흡입력-포화도 조절 기법을 이용한 불포화토의 함수특성곡선에 미치는 간극비 및 순구속압력의 영향 연구

A Study on Change of Soil-Water Retention Curve with Different Net Confining Pressures and Porosities using a Suction-Saturation Control Technique

이준용* · 유 찬**†

Lee, Joonyong · Yu, Chan

ABSTRACT

A suction-saturation control technique based on flow pump system was developed to investigate hydraulic properties in unsaturated soils. The flow pump system is designed based on the principle of the axis-translation technique and triaxial equipment, and gives the suction-time and suction-saturation curves, the primary relationship needed for interpreting the response of unsaturated soils and link between theory and the material properties in unsaturated soil mechanics. Using the suction-saturation control technique, suction-time relationship and soil-water retention curve (SWRC) during hydraulic hysteresis were investigated with different net confining pressures and porosities. Three types of soils-two sands and a silt were used in this paper. This paper showed the effect of the hysteresis on the SWRC due to different net confining pressures and porosities. This means that a careful decision must be made as to which condition is to be modeled, since the delicate difference of the conditions in physical modeling can cause the different experimental output.

Keywords: Suction-saturation control technique, flow pump system; unsaturated soil mechanics; soil-water retention curve; net confining pressure; porosity; hydraulic hysteresis

1. 서 론

최근 지반공학 분야에서 불포화 토질역학의 주된 연구는 지반 내 흐름 (투수성), 지반응력, 지반변형 등 세 가지 대표적인 범주로 분류할 수 있다. 이 중에서 불포화 지반내의 흐름 특성에 대하여 많은 연구자들이 관심을 기울이고 있다 (Biswas et al., 1966; Poulovassilis, 1970; Talsma, 1970; Topp, 1971; Dane and Wierenga, 1975; Hopmans and Dane, 1986; Tami et al., 2004; Mohamed and Sharma, 2007). 불포화 지반내 흐름 특성은 지반내의 흐름을 유발시킬 수 있는 잠재력 (potential)을 정량화한 함수 (토양수분)특성곡선 (soil-water retention curve, SWRC) 및 지반내의 흐름 저항력을 정량화한 투수계수함수 (hydraulic conductivity function, HCF)로 표현할 수 있다. 이러한 불포화 흐름 특성은 사면, 옹벽, 도로포장 등에서의 안정성

과 지반변형률을 엄밀히 해석하기 위하여 필수적으로 고려해야 할 중요한 항목이라 할 수 있다.

함수특성곡선은 순구속압, 간극비, 입도분포, 유기물함량, 광물학적 특징 등 여러 가지 토양변수인자에 의해 영향을 받는다 (Lu and Likos, 2004). 여러 가지 토양변수인자 중 특히 순구속압 (net confining pressure) 및 간극비 (porosity)는 함수특성측정 결과에 상대적으로 큰 영향을 미치는 주요한 인자이다. 일반적으로 불포화된 지반에서 순구속압이 커질수록 입자의 재배열로 인하여 평균간극분포가 작아지고, 이에 따라 수분 보유 능력이 증가하게 된다 (Ng and Pang, 2000). 이러한 순구속압에 의한 수분 보유 능력의 변화는 함수특성곡선의 이력현상 (hysteresis)에도 영향을 미친다. 또한, McCartney (2007)는 다양한 간극비의 흙에 대하여 함수특성곡선을 측정해본 결과, 어느 정도 흡입력이 높은 구간에서는 간극비가 낮을수록 높은 수분저류능력을 가지는 것을 발견하였다. 즉, 관행적으로 차수재 설계 시 흔히 느슨한 흙이 더 높은 수분저류능력을 갖고 있다고 가정하는 것은 높은 흡입력구간에서는 성립하지 않기 때문에 주의가 요하게 된다. 따라서 어떠한 지반 조건에서의 물리적인 현상을 모사하는지에 따라 적절한 함수특성곡선을 측정하고 사용해야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 상기 언급한 순구속압과 간극비가 불포화 지반

* 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

** 경상대학교 지역환경기반공학과 (농업생명과학연구원)

† Corresponding author Tel.: +82-55-772-1932

Fax: +82-55-772-1939

E-mail: chanyu@gnu.ac.kr

2012년 5월 15일 투고

2012년 6월 4일 심사완료

2012년 6월 20일 게재확정

의 함수특성에 미치는 상호 연관성을 규명하기 위하여 세 가지 시료를 대상으로 함수특성곡선을 측정하였다. 불포화 지반 내에서의 유체 흐름 특성 중 하나인 함수특성곡선은 포화된 지반과는 달리 비선형함수로 나타내어지기 때문에 일반적으로 실험 측정을 통하여 결정되어지며, 본 연구에서는 콜로라도 대학에서 개발된 플로우 펌프시스템 (Znidarcic et al, 1991)을 이용하여 순구속압과 간극비에 따른 함수특성곡선의 이력현상을 측정하였다.

