

흡입력 조절 기법을 이용한 함수특성곡선 측정에 관한 연구

이준용^{1*}

¹한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

A Study on Measuring Soil-Water Characteristic Curve Using a Suction Control Technique

Joonyong Lee^{1*}

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

요 약 불포화토 역학에 있어 흐름특성에 대한 규명은 지반공학적 문제들을 해결하는데 있어 매우 중요하다. 특히, 불포화토의 흐름특성을 모사하기 위한 첫 걸음이 되는 함수특성곡선의 측정을 위해서는 측정자의 오류를 최소화할 수 있는 신뢰성있고 편리한 기법이 필수적으로 요구되어진다. 플로우 펌프 시스템을 포함하여 현재까지 많은 연구자들은 함수특성곡선을 측정할 수 있는 다양한 기법들을 개발하였다. 본 연구에서는 기존에 제안되어진 플로우 펌프 시스템을 활용한 흡입력 조절 기법을 이용하여 건조과정과 습윤과정에서 정확하게 실험 공시체의 함수특성곡선을 측정하였다. 플로우 펌프 시스템을 활용한 흡입력 조절 기법을 통하여 두 가지 시료의 함수특성곡선을 산정하였으며, 실험 결과를 바탕으로 흡입력 조절 기법은 현장 조건에 맞는 조건들을 실내에서 구현할 수 있으며 또한 건조과정과 습윤과정에서 발생하는 함수특성곡선의 이력현상을 규명하는데 적절한 장비인 것을 확인하였다. 특히, 플로우 펌프 시스템을 활용한 흡입력 조절 기법은 자동화된 장비와 정밀도로 인하여 높은 정확도를 이끌어낼 수 있어 측정오차를 줄임과 동시에 측정시간을 절약하여 함수특성곡선을 측정할 수 있다.

Abstract Determination of the soil-water characteristic curve is one of the most important things to solve geotechnical engineering problems. Especially, convenient and reliable method to measure the soil-water characteristic curve during drying and wetting cycles is required with lower labor input, more independence from operator experience, and shorter testing time than other available methods. Many measurement methods including the flow pump system have been developed to characterize the soil-water characteristic curve for the several decades. This study measured the soil-water characteristic curve during drying and wetting cycles using a suction control technique with the flow pump system. Two test materials were used for determination of the soil-water characteristic curve, and it is concluded that suction control technique is suitable for determination of the soil-water characteristic curve and characterization of the hydraulic hysteresis with varying test conditions. Especially, the suction control technique can reduce error of measurement and save time in measuring the soil-water characteristic curve due to automated system and high degree of precision.

Key Words : Soil-Water Characteristic Curve, Flow Pump System, Suction Control Technique, Geotechnical Engineering Problems, Hydraulic Hysteresis

1. 서론

불포화토 역학의 대표적인 현상 중 많은 연구자들은

불포화토 흐름 특성, 특히 불포화토의 흐름특성 중 가장 근간이 되는 물성치인 함수특성곡선(soil-water characteristic curve)과 투수계수곡선(hydraulic conductivity func-

본 논문은 한국건설기술연구원 "극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발" 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Joonyong Lee

Tel: +82-31-910-0787 email: joonyong.lee@kict.re.kr

접수일 12년 10월 04일

수정일 12년 10월 24일

게재확정일 12년 11월 08일

tion)에 대하여 여전히 많은 관심을 기울이고 있다[6,7, 11,12]. 함수특성곡선은 지반내의 흐름을 유발시킬 수 있는 잠재력을 정량화한 것이며 투수계수곡선은 지반내의 흐름 저항력을 정량화한 것이다[13]. 이러한 불포화도 흐름특성은 사면, 옹벽, 도로포장 등에서의 안정성과 지반 변형률을 엄밀히 해석하기 위하여 필수적으로 고려해야 할 중요한 항목이라 할 수 있다[7].

