

건조 및 습윤과정에서 보은 화강암 풍화토의 불포화특성곡선 비교

Comparative Study on Unsaturated Characteristic Curves of Boeun Granite Weathered Soil during Drying and Wetting Paths

송 영 석¹ Song, Young-Suk

Abstract

To investigate the unsaturated characteristics of the Boeun granite weathered soil, matric suction and volumetric water content were measured in both drying and wetting paths using Automated Soil-Water Characteristics Curve Apparatus. Based on the measured results, Soil-Water Characteristics Curve was estimated by van Genuchten (1980) model. The relationship between effective degree of saturation and matric suction showed the non-linear curve with S-shape and the hysteresis phenomenon occurred during drying and wetting paths. Suction Stress Characteristics Curve was estimated by the Lu and Likos (2006) model. The suction stress in drying path was constantly maintained and that in wetting path tended to increase when the effective degree of saturation was low. But the suction stress in drying path was larger than that in wetting path at the same degree of saturation when the effective degree of saturation became larger. Meanwhile, Hydraulic Conductivity Function was evaluated by the van Genuchten (1980) model which is one of the parameter estimation methods. The unsaturated hydraulic conductivity decreased with increasing the matric suction, and the decreasing velocity regarding to the matric suction in drying path was larger than that in wetting path.

요 지

보은 화강암 풍화토에 대한 불포화 특성을 조사하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 이를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정한 결과 유효포화도에 따른 모관흡수력은 S자형의 비선형적인 관계를 나타내며, 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 이력현상이 발생되었다. Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과 유효포화도가 낮은 경우 건조과정의 흡입응력은 일정하게 유지되나 습윤과정의 흡입응력은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 유효포화도가 큰 경우에는 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 크게 발생되었다. 한편 계수추정방법의 하나인 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 투수계수함수(HCF)를 산정한 결과 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화 투수계수는 감소하며, 모관흡수력에 따른 불포화 투수계수의 감소 속도는 건조과정이 습윤과정보다 더 크게 발생됨을 알 수 있다.

Keywords : Granite weathered soil, Drying and wetting paths, Soil-Water Characteristics Curve, Suction Stress Characteristics Curve, Hydraulic Conductivity Function

1 정희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3035, Fax: +82-42-868-3414, yssong@kigam.re.kr)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

불포화토는 건조토(dry soil)와 포화토(saturated soil)의 중간영역으로 고전적인 포화토의 이론으로는 불포화토의 특성을 정확하게 설명할 수가 없다. 따라서 불포화토의 특성을 고찰하기 위해서는 모관흡수력 변화에 따른 불포화 지반내 간극수 보유능과 침투능의 상관관계를 조사하여야 한다. 불포화 토질역학에서 흙의 내부에 함수비 혹은 포화도에 따른 모관흡수력의 관계를 흙-함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC)이라고 하며, 불포화토의 거동을 이해하는데 가장 중요한 요소이다. 흙-함수특성곡선(SWCC)은 불포화토 고유의 특성으로서 불포화토의 흐름특성을 이해하고 함수비에 따른 흙의 응력 및 강도특성을 해석하는데 필수적인 요소로 활용되고 있다. 따라서 불포화토의 특성을 이해하기 위해서는 실험을 토대로 불포화토의 함수비 혹은 포화도에 따른 모관흡수력을 측정하고 이를 분석하는 것이 중요하다.

불포화토의 연구는 지난 수십 년 동안 많은 이론적 분석 및 실험적 연구로 인하여 급격하게 발전되어 왔다. Buckingham(1907)은 처음으로 불포화토에 모관흡수력의 개념을 도입하였으며, Richards(1928)는 불포화토에서 간극수의 흐름에 대한 이론식을 개발하였다. 이후 Gardner(1937)에 의해 불포화토의 모관흡수력 측정을 위한 필터페이퍼(filter paper) 기법이 개발되었으며, Richards(1941)는 불포화토의 모관흡수력을 조절할 수 있는 압력판 장치(pressure plate apparatus) 개발하였다. 이와 함께 불포화토의 함수특성 연구(Croney, 1952)가 시작되었으며, Croney et al.(1952)은 다양한 실험방법을 도입하여 모관흡수력을 조절하면서 많은 실험결과를 제시한 바 있다. 한편, 삼투압 기법은 Zur(1966)에 의해 개발되었으며, Kassiff and Ben Shalom(1971)에 의해 발전되었다.

이와 같은 실험장치를 통하여 측정된 자료를 토대로 불포화토의 모관흡수력 변화에 따른 지반내 간극수의 보유능 및 침투능 사이의 상관관계를 나타낼 수 있는 다양한 모델들이 제안되었다(Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Campbell, 1974; van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994). 또한, 모관흡수력의 변화가 불포화토의 유효응력과 전단강도에 미치는 영향에 대한 연구도 진행되고 있다(Vanapalli et al., 1996; Fredlund et al., 1978; Khalili and Khabbaz, 1998). 하지만 흙 내부 토립자 간의 유효응력이나 전단응력을 직접적으로 측정하

기에는 상당한 어려움이 있어 지금도 이에 관한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 불포화토의 응력상태변수를 밝히기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있다(Bishop, 1959; Fredlund et al., 1978; Lu et al., 2010).