II. 함수특성곡선

함수특성곡선은 불포화 지반의 유체 흐름을 모사하기 위하여 필요한 구성성질 중 하나이다. 함수특성곡선은 일반적으로 중량함수량, 체적함수량, 정규함수량, 또는 포화도로 표현되어지는 지반내의 물함량과 흡입력 (suction)과의 관계로 정의되어진다. 일반적으로 함수특성곡선은 상대적으로 작은 함수량일 경우 흡입력이 커지며, 함수량이 증가하며 흡입력이 작아지게 된다. Fig. 1 (a)는 모래, 실트, 점토의 일반적인 함수특성곡선을 보여준다. 모

래, 실트, 점토의 함수특성곡선들은 각각 다른 간극비, 입도분포 경향, 유기물함량, 광물학적 특징을 지니고 있어 각기 다른 특성을 보여주고 있다. Fig. 1 (b)는 일반적인 함수특성곡선의 이력현상과 주사경로 (scanning path)를 나타내고 있으며, 건조과정의 함수특성곡선은 습윤과정에서의 함수특성곡선과 비교하였을 경우 매우 다른 특성을 보여주고 있다. 이러한 특성은 일반적으로 습윤과정시 나타나는 잉크병효과 (ink bottle neck) 및 공기 폐색 (air entrapment), 그리고 건조과정동안에서의 흠조식의 변화 및 수축현상 등 비가역성 변화로 발생되어진다. 따라서 어떠한 과정을 모사하는지에 따라 불포화 지반의 건조 및 습윤 물성치에 대한 올바른 예측 및 사용이 필요하다.

현재, 많은 연구자들은 수치해석에서 물의 흐름을 모사하기 위하여 점들로 측정된 실험결과 및 경험적 데이터를 연속된 곡선으로 표현할 수 있는 다양한 함수특성곡선공식들을 제안하였다 (Gardner, 1958; Brooks and Corey, 1964; Farrel and Larson, 1972; van Genuchten, 1980; Fredlund and xing, 1994). 상기 언급한 다양한 함수특성곡선공식 가운데, 현재 지반공학에서는

(a) Typical examples of SWRC for sand, silt, and clay
(Lu and Likos, 2004)

Effect of Hysteresis
(Mitchell and Soga, 2005)

Fig. 1 Typical soil-water retention curve(SWRC)

Table 1 SWRC equations

Models	SWRC Equations	Parameters
Brooks and Corey model (1964)	$\theta = \begin{cases} \theta_s & \psi < \psi_e \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{\psi_e}{\psi} \right)^{1/b} & \psi \geq \psi_e \end{cases}$	θ_r is the residual volumetric water content θ_s is the saturated volumetric water content, ψ_e is the air entry pressure $1/b$ is a pore size distribution index (which is inverse of the original Brooks and Corey parameter, λ)
van Genuchten model (1980)	$\theta = (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m + \theta_r$	α approximates the inverse of inflection point n is related to the pore size distribution of the soil m is related to the overall symmetry of the characteristic curve
Fredlund and Xing model (1994)	$\theta = C(\psi)\theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/\alpha)^n]} \right]^m$	$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^5/\psi_r)} \right]^m$

Brooks and Corey 모델 (1964), van Genuchten 모델 (1980), Fredlund and Xing 모델 (1994)이 가장 많이 적용되어지고 있으며, 각각의 함수특성곡선 공식은 Table 1에 정리하였다.

III. 함수특성곡선 측정 방법

지난 50여년 동안 함수특성곡선과 투수계수를 측정할 수 있는 많은 기법들이 제안되었다. 함수특성곡선을 측정할 수 있는 대표적인 기법들은 열전대사이클로미터 (Spanner, 1951), 축변환기법 (Hilf, 1956), 습도조절기법 (Young, 1967), 장력계기법 (Cassel and Klute, 1986), 플로우 펌프시스템 기법 (Znidaricic et al., 1991) 등이 있으며, 투수계수를 측정할 수 있는 대표적인 기법으로는 정수위기법 (Corey, 1957), 원심모형기법 (Nimmo et al., 1987), 등속기법 (Olsen et al., 1988) 등이 있다. 하지만, 불포화 지반내 흐름특성을 보다 정확하게 규명하기 위하여 현재에도 여전히 많은 연구자들이 새로운 기법 개발에 매진하고 있다.

본 연구에서는 미국 콜로라도대학에서 개발되어진 플로우 펌프시스템 (Znidaricic et al., 1991)을 이용하여 불포화 지반의 함수특성곡선을 측정하였다. 콜로라도대학에서 개발한 플로우 펌프는 불포화 지반의 특성을 연구하기 위하여 1990년대 초반에 처음 개발되었으며, 이후 많은 개선과 발전을 통하여 건조과정 및 습윤과정에 대한 함수특성곡선을 자동으로 측정하여 실험자에 따른 측정오류를 최소화한 최신식 (state of the art) 장비이다 (Znidaricic et al., 1991; Abu-Hejleh et al., 1993; Bicalho et al., 2000; Hwang, 2002; Lee et al. 2009).

1. 플로우 펌프시스템

플로우 펌프시스템은 삼축압축시험기와 축변환시험기를 기본

으로 설계되어졌다. 플로우 펌프시스템의 기본 모식도는 Fig. 2와 같으며, 실험공시체의 사진 및 모식도는 Fig. 3과 같다. 실험공시체는 원통형으로 제작되어지며 멤브레인, 상하부고정판, 세립다공석판 (high air entry ceramic plate)과 함께 삼축압축셀에 고정되어진다. 상하부 고정판은 실험과정동안 물과 공기의 흐름을 허용하기 위하여 각각 두 개의 홈이 있으며, 플로우 펌프 작동시 하부고정판으로의 공기 침투를 억제하기 위하여 하부고정판의 지름은 상부고정판의 지름보다 약 1 cm 길게 제작되었다. 하나의 배압챔버는 공시체의 하단 (하부고정판)에 연결되어 있으며, 다른 하나는 공시체의 상단 (상부고정판)에 연결되어져 있다. 원형실험시료공시체는 수직하중을 재하하기 위해 제작되어진 Bellofram®의 초기 피스톤압, 공시체의 상하단에 작용하는 배압 (u_w), 삼축압축구속압 (σ)에 의해서 구속되어진다. 플로우 펌프는 공시체의 하단 및 하단에 연결되어진 배압챔버에 연결되

Fig. 2 Schematic drawing of flow pump system

(a) Picture of the specimen assembly

(b) Schematic of the specimen assembly

Fig. 3 Specimen assembly

어져 있으며, 실험과정동안 플로우 펌프 제어판 (control panel)에 의해 일련의 시험이 제어되어진다.

