불포화 모래의 흡입응력 이력현상에 대한 실험적 연구

송영석^{1*} · 최진수^{1,2} · 김교원²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²경북대학교 자연과학대학 지질학과

Experimental Study on the Hysteresis of Suction Stress in Unsaturated Sand

Young-Suk Song^{*1}, Jin-Su Choi^{1,2}, and Gyo-Won Kim²

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Geology, Kyungpook National University

자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 상대밀도 60%인 주문진표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 습윤과정이 건조과정에 비해 상대적으로 많은 시간이 소요되며, 이것은 건조과정에서 간극에 갇힌 독립된 공기에 의한 흐름 저항에 의한 것으로 판단된다. 측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 불포화 관련계수는 건조과정의 경우 α 는 0.399, n 은 8.586, m 은 0.884이며, 습윤과정의 경우 α 는 0.548, n 은 5.625, m 은 0.822로 산정되었다. 그리고 건조과정과 포화과정에서의 흡-함수특성곡선(SSCC)이 일치하지 않는 이력현상이 발생되었다. 불포화 관련계수를 이용하여 유효포화도와 흡입응력의 상관관계인 흡입응력특성곡선(SSCC)을 예측하였다. 흡입응력은 모관흡수력이 공기함입치 이상으로 작용할 경우 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 불포화도의 유효응력은 공기함입치 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화도의 유효응력과 다른 값을 갖게 된다. 그리고 불포화상태에서의 동일한 유효포화도에서는 건조과정의 흡입응력이 더 크게 발생된다. 즉 흡입응력특성곡선(SSCC)에서도 건조과정과 포화과정이 일치하지 않는 이력현상이 발생되었다. 이는 흡-함수특성곡선(SWCC)의 이력현상에 기인하는 것으로 판단되며, 잉크병 효과와 접촉각 이력현상에 의해 발생하는 것으로 예상할 수 있다. 따라서 모래로 구성된 사면의 경우 지반 내 물이 유입되면서 흡입응력의 영향으로 사면 안정성에 유리하게 작용하다가 일정 흡입응력 이상이 되면 사면안정성에 불리하게 작용됨을 알 수 있다. 또한 실제 지반내 강우가 침투하는 과정은 습윤과정과 동일하므로 건조과정의 결과보다는 습윤과정의 결과를 활용하는 것이 바람직하다.

주요어 : 흡입응력, 모관흡수력, 흡-함수특성곡선, 흡입응력특성곡선, 주문진표준사

The matric suction and volumetric water content of Jumunjin standard sand with a relative density of 60% were measured using an Automated Soil-Water Characteristic Curve (SWCC) apparatus during both drying and wetting processes. The test time for the drying process was longer than that for the wetting process, because the flow of water is likely to be protected by air trapped in voids within the soils during the drying process. Based on the matric suction and volumetric water content, the SWCC was estimated using the model proposed by van Genuchten (1980). For the drying process, the unsaturated fitting parameters α , n , and m were 0.399, 8.586, and 0.884, respectively; for the wetting process, the values were 0.548, 5.625, and 0.822, respectively. The hysteresis phenomenon occurred in the SWCCs, which means the SWCC of the drying process is not matched with the SWCC of the wetting process. Using these unsaturated parameters, we estimated the Suction Stress Characteristic Curve (SSCC), based on the relationship between suction stress and the effective degree of saturation. The suction stress showed a rapid decrease when the matric suction exceeds the Air Entry Value (AEV). Therefore, the effective stress of unsaturated soils is different from that of saturated soils when the matric suction exceeds the AEV. The suction stress of the drying process exceeds that of the wetting process for a given effective degree of saturation. The hysteresis phenomenon was also recognized in SSCCs. The hysteresis phenomenon of SSCCs arises from that of SWCCs, which is induced by the ink bottle effect and the contact angle effect. In the case of a sandy slope, the suction stress is positive and acts to enhance the slope stability as the water infiltrates the ground, but is negative when the suction stress exceeds the AEV. The results obtained for the wetting process should be applied in analyses of slope stability, because the process of water infiltration into ground is similar to the wetting process.