본 연구에서는 산사태 모형실험의 지반재료로 활용 예정인 보은 화강암 풍화토를 대상으로 흙-함수특성곡선 측정시험을 실시하여 불포화특성곡선을 산정하고자 한다. 이를 위하여 먼저 자동 흙-함수특성곡선 시험장치(Song et al., 2012)를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정한다. 측정결과를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흙-함수특성곡선(SWCC)과 투수계수함수(HCF)곡선을 산정한다. 그리고 Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 흡입응력 특성곡선(SSCC)을 산정한다. 따라서 보은 화강암 풍화토에 대한 불포화 특성곡선인 흙-함수특성곡선(SWCC), 흡입응력특성곡선(SSCC) 및 투수계수함수곡선(HCF)을 산정하고자 한다.

2. 시험재료 및 방법

2.1 시험재료

산사태 모형실험의 재료로 활용예정인 화강암 풍화토는 충북 보은군 장안면 장대리 일대 택지조성을 위해 절개한 사면에서 채취한 것이다. Fig. 1은 본 시료를 채취한 현장의 전경을 나타낸 것이다. 대상 시료의 공학적 특성을 알아보기 위하여 단위중량, 비중, 입도분석, 액소성한계, 다짐시험 등을 수행하였다. 시험결과에 따르면 대상 시료는 통일분류법(USCS) 상에서 입도가 양호한 모래(SW)에 해당하며, 현장건조단위중량은 $1.34t/m^3$



Fig. 1. Panoramic view of the soil sampling site

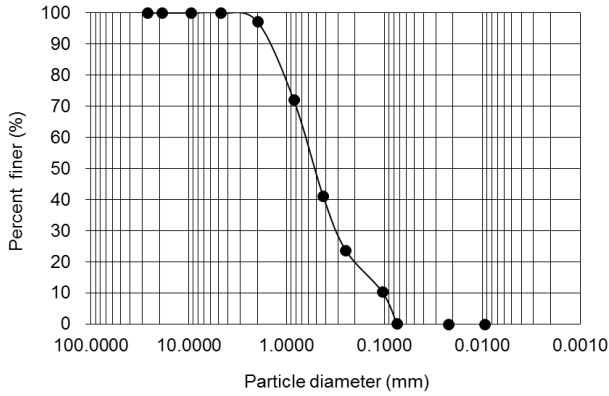


Fig. 2. Grain size distribution curve of the Boeun weathered granite soil

Table 1. Physical soil properties of the Boeun weathered granite soil

Property	Symbol	Unit	Measured value
Specific gravity	G_s	-	2.68
Natural water content	w	(%)	15.90
Total unit weight	γ_t	(t/m ³)	1.55
Dry unit weight	γ_d	(t/m ³)	1.34
Effective particle size	D_{10}	(mm)	0.11
Uniformity coefficient	c_u	-	6.1
Coefficient of curvature	c_g	-	1.5
Liquid limit	LL	(%)	31.79
Plastic limit	PL	(%)	26.74
USCS	-	-	SW

으로 조사되었다.

Fig. 2는 보은 화강암 풍화토의 입도분포곡선을 나타낸 것이며, Table 1은 보은 화강암 풍화토 시료의 기본적인 물리적 특성을 측정된 결과이다.

2.2 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험

2.2.1 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치

본 연구에서는 보은 화강암 풍화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 3은 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 공기의 압력은 0-300kPa범위까지 적용할 수 있으며, 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하였다.

Fig. 4는 본 시험장치의 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 압력조절장치에 의해 공기압을 흡시료에 가하게 된다. 공기압에 의해 포화된 시료내 간극수가 빠져나가게 되며, 이러한 간극수는 HAE(High Air Entry) 디스크와 공기방울트랩을 거쳐 저울을 통하여 측정된다. HAE 디스크는 공기와 흡입자들이 이동하는 것은 제한하지만 물의 흐름을 제한하지 않는다. 이때 공기압은 흡시료의 모관흡수력으로 작용하게 되며, 흡시료가 가지는 일정한 공기함입치를 넘어서게 되면 흡시료 내부에 있는 간극수가 빠져나가기 시작한다. 본 실험에서는 3 bar의 공기압까지 제어할 수 있는 HAE 디스크를 이용하였다.