플로우 펌프에서의 실험공시체로의 물의 유입 및 유출은 플로우 펌프 내의 피스톤에 의해서 제어되며, 피스톤의 최대 스트로크와 단면적은 각각 30 cm와 7.92 cm^2 이다. 따라서, 피스톤의 의한 플로우 펌프의 물의 최대 유입량 및 유출량은 약 240 cm^3 이다. 본 시스템에서 제어 가능한 플로우 펌프의 최소 및 최대 유입 및 유출속도는 7.9×10^{-3} 에서 $4.0 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ 이며, 약 6.75 cm의 지름을 가진 원형실험공시체를 사용할 경우 Darcy의 투과율로 환산시 약 2.2×10^{-9} 에서 $1.1 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 의 속도로 물의 유입 및 유출을 조절할 수 있다. 플로우 펌프 제어판의 리필 밸브가 열리고 하단에 연결된 밸브가 닫히게 되면, 하단에 연결되어진 배압챔버는 플로우 펌프내 물을 채우기 위한 저류조 역할을 하며, 실험과정동안은 조정판의 리필밸브가 잠겨지게 설계

되어져 플로우 펌프는 실험시료공시체 하단에서 물을 유입 및 유출하는 역할을 수행한다. 실험 과정 중 피스톤이 최대 스트로크 (30 cm, 흡윤과정)에 도달하거나 또는 최소 스트로크 (0 cm, 건조과정)에 도달하게 되면 플로우 펌프 제어계측시스템은 자동적으로 제어판과 실험공시체 하단에 연결된 밸브를 닫고 리필밸브를 열어 가장 빠른 속도로 피스톤을 스트로크 = 0 cm (흡윤과정) 또는 스트로크 = 30 cm (건조과정)으로 다시 맞춰놓을 수 있도록 플로우 펌프의 리셋과정이 설정되어있다. 따라서, 플로우 펌프시스템은 실험 과정중 피스톤 스트로크 길이에 의한 제약 없이 실험을 연속적으로 수행할 수 있다.

Validyne®의 차압변환기는 실험과정동안 공시체 상단의 압력과 플로우 펌프에 의해 발생하는 하단의 압력차이를 측정하게 되며, 변위측정기는 실험공시체의 수직 변위량을 측정하게 된다. 측정된 차압과 변위량은 자료수집시스템에 저장 및 표시된다. 또

Withdrawal Stage (Drying Cycle) and Infusion Stage (Wetting Cycle)

Suction increases (stage 1 and 3) or decreases (stage 5 and 7) due to withdrawal or infusion of water using flow pump up to target suction value

Suction Equilibration Stage

Flow pump repeats stopping at target suction and starting at the threshold suction value intermittently during several hours in order to reach water content in equilibrium through the soil sample (stages 2, 4, and 6)

(a) Suction time series with target stages

(b) Suction equilibration stage

Fig. 4 Suction response and corresponding cumulative volume of water flow(Lee, 2011)

한, 실험전 시스템에 존재하는 공기를 제거하며, 공시체의 포화를 촉진시키기 위하여 진공펌프는 두 개의 배압챔버에 연결되어져 있다.

2. 흡입력-포화도 조절 기법의 원리

Fig. 4는 플로우 펌프시스템을 이용한 함수특성곡선 측정기법의 전체적인 과정을 보여주고 있다. 건조과정의 모사를 위해 Fig. 4 (a)의 stage 1에서 완전 포화된 실험공시체의 하단에 플로우 펌프를 이용하여 일정한 흐름속도를 유도하면 연속된 응답흡입력이 Fig. 4에서 보는바와 같이 목표 흡입력 (target suction)에 도달하게 된다. 이때 발생한 연속된 응답흡입력은 실험공시체의 하단부의 흡입력을 나타내며 이에 대응되는 함수량 또는 포화도는 플로우 펌프내의 피스톤의 작동 위치를 통하여 공시체로부터 유출된 물의 양으로 계산되어진다.

만약 플로우 펌프에 의해 가해진 흐름속도가 응답흡입력에 상응하는 투수계수보다 작을 경우 실험공시체의 흡입력 및 함수량 분포는 균일하게 변화되며 실험공시체의 하단부의 응답흡입력은 실험공시체의 함수특성곡선을 나타낸다. 하지만 흐름속도가 작을 경우 실험시간이 길어지며, 또한 플로우 펌프의 최소 흐름속도 및 불포화도 투수계수의 비선형적 특성으로 인한 투수계수의 예측의 어려움으로 인하여 일반적으로 공시체에 응답흡입력에 대응하는 투수계수보다 큰 흐름속도가 가해지게 된다.

