

## 불포화 이암풍화토에서의 흡입응력 이력현상

### Hysteresis of the Suction Stress in Unsaturated Weathered Mudstone Soils

송 영 석<sup>1</sup> Song, Young-Suk

최 진 수<sup>2</sup> Choi, Jin-Su

#### Abstract

To investigate the hysteresis of the suction stress in unsaturated weathered mudstone soils (CL), matric suction and volumetric water content were measured in both drying and wetting processes using Automated Soil-Water Characteristics Curve Apparatus. The drying and wetting processes in unsaturated soils were reproduced in the test; the drying process means to load matric suction to spill pore water from the soils, and the wetting process means to unload matric suction to inject pore water into the soils. Based on the measured result, Soil Water Characteristic Curve(SWCC)s were estimated by van Genuchten model (1980). SWCCs have nonlinear relationship between effective degree of saturation and matric suction. The hysteresis in SWCCs between drying and wetting processes occurred. As a result of estimating Suction Stress Characteristic Curve(SSCC) using Lu and Likos model (2006), the suction stress rapidly increased in the low level of matric suction and then increased slightly. Also, the hysteresis in SSCCs between drying and wetting processes occurred. In order to design geo-structures and check its stability considering unsaturated soil mechanics, therefore, it is more reasonable that the SSCC of drying process should be applied in the condition of rainfall infiltration and the SSCC of wetting process in the condition of evaporation or drainage.

#### 요 지

본 연구에서는 포항지역의 자연사면에서 채취된 이암풍화토(CL)의 흡입응력 이력현상을 조사하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 유출시키는 건조과정과 반대로 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 측정결과를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정한 결과 유효포화도에 따른 모관흡수력은 비선형적인 관계를 나타내며, 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한 유효포화도에서 다른 모관흡수력을 나타내는 이력현상(hysteresis)이 발생되었다. 그리고 Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과 낮은 모관흡수력에서 흡입응력은 빠르게 증가하며 이후 미소하게 증가하는 것으로 나타났으며, 동일한 모관흡수력에서는 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 크게 나타내는 이력현상이 발생되었다. 따라서 불포화토의 특성을 고려하여 설계 및 안정성 검토를 수행하는 경우 강우침투시에는 습윤과정의 흡입응력특성곡선(SSCC)을 적용하고, 건조 혹은 배수시에는 건조과정의 흡입응력특성곡선(SSCC)을 적용하는 것이 바람직하다.

**Keywords :** Hysteresis, Suction stress, Suction Stress Characteristic Curve (SSCC), Weathered mudstone soil, Unsaturated condition

1 정회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, yssong@kigam.re.kr, 교신저자)

2 비회원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 연구생 (Research Student, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

최근 들어 지반공학 분야에 있어 불포화토에 대한 관심이 증가하고 있으며, 불포화토의 강도정수 산정, 불포화지반의 해석기법 개발 등에 대한 연구가 국내외에서 활발하게 진행되고 있다. 왜냐하면 고전적인 포화토의 이론으로 실제 불포화 상태로 존재하는 지반의 거동을 합리적으로 해석 및 예측하기 어려우며, 이로 인하여 많은 문제점이 발생하였기 때문이다(Fredlund and Rahardjo, 1993; Lu and Likos, 2004).

불포화토는 건조토(dry soil)와 포화토(saturated soil)의 중간영역으로서 부분적으로 포화된 흙(partially saturated soil)으로 표현하기도 한다. 이러한 불포화토는 고전적인 포화토의 이론으로는 설명할 수 없는 다른 거동특성을 보인다. 따라서 불포화 지반의 거동을 이해하기 위해서는 흙-함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve, SWCC), 불포화 투수계수, 불포화 전단강도 등과 같은 불포화 지반정수를 정확하게 산정하는 것이 가장 중요하다. 현재까지의 불포화토에 대한 연구에서도 주로 불포화 지반정수의 산정과 이를 활용한 지반거동 해석이 주를 이루고 있다(Jennings and Burland, 1962; Fredlund and Morgenstern, 1977; Fredlund et al., 1978; Lu and Likos, 2006; Lu et al., 2007, 2009; Chae et al., 2010; Song et al., 2012).

불포화토의 특성을 규명하기 위한 가장 기본적인 요소 중의 하나가 흙-함수특성곡선(SWCC)을 산정하는 것이다. 흙-함수특성곡선은 모관흡수력과 포화도 혹은 체적함수비 사이의 관계로 정의할 수 있다. 이는 불포화토 고유의 물성을 나타내며, 비선형적인 관계를 갖는다. 그리고 모관흡수력과 포화도의 상관관계를 토대로 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 흡입응력(suction stress)을 산정할 수 있다. 따라서 정확한 흙-함수특성곡선(SWCC)에 대한 측정 및 예측 없이 불포화토의 특성을 파악하는 것은 불가능하다고 할 수 있다.

지반 내에서 물은 흙의 간극 속에서 물리-화학적 작용에 의하여 보유된다. 이와 같이 흙이 물을 보유하게 되는 것은 간극내 공기와 물의 접촉면에서 발생하는 모관력과 물분자를 흡착하는 흡입자의 반데르 발스 인력, 전기이중층 척력, 고결작용 등의 표면력 때문이다(Likos and Lu, 2004; Lu and Likos, 2006). 불포화토를 다루는 토질역학에서는 이 모관력을 모관흡수력이라고 한다. 불포화토에서 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한

체적함수비에서 모관흡수력이 다르게 나타나는 현상을 이력현상(hysteresis)이라고 한다.

본 연구에서는 이암풍화토를 대상으로 건조 및 습윤 과정에 따른 모관흡수력의 이력현상이 불포화토의 흡입응력에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다. 이를 위하여 먼저 자동 흙-함수특성곡선 시험장치(Song et al., 2012)를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흙-함수특성곡선(SWCC)을 예측한다. 이를 토대로 불포화 상태에서 이암풍화토의 포화도에 따른 모관흡수력을 비교 검토한다. 그리고 측정된 흙-함수특성곡선을 이용하여 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)을 산정한다. 따라서 건조 및 습윤과정에 따른 이암풍화토의 흙-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 토대로 불포화 상태에서 건조 및 습윤과정의 흡입응력을 비교 분석하고, 모관흡수력과 흡입응력의 관계를 고찰하고자 한다.