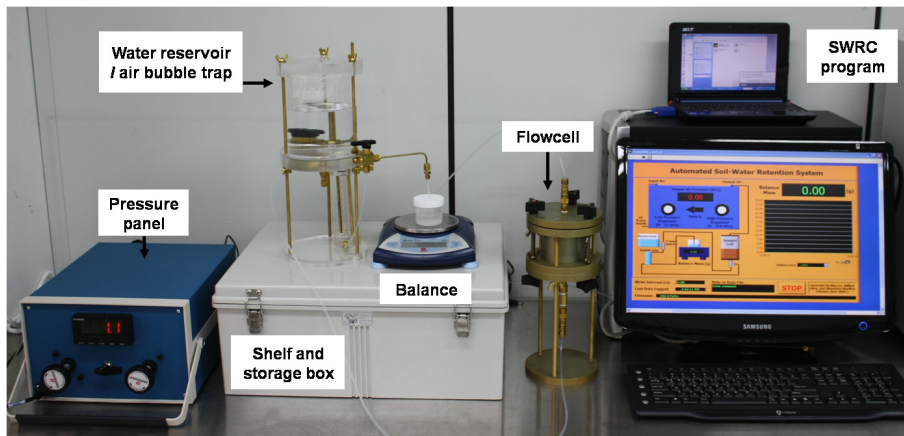


Fig. 3. Automated SWCC apparatus

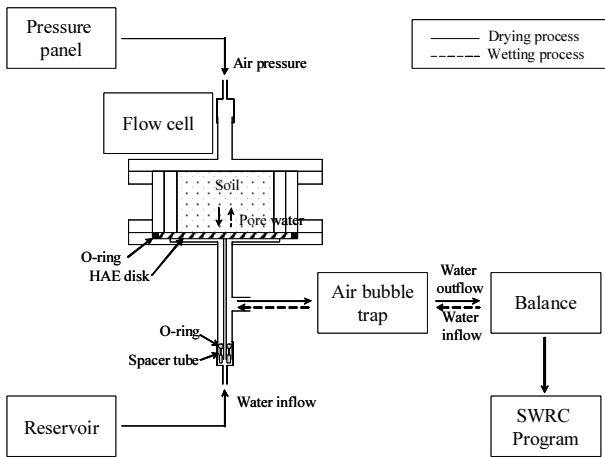


Fig. 4. Schematic diagram of the automated SWCC apparatus (Song et al., 2012)

2.2.2 시료성형

본 시험에서는 먼저 시료를 포화시킨 후 공기압을 가하여 간극수를 배출하는 건조과정을 실시하게 된다. 플라스틱 몰드(직경 5.05cm, 높이 3.89cm)와 플라스틱 봉을 이용하여 3층 다짐을 실시하였다. Fig. 5(a)는 플라스틱 몰드에 시료를 성형하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라스틱 봉으로 시료를 다져 현장에서의 건조단위중량인 $1.34t/m^3$ 과 동일하게 시료를 성형하였다. 그리고 시료 상하부에 다공석을 두어 포화시 시료내부에 물이 원활하게 흐를 수 있도록 하였다. 시료를 포화시키기 위하여 데시케이터와 진공펌프를 활용하였다. 즉 데시케이터 내에 정제된 증류수를 채우고, 성형된 시료를 약 2/3정도 물에 잠기도록 한 다음 진공펌프를 이용하여 데시케이터 내부를 진공상태로 만든다. 이때 시료는 높은 배압을 받게 되며, 물이 시료의 하부로부터 포화되면서 상부로 흘러가기 때문에 간극내 남아 있는 공기를 제거하면서 포화가 진행된다. 시료

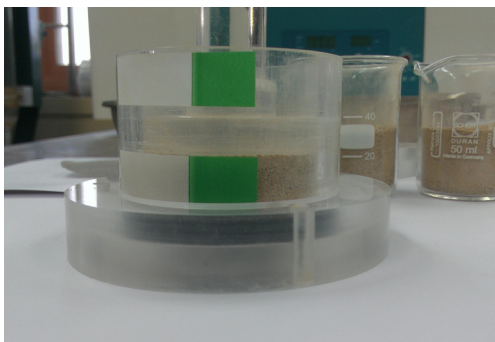
를 포화시키기 위하여 진공상태의 데시케이터 내부에 약 24시간 두었다. Fig. 5(b)는 데시케이터 내부에 성형된 시료를 위치한 모습이다.

3. 시험결과 및 분석

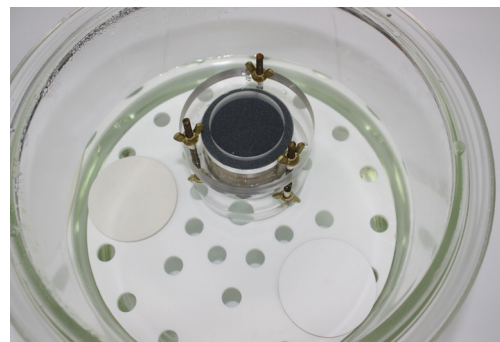
3.1 모관흡수력과 간극수량 측정결과

Fig. 6은 모관흡수력의 재하 및 제하시 단계별 간극수의 유출 및 유입량을 나타낸 것이다. 즉 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 간극수의 유출량은 증가하며, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 간극수의 유입량이 증가함을 알 수 있다. 단계별 모관흡수력을 조절하기 위하여 일정단계 모관흡수력 수준에서 간극수 유출 및 유입량이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 재하 혹은 제하하였다. 한편 습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다. 이것은 건조과정에서 간극에 갇힌 독립된 공기에 의한 흐름의 저항에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 측정결과를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비의 상관관계를 도시한 것이다. 시료에 재하 및 제하되는 공기압과 이때 배출 및 유입되는 간극수의 양을 측정하여 모관흡수력과 체적함수비의 상관관계를 도출하였다. 모관흡수력은 간극공기압과 간극수압의 차로 정의되며, 시료에 재하 및 제하된 공기압이 되며, 체적함수비는 공시체의 체적, 간극률, 흙내부의 물의 부피 등을 계산하여 구하였다. 그림에서 보는 바와 같이 시료