Key words : suction stress, matric suction, Soil Water Characteristics Curve (SWCC), Suction Stress Characteristics Curve (SSCC), Jumunjin standard sand

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

서 론

일반적으로 흙은 지하수위 위치, 강우 침투 등에 따라 포화토, 불포화토 및 건조토로 구분할 수 있으나, 현재까지 주로 포화토 및 건조토 만을 대상으로 한 지반 구조물의 설계가 진행되어 왔다. 그 이유는 지반구조물 설계시 자연지반을 포화상태로 간주하면 비교적 안정해석이 간단할 뿐만 아니라 안전측 설계가 이루어지기 때문이다. 그러나 고전적인 포화토의 개념과 원리로는 실제 지반에서 발생하는 현상과 거동을 합리적으로 해석 및 예측하기 어렵기 때문에 많은 문제점이 발생하였다(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(SSCC), 불포화 투수계수, 불포화 전단강도 등과 같은 불포화 지반정수를 정확하게 산정하는 것이 가장 중요하다.

불포화토에 관한 연구는 1900년 초부터 모관흡수력(matric suction) 개념의 도입으로부터 시작되었다(Edlefson and Anderson, 1943; Childs and Collis-George, 1950; Narasimhan, 2005). 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(Lu and Likos, 2006). 불포화토를 다루는 토질역학에서는 이 모관력을 모관흡수력(matric suction)이라고 한다.

불포화토의 거동을 이해하는데 가장 중요한 요소는 흙-함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)이다. 흙-함수특성곡선(SWCC)의 정의는 함수비 혹은 포화도와 모관흡수력의 관계 또는 응력상태 변수로 규정할 수 있다(Fredlund and Rahardjo, 1993).

불포화토의 흙-함수특성곡선(SWCC) 상에서 건조과정(drying process)과 습윤과정(wetting process)을 거치는 동안 동일한 체적함수비에서 모관흡수력이 다르게 나타나는 이력현상(hysteresis)이 발생한다. 흙의 이력현상을 고려함으로써 불포화토에 관한 흐름 혹은 변형 등의 공학적인 특성을 이해하는 기초가 될 수 있다. 흙의 이력현상에 대한 광범위한 원인에 대해서는 정확히 알려진

바가 없으나 이론적이고 실험적인 방법을 통하여 관찰되어 왔다(Likos and Lu, 2004; 박성완 등, 2006; 송영석과 최진수, 2012).

본 연구에서는 모래(주문진 표준사)를 대상으로 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력의 이력현상이 불포화토의 흡입응력에 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 한다. 이를 위하여 먼저 자동 흙-함수특성곡선 시험장치(Song et al., 2012; Wayllace and Lu, 2012)를 이용하여 건조 및 습윤과정에 따른 모관흡수력과 체적함수비를 측정한다. 측정된 모관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흙-함수특성곡선(SWCC)을 예측하고, 불포화 상태에서 모래의 포화도에 따른 모관흡수력을 비교 검토한다. 그리고 측정된 흙-함수특성곡선(SWCC)을 이용하여 흡입응력특성곡선(Suction Stress Characteristics Curve, SSCC)을 산정한다. 건조 및 습윤과정에 따른 모래의 흙-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 토대로 불포화 상태에서 건조 및 습윤과정에서의 흡입응력을 비교 분석하고, 모관흡수력과 흡입응력의 관계를 고찰하고자 한다.

불포화토의 흡입응력

Bishop (1954, 1959)은 식 (1)과 같이 불포화토의 유효응력을 제안한 바 있다. 그리고 Bishop (1954)은 식 (2)에서 보는 바와 같이 유효응력계수 χ 를 포화도 S 로 제안하였다.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (1)$$

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + S(u_a - u_w) \quad (2)$$

여기서, χ 는 유효응력계수, S 는 포화도, u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, $(u_a - u_w)$ 는 모관흡수력이다.

Lu and Likos (2006)는 흡입응력항(σ^s)을 적용하여 불포화토의 유효응력을 식 (3)과 같이 Terzaghi (1943)의 유효응력과 유사한 형태로 제안하였다.

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

여기서 σ^s 는 흡입응력이다.

그러나 Lu and Likos (2006)는 불포화토의 흡입응력을 식 (4)와 같이 제안하였다. 식 (5)는 식 (3)에 식 (4)를 대입함으로써 Bishop (1959)과 Terzaghi (1943)의 유효응력 공식을 확장하여 나타낸 것이다. 식 (5)에 제시된 불포화토의 유효응력 공식은 Bishop (1959)에 의한 불

포화도의 유효응력 공식과 서로 상이함을 알 수 있다.

