual affairs. For this, studying about existing proposal methods for SWCC was performed and a computer program Soil-Vision is used. Furthermore for verification theoretical and testing methods were also performed.

**Keywords** : Weathered granite soil, Soil water characteristic curve, Soil vision

**요 지** : 최근까지 사면, 제방, 댐 등의 안정해석에는 흙의 포화도를 고려하지 않고 포화상태의 시료에서 얻어진 강도정수를 사용하여 왔다. 이는 포화지반의 개념으로 구조물을 설계하는 것이 이론적 접근이 용이하고 안전측 설계가 가능하기 때문이었으며, 불포화토를 연구하기 위해 소요되는 실험적 비용과 시간 등의 어려움이 많았기 때문이다. 하지만 고전적인 포화토질역학의 개념과 원리로는 실제의 불포화 지반에서 발생하는 현상과 거동이 합리적으로 해석되지 않는 많은 공학적 문제들이 인식되면서 최근 들어 지반의 공학 연구 분야에 불포화토에 대한 관심이 증가하고 있다. 최근 들어 많은 연구자들은 흙 구조물을 보다 합리적으로 해석하기 위하여 구조체의 포화도를 고려하는 해석의 필요성을 제기하고 있다. 불포화토의 역학적 성질을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소 중의 하나가 바로 '함수특성곡선(SWCC)'이다. 흙은 불포화상태로 갈수록, 즉 함수비가 감소할수록, 흙 내부에 음의 간극수압이 작용되는데 이 음의 간극수압인 모관흡수력(suction)과 체적 함수비(volumetric water content)간의 상관관계를 나타내는 곡선이 함수특성곡선이다. 본 연구에서는 실무에 편리하게 쓰일 수 있도록 국내 화강풍화토에 대한 지역별 자료를 제시하며, 이에 대한 검증을 위하여 이론적 고찰과 검증, 실험적 검증을 하였다. 함수특성곡선의 추정에는 Soil Vision Ltd.의 Soil Vision이 사용되었으며, 추정된 함수특성곡선과 실험적인 방법과 이론적인 방법으로 얻어진 함수특성곡선을 비교, 검증하였다.

**주요어** : 화강풍화토, 함수특성곡선, Soil Vision

## 1. 서 론

지반공학이나 지중구조물의 설계 시 일반적으로 지반을 포화상태로 간주하는 것은 해석상 간편하고 안정적이기 때문이다. 그러나 현장에서 일상적으로 접하는 대부분의 지반은 불포화상태이다. 불포화 상태에서의 설계는 일반적인 포화토질역학의 계수처럼 일정한 상수로 규정지어지지 않기 때문에 접근이 어렵고, 실험적인 측면에서도 시간과 비용 등 많은 어려움이 있다. 이러한 불포화토의 특성을 규명하는데 가장 기본적인 요소 중의 하나가 지반내의 함

수와 지반의 흡수력의 관계를 나타내는 함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve)이다. 국내외의 많은 연구를 통하여 함수특성곡선의 산정식과 실험법등 많은 접근법이 소개되어 왔으나, 국내의 경우 대부분의 토사는 화강풍화토이며, 화강풍화토에 대한 함수특성곡선 연구는 아직 미비한 실정이다. 본 연구에서는 기존의 제안식에 대한 고찰을 통하여 국내 화강풍화토에 맞는 함수특성곡선 산정식을 결정하고 수집된 국내 자료들을 통하여 국내 화강풍화토의 함수특성곡선에 대한 데이터베이스 구축을 목표로 한다. 이를 위해, 그 동안 제시된 국내외의 함수특성곡선

1) 정회원, 서일대학 토목과 교수, 공학박사

† 정회원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : leein10@hotmail.com)

에 대하여 고찰하였으며, 실내실험을 통하여 국내 화강풍화토에 가장 잘맞는 제안식을 선정하였다. 이러한 제안식을 통하여 함수특성곡선을 구할 수 있는 컴퓨터 프로그램 Soil-Vision을 이용하여 국내 화강풍화토에 대한 함수특성곡선을 구하였으며, 이를 지역별로 정리하였다.