(a) Forming of the soil sample



(b) Saturation of the soil sample

Fig. 5. Soil sample preparation

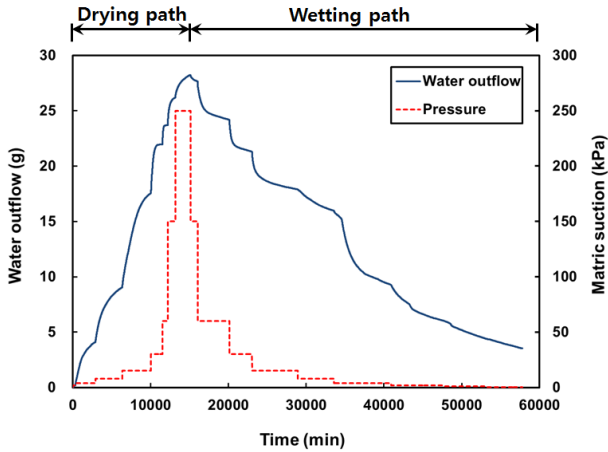


Fig. 6. Mass of water outflow for various matric suctions

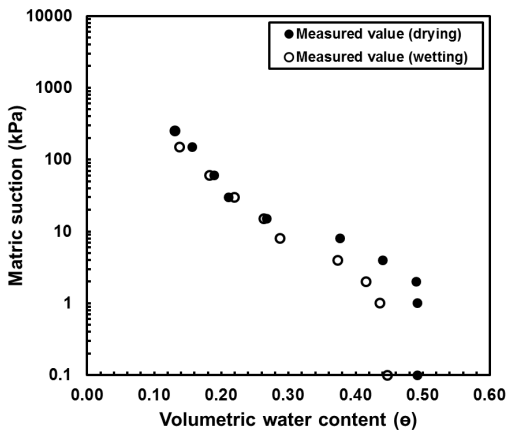


Fig. 7. Measuring result of volumetric water contents according to matric suctions

내 체적함수비가 감소함에 따라 모관흡수력이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 동일한 체적함수비에서 건조과정의 모관흡수력은 습윤과정의 모관흡수력보다 더 큰 것으로 나타났다.

3.2 흡-함수특성곡선(SWCC) 예측

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten (1980)방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 본 실험장치를 이용하여 측정된 결과는 van Genuchten(1980)방법을 적용하는 것이 가장 적합한 것으로 조사된 바 있다(Song et al., 2010). van Genuchten (1980)은 Mualem(1976)의 제안식을 토대로 유효포화도 (S_e)와 압력수두(h)의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 식 (1)은 van Genuchten (1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정식

Table 2. Curve-fitting parameters of the Boeun weathered granite soil

Condition	α (kPa ⁻¹)	n	m	AEV/WEV (kPa)
Drying	0.145	1.990	0.497	2.7
Wetting	0.245	1.712	0.416	1.8

을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)^n]} \right]^m \quad (1)$$

여기서, α 는 공기유입값과 관계된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관계된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관계된 계수이다.

측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 비선형 최소제곱법(nonlinear least squares analysis)을 적용하여 van Genuchten(1980)방법의 불포화 관련계수인 α , n 및 m 을 산정하였다. Table 2는 건조 및 습윤과정에 대한 화강암 풍화토 시료의 불포화 관련계수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 과 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 갖는다. 표에 나타난 불포화 관련계수와 식 (1)을 이용하여 화강암 풍화토의 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 8은 van Genuchten(1980)방법을 적용하여 산정한 불포화 관련계수를 이용하여 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 각각 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)에서 모관흡수력과 체적함수비는 S자 형태의 비선형적인 관계를 나타내며, 곡선의 기울기도 차이를 보이는 것으로 나타났다.

건조과정에서의 공기함입치(AEV)와 잔류체적함수비(θ_r^d)와 습윤과정에서의 수분함입치(Water Entry Value, WEV)와 잔류체적함수비(θ_r^w)를 구하기 위하여 Fig. 8의 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC) 상에서도해적인 방법을 적용하였다. 건조과정에서 공기함입치(AEV)는 2.7kPa이며, 포화체적함수비(θ_s^d)는 0.492, 잔류체적함수비(θ_r^d)는 0.131이며, 습윤과정에서 수분함입치(WEV)는 1.8kPa이며, 포화체적함수비(θ_s^w)는 0.447, 잔류체적함수비(θ_r^w)는 0.131로 산정할 수 있다.