이 식은 유효응력에 대한 포화도의 영향을 나타낼 수 있으며, 모든 포화조건에 따른 유효응력을 제시할 수 있다. 그리고 포화도일 경우 Terzaghi (1943)의 유효응력 공식과 동일하게 된다.

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

$$\begin{aligned} \sigma' &= (\sigma - u_a) - [-S_e(u_a - u_w)] \\ &= (\sigma - u_a) - \left[-\frac{S - S_r}{1 - S_r}(u_a - u_w) \right] = (\sigma - u_a) - \sigma^s \quad (5) \end{aligned}$$

여기서 S_e 는 유효포화도, S_r 은 잔류포화도이다.

식 (5)는 체적함수비 혹은 유효포화도와 모관흡수력 사이의 상관관계를 적용하여 추가적으로 확장시킬 수 있다. 만약 van Genuchten (1980)의 흡-함수특성곡선 (SWCC)을 활용하면, 유효포화도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_e = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^m = \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^{1-1/n} \quad (6)$$

여기서, α , n 및 m 은 불포화 계수로서, α 는 공기함입치와 관련된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관련된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관련된 계수이다. 또한 $m = 1 - 1/n$ 로 나타낼 수 있다. 불포화 계수는 불포화도의 고유한 특성을 나타내는 값으로서 흡의 종류에 따라 다른 범위를 갖는다(Lu et al., 2010).

식 (4)에 식 (6)을 대입하고 모관흡수력의 항을 제외하면 식 (7)과 같이 전체포화범위에 대한 흡입응력을 산정할 수 있는 공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^s = -\frac{S_e \left(S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right)^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \quad 0 \leq S_e \leq 1 \quad (7)$$

이와 유사하게 식 (4)에 식 (6)을 대입하고 유효포화도의 항을 제외하면 식 (8)에서 보는 바와 같이 전체 모관흡수력 범위에 대한 흡입응력 산정공식을 유도할 수 있다.

$$\sigma^s = -(u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (8a)$$

$$\sigma^s = -\frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{1/(n-1)/n}} \quad u_a - u_w \geq 0 \quad (8b)$$

Fig. 1. SWCC and SSCC (after Lu et al., 2010).

식 (8)을 식 (5)에 대입하여 정리하면 전체적인 간극수압의 범위에 대한 유효응력 공식을 나타낼 수 있다. 그리고 식 (9a)는 포화조건에 대한 유효응력 공식으로 Terzaghi의 유효응력 공식과 동일하며, 식 (9b)는 불포화조건에 대한 유효응력 공식이다. 따라서 불포화도에서의 흡입응력은 모관흡수력, 체적함수비 혹은 포화도와 밀접한 관계를 가지기 때문에 불포화도의 응력상태를 평가할 수 있다.

$$\sigma' = \sigma - u_a + (u_a - u_w) \quad u_a - u_w \leq 0 \quad (9a)$$

$$\sigma' = \sigma - u_a + \frac{(u_a - u_w)}{(1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n)^{(n-1)/n}} \quad u_a - u_w \geq 0 \quad (9b)$$

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. 1은 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 함께 도시한 것이다. 흡입응력은 식 (4)에서 보는 바와 같이 모관흡수력과 유효포화도의 곱으로 정의할 수 있으므로 흡-함수특성곡선(SWCC)에서의 면적(회색 음영 부분)을 의미한다. 흡입응력특성곡선

Fig. 2. Automated SWCC apparatus (after Song et al., 2012; Wayllace and Lu, 2012).

(SSCC)은 불포화토의 응력상태를 평가하는 중요한 지표로 사용할 수 있으며, 함수량에 따른 지반의 강도를 예측 및 평가할 수 있다.

시험방법 및 재료

시험장치

본 연구에서는 모래의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정하기 위하여 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012; Wayllace and Lu, 2012). 본 시험장치는 측정원리가 간단하고 연속적인 측정이 가능하며, 시험자에 의해 발생될 수 있는 오차를 최소화하여 정확한 불포화토의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 2는 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 본 시험장치는 압력조절장치, 플로우셀, 물저장소, 공기방울트랩, 저울, 시료준비장치, 측정시스템 등으로 구성되어 있다. 그리고 측변환기법을 도입하여 압력을 0-300 kPa 범위까지 적용할 수 있다.

Fig. 3은 본 시험장치의 계통도를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 압력조절장치에 의해 조절 및 계획된 공기압을 흡시료에 가해지게 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 간극

Fig. 3. Conceptual diagram of the automated SWCC apparatus (Song et al., 2012; Wayllace and Lu, 2012).