응답흡입력에 대응하는 투수계수보다 큰 흐름속도를 실험공시체의 하단부에 가하게 되면 하단부의 흡입력 및 함수량은 상단부보다 빠르게 급변하게 되어 공시체의 흡입력 및 함수량 분포는 균일하게 변화되지 못한다. 이때 공시체 하단에서 측정되어진 포화도를 겔보기포화도 (bulk specimen saturation)라고 한다.

따라서, 공시체의 흡입력 및 함수량 분포가 균일하게 되도록 Fig. 4 (a)의 stage 2와 (b)와 같이 플로우 펌프시스템의 주요기법인 흡입력평형단계(suction equilibration stage) 기술이 개발되었다 (Lee, 2011). Fig. 4 (a)의 stage 1에서 플로우 펌프에 의한 응답흡입력이 목표흡입력에 도달하면 플로우 펌프는 자동적으로 작동을 멈추게 되며 응답흡입력은 목표흡입력으로부터 한계흡입력 (threshold suction)에 도달하게 된다. 응답흡입력이 한계흡입력에 도달하게 되면 다시 플로우 펌프는 응답흡입력이 목표흡입력에 도달할 때까지 다시 자동적으로 작동하게 되며 플로우 펌프시스템은 이러한 과정을 반복해서 수행한다.

일반적으로 목표흡입력부터 한계흡입력까지 쇠퇴되는 기간 (decay period)이 5,000초를 도달하게 되면, 실험공시체의 흡입력 및 함수량분포는 평형을 이루게 된다. 이 시점에서의 응답흡입력 및 함수량은 함수특성곡선의 첫 번째 지점이 된다. 5,000초의 쇠퇴기

간은 많은 실험을 통한 경험 및 수치해석으로 결정되어졌다. 시스템에서 설정되어진 목표흡입력에서 한계흡입력으로 도달하는 기간이 5,000초에 도달하게 되면 플로우 펌프시스템은 자동적으로 두 번째 목표흡입력까지 작동하게 되며, 두 번째 함수특성곡선 지점을 측정하기 위하여 두 번째 목표흡입력에서의 흡입력평형단계를 자동적으로 반복하게 된다. 이와 같은 과정의 반복을 통하여 건조과정에서의 최종 목표 흡입력에서 함수특성곡선 지점을 측정하면 실험공시체의 하단부에 연결되어진 플로우 펌프내의 피스톤 방향을 반대로 조절하여 건조과정에서의 방법과 동일하게 습윤과정을 실행하게 된다.

IV. 실험재료 및 방법

1. 실험재료의 특성

본 논문에서는 화강풍화토, Bonny 실트, F-75 Ottawa 모래가 사용되었다. 화강풍화토는 경기도 포천지역에서 채취하였으며, 흡입자간 간극과 흡입자내의 간극이 잘 발달되어 있다고 알려져 있다. 채취한 화강풍화토는 통일분류상 'SM'에 해당하며, 비중은 2.67이다. Bonny 실트는 미국 콜로라도 동쪽에 위치한 Bonny 댐 지역에서 채취하였으며, 통일분류상 'CL-ML'에 해당하며 비중은 2.60이다. F-75 Ottawa 모래는 미국 Ottawa Silica Company에서 가공한 모래이며, 통일분류상 'SP'에 해당한다. 또한, F-75 Ottawa 모래는 비중은 2.63인 세립질의 자연산 이산화규소모래로 비교적 균질한 입경분포를 가지고 있다.

Fig. 5는 각 실험시료의 입도분포를 보여주고 있다. Table 2은 간극비 및 순구속압력에 의한 에 따른 함수특성의 상호 연관성에 대해 규명하기 위하여 화강풍화토, Bonny 실트, F-75 Ottawa 모래로 제작한 공시체의 기본물성치를 보여주고 있다.

Fig. 5 Grain size distributions of three soils

2. 실험방법

화강풍화토 및 Bonny 실트의 경우 최적함수비 상태로 시료를 잘 혼합한 뒤 공시체 제작몰드에 시료를 넣고 3층 다짐을 통하여 공시체를 제작하였다. F-75 Ottawa 모래인 경우 건조상태에서 점착력이 없으므로 삼축압축기 내에서 몰드와 멤브레인을 이용하여 성형을 한 뒤 구속압을 가하기전까지 진공을 가하여 공시체를 제작하였다. 본 실험의 경우 실험측정값의 초기값을 정하는데 많은 어려움이 있으므로 실험시작 전 실험시료를 완전포화시킨 후 건조과정 이후 흡윤과정을 거치는 순서로 함수특성곡선을 측정하였다.

시스템의 건조된 상태에서 공시체를 Fig. 3과 같이 설치한 후 진공을 가하여 공시체의 모양을 유지한다. 삼축압축셀을 닫고 물을 채우며, 구속압 없이 콜로라도 지역의 절대압과 비슷한 진공값을 플로우 펌프시스템에 가한다. 진공을 이용하여 배압챔버에 있는 물을 하부에서 상부방향으로 공시체, 상하단 고정판, 세립다공질판 및 모든 공급라인들에 흘려보낸 후 약 한 시간 동안 진공을 가하여 공시체 및 플로우시스템의 포화를 유도한다. 플로우 펌프시스템의 완전 포화를 위하여 주의 깊게 플로우 펌프 밸브,

펌프와 연결되어진 삼축압축셀 밸브 및 차압변환기에 위치한 공기를 물을 이용하여 제거한다.