## 2. 불포화토의 특성곡선

### 2.1 흙-함수특성곡선(SWCC)

흙-함수특성곡선(SWCC)은 불포화토의 거동을 이해하는데 가장 중요한 관계이다. 흙-함수특성곡선(SWCC)의 정의는 함수비 혹은 포화도와 모관흡수력의 관계 또는 응력상태 변수로 규정할 수 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 함수비는 흙의 간극사이에 채워진 물의 양으로 규정되며, 응력 평형상태에서 유지되는 함수비는 간극 크기와 물로 채워진 간극부피의 함수이다. 기본적으로

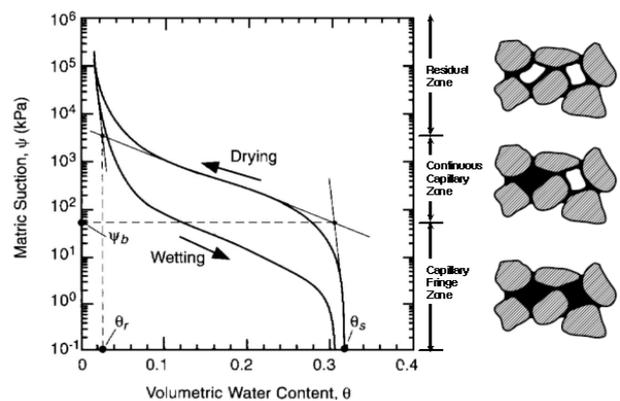


그림 1. 건조 및 습윤과정에서의 흙-함수특성곡선(SWCC) (modified the Figure from Lu and Likos, 2004)

흡-함수특성곡선(SWCC)은 가해진 흡수력상태에서 흡이 물을 저류할 수 있는 능력을 나타낸다.

대표적인 흡-함수특성곡선(SWCC)은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 함수비의 경우 체적함수비( $\theta$ ), 중량함수비( $w$ )를 사용할 수 있으며, 간극과 물로 포화된 간극의 부피비로 표현되는 포화도( $S$ )를 사용하기도 한다. 흡수력은 흡의 모관흡수력( $u_a - u_w$ ) 또는 전체 흡수력으로서 높은 흡수력 단계에서는 모관흡수력이 지배적인 것으로 가정하여 전체 흡수력은 모관흡수력에 대응하는 것으로 한다. 포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치(Air-Entry-Value(AEV),  $\Psi_i$ )를 초과하지 않으면 간극으로부터 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극 내부로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상의 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류체적함수비( $\theta_r$ )라고 하며, 흡의 간극내 보유할 수 있는 최대체적함수비를 포화체적함수비( $\theta_s$ )라고 한다.

한편 그림 1에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)은 모관흡수력의 단계에 따라 세 개의 영역으로 구분할 수 있다. 흡이 포화상태로부터 공기침투압이 발생하는 시점까지가 capillary fringe(capillary)영역이고, 공기침투가 발생된 시점부터 잔류함수비 발생 시점까지가 continuous capillary(funicular)영역, 잔류함수비 발생 이후부터가 residual(pendular)영역이다(Lu and Likos, 2004).

## 2.2 흡입응력특성곡선(SSCC)

최근 Lu and Likos(2006)는 Terzaghi(1943) 및 Bishop(1959)의 유효응력 공식을 확장하여 식 (1)와 같이 불포화토의 응력상태를 표현할 수 있는 방법을 제안하였다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + \sigma_{pc} + \sigma_{ca} + \sigma_t + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{pc}$ 는 입자상호간에 발생하는 물리화학적 응력(interparticle physicochemical stress),  $\sigma_{ca}$ 는 표면장력에 의한 모관응력(capillary stress),  $\sigma_t$ 는 흡 구조에 따른 응력(granular skeleton stress)을 의미한다. 앞에서 보는 바와 같이 Lu and Likos(2006)의 유효응력 산정공식은 입자간 물리화학적 응력, 모관응력 및 흡 구조에 따른 응력을 제외하면 Bishop(1959)의 유효응력 산정공식과 동일해지므로 기존 이론을 확대하여 해석하였다는 장

점이 있다.

식 (1)에서 불포화토의 흡입응력( $\sigma^s$ )은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서,  $F_{pc}$ 는 입자상호간에 발생하는 물리화학적 힘,  $F_{ca}$ 는 표면장력에 의한 모관력,  $F_t$ 는 흡 구조의 따른 힘을 의미한다. 입자상호간에 발생하는 물리화학적 힘은 식 (3)에서 보는 바와 같이 반데르발스의 힘( $F_{vdw}$ ), 전기이중층 반발력( $F_{edl}$ ) 및 고결작용( $F_{ce}$ )을 고려하여 산정하였다.

$$\begin{aligned} \sigma^s &= \frac{F_{pc}}{A} + \frac{F_{ca}}{A} + \frac{F_t}{A} + \chi(u_a - u_w) \\ &= \sigma_{pc} + \sigma_{ca} + \sigma_t + \chi(u_a - u_w) \end{aligned} \quad (2)$$

$$F_{pc} = F_{vdw} + F_{edl} + F_{ce} \quad (3)$$

이와 같이 불포화토 내부에서 일어나는 다양한 현상을 고려하여 불포화토의 유효응력을 산정하였으므로 비교적 정확한 흡입응력을 구할 수 있다. 흡입응력은 모관흡수력 또는 포화도와 밀접한 관계를 가지기 때문에 불포화토의 응력상태를 평가할 수 있는 지표로 사용될 수 있다. 식 (1)에서 나타난 불포화토의 유효응력 공식을 흡입응력에 관한 항으로 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다(Lu and Likos, 2006).

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - \sigma^s = (\sigma - u_a) + (u_a - u_w)S_e \quad (4)$$

여기서,  $S_e$ 는 유효포화도를 나타낸다.

식 (4)에서 보는 바와 같이 유효응력은 외부의 다른 응력에 영향을 받지 않고 오로지 흡입응력에 영향을 받는다고 판단할 수 있다. 따라서 흡입응력은 불포화토의 강도를 결정하는데 중요한 요소임을 알 수 있다. 한편, 흡입응력은 모관흡수력 혹은 유효포화도와 특정한 상관관계를 갖게 되며, 이를 흡입응력특성곡선(SSCC)이라고 한다(Lu and Likos, 2006; Lu et al., 2010). 그림 2는 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 흡입응력은 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있으므로 흡-함수특성곡선(SWCC)에서의 면적(회색 음영 부분)을 의미한다. 흡입응력특성곡선(SSCC)은 불포화토의 응력상태를 평가하는 중요한 지표로 사용할 수 있으며, 함수량에 따른 지반의 강도를 예측 및 평가할 수 있다.