수가 빠져나오기 시작한다. 본 실험에서는 모래의 경우 1 bar, 실트의 경우 3 bar의 공기침입값을 갖는 HAE 디스크를 이용하였다.

저울은 컴퓨터와 연결되어있으며 가해진 공기압과 측정된 간극수의 무게는 컴퓨터 프로그램을 통해 실시간으로 확인 및 저장이 가능하다. 본 프로그램을 통하여 실시간으로 간극수의 유출입을 그림을 통하여 보여줌으로써 다음 단계의 공기압을 가하는 시점을 정확하게 알 수 있다. 그리고 일정 공기압에서 간극수의 유출입이 수렴되는 과정을 실시간으로 확인할 수 있으며, 약 2시간 정도 간극수의 유출입이 없을 경우 다음 단계의 공기압을 재하 및 제하하였다. 따라서 이를 통하여 공기압을 단계별로 증가시켜 흡시료내 간극수를 배출시킴으로서 건조과정에 대한 함수특성을 나타낼 수 있으며 반대로 공기압을 단계별로 감소시켜 흡시료내 간극수를 유입시킴으로서 습윤과정에 대한 함수특성을 나타낼 수 있다.

이러한 결과를 이용하여 건조과정 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 도출할 수 있으며, 불포화토의 특성치를 산정할 수 있다.

시험재료

본 연구에서는 모래(주문진 표준사)를 이용하여 시험을 수행하였다. ASTM D 4254-83 및 ASTM D 4254-83 시험기준에 의거하여 시료에 대한 최대 및 최소건조단위중량을 측정하고 상대밀도 60%의 조건으로 시료를 성형하였다. 이와 같이 성형된 시료는 포화를 시킨 후 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. Fig. 4는 본 연구에 사용된 모래(주문진 표준사)의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 그리고 Table 1은 모래에 대한 기본적인 물리적 특성을 측정한 결과이다.

시료성형

본 시험에서는 먼저 시료를 포화시킨 후 공기압을 가하여 간극수를 배출하는 건조과정을 실시하게 된다. 플라스틱 몰드(직경 5.05 cm, 높이 3.89 cm)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 상대밀도 60%의 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. 모래의 경우 약 1시간 이상을 두면 시

Fig. 4. Grain size distribution curves of the Jumunjin standard sand.

Table 1. Physical soil properties of the Jumunjin standard sand.

Description	Symbol	Sand
Specific gravity	G_s	2.621
max. void ratio	e_{max}	0.919
min. void ratio	e_{min}	0.625
max. dry density	γ_{dmax}	15.824
min. dry density	γ_{dmin}	13.387
Effective particle size	D_{10}	0.421
Particle size of D_{30}	D_{30}	0.512
Particle size of D_{60}	D_{60}	0.631
Uniformity coefficient	C_u	1.499
Coefficient of curvature	C_c	0.987

료가 포화된다(송영석 등, 2010). Fig. 5(b)는 데시케이터 내부에 성형된 시료를 위치한 모습이다.

시험결과 및 분석

모관흡수력과 간극수량 측정결과

Fig. 6은 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 상대밀도 60%인 주문진표준사의 모관흡수력 재하 및 제하시 시간에 따른 간극수의 측정량을 나타낸 것이다.

(a) Forming method

(b) Saturation

Fig. 5. Forming method and saturation of the soil sample.

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

Fig. 7. Relationship between matric suction and volumetric water content.

즉, 시료에 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 배출시키는 건조과정과, 반대로 모관흡수력을 제하시켜 간극수를 유입시키는 습윤과정을 재현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 건조과정에서는 모관흡수력이 증가함에 따라 간극수의 유출량은 증가하고, 습윤과정에서는 모관흡수력이 감소함에 따라 간극수의 유입량이 증가하는 것으로 나타났다. 단계별 모관흡수력을 조절하기 위하여 일정단계 모관흡수력 수준에서 간극수 유출 및 유입량이 수렴된 이후 다음 단계의 모관흡수력을 제하 혹은 제하하였다. 한편, 습윤과정의 시험시간이 건조과정의 시험시간보다 상대적으로 긴 것으로 나타났다. 이러한 원인은 습윤과정을 거치는 동안 흡입자 사이의 간극이 밀폐되어 간극 내 공기가 갇히게 되며, 갇힌 공기의 영향으로 인하여 건조 및 습윤과정에서의 시험시간이 다르게 발생하는 것이다.