Fig. 9는 보은 화강암 풍화토의 건조 및 습윤과정에 따른 측정결과와 van Genuchten(1980) 방법으로 예측한 흡-함수특성곡선(SWCC)을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 포관흡수력에서 건조과정의 체적함수비가 습윤과정의 체적함수비 혹은 유효포화도 보다 더 크게 나타났다. 이와 같이 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)이 일치하지 않는 현상을 이력현상(hysteresis)라고 한다. 이와 같은 이력현상의 원인으로는 잉크병 효과(Ink-bottle effect), 모세관 응축(Capillary condensation), 갇힌 공기(Entrapped air), 팽창 및 수축(Swelling and Shrinkage), 접촉각 이력현상(Contact angle hysteresis)을 들 수 있다. 이 가운데 이력현상의 주요원인으로는 잉크병 효과를 들 수 있다. 잉크병 효과는 흙의 구조적 특징(간극의 크기, 형상 및 분포)이 비균질하기 때문에 발생하며, 비균질한 간극에서의 모세관

을 고려함으로써 알 수 있다. 즉 물을 흡수하는 습윤과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이고, 물을 배수하는 건조과정에서는 작은 간극의 영향이 주요하기 때문이다(Lu and Likos, 2004; Park et al., 2006; Song and Choi, 2012).

3.3 흡입응력특성곡선(SSCC) 예측

Lu and Likos(2006)는 흡입응력항(σ^s)을 적용하여 불포화토의 유효응력을 식 (2)와 같이 Terzaghi(1943)의 유효응력과 유사한 형태로 제안되었다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (2)$$

여기서 σ^s 는 흡입응력이다.

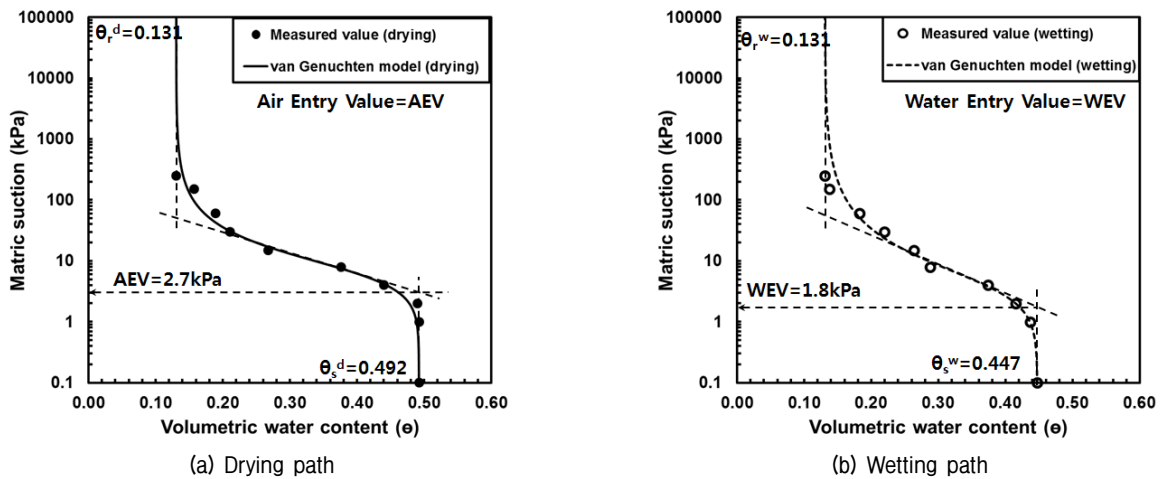


Fig. 8. Estimation of the saturated and residual volumetric water contents and AEV or WEV

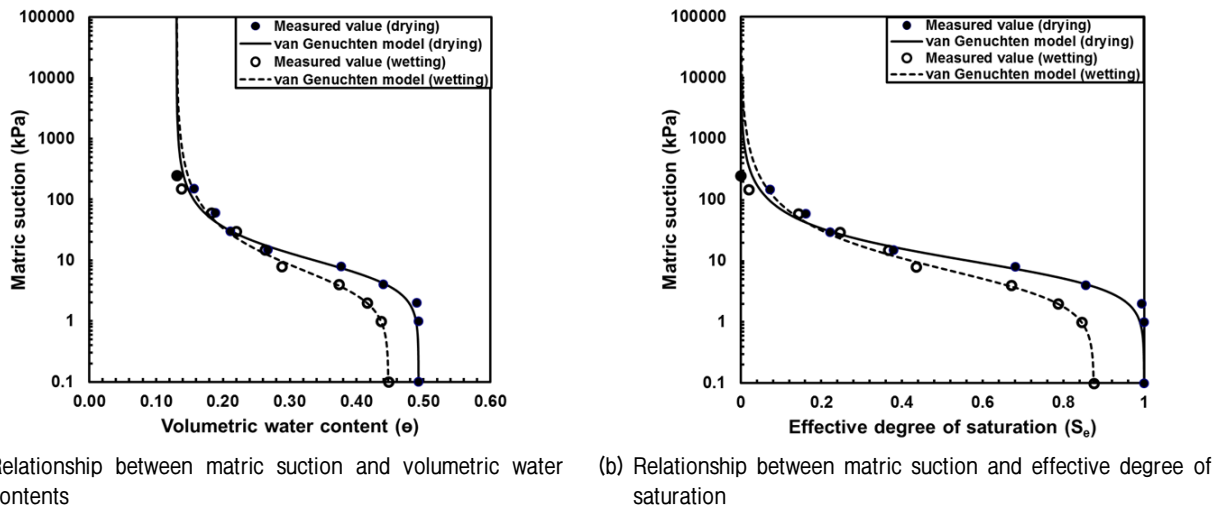


Fig. 9. Comparison of the SWCCs for drying and wetting paths

그리고 Lu and Likos(2006)는 불포화도의 흡입응력을 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) S_e \quad (3)$$

식 (3)은 체적함수비 혹은 유효포화도와 모관흡수력 사이의 상관관계를 적용하여 추가적으로 확장시킬 수 있다. 만약 van Genuchten(1980)의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 활용하면, 유효포화도는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^m = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (4)$$

여기서, α , n 및 m 은 불포화 계수로서, α 는 공기함 입치와 관련된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관련된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관련된 계수이다. 또한 $m = 1 - 1/n$ 로 나타낼 수 있다.