그림 3은 흡 종류에 따른 전형적인 흡입응력특성곡선(SSCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 모래의 경우 낮은 모관흡수력에서 흡입응력의 크기가 급

격히 증가하였다가 급격히 감소하는 경향을 보이며, 실트의 경우 낮은 모관흡수력에서 급격히 증가하였다가 일정한 흡입응력의 크기로 서서히 감소함을 알 수 있다. 반면에 점토의 경우는 낮은 모관흡수력에서 흡입응력이 급격히 증가하고 일정한 흡입응력의 크기로 계속적으로 서서히 증가함을 알 수 있다.

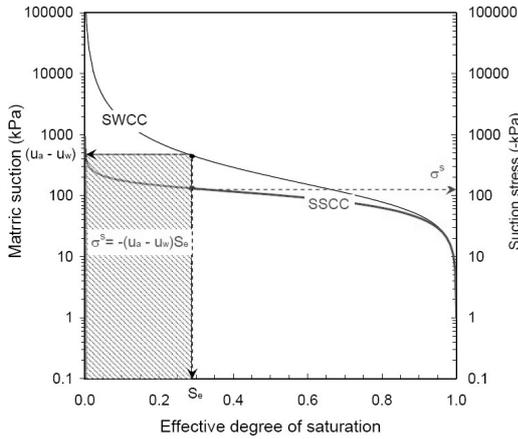


그림 2. 흡입응력특성곡선(SSCC)(Lu et al., 2010)

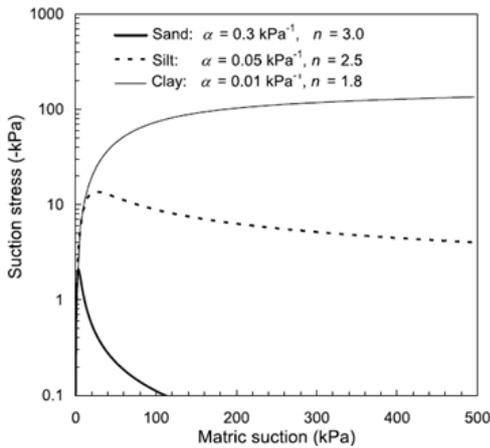


그림 3. 흙 종류에 따른 흡입응력특성곡선(SSCC)(Lu et al., 2010)

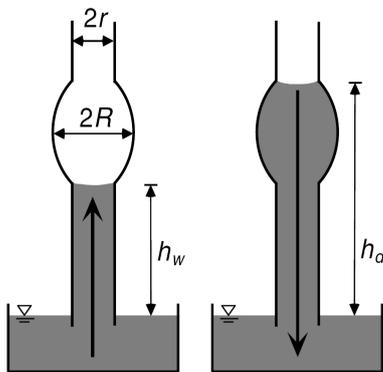
### 2.3 이력현상(Hysteresis)

불포화토에서 이력현상은 건조 및 습윤과정에서 흡수특성곡선(SWCC)의 차이에 의해 볼 수 있다. 증발 혹은 중력배수가 일어나는 건조과정에서의 흡수 침투 혹은 모세관 상승이 일어나는 습윤과정에서의 흡수 보다 같은 크기의 모관흡수력에 대하여 일반적으로 더 많은 양의 물을 함유하려는 경향이 있다.

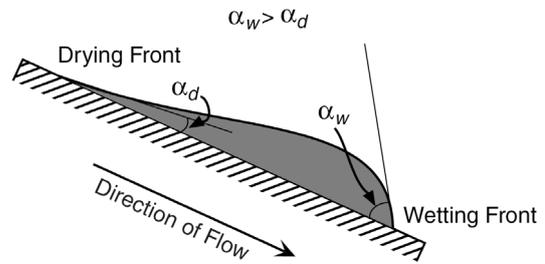
이러한 이력현상은 잉크병 효과(Ink-bottle effect), 모세관 응축(Capillary condensation), 갇힌 공기(Entrapped air), 팽창 및 수축(Swelling and Shrinkage), 접촉각 이력현상(Contact angle hysteresis)을 들 수 있다. 이 가운데 이력현상의 주요원인으로는 잉크병 효과, 접촉각 이력현상, 갇힌 공기영향 등을 들 수 있다(Lu and Likos, 2004; Likos and Lu, 2004).

잉크병 효과는 흙 내부 공극의 크기, 형상 및 분포가 비균질하기 때문에 발생된다. 잉크병 효과는 그림 4(a)와 같이 다른 모세관 반경을 고려하여 설명할 수 있다. 불포화토 내부에서 큰 모세관 반경을  $R$ , 작은 모세관 반경을  $r$ 로 가정하면, 습윤과정의 경우 모세관 흐름이 상향으로 발생되며, 모관상승고는  $h_w$ 가 된다. 이때 모관상승고는 큰 모세관 반경에 의해  $h_w$  이상으로 상승하지 못한다. 그러나 건조과정의 경우 먼저 모세관이 포화되어 있다고 하면 모세관 흐름은 하향으로 발생되며 모관상승고는  $h_d$ 가 된다. 이때 모관상승고는 작은 모세관 반경에 의해  $h_d$  이하로 하강하지 못한다. 즉, 물을 흡수하는 습윤과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이고, 물을 배수하는 건조과정에서는 작은 간극의 영향이 크게 작용한다.

그림 4(b)는 경사면 위에서의 물방울이 중력에 의해



(a) 잉크병 효과



(b) 접촉각 이력현상

그림 4. 이력현상의 주요 원인(Lu and Likos, 2004)

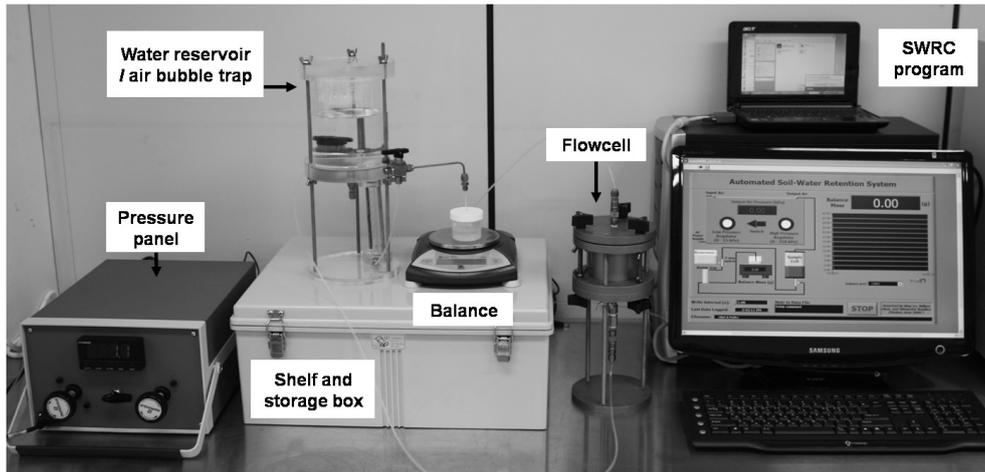


그림 5. 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치(Song et al., 2012)