## 2. 연구배경 및 목적

일반적으로 사면, 제방, 댐 등의 안정해석에는 흙의 포화도를 고려하지 않고 포화상태의 시료에서 얻어진 강도정수를 사용하여 왔다. 이는 포화지반의 개념으로 구조물을 설계하는 것이 이론적 접근이 용이하고 안전측 설계가 가능하기 때문이었으며, 불포화도를 연구하기 위해 소요되는 실험적 비용과 시간 등의 어려움이 많았기 때문이다. 하지만 고전적인 포화토질역학의 개념과 원리로는 실제의 불포화 지반에서 발생하는 현상과 거동이 합리적으로 해석되지 않는 많은 공학적 문제들이 인식되면서 최근 들어 지반의 공학 연구 분야에 불포화도에 대한 관심이 증가하고 있다.

불포화도는 부간극수압의 영향으로 걸보기 점착력을 보이고 마찰각도 커지는 등 완전 포화토와는 다른 특성을 나

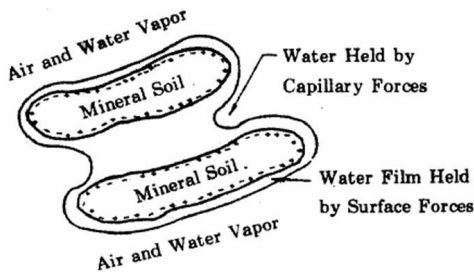


그림 1. 모관흡수력과 표면력에 의해 보유되는 물

타낸다. 따라서 많은 지반공학과 지반환경문제의 해석에 포화토의 이론을 적용한다면 과대설계가 되거나 실제문제를 잘못 모델링하는 결과를 초래할 수 있다. 실제의 토질 구조물은 불포화 지반에 놓이는 경우가 많기 때문이다. 또한, 국내의 경우 기초지반 또는 건설재료로 이용되는 흙의 대부분이 화강풍화토이며, 국내 지반에서 가장 흔히 접할 수 있는 화강풍화토는 세립분( $75\mu\text{m}$  이하)이 60%이하이고 입도분포가 양호한 흙으로 자연상태에서 대부분이 지하수위 이상에서 불포화 상태로 존재하고 있으며, 지반구조물의 주요한 재료로 사용되고 있기 때문에 이러한 화강풍화토의 불포화 특성에 대한 연구가 더욱 요구되고 있다.

이러한 불포화토의 역학적 성질을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소 중의 하나가 바로 ‘함수특성곡선(SWCC)’이다. 본 연구에서는 실무에 편리하게 쓰일 수 있도록 국내 화강풍화토에 대한 지역별 자료를 제시하며, 이에 대한 검증을 위하여 이론적 고찰과 검증, 실험적 검증을 하였다.

## 3. 이론적 배경

이론적 추정식을 이용한 함수특성곡선의 산정은 주로 건조시 함수특성곡선이며, 추정식의 기본적인 형태는 식

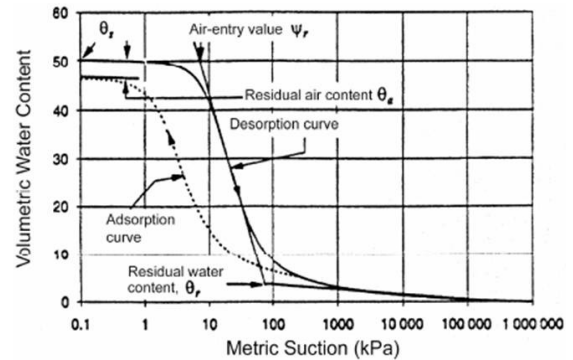
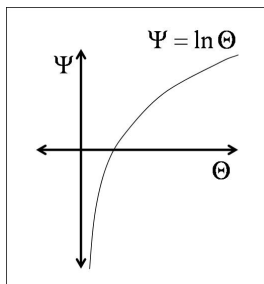
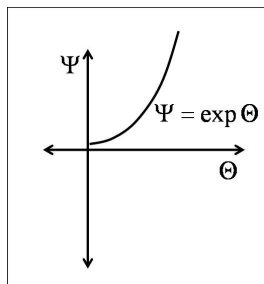