식 (3)에 식 (4)를 대입하고 모관흡수력의 항을 제외하면 식 (5)와 같이 전체포화범위에 대한 흡입응력을 산정할 수 있는 공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} \left(S_e^{1/n} - 1 \right)^{1/n} \quad 0 \leq S_e \leq 1 \quad (5)$$

이와 유사하게 식 (3)에 식 (4)을 대입하고 유효포화도의 항을 제외하면 식 (6)에서 보는 바와 같이 전체 모관흡수력 범위에 대한 흡입응력 산정공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (6a)$$

$$\sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w \geq 0 \quad (6b)$$

Lu and Likos (2006)에 의하면 흡입응력은 고결작용, 반데르발스 인력, 전기이중층 척력에 기인한 입자간의 물리화학적 응력과, 표면장력 및 부간극수압으로 인하여 발생하는 모관흡수력의 결과로 개념화 시킬 수 있다. 흡입응력을 구성하는 이러한 입자간 응력들은 함수비, 포화도 혹은 모관흡수력의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 흡입응력은 흡-함수 시스템의 특성함수로 나타낼 수 있다. 즉, 흡입응력은 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(SSCC)이라고 한다.

Fig. 10은 보은 화강암 풍화토에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)으로부터 측정된 불포화도 관련계수(α , n)와 식 (3) 및 식 (6)을 이용하여 체적함수비 혹은 유효포화도에 따른 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정과 습윤과정의 유효포화도에 따른 흡입응력의 거동은 다르게 나타났다. 유효포화도가 낮은 경우 건조과정의 흡입응력은 일정하게 유지되는 경향을 보이거나 습윤과정의 흡입응력은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 유효포화도가 약 0.2이하에서는 동일한 유효포화도에서 습윤과정의 흡입응력이 건조과정의 흡입응력보다 크게 발생됨을 알 수 있다.

3.4 불포화 투수계수함수(HCF) 예측

불포화도의 투수계수함수를 결정하는 방법으로는 실험적인 방법과 이론적인 방법으로 나눌 수 있다. 우선 실험적으로 불포화도의 투수계수를 측정하는 방법으로는 수직기둥을 이용한 정상상태 해석(Richards, 1931), 반영구적인 멤브레인을 이용한 정상상태 해석(Hassler and Brunner, 1945), 그리고 비정상상태 해석(Welge, 1952)이 가장 많이 사용되고 있다. 반면, 이론적으로 불포화도의 투수계수를 결정하는 방법으로는 계수추정방법과 역해석기법이 가장 많이 사용되고 있으며 많은 연구자들에 의해 제안되어 왔다(Zachman et al., 1981; Dane and Hruska, 1983; Abu-Hejleh et al., 1993; Wildenschild et al., 1997).

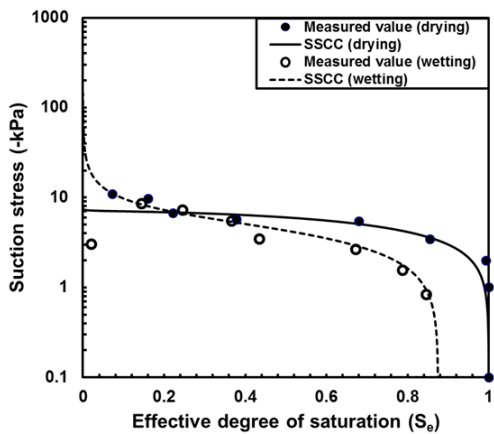


Fig. 10. Comparison of SSCCs for drying and wetting paths

Table 3. Saturated hydraulic conductivity of the Boeun weathered granite soil

Condition	k_s (cm/sec)
Drying	1.89×10^{-3}
Wetting	3.05×10^{-4}

보통 실험적인 방법으로 불포화토의 투수계수함수를 결정하기 어렵기 때문에 이론적인 방법을 선호하고 있다. 그 가운데 흡-함수특성곡선의 불포화 계수를 이용하여 투수계수함수를 추정하는 계수추정방법이 주로 사용되고 있다. 특히 Mualem(1976)의 모델을 기초로 한 van Genuchten(1980)의 투수계수함수 모델이 계수추정방법으로 가장 많이 이용되고 있다. 식 (7)은 van Genuchten (1980)이 제안한 불포화토의 투수계수함수를 나타낸 것이다.

$$k = k_s \times S_e^{1/2} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (7)$$

여기서, k =불포화 투수계수, k_s =포화투수계수, S_e =유효포화도 $m=1-1/n$ ($0 < m < 1$)