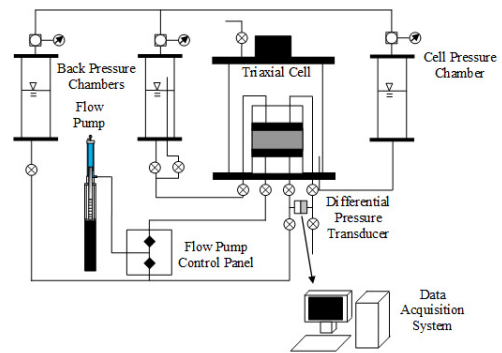
불포화도의 흐름특성 중 특히 함수특성곡선의 측정은 불포화도 역학과 지반공학 현장 적용을 연계시키는 가장 중요한 실험 항목 중 하나이다. 이와 같은 이유로 과거 100년 동안 함수특성곡선을 측정하기 위하여 많은 측정 기법들이 개발되었다[2, 4, 9 10]. 장력계(tensiometer)는 흙의 흡입력을 측정하기 위하여 현재까지 가장 많이 사용되어지는 장비 중 하나이다. 장력계는 물흐름에 있어 캐비테이션(cavitation)이 발생하는 압력까지 흙의 흡입력을 측정할 수 있다. 만약 흡입력을 측정하는 도중 캐비테이션이 발생하면, 측정시스템과 흙의 간극수사이에 물흐름에 대한 연속성이 깨지게 되며, 더 이상 장력계를 이용하여 흙의 흡입력은 측정할 수 없다. 이와 같이 캐비테이션에 의한 측정범위의 한계를 극복하기 위하여 Hill[10]는 실내실험에서 활용할 수 있는 축변환기법(axis translation technique) 개발하였다. 축변환기법은 대기압과 부간극수압의 차이 대신 간극공기압과 간극수압의 차이를 조절하게 되며, 적용된 흡입력에 대하여 평형을 이루는 함수량을 측정하게 해준다. 원심모형기법은 1900년대 초 Briggs와 McLane[12]에 의하여 개발되었으며, 이후 많은 연구자들에 의하여 개선되어졌다[3,5,8,9]. 원심모형기법의 장점 중 하나는 보편화된 함수특성곡선 측정기법에 비하여 측정시간을 대폭 줄여줄 수 있는 장점을 지니고 있다. 습도조절기법(humidity control technique)은 일반적으로 장력계, 축변환기법, 원심모형 등 일반적인 함수특성곡선에서 측정할 수 없는 높은 흡입력 구간에 대한 함수특성곡선을 측정할 수 있도록 개발되었다[4,13].

본 연구에서는 두가지 실험시료에 대하여 상기 언급한 불포화도 흐름특성 중 하나인 함수특성곡선을 측정하기 위하여 2003년에 개발되어진 플로우 펌프를 활용한 흡입력 조절 기법을 활용하였다[1]. 플로우 펌프를 활용한 흡입력 조절 기법은 한 점이 아닌 연속적 곡선을 활용하여 완전한 함수특성곡선의 측정이 가능하며, 또한 보편화된 함수특성곡선 측정 장비에 비하여 상대적으로 비용이 저렴하며 자동화가 가능하고, 실험진행자에 따른 측정오류의 영향을 덜받으며 비교적 짧은 시간에 함수특성곡선을 측정할 수 있다[1].

2. 실험장비 및 기법

2.1 실험장비

본 연구에 활용되어진 플로우 펌프 시스템은 삼축압축 시험기에 축변환기법을 적용하여 개발되었으며, 그림 1과 같다. 왼쪽의 배압챔버는 공시체의 하단부에 연결되어 있으며 오른쪽 배압챔버는 공시체의 상단부에 연결되어 있다. 공시체의 상단부에 연결되어진 배압챔버는 수압뿐만 아니라 챔버 내 작은 관을 통하여 공기압을 가해주도록 설계되어졌다. 본 실험 장비는 실험 조건에 적합한 구속압을 가해줄 수 있도록 설계되었으며 플로우 펌프는 공시체의 하단부와 저류조 역할을 하는 왼쪽 배압챔버에 연결되어 있다. 플로우 펌프는 플로우 펌프 조절판을 통하여 실험과정 중 공시체의 하단부와 저류조와의 연결을 조절할 수 있도록 설계되어졌다. 원형의 공시체는 삼축압축시험기 셀 안에 라텍스 멤브레인에 의해 감싸지게 되며, 초기 피스톤압, 공시체의 상하부에 작용하는 배압, 구속압에 의하여 고정되어진다. 공시체의 상하단부에 연결되어진 차압변압기는 실험과정동안 일정하게 유지되는 공시체의 상단부의 배압과 플로우 펌프에 의해 발생하는 공시체의 하단부의 압력 변화에 대한 차이를 측정하게 된다.



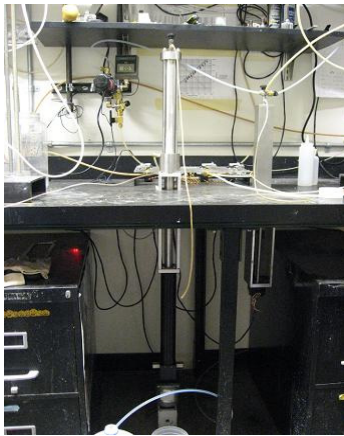
[그림 1] 플로우 펌프 시스템 모식도[7]

[Fig. 1] Schematic drawing of the flow pump system[7]