일반적으로 공시체의 완전포화를 위하여 Skempton의 B계수 측정실험을 하지만, 실험공시체에 가해지는 높은 진공압을 고려할 경우 Skempton의 B계수 측정실험 없이 짧은 시간 안에 공시체의 완전포화를 시킬 수 있다 (Rad and Cough, 1984). 진공펌프의 작동을 멈추고 구속압력 및 배압을 약 24시간동안 가한다. 구속압 (σ) 500 kPa 및 배압 (u_w) 400 kPa를 가하였을 경우 공시체에는 100 kPa의 초기 유효응력 ($\sigma' = \sigma - u_w$)이 가해지게 된다. 비교적 높은 구속압력 및 배압을 사용하는 이유는 Henry의 법칙에 따라 간극에 남아있던 공기방울을 간극 안으로 녹여 흡수시켜 시료를 완전 포화시키기에 유리하며, 축변화기법 (Hilf, 1956)를 적용하여 높은 흡입력 측정범위를 확보할 수 있기 때문이다.

공시체가 완전 포화된 후 함수특성곡선 측정을 시작하기전, 상부고정판에 있는 조립다공석과 공시체 윗부분에 위치한 물을 제거하였다. 공시체의 상부에 위치한 물의 제거를 위하여 (1) 오른쪽 배압 챔버의 바닥 밸브를 잠근 후, (2) 배압챔버안에 위치한 작은 관과 연결된 있는 밸브를 통하여 공기압을 조립다공석, 공

Table 2 Soil specimen properties for comparison of porosity and net confining pressure effects on SWRC

	Weathered Granite			Bonny Silt		F-75 Ottawa Sand	
Test No#	1	2	5	3	4	6	7
Specific Gravity, G_s	2.67	2.67	2.67	2.60	2.60	2.63	2.63
Net Confining Pressure ($\sigma - u_a$)	100	100	200	100	100	50	100
Area (cm^2)	35.78	35.78	35.78	35.78	35.78	41.28	41.28
Height (cm)	5.15	5.53	5.51	6.04	4.65	13.80	14.11
Total Volume (cm^3)	184.30	197.89	197.38	216.14	166.40	569.67	582.44
Volume of Solids (cm^3)	124.00	129.53	129.53	129.50	104.07	314.87	324.04
Volume of Voids (cm^3)	60.29	68.36	67.85	86.63	62.33	254.80	258.40
Porosity, n	0.327	0.345	0.344	0.400	0.375	0.447	0.443

Table 3 Target suctions and applied flow rates in each test

Test No#	Sand type	Target suction (kPa)	Applied flow rate (m/s)
1	weathered granite	22.6, 49.3, 71.6	1.1×10^{-8} m/s
2	weathered granite	12.6, 24.6, 35.8, 72.5	5.5×10^{-8} m/s
3	Bonny silt	37.1, 52.9, 75.5, 97.6, 125.5	2.2×10^{-8} m/s
4	Bonny silt	46.4, 83.5, 120.0 171.5	5.1×10^{-8} m/s
5	weathered granite	12.6, 24.6, 35.8, 72.5	5.5×10^{-8} m/s
6	F-75 Ottawa sand	4.9, 6.5, 8.6, 10.6 (drying process) 2.7, 1.1 (wetting process)	$2. \times 10^{-6}$ m/s (stage 1), 1.1×10^{-6} m/s (stage 2), 5.5×10^{-7} m/s (stage 3), 2.2×10^{-7} m/s (stage 4), 1.1×10^{-6} m/s (stage 6), 4.4×10^{-6} m/s (stage 7 & 8) *stages 1 to 5: drying cycle *stages 6 to 8: wetting cycle
7	F-75 Ottawa sand	4.3, 6.7, 9.7, 13.7 (drying process) 5.5, 4.1, 2.2 (wetting process)	2.2×10^{-6} m/s (stage 1 & 2), 5.5×10^{-7} m/s (stage 3), 2.2×10^{-7} m/s (stage 4), 1.1×10^{-6} m/s (stage 5 & 6), 4.4×10^{-6} m/s (stage 7 & 8) *stages 1 to 4: drying cycle *stages 5 to 8: wetting cycle

시체 상부, 챔버와 공시체를 연결해주는 밸브에 주입하고, (3) 가압변환기의 상부에 연결된 밸브를 개방하였다. 공시체 상부의 물을 제거할 경우, 공시체의 상부에는 오른쪽 배압챔버의 작은관을 통하여 공기압을 가해주게 되며, 공시체의 하부에는 왼쪽 배압챔버에 의해서 수압이 가해지게 된다.

흡입력은 간극수압과 간극공기압의 차이로 정의되어지므로 함수특성곡선 측정을 시작하기전 실험공시체의 흡입력은 0이 된다. 또한, 구속압 (confining pressure, σ) 및 간극공기압 (pore air pressure, u_a)은 실험과정동안 일정하게 유지되며, 구속압과 간극공기압의 차를 순구속압 (net confining pressure, $\sigma - u_a$)이라고 정의한다. 플로우 펌프를 작동하기 전 건조과정 및 습윤과정의 목표 흡입력들을 제어계측시스템에 설정해주며, 흡입력평형단계에서 사용되어지는 목표흡입력에서의 쇠퇴기간 5,000초를 설정한다. 플로우 펌프가 공시체 하단에 작동을 시작하면 차압변환기는 실험과정동안 일정하게 유지되는 상부의 간극공기압과 플로우 펌프에 의해 발생하는 간극수압과의 차이를 측정하며, 상기에서 언급한 플로우 펌프기법을 이용하여 건조과정 및 습윤과정에서의 시간에 따른 응답흡입력을 측정하게 된다. Table 3은 각 실험에서 사용되어진 목표흡입력 및 흐름속도를 나타내고 있다.