정상상태에 도달하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 고체-액체-기체 접촉면에서 습윤시 접촉각은 건조시 접촉각보다 실질적으로 상당히 크다. 중력의 영향으로 물방울의 형상은 정상상태에 도달하게 되며 이때 진행방향(wetting front)에서는 상대적으로 큰 접촉각  $\alpha_w$ 을 나타내고, 진행반대방향(drying front)에서는 훨씬 더 작은 접촉각  $\alpha_d$ 를 나타낸다. 습윤 및 건조과정에서 이러한 접촉각의 차이는 불포화도의 이력현상을 유발하게 된다. 모관 상승 및 수평 침투 시험에 근거한 많은 실험적 연구에서는 모래에서의 습윤 접촉각은  $60^\circ \sim 80^\circ$ 의 범위(Letey et al., 1962; Kumar and Malik, 1990)로 나타나며 건조 접촉각은  $0^\circ \sim 20^\circ$  또는  $30^\circ$ 의 범위(Laroussi and DeBacker, 1979)로 나타난다는 것을 보여주었다.

한편, 습윤과정을 거치는 동안 흡입자 사이의 간극이 밀폐되어 간극 내 공기가 갇히게 되며, 갇힌 공기의 영향으로 인하여 건조과정 및 습윤과정에서의 포화체적 함수비( $\theta_s$ )가 다르게 나타난다.

### 3. 시험방법 및 재료

#### 3.1 시험장치 및 방법

본 연구에서는 이암풍화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 활용하였다. 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화도의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

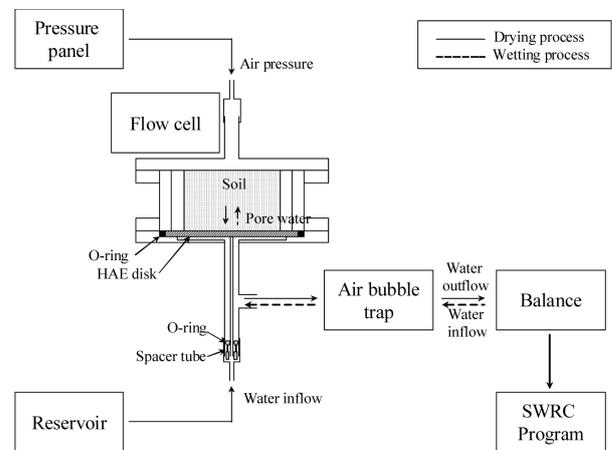


그림 6. 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치 계통도(Song et al., 2012)

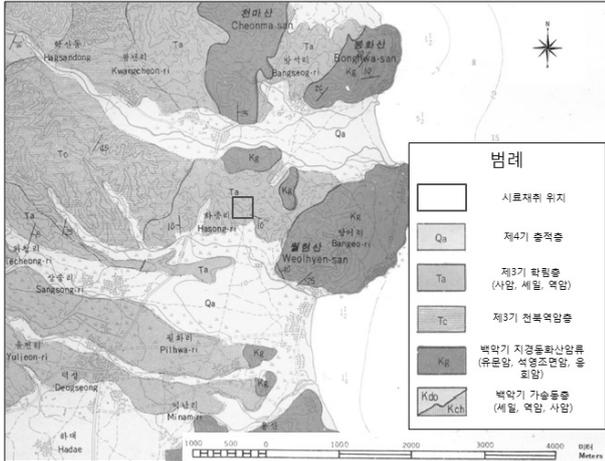
그림 5는 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 공기의 압력은 0-300kPa범위까지 적용할 수 있으며, 축변환기법(Hilf, 1956)을 도입하였다.

그림 6은 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 빠져나오기 시

작한다. 본 실험에서는 3 bar의 공기압까지 제어할 수 있는 HAE 디스크를 이용하였다.

### 3.2 시험재료

본 연구에서는 이암풍화토를 이용하여 흙-함수특성곡



(a) 연구지역 지질도



(b) 시료채취위치 전경

그림 7. 시료채취위치 및 지질도

선(SWCC) 측정시험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 이암풍화토는 포항시 북구 송라면 하송리 일대 자연사면에서 채취하였다. 그림 7은 시료채취 위치와 지질조건을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료채취지역의 지질은 제3기 퇴적암류이고 모암은 이암(mudstone)으로 구성되어 있다. 대상지역의 시료는 지표면으로부터 약 50cm하부의 토층에서 채취한 것이며, 현장건조단위중량은 1.187t/m<sup>3</sup>으로 측정되었다.

그림 8은 채취된 이암풍화토의 입도분포곡선을 나타낸 것이며, 표 1은 이암풍화토에 대한 기본적인 물리적 특성을 측정된 결과이다. 표에서 보는 바와 같이 이암풍화토의 비중은 2.435, 액성한계 35.2% 및 소성지수 11.2%로 나타났다. 그리고 통일분류법(USCS)에 근거하여 흙을 분류한 결과 점토(CL)에 해당하는 것으로 나타났다.