Fig. 7은 위의 측정결과를 이용하여 체적함수비와 모관흡수력의 상관관계를 도식한 것이다. 그림에서 보는

바와 같이 시료내 체적함수비 혹은 유효포화도가 감소함에 따라 모관흡수력은 증가하는 것으로 나타났다. 특히, 공기함입치 이후에는 작은 모관흡수력에 의해서도 체적함수비가 크게 변화하며, 동일한 체적함수비에서 건조과정의 모관흡수력은 습윤과정의 모관흡수력보다 크게 나타났다.

흡-함수특성곡선(SWCC) 산정

측정된 모관흡수력과 간극수량을 토대로 van Genuchten (1980)의 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 (10)은 van Genuchten (1980)에 의해 제안된 흡-함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)^n]} \right]^m \quad (10)$$

여기서, θ_s 는 포화체적함수비이며, θ_r 는 잔류체적함수비를 의미한다.

$$m = 1 - \exp(-0.8S_p) \quad (0 < S_p \leq 1)$$

$$= 1 - \frac{0.5755}{S_p} + \frac{0.1}{S_p^2} + \frac{0.025}{S_p^3} \quad (S_p > 1) \quad (11a)$$

$$n = 1/(1 - m) \quad (11b)$$

$$\alpha = \frac{1}{h_p} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (11c)$$

여기서, S_p 는 $(\theta_s + \theta_r)/2$ 의 점 P에서의 경사, h_p 는 점 P에서의 모관흡수력이다.

본 제안식에서 필요한 불포화 계수인 α , n 및 m 는 식 (11)을 통하여 구할 수 있다. 식 (11a)에서 보는 바와 같이 잔류체적함수비에 관련된 계수 m 은 $(u_a - u_w)_p$ 와 S_p 를 구하여 계산할 수 있다. 먼저 체적함수비와 모관흡수력의 상관관계에서 우선 θ_s 와 θ_r 사이에 중간점 P를 구한다. 이 중간점 P에서의 모관흡수력은 $(u_a - u_w)_p$ 이고 기울기가 S_p 가 된다. 그리고 α 와 n 은 각각 식 (11b)와 식 (11c)를 통하여 구할 수 있다.

Table 2는 건조 및 습윤과정에 대한 모래의 상대밀도 60%일 경우 불포화 계수를 산정한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입값과 관계된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 가지며, 변곡점의 경사에 관련된 계수 n 과

Table 2. Independent parameters of unsaturated Jumunjin standard sand.

Condition		a (kPa ⁻¹)	n	m	AEV (kPa)
$D_r = 60\%$	Drying	0.399	8.586	0.884	2.01
	Wetting	0.548	5.625	0.822

(a) Relationship between matric suction and volumetric water content

(b) Relationship between matric suction and effective degree of saturation

Fig. 8. SWCCs estimated by the van Genuchten model.

잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 가진다. 그리고 Lu et al. (2010)에 의해 제시된 흡의 종류에 따른 불포화도 관련계수의 범위와 일치하는 것으로 나타났다. 표에 나타난 불포화 계수를 이용하여 모래의 상대밀도 60%에 대한 흡-함수특성곡선(SWCC)

을 도출할 수 있다.

Fig. 8은 상대밀도 60%의 주문진표준사에 대한 건조 과정과 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 흡-함수특성곡선(SWCC)은 S자 모양의 비선형적인 관계를 나타내고, 건조과정의 모관흡수력이 습윤과정의 모관흡수력보다 상대적으로 큰 값이 나타났으며 곡선의 기울기도 차이를 보이고 있다. 그리고 건조과정과 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)이 일치하지 않는 이력현상(hysteresis)이 발생되었다.

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 효과와 접촉각 이력현상을 들 수 있다. 잉크병 효과는 흙의 구조적 특징(간극의 크기, 형상 및 분포)이 비균질하기 때문에 발생하며, 비균질한 간극에서의 모세관을 고려함으로써 알 수 있다. 즉 물을 흡수하는 습윤 과정에서는 큰 간극의 영향이 절대적이고, 물을 배수하는 건조과정에서는 작은 간극의 영향이 주요하기 때문이다(Lu and Likos, 2004). 한편, 접촉각 이력현상은 간극내 물과 흡입자사이의 접촉각이 습윤시와 건조시에 다르기 때문에 발생한다. 즉, 습윤시 접촉각은 건조시 접촉각보다 실질적으로 상당히 크다. 모관 상승 및 수평 침투 시험에 근거한 많은 실험적 연구에서는 모래에서의 습윤 접촉각은 60°~80°의 범위(Letey et al., 1962; Kumar and Malik, 1990)로 나타나며 건조 접촉각은 0°~20° 또는 30°의 범위(Laroussi and DeBacker, 1979)로 나타난다는 것을 보여주었다.