Table 3은 보은 화강암 풍화토의 건조 및 습윤과정에서의 포화투수계수를 나타낸 것이다. 이를 위하여 먼저 보은 화강암 풍화토의 포화시 투수계수를 측정하였다. 이 값은 건조과정의 포화투수계수가 된다. 이 값을 토대로 van Genuchten(1980)이 제시한 불포화토의 투수계수함수 산정식을 이용하여 습윤과정에서의 포화시 유효포화도를 입력함으로써 투수계수를 계산한다. 이 값이 습윤과정의 포화투수계수가 된다. 표에서 보는 바와 같이 건조과정에서의 포화투수계수는 습윤과정에서의 포화투수계수보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 11은 보은 화강암 풍화토의 모관흡수력과 불포화 투수계수의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화 투수계수는 감소하는 것으로 나타났다. 주문진 표준사의 경우 불포화 투수계수(Song, 2013)는 일정하게 유지되다가 급격하게 감소하는 경향을 보이는 반면 보은 화강암 풍화토의 경우는 상대적으로 완만하게 감소하는 경향을 나타낸다. 그리고 모관흡수력에 따른 불포화 투수계수의 감소 속도는 건조과정이 습윤과정보다 더 크게 발생됨을 알 수 있다. 한편 Fig. 12는 보은 화강암 풍화토의 유효포화도에 따른 불포화 투수계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유효포화도가 증가함에 따라 투수

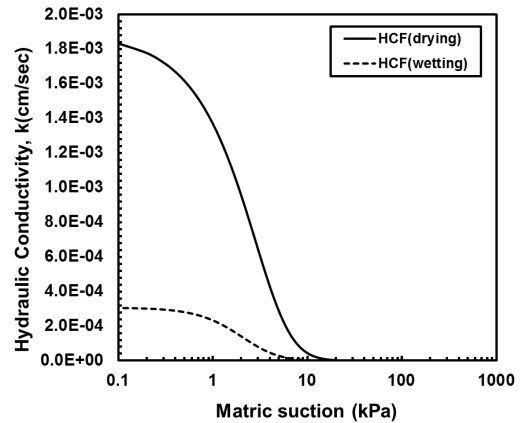


Fig. 11. Relationship between matric suction and hydraulic conductivity

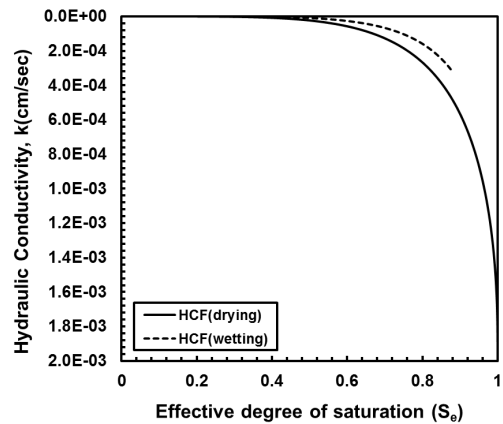


Fig. 12. Relationship between effective degree of saturation and hydraulic conductivity

계수는 증가하는 경향을 보이며, 동일한 유효포화도에서 건조과정의 투수계수가 습윤과정의 투수계수보다 더 큰 값을 갖는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 보은 화강암 풍화토에 대한 불포화 특성을 조사하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 측정결과를 토대로 van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)과 투수계수함수(HCF)곡선을 산정하였다. 그리고 Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 흡입능력특성곡선(SSCC)을 산정하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 보은 화강암 풍화토의 현장건조단위중량이 $1.34t/m^3$ 이고, 소성지수는 5.05이며, 통일분류법(USCS)의한

분류결과 입도분포가 양호한 모래(SW)로 구분할 수 있다.