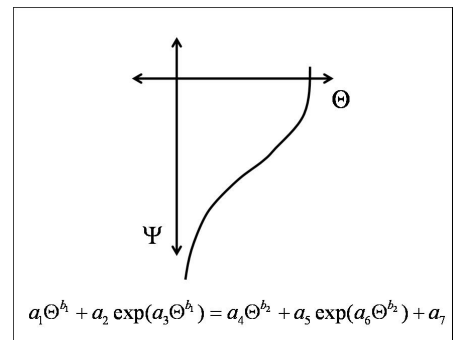
그림 2. 전형적인 함수특성곡선(SoilVision User's Manual, 2004)



(a)



(b)



(c)

그림 3. 함수특성곡선 추정식의 일반형태

(1)과 같이 지수함수와 로그함수의 조합으로 표현된다. 그림 3은 함수특성곡선 추정식의 기본형태에 대한 그림이다.

$$a_1\Theta^{b_1} + a_2\exp(a_3\Theta^{b_1}) = a_4\Psi^{b_2} + a_5\exp(a_6\Psi^{b_2}) + a_7 \quad (1)$$

여기서,  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, b_1, b_2$  : 상수

$\Psi$  : 모관흡수력

$$\Theta : \text{정규 체적함수비} \Theta = \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$\theta_s$  : 포화시 체적함수비

$\theta_r$  : 잔류 체적함수비

$\theta_w$  : 체적함수비

### 3.1 Van Genuchten(1980)

식 (1)에서  $a_4/a_1 = \alpha^n$ ,  $b_1 = m$ ,  $b_2 = n$ 이라 하면, 함수특성곡선의 산정에 많이 쓰이는 Van Genuchten(1980)의 제안식이 된다. Van Genuchten(1980)의 모델은 이전의 제안식들에 비해 적용성이 뛰어나지만, 국내화강풍화토에는 다소 차이가 있다고 밝혀져 있다(이성진 등, 2005).

$$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (a\Psi)^n} \right]^m \quad (2)$$

여기서,  $\Psi$  : 모관흡수력

$a$  : 공기유입값과 관계된 계수

$n$  : 변곡점의 경사에 관계된 계수

$m$  : 잔류함수비에 관계된 계수

### 3.2 Fredlund and Xing(1994)

Fredlund and Xing(1994)은 이전의 연구에 의해 발표된 식들을 수정하여, 함수특성곡선식을 제시하였으며, 가장 보편적이고 넓은 범위의 함수특성을 반영한다(SoilVison User's Manual, 2004).  $a_7/a_1 = e$ ,  $a_4/a_2 = (1/a)^{b_2}$ ,  $b_1 = m$ ,  $b_2 = n$ 이라 하면 Fredlund and Xing(1994)의 제안식(식 (3))이 얻어진다.

$$\Theta = C_{(\Psi)} \left[ \frac{1}{\ln \left( e + \left( \frac{\Psi}{a} \right)^n \right)} \right]^m \quad (3)$$

여기서,  $\Psi$  : 모관흡수력

$e$  : 자연수, 2.71828

$n$  : 변곡점의 경사에 관계된 계수

$m$  : 잔류함수비에 관계된 계수

$C_{(\Psi)}$  : 보정함수

### 3.3 수정 Arya & Paris 모델(이성진 등, 2005)

이성진(2005)등은 Van Genuchten(1980)의 함수특성곡선 산정식을 국내 화강풍화토에 대하여 수정하였으며, 적용결과 국내 화강풍화토에 매우 적합한 것으로 밝혀졌다. Van Genuchten(1980)의 식을 적용한 Arya & Paris 모델의 보정계수  $\xi$ 에 대한 수정이 주된 점이며  $\xi$ 의 수정은 식 (4)와 같다.

$$\xi = \begin{cases} \frac{\beta}{\log(D_i)} & (D_i \geq 100\mu m) \\ \frac{\beta}{\log(100)} & (D_i < 100\mu m) \end{cases} \quad (4)$$