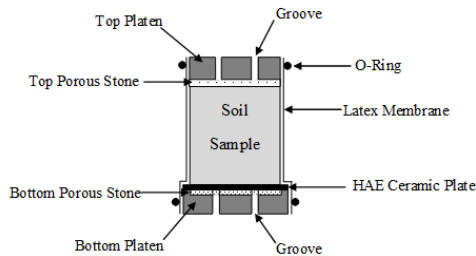
그림 2에 보여진 플로우 펌프는 함수특성곡선 측정을 위한 건조과정 및 습윤과정 중 공시체에 가해지는 흐름 속도를 매우 정밀하게 조절할 수 있다. 본 시스템에서 제어 가능한 플로우 펌프의 유입 및 유출속도 범위는 7.9×10^{-3} 에서 $4.0 \times 10^3 \text{ mm}^3/\text{s}$ 이다. 또한, 플로우 펌프내 피스톤의 최대 스트로크와 단면적은 각각 30cm와 7.92 cm^2 로 피스톤에 의한 플로우 펌프의 물의 최대 유입량 및 유

출량은 240cm^3 이다. 실험과정동안 플로우 펌프 조절판을 통하여 저류조에 연결되어진 밸브는 닫혀지게 되며, 플로우 펌프는 공시체의 하단부와 연결되어 공시체 내외부의 물의 흐름을 조절하게 된다.

그림 3은 실험공시체의 모식도를 나타내고 있다. 상단 부판과 하단부판은 삼축실험기의 중앙에 실험공시체를 위치하도록 하며, 각 단부판에 위치한 두 개의 홈들은 실험과정 중 물과 공기의 흐름이 가능하도록 해준다. 실험과정, 특히 건조과정 동안 불포화된 공시체로부터 다공성장벽을 우회하여 완전 포화된 시스템으로 유입될 가능성이 있는 공기의 흐름을 차단하기 위하여 하단부의 지름은 상단부의 지름보다 1cm 크게 제작되었다.



[그림 2] 플로우 펌프
[Fig. 2] Picture of the flow pump



[그림 3] 공시체 모식도
[Fig. 3] Schematic of the specimen assembly

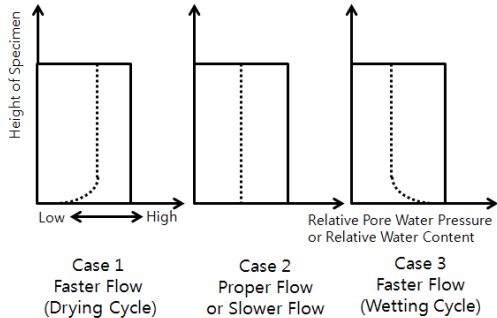
2.2 실험기법

플로우 펌프가 작동하게 되면 공시체의 하단에서는 특정 흐름속도가 작용하게 된다. 플로우 펌프에 의한 흐름속도와 펌프의 작동방향에 따라 실험공시체 내의 간극수압과 함수량 분포도가 달라지게 된다. 그림 4는 플로우

펌프 작동에 의해 변화되어지는 공시체의 간극수압 및 함수량 분포 변화에 대한 개념도를 나타내고 있다. 그림 4의 첫 번째와 세 번째 경우는 건조과정 또는 습윤과정 동안 투수계수보다 빠른 흐름속도가 가해졌을 경우 공시체 하단부의 간극수압은 공시체의 다른 위치에 비하여 작아지거나 커지게 된다. 이러한 경우 공시체의 간극수압 및 함수량 분포는 균질하지 못하기 때문에 플로우 펌프에 의해 공시체 하단에서 측정되어진 응답흡입력은 함수특성곡선을 대표할 수 없다. 두 번째 경우는 투수계수와 같거나 작은 흐름속도를 공시체의 하단에 작용하였을 경우의 간극수압 및 함수량 분포도를 나타내고 있다. 이와 같은 경우 공시체 내의 간극수압 및 함수량 분포도는 균질하게 되어 공시체의 하단부에 측정되어진 응답흡입력은 함수특성곡선을 나타낸다. 하지만, 실험과정동안 불포화토의 투수계수는 산정되어지지 않은 상태이며, 또한 포화토의 투수계수와는 다르게 불포화토의 투수계수는 간극수압이 작아질수록(흡입력이 커질수록) 급격하게 작아지는 경향을 지니고 있어 실험과정동안 공시체의 간극수압 및 함수량의 분포도가 균질하게 유지되도록 적절한 플로우 펌프의 속도를 찾는 것은 매우 어렵다. 따라서 일반적으로 실험과정동안 적용되어지는 투수계수보다 빠른 플로우 펌프의 흐름속도는 함수특성곡선이 아닌 플로우 펌프의 흐름속도에 대한 공시체 바닥경계면의 응답흡입력을 측정하게 된다. 이상에서 논의된 투수계수보다 빠른 플로우 펌프의 속도에 따른 문제점들은 본 연구에서 활용되어진 플로우 펌프 시스템은 함수특성곡선을 측정하는 여러 방법들 중 동적방법이기 때문이다[1]. 플로우 펌프 시스템을 활용한 함수특성곡선 측정시 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 Hwang과 Kim[1]은 동적 방법인 플로우 펌프 시스템을 그대로 활용하되 함수특성곡선의 각 측정값은 정상상태(steady state)에서 측정할 수 있도록 하는 흡입력 조절 기법을 개발하였다.