흡입응력특성곡선(SSCC) 산정

앞서 설명한 바와 같이 Bishop (1959)과 Terzaghi (1943)의 유효응력 공식을 확장하여 Lu and Likos (2006)는 불포화토의 흡입응력을 식 (4)와 같이 제안하였다. 또한 van Genuchten (1980)의 유효포화도와 모관흡수력의 관계를 토대로 흡입응력특성곡선(SSCC)의 상관식을 유도하였으며, 식 (7) 혹은 식 (8)과 같이 유효

Fig. 9. Relationship between matric suction and suction stress.

포화도 혹은 유효체적함수비에 따른 흡입응력 산정식을 제안하였다.

Fig. 9는 상대밀도 60%인 주문진 표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 흡-함수특성곡선(SWCC)으로부터 측정된 불포화도 관련계수(α , n)와 식 (8)을 이용하여 모관흡수력 및 유효포화도에 따른 흡입응력을 산정한 결과이다. Fig. 9는 모관흡수력과 흡입응력의 상관관계를 나타낸 것으로 흡입응력은 작은 모관흡수력의 범위에서 증가하였다가 감소하는 것으로 나타났다. 즉 흡입응력은 모관흡수력이 0 kPa인 포화영역과 8 kPa 이상의 Pendular 영역에서 존재하지 않는 것으로 나타났다. 그리고 흡입응력은 습윤과정에서보다 건조과정에서 더 크게 발생되는 것으로 나타났다. 이와 같은 흡입응력의 거동은 기존의 모래에 대한 시험결과(Schubert, 1975; Kim, 2001; Lu et al., 2007)와 유사한 것으로 나타났다. 이러한 역학적 거동은 모래성을 만드는 것과 유사함을 알 수 있다. 만약 모래가 너무 건조하거나 너무 젖어있으면 구조적으로 멎진 모래성을 만드는데 사용할 수가 없다. 이러한 거동은 Bishop (1959)의 유효응력 산정방법으로는 설명이 불가능하다.

한편 Fig. 10은 유효포화도와 흡입응력의 상관관계로부터 흡입응력특성곡선(SSCC)을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 유효포화도가 증가함에 따라 흡입응

Fig. 10. SSCCs of Jumunjin standard sand.

력은 증가하다가 완전하게 포화되기 직전에 급격하게 감소하는 경향을 나타내었다. 즉 모래의 경우 포화되면서 흙내부에 작용하는 흡입응력의 크기는 증가하다가 완전하게 포화되기 직전에 흡입응력을 모두 잃어버리게 된다. 그리고 불포화상태에서의 동일한 유효포화도에서는 건조과정의 흡입응력이 더 크게 발생된다. 즉 흡입응력 특성곡선(SSCC)에서도 건조과정과 포화과정이 일치하지 않는 이력현상(hysteresis)이 발생됨을 알 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 흡입응력특성곡선(SSCC)의 이력현상도 잉크병 효과와 접촉각 이력현상에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

Table 3은 건조 및 습윤과정에서의 최대흡입응력을 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 건조과정에서의 흡입응력이 습윤과정에서의 흡입응력보다 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 상대밀도 60%의 모래에서 모관흡수력에 따른 흡입응력과 포화시 흡입응력($\sigma^s = -(u_a - u_w)$)을 함께 도시한 것이다. 모관흡수력이 공기함입치 이내로 작용할 경우 주문진표준사의 흡입응력은 포화시 흡입응력 상태를 유지하는 것으로 나타났다. 그러나 모관흡수력이 공기함입치 이상으로 작용할 경우 주문진표준사의 흡입응력은 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 불포화도의 유효응력은 공기함입치 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화도의 유효응력과 다른 값을 갖게 된다.

Table 3. Minimum suction stress under drying and wetting conditions.

Condition		Ψ (kPa)	S_e	σ_{min}^s (-kPa)
$D_r = 60\%$	Drying	2.01	0.88	1.78
	Wetting	1.45	0.77	1.19

Fig. 11. Comparison with suction stress for various matric suctions.

흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 비교

Fig. 12는 상대밀도 60%인 주문진표준사의 건조 및 습윤과정에서 산정된 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 함께 나타낸 것이다. Fig. 12(a)는 건조과정에서 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 비교한 것으로 유효포화도가 약 0.03이하의 구간에서는 모관흡수력은 감소하지만 흡입응력은 발생되지 않는 것으로 나타났다. 그 이후 유효포화도가 증가함에 따라 모관흡수력은 감소하지만 흡입응력은 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 유효포화도가 약 0.9 이상의 구간에서는 모관흡수력과 흡입응력이 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 유효포화도가 1인 경우 모관흡수력과 흡입응력은 0의 값을 갖는 것으로 나타났다.

한편 Fig. 12(b)는 습윤과정에서 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)을 비교한 것으로 건조과정에서의 거동과 유사함을 알 수 있다. 그러나 습윤과정의 경우 흡-함수특성곡선(SWCC)과 흡입응력특성곡선(SSCC)의 이력현상으로 인하여 건조과정에서와 다르게 유효포화도가 약 0.8이상의 구간에서 모관흡수력과 흡입응력이 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 유효포화도가 약 0.94일 경우 모관흡수력과 흡입응력은 0의 값을 갖는 것으로 나타났다.

이상의 결과를 토대로 유효포화도가 증가함에 따라 모래의 흡입응력은 증가하였다가 감소함을 알 수 있다. 즉, 모래의 경우 지반내 물이 유입되면서 흡입응력은 증가하다가 감소하므로 유효응력도 증가하다가 감소하게

(a) Drying process

(b) Wetting process

Fig. 12. Comparison between SWCC and SSCC.

된다. 따라서 모래로 구성된 사면의 경우 지반 내 물이 유입되면서 흡입응력의 영향으로 사면안정성에 유리하게 작용하다가 일정 흡입응력 이상이 되면 사면안정성에 불리하게 작용됨을 알 수 있다. 특히, 흡입응력특성곡선(SSCC)에서 보는 바와 같이 일정 유효포화도에서 급격하게 흡입응력이 감소되고 유효응력도 급격하게 감소되므로, 이로 인한 갑작스런 지반붕괴를 유발할 수 있다.

결론 및 요약

본 연구에서는 자동 흡-함수특성곡선 시험장치를 이용하여 상대밀도 60%인 주문진표준사에 대한 건조 및 습윤과정에서의 모관흡수력과 체적함수비를 측정하였다. 습윤과정이 건조과정에 비해 상대적으로 많은 시간이 소요되며, 이것은 건조과정에서 간극에 갇힌 독립된 공기

관흡수력과 체적함수비를 토대로 van Genuchten (1980)의 방법을 이용하여 흡-함수특성곡선(SWCC)을 예측하였다. 불포화 관련계수는 건조과정의 경우 α 는 0.399, n 은 8.586, m 은 0.884이며, 습윤과정의 경우 α 는 0.548, m 은 5.625, m 은 0.822로 산정되었다. 그리고 건조과정과 포화과정에서의 흡-함수특성곡선(SSCC)이 일치하지 않는 이력현상이 발생되었다. 불포화 관련계수를 이용하여 유효포화도와 흡입응력의 상관관계인 흡입응력특성곡선(SSCC)을 예측하였다. 흡입응력은 모관흡수력이 공기함입치 이상으로 작용할 경우 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 불포화도의 유효응력은 공기함입치 이상의 모관흡수력이 작용할 경우 포화도의 유효응력과 다른 값을 갖게 된다. 그리고 불포화상태에서의 동일한 유효포화도에서는 건조과정의 흡입응력이 더 크게 발생된다. 즉 흡입응력특성곡선(SSCC)에서도 건조과정과 포화과정이 일치하지 않는 이력현상이 발생됨을 알 수 있다. 이는 흡-함수특성곡선(SWCC)의 이력현상에 기인하는 것으로 판단되며, 잉크병 효과와 접촉각 이력현상에 의해 발생되는 것으로 예상할 수 있다. 이상의 결과를 토대로 유효포화도가 증가함에 따라 모래의 흡입응력은 증가하였다가 감소함을 알 수 있다. 즉, 모래의 경우 지반 내 물이 유입되면서 흡입응력은 증가하다가 감소하므로 유효응력도 증가하다가 감소하게 된다. 따라서 모래로 구성된 사면의 경우 지반 내 물이 유입되면서 흡입응력의 영향으로 사면안정성에 유리하게 작용하다가 일정 흡입응력 이상이 되면 사면안정성에 불리하게 작용됨을 알 수 있다. 특히, 일정 유효포화도에서 급격하게 흡입응력이 감소되고 유효응력도 급격하게 감소되므로, 이로 인한 갑작스런 지반붕괴를 유발할 수 있다. 또한 실제 지반내 강우가 침투하는 과정은 습윤과정과 동일하므로 건조과정의 결과보다는 습윤과정의 결과를 활용하는 것이 바람직하다.