여기서  $D_i$ 는  $n$ 개의 부분으로 나누어진 입도분포곡선 중  $i$ 번째 부분에서의 흡 입자들의 평균입자지름을 의미하며,  $\beta$ 는 입도분포곡선의 모양에 영향을 받는 계수이며, 체적함수비에 대한 보정계수로서  $\chi$ 를 제시하였다. 각각은 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\beta = \frac{1000a}{300a - 0.3} \quad (5)$$

여기서,  $a$  : 공기유입값과 관계된 계수(Van Genuchten(1980))

$$\chi = \frac{e_v}{1.17e_v - 0.09} \quad (6)$$

여기서,  $e_v$  : 간극비

## 4. 불포화토의 함수특성곡선 예측

### 4.1 개요

본 연구에서 불포화토의 SWCC는 실내물성시험과 강우재현장치를 이용하여 수정 Arya & Paris 모델(이성진 등, 2005)과 Fredlund and Xing(1994)의 모델의 SWCC를 제시하였다. 실내물성시험과 강우재현장치 실험의 결과를 각각의 모델에 대입하여 SWCC를 산출하였다.

### 4.2 모형지반의 조성과 함수특성곡선

일반적으로 SWCC의 산정에 쓰이는 실내시험은 GCTS사의 SWCC Device가 많이 쓰이나, 시료의 규격이 작아서 신뢰성이 떨어진다. 본 연구에서는 강우재현 실험장치를 이용하였으며, 모형토조에 지반을 형성하여 모형지반 내에 흡수력을 측정하는 Tensiometer와 체적함수비를 측정하는 TDR을 같은 지점에 설치하여 시료를 건조시키며 직접적으로 체적함수비와 모관흡수력을 측정하였다.

### 4.2.1 TDR 원리 및 보정시험

#### 1) TDR의 원리

유전율(dielectric constant)은 두 전극사이에 유전체를 넣었을 경우와 넣지 않은 경우의 전기용량비이다. 물의 유전율은 대략 80, 건조된 흙의 유전율은 일반적으로 3~8 사이의 값을 나타내고 있다. 바로 TDR의 원리는 물과 흙의 유전율이 크게 차이가 있다는 것에 기초하여 나온 것이다. 즉 TDR의 원리는 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자파(electromagnetic wave)이 이동시간(travel time)을 측정하는 것을 바탕으로 하고 있다(전성일 등, 2003).

#### 2) TDR의 보정방정식 - US-LTPP(Long Term Pavement Performance)

$$\theta_w = \alpha_0 + \alpha_1 K_a + \alpha_2 K_a^2 + \alpha_3 K_a^3 \quad (7)$$

$$\theta_w = \alpha_0 + \alpha_1 K_a + \alpha_2 K_a^2 + \alpha_3 K_a^3 + \alpha_4 G11_2 + \alpha_5 G1_2 + \alpha_6 No4 + \alpha_7 No10 + \alpha_8 No200 + \alpha_9 PL + \alpha_{10} LL \quad (8)$$

여기서,  $K_a$  : TDR도파관의 유전율  $K_a = \left( \frac{L_a}{L \times V_p} \right)^2$

$L$  : 도파관의 길이

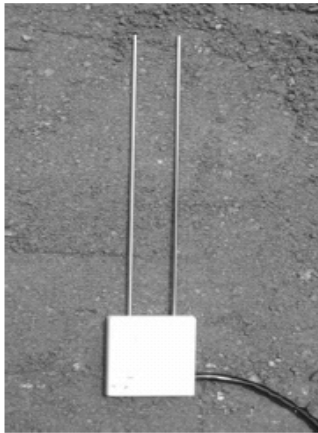


그림 4. 실험에 사용된 TDR(Campbell사의 CS616)

$L_a$  : 측정길이

$V_p$  : 전파속도와 빛의 속도의 비(= 0.99 ≈ 1)

#### 3) TDR 보정실험

미국의 여러 시험도로에서도 TDR 방식 함수량계의 보정실험을 통하여, 자체적으로 보정방정식을 제안하였다. 일반적으로 제품 매뉴얼 상에 보정방정식이 제안되어 있지만, 실제 흙의 타입, 현장조건에 따라 많은 오차가 발생할 수 있기 때문에, TDR 함수량계는 사용자가 자체적인 보정실험을 수행하는 것이 일반적이다(전성일 등, 2003). 따라서 본 논문에서는 자체적인 보정실험을 통하여 보정계수를 이용한 보정을 실시하였다.