V. 실험결과 및 고찰

1. 간극비에 따른 함수특성곡선의 변화

Fig. 6은 간극비가 0.327인 화강풍화토 (test 1)에 대한 실험 결과를 보여주고 있다. 플로우 펌프를 이용하여 건조 및 습윤 과정동안 동일한 1.1×10^{-4} mm/s의 흐름속도를 유지해 주었으며, 건조과정에서의 목표 흡입력 세지점과 습윤과정에서의 목표 흡입력 두지점을 이용하여 시간에 따른 응답흡입력을 측정하였다.

Fig. 6 (a)에서 보는 바와 같이 각각의 목표흡입력에서 쇠퇴기간이 5,000초에 도달하였을 경우 물의 흐름이 멈추는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 공시체의 흡입력 및 함수량 분포가 균일하게 되었다고 결론지을 수 있다. Fig. 6 (b)에서 보는 바와 같이 누적흐름체적은 플로우 펌프 내의 피스톤의 움직임을 0.001 mm의 정확도로 읽을 수 있기 때문에 공시체에 유입 또는 유출된 유량을 정확히 계산할 수 있다. Fig. 6 (a)에서 측정되어진 응답흡입력에 상응하는 비정상흡입력-평균포화도곡선과 함수특성곡선은 플로우 펌프내의 피스톤 위치변화를 통한 누적흐름체적변화를 계산하였으며, 이를 Fig. 7 (a)와 같이 나타내었다. 실험과정동안의 공시체의 수직변위량은 Fig. 6 (c)와 같이 실험과정동안 큰 변화를 보이지 않았기 때문에 응답흡입력으로부터 함수특성곡선으로 변환시 체적변화는 무시하였다. Fig. 7 (b)에서 보여진 화강풍화토의 연속된 함수특성곡선은 최소자승법 (least square

(a) Suction time series and cumulative volume of water flow

(b) Pump rate and cumulative volume of water flow

(c) Axial displacement during test

Fig. 6 Suction response, corresponding cumulative volume of water flow, and axial displacement (weathered granite, $n=0.327$, test 1)

method)를 이용하여 분석해 본 결과 Brook and Corey 모델 (1964)이 가장 잘 묘사하는 것으로 나타났다. 같은 모델을 이용하여 test 2, 3 와 4의 함수특성곡선을 표현하였으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 나타난바와 같이 다른 간극비를 가진 화강풍화토 및 Bonny 실트의 함수특성곡선은 서로 차이를 보이고 있다. 하지만, 두 재료의 경우 모두 간극비가 클수록 건조과정에서 낮은 공기함입치 (air entry value)를 보여주고 있다. 그 이유는 간극비가 작은 공시체일 경우 수분을 보유할 수 있는 능력이 더 크기 때문으로 추정되어진다. 또한 두 재료의 경우 간극비가 작은

Fig. 7 Comparison of different porosities for weathered granite and Bonny silt

공시체일수록 건조과정과 습윤과정에서 보여지는 이력현상고리(hysteresis loop)가 간극비가 큰 공시체의 이력현상고리보다 폭이 더 좁은 것을 관찰할 수 있다. 또한, 간극비가 높을 경우 흡입력이 증가될수록 수분저류능력이 간극비가 낮은 경우보다 작아지는 것을 확인할 수 있다.

2. 순구속압에 따른 함수특성곡선의 변화

실험을 통해 산정된 함수특성곡선은 간극비에 따라서 영향을 받기도 하지만 순구속압의 크기에 따른 입자분포의 재배열로 인한 영향도 받는다. 화강풍화토의 경우 순구속압이 100 kPa와 200 kPa일때의 함수특성곡선을 측정하였으며, F-75 Ottawa 모래의 경우 순구속압이 50 kPa와 100 kPa일때의 함수특성곡선을 측정하여 서로 비교하였다. Test 1에서 5까지 사용한 화강풍

화토 및 Bonny 실트의 경우 건조과정 및 습윤과정에 모두 일정한 흐름속도를 가하였으나, F-75 Ottawa 모래인 경우 수동적으로 각 흡입력평형단계에서 흐름속도의 변화를 주었으며, 건조과정 완료 후 습윤과정의 목표흡입력을 설정하였다. 다른 두 재료와 다르게 F-75 Ottawa 모래에 대하여 흡입력평형단계에서 속도의 변화를 준 이유는 균질한 흙의 투수계수는 흡입력이 증가함에 따라 급격하게 감소하므로 초반에 플로우 펌프에 설정된 흐름 속도는 흡입력이 증가함에 따라 투수계수와 매우 큰 격차를 보이게 된다. 따라서, 플로우 펌프의 흐름속도에 의한 응답흡입력이 설정된 목표흡입력을 매우 빠르게 지나침으로서 플로우 펌프시스템은 흡입력평형단계를 자동적으로 제어하는 것이 어려워진다. 따라서 건조과정인 경우 흡입력평형단계가 높아질수록 점점 낮은 속도를 적용하였으며, 습윤과정인 경우 반대로 점점 높은 속도를 적용하였다. 또한 건조과정에서 습윤과정으로 변환