### 3.3 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. 그림 9(a)는 플라

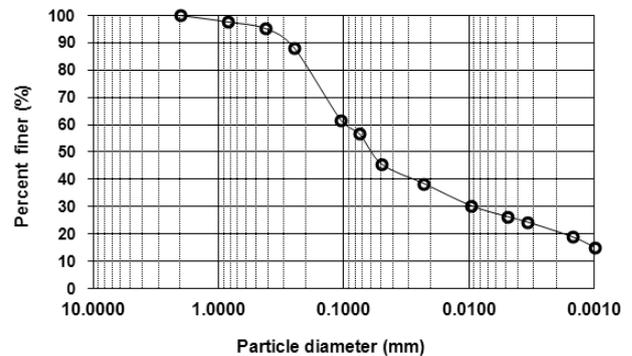
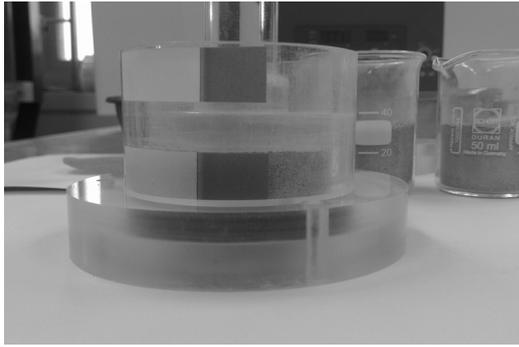


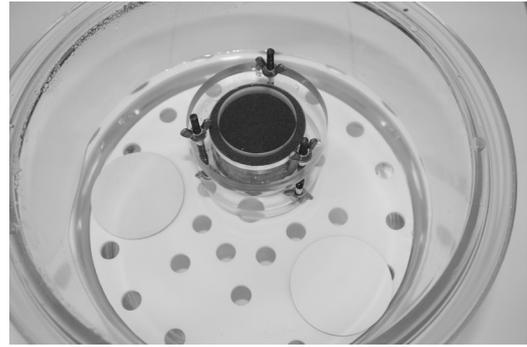
그림 8. 이암풍화토의 입도분포곡선

표 1. 이암풍화토의 물리적 특성

구분	기호 및 단위		측정값
비중	$G_s$		2.435
최대간극비	$e_{max}$		1.963
최소간극비	$e_{min}$		0.651
최대건조단위중량	$\gamma_{dmax}$	(t/m <sup>3</sup> )	1.475
최소건조단위중량	$\gamma_{dmin}$	(t/m <sup>3</sup> )	0.822
액성한계	LL	(%)	35.21
소성한계	PL	(%)	24.01
소성지수	PI	(%)	11.20
통일분류법	-		CL



(a) 3층 다짐 성형



(b) 시료포화

그림 9. 시료성형 및 포화

스틱 몰드에 시료를 성형하는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 플라스틱 봉으로 시료를 다져 현장에서와 같이 건조단위중량과 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 정해진 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. 시료를 포화시키기 위하여 진공상태의 데시케이터 내부에 약 24시간 두었다. 그림 9(b)는 데시케이터 내부에 성형된 시료를 위치하는 모습이다.

#### 4. 시험결과 및 분석

##### 4.1 모관흡수력과 간극수량 측정결과

그림 10은 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

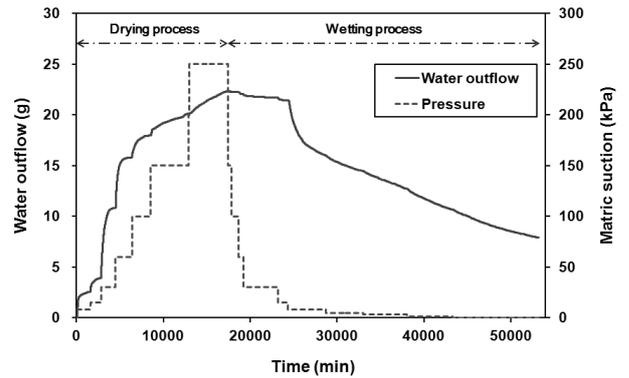


그림 10. 모관흡수력에 따른 간극수량의 측정결과

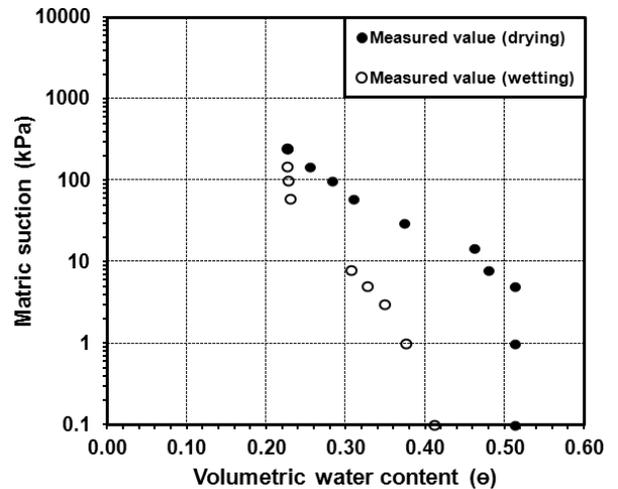


그림 11. 모관흡수력과 체적함수비의 관계

습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다. 이것은 건조과정에서 간극에 갇힌 독립된 공기에 의한 흐름의 저항에 의한 것으로 판단된다.

그림 11은 측정결과를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비의 상관관계를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시료내 체적함수비가 감소함에 따라 모관흡수

력이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 동일한 체적함수비에서 건조과정의 모관흡수력은 습윤과정의 모관흡수력보다 더 큰 것으로 나타났다.

#### 4.2 흡-함수특성곡선(SWCC) 예측방법 및 결과

측정된 모관흡수력과 잔류수량을 토대로 van Genuchten (1980) 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. van Genuchten(1980)은 Mualem(1976)의 제안식을 토대로 유효포화도( $S_e$ )와 압력수두( $h$ )의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 식 (5)는 van Genuchten(1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)^n]} \right]^m \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 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  $\alpha$ ,  $n$  및  $m$ 을 산정하였다. 최소제곱법의 신뢰도를 나타내는 결정계수(coefficient of determination,  $R^2$ )는 건조과정의

경우 0.996, 습윤과정의 경우 0.984로 매우 높게 나타났다. 표 2는 건조 및 습윤과정에 대한 이암풍화토의 불포화 관련계수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수  $\alpha$ 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 (5)를 이용하여 이암풍화토의 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

그림 12는 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( $\theta_r^d$ )와 습윤과정에서의 수분함입치(Water Entry Value, WEV)와 잔류체적함수비( $\theta_r^w$ )를 구하기 위하여 그림 12의 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC) 상에서 Lu and Likos(2004)에 의해 소개된 도해적인 방법(그림 1 참조)을 활용하였다. 건조과정에서 공기함입치(AEV)는 8kPa이며, 포화체적함수비( $\theta_s^d$ )는 0.513, 잔류체적함수비( $\theta_r^d$ )는 0.199이며, 습윤과정에서 수분함입치(WEV)는 1kPa이며, 포화체적함수비( $\theta_s^w$ )는 0.411, 잔류체적함수비( $\theta_r^w$ )는 0.199