표 2는 보정실험의 결과를 나타내며, 실험결과, AllSoil -  $K_a$  Model과 비슷한 값을 보여, 본 연구에서는 TDR 함수량계의 보정방정식의 계수에 AllSoil -  $K_a$  Model을 사용하였다.

### 4.2.2 Tensiometer

Tensiometer는 액주계의 원리를 이용하며, 별도의 보정이 필요치 않다. 본 연구에 쓰인 Tensiometer은 Soil-Moisture사의 Mini-Tensiometer(2100F)가 쓰였으며, 이는 일반적인 Tensiometer을 로깅이 가능하게 고안된 것이다. 또한 현장계



그림 5. Soil-Moisture사의 Mini-Tensiometer 2100F

표 1. 각각의 모델에 따른 계수값(식 (7))

모델명	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
Coarse - $K_a$ Model	-5.7875	3.41763	-0.13117	0.00231
Fine - $K_a$ Model	0.4756	2.75634	-0.06167	0.00048
AllSoil - $K_a$ Model	-0.8120	2.38682	-0.04427	0.00029

표 2. 보정실험 결과

모델명	$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
보정실험	-0.8501	2.3500	-0.04428	0.00031
AllSoil - $K_a$ Model	-0.8120	2.38682	-0.04427	0.00029

측보다는 실험실용으로 만들어져 일반적인 Tensiometer처럼 실린더 끝에 세라믹이 달려있지 않고 작은 튜브를 통하여 그 끝에 소형 세라믹이 장착되어있다. 그림 5는 Soil-Moisture사의 Mini-Tensiometer의 모습이다.

#### 4.2.3 강우재현실험장치

그림 6은 강우재현장치의 모식도이다. 강우재현실험을 위해 고안된 실험장치로 실험순서는 그림 6의 오른쪽에 있는 토조에 시료를 가하고 이를 운반크레인을 이용하여 진동대로 이동시켜 다짐을 한다. 다짐을 한 후 다시 기존에 토조가 있던 자리로 토조를 이동시키고 시료를 추가한 후 다시 진동대로 이동하여 다짐을 하는 방식을 반복하여 모형지반을 형성한다. 모형지반이 형성되면 운반크레인을 이용하여 모형토조를 실험대로 이동시킨뒤 운반크레인을 원래 자리로 이동시키고 모형토조위로 모형강우장치를 이동시켜 강우를 발생시킨다. 모형강우 장치는 모형지반의 표면파괴를 막기 위하여 진동하면서 물을 뿌리는 방식으로 실제 강우상태를 최대한 재현하였다. 실험대의 경사조절장치는 사용하지 않았다. 또한 함수특성곡선의 이력현상을 고려하여 모형지반을 최대한 포화시킨 후 건조되는 방

향으로 측정하였다. 해당 실험기의 장점은 기존의 SWCC Device 시험기를 사용할 경우에 비하여 많은 시간이 절약되며 자료수집장치의 입력치를 조절을 통하여 더 많은 측정데이터를 얻을 수 있다. 단점으로는 SWCC Device를 이용한 시험은 지반의 심도를 고려하여 시료에 상재압을 가할 수 있지만 해당 실험기는 상재압을 가하는 장치가 아직 추가되지 못하여 상재압에 대한 고려는 불가능하다.

#### 4.2.4 실내실험결과

그림 8은 강원도 홍천군 두촌면 화강풍화토의 시료채취 과정과 시료의 입도분포곡선 및 입도분포 특성, 밀도, 흙 분류이다. 2005년 여름 이 지역은 토석류에 의한 파괴가 있었다. 그림 8은 해당 시료의 체분석시험과 비중시험 결과이다. 그림 9는 체적함수비와 간극수압을 측정하기위한 TDR과 Tensiometer의 설치 위치를 나타내었다. 그림 9에 보이는 것처럼 TDR과 Tensiometer는 각각 9군데에 설치되었으며 자료를 수집은 지점은 3곳이다. 모형지반은 단위중량  $17\text{kN/m}^3$ 에 맞춰서 3층다짐을 실시하여 구성하였으며, 다짐에는 진동다짐대가 쓰였다.