사 사

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

참고문헌

박성완, 신길호, 김병수, 2006, 시험도로 노상토의 불포화 함수특성 및 이력현상, 한국도로학회 논문집, 8(2), 95-104.

- 송영석, 이남우, 황웅기, 김태형, 2010, 자동 흡-함수특성곡선 시험장치 구축 및 활용, 지질공학, 20(3), 281-295.
- 송영석, 최진수, 2012, 불포화 이암풍화토에서의 흡입응력 이력현상, 한국지반공학회 논문집, 28(3), 55-66.
- Bishop, A.W., 1954, The use of pore pressure coefficients in practice, *Geotechnique*, 4(4), 148-152.
- Bishop, A.W., 1959, The principle of effective stress", *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknisk*, 106(39), 859-863.
- Childs, E.C. and Collis-George, N., 1950, The permeability of porous materials, *Proc. Royal Society, London, Series A*, 210, 392-405.
- Edelfsen, N.E. and Anderson, A.B.C., 1943, Thermodynamics of soil moisture, *Hilgardia*, 15, 31-298.
- Fredlund, D.G. and Rahardjo, H., 1993, *Soil mechanics for unsaturated soils*, John Wiley & Sons Inc., New York, 517p.
- Kim, T.H., 2001, Moisture-induced tensile strength and cohesion in sand, Ph.D. thesis, Univ. of Colorado at Boulder, CO, 150p.
- 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*, 150(6), 883-888.
- Laroussi, C.H., and DeBacker, L.W., 1979, Relations between geometrical properties of glass bead media and their main $\Psi(\theta)$ hysteresis loops, *Soil Science Society of America Journal*, 43, 646-650.
- Letey, J., Osborn, J., and Pelishek, R.E., 1962, Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand, *Soil Science*, 93, 149-153.
- Likos, W.J. and Lu, N., 2004, Hysteresis of capillary stress in unsaturated granular soil, *Jour. of Engineering Mechanics, ASCE*, 130(6), 646-655.
- Lu, N. and Likos, W.J., 2004, *Unsaturated soil mechanics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 556p.
- Lu, N. and Likos, W.J., 2006, Suction stress characteristic curve for unsaturated soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 132(2), 131-142.
- Lu, N., Godt, J.W. and Wu, D.T., 2010, A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil, *Water Resources Research*, 46, W05515.
- Lu, N., Wu, B. and Tan, C.P., 2007, Tensile strength characteristics of unsaturated soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 133(2), 144-154.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resource Research*, 12, 513-522.
- Narasimhan, T.N., 2005, Buckingham, 1907: An appreciation, *Vadose Zone Journal*, 4, 434-441.
- Schubert, H., 1975, Tensile strength of agglomerates, *Powder Technology*, 11, 107-119.
- 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*, 124, 90-97.

- Terzaghi, K., 1943, Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons Inc., New York, 510p.
- van Genuchten, M.T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Science Society of America Journal, 44, 892-898.
- Wayllace, A. and Lu, N., 2012, A transient water release and imbibitions method for rapidly measuring wetting and drying soil water retention and hydraulic conductivity functions, Geotechnical Testing Journal, ASTM, 35, GTJ103596.

원고접수일 : 2012년 3월 2일
수정본채택 : 2012년 4월 24일(1차)
2012년 5월 4일(2차)
게재확정일 : 2012년 5월 9일

송영석(Young-Suk Song)

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3035
Fax: 042-868-3414
e-mail: yssong@kigam.re.kr

최진수(Jin-Su Choi)

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
305-350, 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel: 042-868-3035
Fax: 042-868-3414
e-mail: newface815@nate.com

김교원(Gyo-Won Kim)

경북대학교 자연과학대학 지질학과
702-701, 대구광역시 북구 대학로 80
Tel: 053-950-5357
Fax: 053-950-5362
e-mail: gyokim@knu.ac.kr