- (2) 보은 화강암 풍화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정한 결과 유효포화도에 따른 모관흡수력은 비선형적인 관계를 나타내며, 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한 체적함수비 혹은 유효포화도에서 다른 모관흡수력을 나타내는 이력현상이 발생되었다.
- (3) 보은 화강암 풍화토의 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과 유효포화도가 낮은 경우 건조과정의 흡입응력은 일정하게 유지되나 습윤과정의 흡입응력은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 유효포화도가 큰 경우에는 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 크게 발생됨을 알 수 있다.
- (4) 보은 화강암 풍화토의 불포화 투수계수함수(HCF)를 산정한 결과 모관흡수력이 증가함에 따라 불포화 투수계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 모관흡수력에 따른 불포화 투수계수의 감소 속도는 건조과정이 습윤과정보다 더 크게 발생됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘실시간 모니터링 기반의 산사태 신속탐지기술 개발(Grant No. 16-3413)’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Abu-Hejleh, A.N., Znicari, D., and Illangasekare, T.H. (1993), "Permeability Determination for Unsaturated Soils", *Unsaturated soils*, GSP No.39, ASCE, Houston, S. and Wray, W. eds., pp. 163-174.
2. Bishop, A.W. (1959), "The Principle of Effective Stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
3. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), Hydraulic properties of porous media, Colorado State University(Fort Collins), Hydrology Paper, 3, March.
4. Buckingham, E. (1907), Studies on the movement of soil moisture, U.S. Department of Agriculture, Soils Bulletin 38, U.S. Government Publishing Office, Washington, DC.
5. Campbell, G.S. (1974), "A Simple Method for Determine Unsaturated Conductivity from Moisture Retention Data", *Soil Science*, Vol.117, pp.311-314.
6. Croney, D. (1952), "The Movement and Distribution of Water in Soil", *Geotechnique*, Vol.3, No.1, pp.1-16.
7. Croney, D., Coleman, J.D., and Bridge, P.M. (1952), The suction of moisture held in soils and other prous materials, Tech. Paper, Road Research Board, 24.
8. Dane, J.H. and Hruska, S. (1983), "In-situ Determination of Soil Hydraulic Properties during Leaching", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.47, No.4, pp.619-624.
9. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994), "Equations for the Soil-water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.521-532.
10. Fredlund, D.G., Morgenstern, N.R., and Widger, D.A. (1978), "The Shear Strength of Unsaturated Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
11. Gardner, R. (1937), "A Method of Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture Over a Wide Moisture Range", *Soil Science*, Vol.43, pp.227-283.
12. Gardner, W. R. (1958), "Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table", *Soil Science*, Vol.85, pp.4, pp.228-232.
13. Hassler, G.L. and Brunner, E. (1945), "Measurement of Capillary Pressures in Small Core Samples", *Petroleum Technology*, Technical Paper, pp.114-123.
14. Hilf, J.W. (1956), An investigation of pore water pressure in compacted cohesive soils, Technical Memorandum No.654, U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, CO.
15. Kassiff, G. and Ben Shalom, A. (1971), "Experimental Relationship between Swell Pressure and Suction", *Geotechnique*, Vol.21, pp. 245-255.
16. Khalili, N. and Khabbaz, M.H. (1998), "A Unique Relationship for χ for the Determination of the Shear Strength of Unsaturated Soils", *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.681-687.
17. Lu, N. and Likos, W.J. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York. 556p.
18. Lu, N. and Likos, W.J. (2006), "Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
19. Lu, N., Godt, J.W., and Wu, D.T. (2010), "A Closed-form Equation for Effective Stress in Unsaturated Soil", *Water Resources Research*, Vol.46, W05515.
20. Mualem, Y. (1976), "A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media", *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
21. Park, S.W., Shin, G.H., and Kim, B.S. (2006), "Soil-water Characteristics and Hysteretic behaviors on Unsaturated Pavement Subgrades in Test Roads", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.8, No.2, pp.95-104. (In Korean with English abstract)
22. Richards, L.A. (1928), "The Usefulness of Capillary Potential to Soil Moisture and Plant Investigators", *Journal of Agricultural Research*, Vol.37, pp.719-742.
23. Richards, L.A. (1931), "Capillary Conduction of Liquids through Porous Medium", *Jour. Physics*, Vol.1, pp.318-333.
24. Richards, L.A. (1941), "A Pressure-membrane Extraction Apparatus for Soil Solution", *Soil Science*, Vol.51, pp.377-386.
25. Song, Y.S. (2013), "Estimation on Unsaturated Hydraulic Conductivity Function of Jumoonjin Sand for Various Relative Densities", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.33, No.6, pp.2369-2379 (In Korean with English abstract).
26. Song, Y.S. and Choi, J.S. (2012), "Hysteresis of the Suction Stress in Unsaturated Weathered Mudstone Soils", *Journal of the Korean*

- Geotechnical Society*, Vol.28, No.3, pp.55-66 (In Korean with English abstract).
27. Song, Y.S., Hwang, W.K., Jung, S.J., and Kim, T.H. (2012), "A Comparative Study of Suction Stress between Sand and Silt under Unsaturated Conditions", *Engineering Geology*, Vol.124, pp.90-97.
 28. Song, Y.S., Lee, N.W., Hwang, W.K., and Kim, T.H. (2010), "Construction and Application of an Automated Apparatus for Calculating the Soil-Water Characteristics Curve", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.20, No.3, pp.281-295.
 29. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
 30. van Genuchten, M.Th. (1980), "A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
 31. Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E., and Clifton, A.W. (1996), "Model for the Prediction of Shear Strength with Respect to Soil Suction", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, No.3, pp.379-392.
 32. Welge, H.J. (1952), "A Simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive", *Transactions AIME*, Vol.195, pp.91-98.
 33. Wildenschild, D., Jensen, K.H., Hollenbeck, K.J., Illangasekare, T.H., Znicari, D., Sonnenborg, T., and Butts, M.B. (1997), "A Two-stage Procedure for Determining Unsaturated Hydraulic Characteristics using a Syringe Pump and Outflow Observations", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.61, pp.347-359.
 34. Zachman, D.W., Duchateau, P.C., and Klute, A. (1981), "The Calibration of the Richards Flow Equation for a Draining Column by Parameter Identification", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.45, pp.1012-1015.
 35. Zur, B. (1966), "Osmotic Control the Matric Soil Water Potential", *Soil Science*, Vol.102, pp.394-398.

Received : April 18th, 2016

Revised : May 25th, 2016

Accepted : June 28th, 2016