실내실험의 결과 각 지점에 측정된 체적함수비와 간극

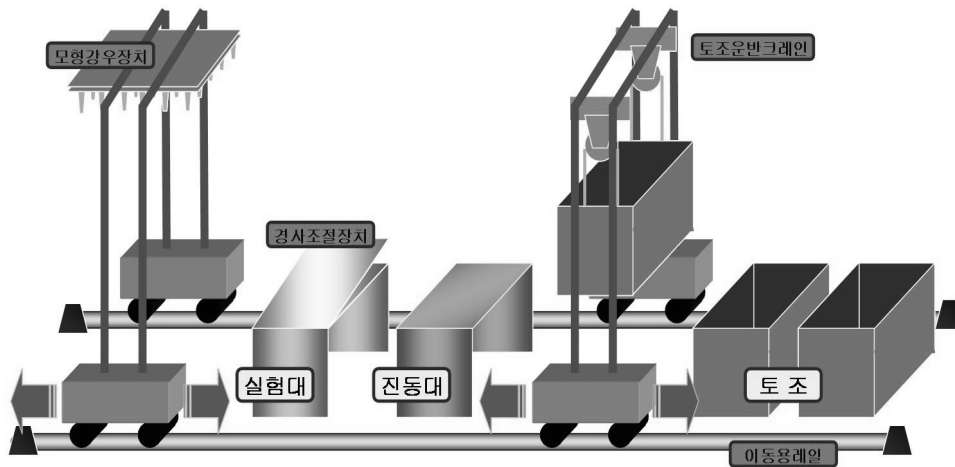
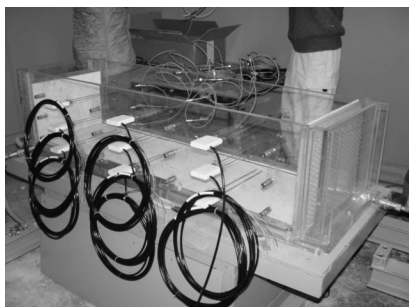
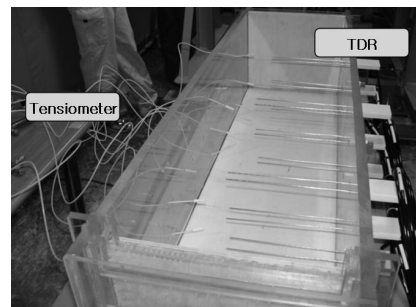


그림 6. 강우재현장치 모식도

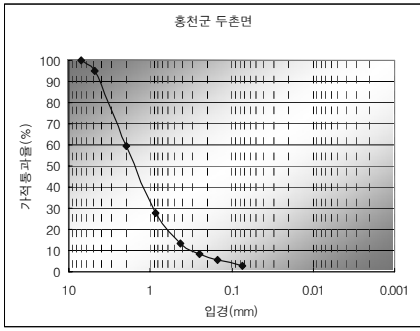


(a) 계측기 결합모습(측면, 흙 제외)



(b) 계측기 결합모습(평면, 흙 제외)

그림 7. 모형토조 및 계측기 결합모습



비중 2.684  
 최대입경 7mm  
 균등계수 10  
 곡률계수 2.03  
 통일분류 SW  
 LL, PL N.P.