(a) Transient suction-average saturation curve and SWRC (Weathered granite, test 2&5)

(b) SWRCs and SWRC fits (Weathered granite, test 2&5)

(c) Transient suction-average saturation curve and SWRC (F-75 Ottawa sand, test 6&7)

(d) SWRCs and SWRC fits (F-75 Ottawa sand, test 6&7)

Fig. 8 Comparison of different confining pressures for weathered granite and F-75 Ottawa sand

시 응답흡입력이 매우 빠르게 변화기 때문에 흡윤과정의 첫 번째 단계는 수동적으로 조절하여 흡윤과정의 첫 번째 목표흡입력을 설정하였으며, 따라서 흡윤과정에서 사용되어진 목표흡입력, 즉 함수특성곡선의 지점은 건조과정과 다르게 측정되었다. Fig. 8 (b)와 (d)에서 실험으로 구해진 측정값들을 바탕으로 연속적인 함수특성곡선을 구하기 위하여 화강풍화토의 경우 Brooks and Corey 모델 (1964)을 사용하였으며, F-75 Ottawa 모래의 경우 van Genuchten 모델 (1980)을 사용하였다.

일반적으로 순구속압이 증가할수록 실험공시체는 높은 수분보유능력이 지니고 있으며, 이로 인한 건조과정에서의 높은 공기함입치를 지니고 있다고 알려져 있다. 하지만, Fig. 8에서 보는데와 같이 두 재료 모두 서로 다른 순구속압에 대하여 건조과정 공기함입치는 많은 차이를 보이고 있지 않다. 하지만, 두 재료 모

두 서로 다른 순구속압에서의 함수특성곡선의 이력현상고리는 순구속압이 커질수록 좁아지며, 흡윤과정 이후 좀 더 높은 포화도를 나타내고 있다. 최근 몇 년 동안 건조과정과 흡윤과정의 차이를 보여주는 함수특성곡선의 이력현상의 원인이 되는 몇가지의 흡구조 특성들, 즉 비균질적 공극분포, 흡윤과정에서의 공기폐색현상, 건조과정과 흡윤과정에서의 공극구조를 변화시키는 팽창 및 수축, 접촉각이력현상에 대해서 많은 연구가 이루어졌다. Ng와 Pang (2000)에 따르면 높은 순구속압에 따른 평균공극분포가 작아지면 함수특성곡선의 이력현상의 원인이 되는 이러한 흡구조 특성들의 영향 또한 작아지게 된다는 것을 발견하였다. 따라서 순구속압이 커질수록 이력현상의 원인들의 영향이 작아지므로 결과적으로 함수특성곡선의 이력현상고리가 작아진다는 사실을 이번 연구를 통해서 다시 한번 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 미국 콜로라도 대학에서 개발되어진 흡입력-포화도 조절 기법을 이용하여 순구속압 및 간극비 변화에 따른 함수특성곡선을 측정하였으며, 다음과 같은 결과들을 도출하였다.

1. 흡입력-포화도 조절 기법은 실험장치의 자동화로 인하여 다른 측정방법에 비해서 빠른 시간 내에 편리하고 효과적으로 함수특성곡선의 이력현상을 측정할 수 있으며, 또한 실험과정의 자동화로 인한 측정자의 미숙으로 인한 실수를 줄일 수 있다. 따라서, 불포화된 지반에서의 흐름특성, 즉 흐름속도에 따른 응답흡입력 및 함수특성곡선을 규명하는데 있어서 효과적인 대안이라고 할 수 있다.

2. 본 연구에서는 각기 다른 간극비를 가진 공시체를 이용하여 함수특성곡선을 측정한 결과, 간극비가 낮을수록 높은 수분보유 능력으로 인한 높은 공기함입치를 나타내었으며, 이력현상고리가 좁아지는 것으로 나타났다.

3. 또한, 느슨한 흙은 흡입력이 높아질수록 조밀한 흙보다 수분저류능력이 낮아지는 경향을 발견할 수 있었으며, 이는 그동안 느슨한 흙이 전체 흡입력 구간에서 조밀한 흙보다 높은 수분저류능력을 갖을 것이라는 가정에 배치되는 상황으로 지반공학 적용시 세심한 주의가 필요하다.

4. 다른 순구속압을 가하였을 경우 순구속압이 커질수록 공기함입치는 차이가 크게 없었으나 함수특성곡선의 이력현상에 영향을 미치는 비균질적 간극분포, 공기폐색현상, 팽창 및 수축, 점착각이력현상등의 영향이 작아지게 되어 이력현상고리가 좁아지며, 습윤과정 완료 후 포화도가 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같이 함수특성곡선은 간극비와 순구속압 등 흙구조변수들에 의하여 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 불포화된 지반에서의 흐름특성을 규명하고, 이와 관련된 지반공학적 문제들의 안정성을 검토 및 해석하기 위해서는 각 조건에 맞는 함수특성곡선을 측정하는 것이 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