표 2. 건조 및 습윤과정에서의 불포화 관련계수

구분	$\alpha$ (kPa <sup>-1</sup> )	$n$	$m$	$R^2$
건조과정	0.050	1.873	0.466	0.996
습윤과정	0.512	1.506	0.366	0.984

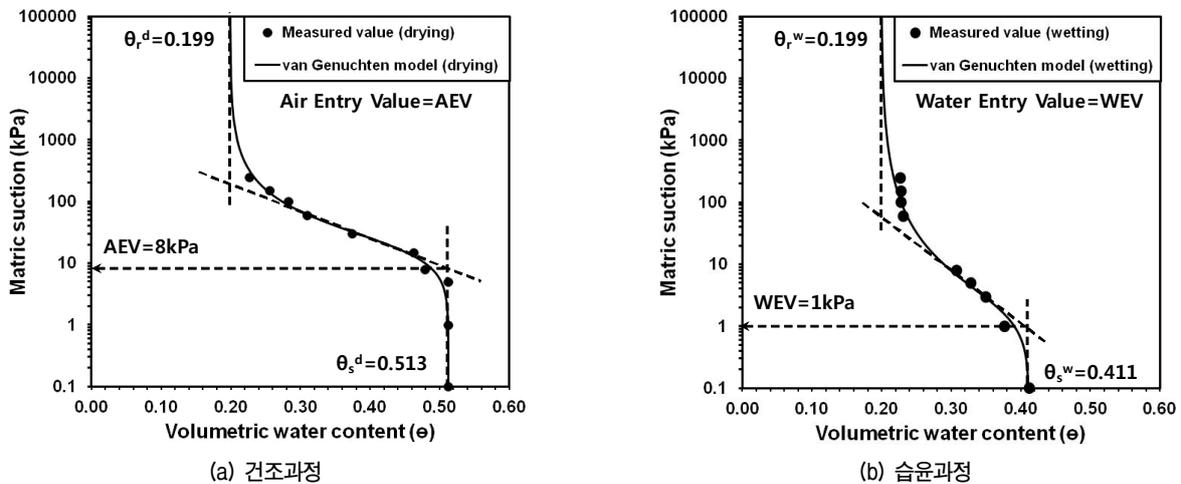


그림 12. 잔류체적함수비와 공기 및 수분함입치 산정

수비( $\theta_r^w$ )는 0.199로 산정할 수 있다.

그림 13은 이암풍화토의 건조 및 습윤과정에 따른 측정결과와 van Genuchten(1980) 방법으로 예측한 흡-함수특성곡선(SWCC)을 함께 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 동일한 모관흡수력에서 건조과정의 체적함수비가 습윤과정의 체적함수비 혹은 유효포화도 보다 더 크게 나타났다. 특히, 건조과정 이후 습윤과정을 거치는 동안 흡입자 사이의 간극이 밀폐되어 간극 내 공기가 갇히게 되며, 갇힌 공기의 영향으로 인하여 건조과정의 포화체적함수비( $\theta_s^d$ )와 습윤과정의 포화체적함수비( $\theta_s^w$ )가 다르게 나타난다.

### 4.3 흡입응력특성곡선(SSCC) 예측방법 및 결과

본 연구에서는 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하기 위

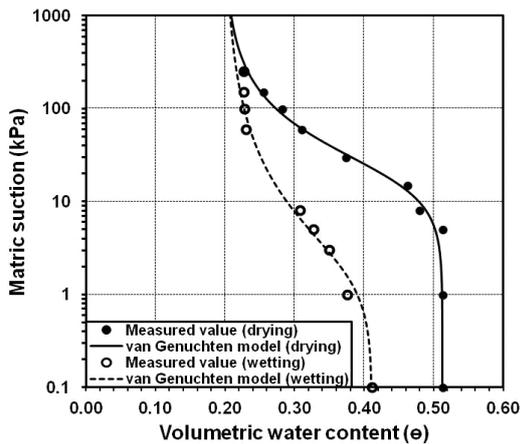
한 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡입응력특성곡선(SSCC)의 상관식을 유도하였다. van Genuchten(1980)은 유효포화도와 모관흡수력의 관계를 식 (5)와 같이 제안하였으며, 이를 Lu and Likos(2006)에 의해 제안된 식 (4)에 대입하여 정리하면 식 (6) 혹은 식 (7)과 같이 유효포화도 혹은 유효체적함수비에 따른 흡입응력 산정식을 구할 수 있다.

$$\sigma^s = -\frac{S_e}{\alpha} \left( S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}} \quad 0 \leq S_e \leq 1.0 \quad (6)$$

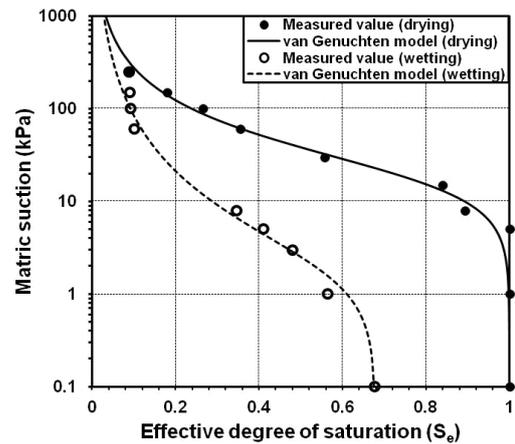
$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (7a)$$