그림 8. 홍천군 두층면 화강풍화토의 입도분포곡선 및 비중

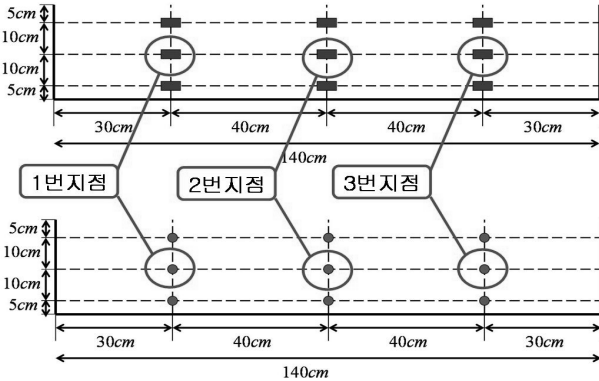


그림 9. 실내실험 계측위치

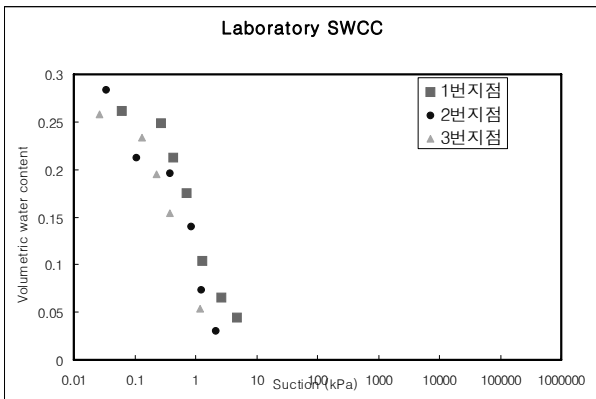


그림 10. 실내실험 결과

수압을 그림 9에 나타내었다.

실내실험의 결과 각 지점별 측정된 체적함수비와 모관흡수력은 일반적인 풍화토의 형상을 보였으며, SWCC Device 시험기를 이용한 결과보다 더 많은 데이터를 얻을 수 있었다. 해당 데이터를 이용해 SWCC를 산정한 결과를 4.3절에 나열하였다.

### 4.3 모형지반의 함수특성곡선 예측

#### 4.3.1 수정 Arya & Paris 모델(이성진 등, 2005)을 이용한 SWCC

본 연구에 사용된 수정 Arya & Paris 모델(이성진 등,

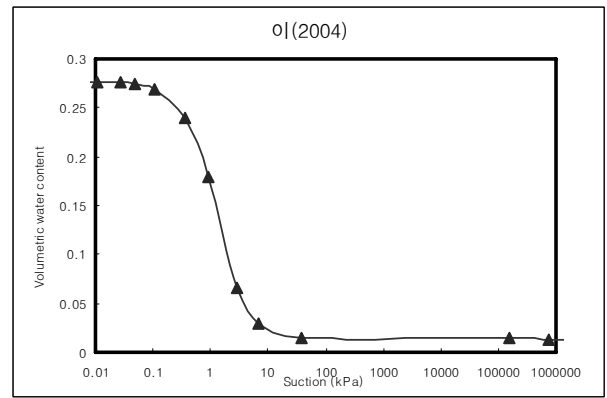


그림 11. 수정 Arya & Paris 모델(이성진 등, 2005)을 이용한 두층면 시료의 함수특성곡선

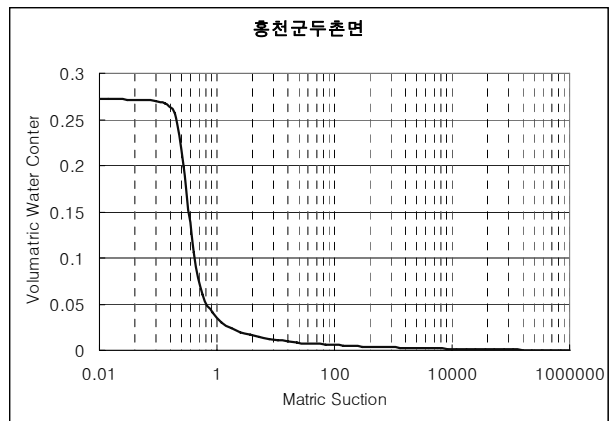


그림 12. Soil-Vision에서의 두층면 시료의 SWCC

2005)을 이용한 함수특성곡선을 실내실험 결과를 이용하여 그림 11과 같이 산정하였다.