본 연구는 한국건설기술연구원 기관고유사업인 “극한지하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발” 과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. Abu-Hejkeh, A. N., Znidarcic, D., and Illangasekare, T. (1993). "Parameter Estimation of Hydraulic Conductivity in Unsaturated Soils using the Flow Pump Technique," *Unsaturated Soil. Geotechnical Special Publication* 39: 163-174.
2. Bichalho, K. V., Znidarcic, D. and Ko, H.-Y. (2000). "Air Entrapment Effects on Hydraulic Properties," *Advances in Unsaturated Geotechnics, Proceedings of Sessions of Geo-Denver 2000*, GSP NO. 99, Shackelford, C. D., Houston, S. L. & Chang, N. -Y., Editors, ASCE, Reston, VA, 517-528.
3. Biswas, T. D., Nielsen, D. R. and Biggar, J. W. (1966). "Redistribution of Soil Water after Infiltration," *Water Resour. Res.* 2(3): 513-524.
4. Brooks, R. H., and Corey, A. T. (1964), "Hydraulic Properties of Porous Media," Colorado State University, Hydrology Paper, 3, March.
5. Cassel, D. K. and Klute, A. (1986). "Water Potential: Tensiometry," *Methods of Soil Analysis, Part I, Physical and Mineralogical Methods*, 2nd ed., A. Klute, Ed., Soil Science Society of America, Madison, WI.
6. Corey, A. T. (1957). "Measurement of Water and Air Permeability in Unsaturated Soil," *Proceedings of Soil Science Society of America* 21(1): 7-10.
7. Dane, J. H. and Wierenga, P. J. (1975). "Effect of Hysteresis on the Prediction of Infiltration, Redistribution and Drainage of Water in a Layered Soil," *J. Hydrol.* 25: 229-242.
8. Farrel, D. G., and Larson, W. E. (1972). "Modelling the pore structure of porous media," *Water Resource, Res.* 3: 699-706.
9. Fredlund, D. G., and Xing, A. (1994). "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve," *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521-532.
10. Gardner, W. R. (1958). "Some Steady State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow equation with Application to Evaporation from a Water Table," *Soil Science* 85(4): 228-232.
11. Hilf, J. W. (1956). "An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils" Ph.D. diss., Technical Memo No. 654, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado.: University of Colorado.
12. Hopmans, J. W., and Dane, J. H. (1986). "Combined Effect of Hysteresis and Temperature on Soil-Water Movement," *J. Hydrol.* 83(1-2): 161-171

13. Hwang, C. (2002). "Determination of Material Functions for Unsaturated Flow," Ph.D. diss., Boulder, Colorado.: University of Colorado at Boulder.
14. Lee, J. (2011). "Limits to Continuity of Water Flow in Unsaturated, Compacted Soils," Ph.D. diss., Boulder, Colorado.: University of Colorado at Boulder.
15. Lee, K. I., Lee, J. Y., and Back, W. J. (2009). "Soil-Water Characteristic Curve of Weathered Granite Soils in Pocheon Area Using Flow Pump Technique," *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(1): 11-20 (in Korea)
16. Lu, N., and Likos, W. J. (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*, Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, Inc.
17. McCartney, J. S. (2007). "Determination of the Hydraulic Characteristics of Unsaturated Soils using a Centrifuge Permeameter," Ph.D. diss., Austin, Texas.: University of Texas at Austin.
18. Mitchell, J. K., and Soga, K. (2005). *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc.
19. Mohamed, M. H. A., and Sharma, R. S. (2007). "Role of Dynamic Flow in Relationships between Suction Head and Degree of Saturation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(3): 286-294.
20. Ng, C. W. W., and Pang, Y. W. (2000). "Experimental Investigations of the Soil-Water Characteristics of a Volcanic Soil," *Canadian Geotechnical Journal* 37(6): 1252-1264.
21. Nimmo, J. R., Rubin, J. and Hammermeister, D. P. (1987). "Unsaturated Flow in a Centrifugal Field: Measurement of Hydraulic Conductivity and Testing of Darcy's Law," *Water Resource Research* 23(1): 124-134.
22. Olsen, H. W., Morin, R. H., and Nichols, R. W. (1988). "Flow pump application in triaxial testing," Donaghe, R. T., Cahney, R. c., and Silver, M. L., eds., *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock*, ASTMSTP977, ASTM, Philadelphia 4: 82-504.
23. Poullovassilis, A. (1970). "Hysteresis of Pore Water in Granular Porous Bodies," *Soil Sci* 109(1): 5-12
24. Rad, N. S. and Clough, G. W. (1984). "New Procedure for Saturating Sand Specimens" *Journal of Geotechnical Engineering* 110(9): 1205-1218.
25. Spanner, D. C. (1951). "The Peltier Effect and Its Use in the Measurement of Suction Pressure." *J. Exp. Bot.* 11: 145-168.
26. Talsma, T. (1970). "Hysteresis in Two sands and the Independent Domain Model," *Water Resour. Res.* 6(3): 964-970.
27. Tami, T., Rahardjo, H., and Leong, E.-C. (2004). "Effect of Hysteresis on Steady-State Infiltration in Unsaturated Slopes," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(9): 956-967.
28. Topp, G. G. (1971). "Soil Water Hysteresis in Silt Loam and Clay Loam Soils," *Water Resour. Res.* 7(4): 914-920.
29. van Genuchten, M. TH.(1980). "A Closed-Form for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils," *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.
30. Young, J. F.(1967). "Humidity Control in the Laboratory Using Salt Solution -A Review," *Journal of Applied Chemistry* 17: 241-245.
31. Znidarcic, D., Illangasekare, T., and Manna, M. (1991). "Laboratory Testing and Parameter Estimation for Two-Phase Flow Problems," F. G. McLean, D. A. Campbell and D. W. Harris, Eds., *Proc. of the Geotechnical Engineering Congress*. Boulder, CO. 1991. ASCE, NewYork.