$$\sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w > 0 \quad (7b)$$

그림 14는 이암풍화토에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)으로부터 측정된 불포화도

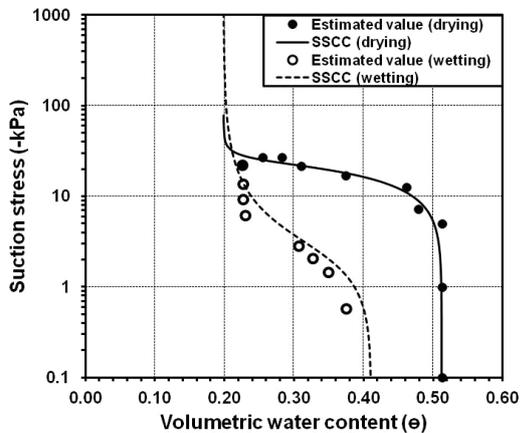


(a) 모관흡수력과 체적함수비의 관계

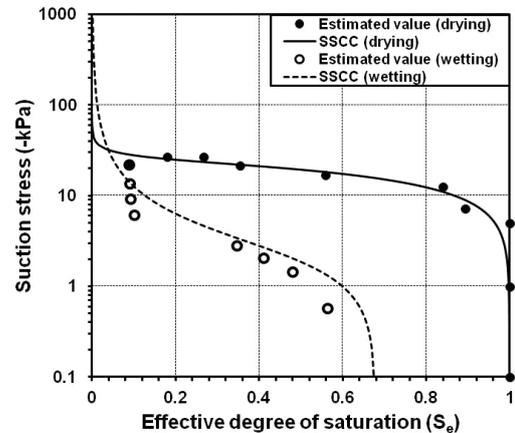


(b) 모관흡수력과 유효포화도의 관계

그림 13. 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC) 비교



(a) 체적함수비와 흡입응력의 관계



(b) 유효포화도와 흡입응력의 관계

그림 14. 건조 및 습윤과정에서의 흡입응력특성곡선(SSCC) 비교

관련계수( $\alpha, n$ )와 식 (6) 및 식 (7)을 이용하여 체적함수비 혹은 유효포화도에 따른 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정과 습윤과정의 모관흡수력에 따른 흡입응력의 거동은 비슷하지만 크기는 다르게 나타났다. 동일한 유효포화도에서 건조과정의 흡입응력은 습윤과정의 흡입응력보다 크게 나타나며, 흡-함수특성곡선(SWCC)과 유사한 S자형 곡선을 나타내고 있다.

그림 15는 모관흡수력과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 상관관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 낮은 모관흡수력에서 흡입응력은 빠르게 증가하며 이후 미소하게 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 모관흡수력에서는 건조과정의 흡입응력이 습윤과정의 흡입응력보다 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 낮은 모관흡수력에서 흡입응력이 빠르게 증가하고 높은 모관흡수

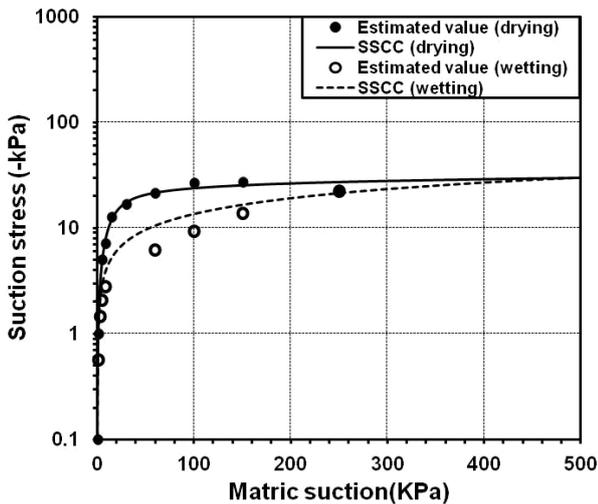


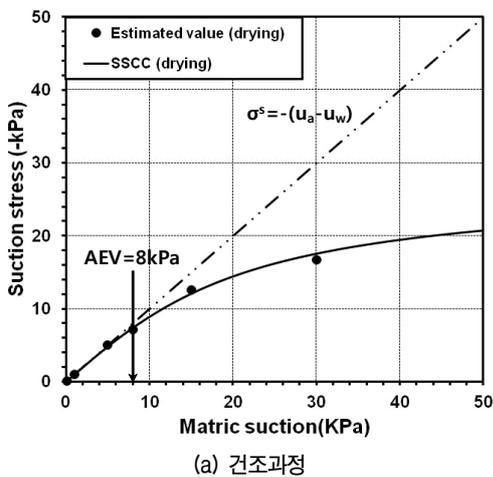
그림 15. 모관흡수력과 흡입응력의 관계

수력에서 흡입응력이 일정한 수준에 도달하는 세립토의 전형적인 흡입응력특성곡선(SSCC)과 동일함을 알 수 있다(Lu et al, 2010).

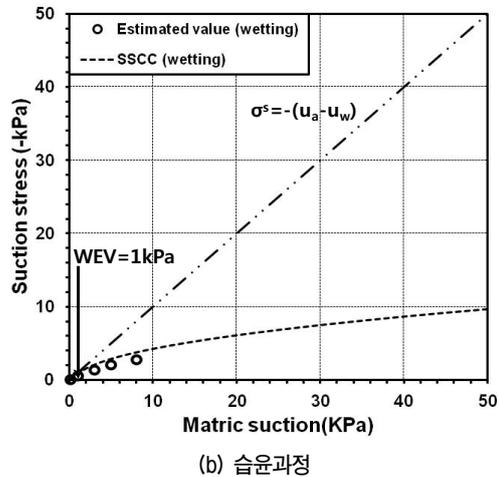
그림 16은 이암풍화토에서 건조 및 습윤과정의 모관흡수력에 따른 흡입응력과 포화시 흡입응력상태( $\sigma^s = -(u_a - u_w)$ )를 함께 도시한 것이다. 건조과정의 경우 모관흡수력이 공기함입치(AEV)이내로 작용할 경우 흡입응력은 포화시 흡입응력상태를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 모관흡수력이 공기함입치(AEV)이상으로 작용할 경우 흡입응력은 포화시 흡입응력상태보다 작은 값을 갖는다. 습윤과정의 경우에도 흡입응력은 수분함입치(WEV)를 기준으로 건조과정의 경우와 동일한 거동을 보인다. 그리고 습윤과정의 흡입응력은 건조과정의 흡입응력보다 완만하게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 불포화토의 유효응력은 공기함입치(AEV) 혹은 수분함입치(WEV) 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화토의 유효응력과 다른 값을 갖게 된다.