#### 4.3.2 Soil-Vision을 이용한 Fredlund & Xing 제안식의 SWCC

그림 12는 Soil-Vision을 통하여 산정된 강원도 홍천군 두층면 화강풍화토의 함수특성곡선(건조층, 포화된 시료를 건조시켜가며 측정된 결과를 이용한 함수특성곡선)이다. 앞서 언급했듯, Fredlund & Xing의 방법이 쓰였으며, Fredlund & Xing의 변수는 다음과 같다.

$$\text{Fredlund \& Xing의 식 } \theta = C_{(\psi)} \left[ \frac{1}{\ln \left( e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right)} \right]^m \text{ 에서,}$$

$$a : 0.2940 \quad n : 6.0723 \quad m : 0.9385$$

### 4.4 각 모델별 함수특성곡선 비교

수정 Arya & Paris 모델(이성진 등, 2005)식과 모형토조를 이용한 실내실험을 Fredlund & Xing의 모델을 이용한



표 4. 화강풍화토의 Fredlund & Xing SWCC 산정에 필요한 각 계수

	통일분류	a	n	m	h (kPa)	AEV (kPa)
진부령	SW	0.51723	9.9479	0.5434	1.0483	0.413
원 주	SW	0.50467	9.8971	0.5558	1.0124	0.389
시 흥	SW	0.29266	9.8176	0.4226	0.6603	0.247
풍 산	SW	0.40123	20.000	0.3105	0.7494	0.362
군 산	SM	0.89378	3.7292	0.6638	3.5085	0.605
익 산	SW	1.10496	4.0714	0.7964	3.4309	0.782
보성육교	SW	0.34160	20.000	0.3178	0.5519	0.266
광주첨단	SW	1.11424	6.0788	0.5940	2.9392	0.879
풍암평지	SM	0.67971	20.000	0.1966	1.6001	0.554
보성득량	SW	0.60566	7.1535	0.4150	1.7664	0.492
풍암2단	SW	0.50062	6.6495	0.4475	1.5143	0.400
옥 천	SW	0.51951	7.3107	0.4503	1.4464	0.424
홍천군두촌면	SW	0.27009	6.5425	0.9588	0.5435	0.206
문경이화령	SP	0.34331	4.0606	1.0836	0.8683	0.226
영주순흥	SW	0.44150	5.9424	0.5766	1.2031	0.337
예천돈담	SW	0.29397	4.6209	1.0177	0.6934	0.208
안동북후	SP	0.30447	3.8280	1.5003	0.6647	0.193

내 각 지역별 화강풍화토의 SWCC들은 각각 차이가 있었다. 현재의 연구는 국내 화강풍화토의 SWCC의 자료화에 대한 기초적인 연구단계로 각 계측기별 보정 실험이 있었다 하더라도 본 연구에서 쓰인 강우재현실험장치의 실험 횟수가 1회로 상당히 부족하며, 국내 각지역이라 하기엔 연구결과로 제시된 지역수 또한 부족하다. 현재의 연구는 기초적인 단계이며 함수특성곡선 지도를 더 완성도 있게 작성하기 위해서는 더 많은 실험과 각 지역의 자료 수집을 통한 향후 추가적인 연구가 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 2007년도 서일대학 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 권오순, 정충기 (1998), 풍화에 따른 풍화토의 특성 변화, *한국지반공학회지*, 제14권, 제5호, pp. 53~66.
2. 김상규, 류지협, 송진규 (1996), 불포화토의 함수특성 측정, *한국지반공학회지*, 제12권, 제6호, pp. 139~151.
3. 김종렬, 조탁휘, 박정훈, 황성원 (2002), 전남지역 석회 풍화토의 토질 공학적 특성 연구, *대한토목학회 2002년 학술발표회*, pp. 402~405.
4. 이성진, 이혜지, 이승래 (2005), 화강풍화토에 대한 함수특성곡선 - 추정방법에 대한 연구, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 제1호, pp. 15~27.
5. 전성일, 권수안, 김도완 (2003), 포장하부구조의 함수비 측정을 위한 TDR방식 함수량계의 실내보정실험, *대한토목학회 2003년도 정기 학술대회 논문집*, pp. 1812~1817.
6. D.G. Fredlund, Anqing Xing (1994), Equations for the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, pp. 521~532.
7. SoilVision User's Manual (2004), SoilVision Systems Ltd.
8. van Genuchten (1980), A closed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, No. 44, pp. 982~898.

(접수일: 2008. 4. 28 심사일: 2008. 5. 28 심사완료일: 2009. 3. 23)