#### 4.4 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 비교

그림 17은 이암풍화토의 건조 및 습윤과정에서 측정된 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)은 유사한 형태를 보이고 있다. 그러나 곡선의 기울기는 흡-함수특성곡선(SWCC)이 흡입응력특성곡선(SSCC)보다 더 작은 것으로 나타났다. 동일한 체적함수비에서 모관흡수력은 흡입응력보다 큰 값을 갖는 것으로 나타났다. 모관흡수



(a) 건조과정



(b) 습윤과정

그림 16. 포화시 흡입응력상태와의 비교

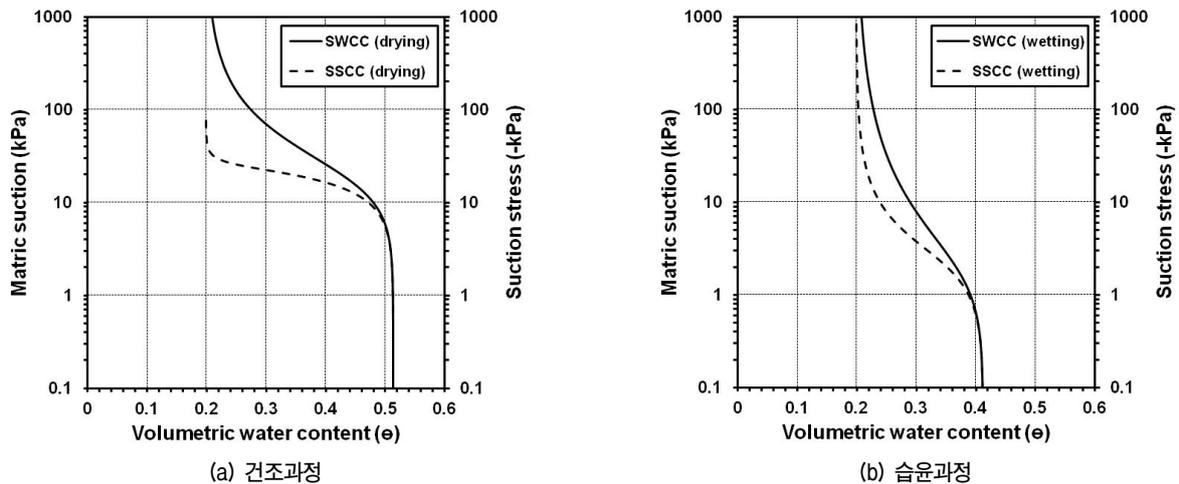


그림 17. 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 비교

력과 흡입응력은 건조과정의 경우 공기함입치(AEV)인 8kPa 이하에서, 습윤과정의 경우 수분함입치(WEV)인 1kPa 이하에서 동일한 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 공기함입치(AEV) 혹은 수분함입치(WEV) 이상에서 모관흡수력과 흡입응력의 차이는 건조과정에서의 경우가 습윤과정에서의 경우보다 상대적으로 더 크게 나타나고 있다. 즉 포화에 가까울수록 모관흡수력과 흡입응력의 차이는 감소하며 포화에서 건조로 갈수록 모관흡수력과 흡입응력의 차이는 증가함을 알 수 있다.

이암풍화토 지반의 경우 지반 내 물이 유입되면서 습윤과정에서의 흡입응력은 지속적으로 감소하므로 유효응력도 지속적으로 감소하게 됨을 알 수 있다. 따라서 이암풍화토로 구성된 자연사면의 경우 흡입응력의 영향으로 강우시 급격한 사면붕괴보다는 지반내 물이 유입되면서 유효응력이 지속적으로 감소되는 진행성 사면붕괴를 유발하게 될 것으로 예상된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 포항지역의 자연사면에서 채취된 이암풍화토의 불포화 특성과 흡입응력의 이력현상을 조사하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 즉 시료에 모관흡수력을 재하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 측정결과를 토대로 van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하고,

Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 포항지역의 자연사면에서 채취된 이암풍화토는 현장건조단위중량이 1.187t/m<sup>3</sup>이고, 소성지수는 11.2%이며, 통일분류법(USCS)의한 분류결과 점토(CL)에 해당한다.
- (2) 자동 흡-함수특성곡선(SWCC) 측정장치를 이용하여 불포화토의 건조 및 습윤과정을 재현하였으며, 건조과정에서의 간극내 갇힌 공기의 흐름 저항으로 인하여 습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 길게 나타났다.
- (3) van Genuchten(1980)의 방법을 이용하여 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.
- (4) Lu and Likos(2006)의 방법을 이용하여 흡입응력특성곡선(SSCC)을 산정한 결과 낮은 모관흡수력에서 흡입응력은 빠르게 증가하며 이후 미소하게 증가하는 것으로 나타났으며, 건조 및 습윤과정을 거치는 동안 동일한 체적함수비 혹은 유효포화도에서 다른 흡입응력을 나타내는 이력현상이 발생되었다.
- (5) 불포화토의 특성을 고려하여 설계 및 안정성 검토를 수행하는 경우 강우시에는 습윤과정의 흡입응력 특성곡선(SSCC)을 적용하고, 건조 혹은 배수시에는

건조과정의 흡입응력특성곡선(SSCC)을 적용하는 것이 바람직하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 ‘광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. Bishop, A.W. (1959), "The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Vol.106, No.39, pp.859-863.
2. Chae, J.G., Kim, B.S., Park, S.W. and Kato, S. (2010), "Effect of suction on unconfined compressive strength in partly saturated soils", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.14, No.3, pp. 281-290.
3. Fredlund, D.G. and Morgenstern, N.R. (1977), "Stress Variables for Unsaturated Soils", *Jour. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, Vol.103, pp.447-466.
4. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc., New York.
5. 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.
6. 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.
7. Jennings, J.E.B. and Burland, J.B. (1962), "Limitation to the use of effective stresses in unsaturated soils", *Geotechnique*, Vol.12, pp.125-144.
8. Latey, J., Osborn, J. and Pelishek, R.E. (1962), "Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand", *Soil Science*, Vol.93, pp.149-153.
9. Kumar, S. and Malik, R.S. (1990), "Verification of quick capillary rise approach for determining pore geometrical characteristics in soils of varying texture", *Soil Science*, Vol.150, No.6, pp.883-888.
10. Laroussi, C.H. and DeBacker, L.W. (1979), "Relation between geometrical properties of glass bead media and their main  $\psi(\theta)$  hysteresis loops", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.43, pp.646-650.
11. Likos, W.J. and Lu, N. (2004), "Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.130, No.6, pp.646-655.
12. Lu, N. and Likos, W.J. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
13. Lu, N. and Likos, W.J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.
14. Lu, N., Godt, J.W. and D.T. Wu (2010), "A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil", *Water Resources Research*, Vol.46, W05515.
15. Lu, N., Kim, T.-H. Sture, S. and Likos, W.J. (2009), "Tensile strength of unsaturated sand", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.135, No.12, pp.1410-1419.
16. Lu, N., Wu, B. and Tan, C.P. (2007), "Tensile strength characteristics of unsaturated soils", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.2, pp.144-154.
17. 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.
18. 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.
19. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York.
20. van Genuchten, M.T. (1980), "A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.

(접수일자 2012. 2. 1, 심사완료일 2012. 3. 13)