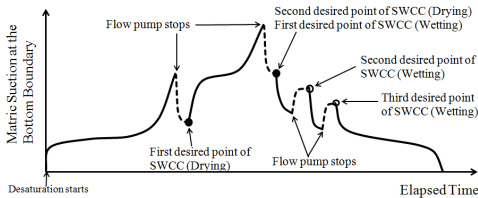
흡입력 조절 기법은 미리 선택된 플로우 펌프의 속도로 측정하고자 하는 함수특성곡선의 포화도까지 플로우 펌프를 작동시킨 후, 측정하고자하는 포화도에 도달하면 펌프를 정지시켜 실험 공시체 내에 유발된 불균질한 간극수압이 균질해질 때까지 기다렸다가 간극수압과 포화도를 측정하는 방법이다[1]. 그림 5는 Hwang과 Kim[1]이 제안한 흡입력 조절 기법에 대한 원리를 나타내고 있다. 흡입력 조절 기법을 활용하여 측정하고자 하는 포화도에서 반복적으로 정상상태상의 간극수압을 측정하여 건조과정 및 습윤과정에 대한 함수특성곡선을 측정할 수 있다. 흡입력 조절 기법을 활용하여 얻어진 측정값은 첫 번째로 정상상태에서의 함수특성곡선이며 두 번째로 투수계수보다 빠른 플로우 펌프의 속도에 의한 불균질한 간

극수압 및 함수량 분포를 보이는 공시체 바닥경계면의 응답흡입력이다.



[그림 4] 물 흐름 방향 및 속도에 따른 상대흡입력 및 상대 함수량 분포도 개념[1]

[Fig. 4] Relative pore water pressure or relative pore water content profiles with respect to different flow rates and directions[1]



[그림 5] 흡입력 조절 기법의 원리
[Fig. 5] Principle of suction control technique

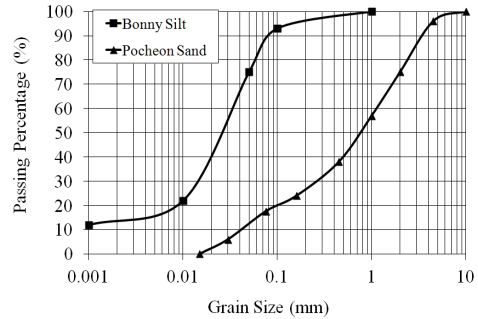
3. 실험방법 및 결과

3.1 실험시료

흡입력 조절 기법을 이용하여 함수특성곡선을 측정하기 위하여 본 연구에서는 두 가지 시료를 이용하였다. 보니토사는 미국 콜로라도 동쪽에 위치한 보니토크 지역의 토사이며, 통일분류상 'CL-ML'이고 비중은 2.60이다. 화강풍화토는 국내 경기도 포천 지역에서 채취하였으며 통일분류상 'SM'이고 비중은 2.67이다. 그림 6은 두 가지 실험시료에 대한 입도분포곡선을 보여주고 있다.

함수특성곡선을 측정하기 위하여 두 가지 시료의 실험 공시체 제작의 경우 최적함수비 상태로 시료를 잘 혼합한 뒤 비닐팩을 이용하여 함수량의 손실을 막고 함수비가 균일하게 퍼지도록 약 24시간동안 보관하였다. 24시간 이후 직경이 6.75cm인 제작모드에 시료를 넣고 3층 다짐을 통하여 공시체를 제작하였다. 두 가지 시료를 이용하여 제작된 공시체의 제원은 표 1과 같으며, 제작된

공시체 또한 함수량의 손실을 막고 함수비가 균일하게 퍼지도록 약 24시간동안 비닐팩을 이용하여 보관하였다.



[그림 6] 실험시료의 입도분포곡선
[Fig. 6] Grains size distribution of two sands

[표 1] 실험공시체의 제원
[Table 1] Test specimen dimensions

	Weathered granite	Bonny silt
Specific gravity, G_s	2.63	2.60
Specimen Area(cm^2)	35.78	35.78
Specimen Height (cm)	6.75	7.11
Total volume (cm^3)	197.39	254.43
Volume of solid (cm^3)	129.53	151.18
Volume of water (cm^3)	67.86	103.24
Porosity, n	0.33	0.40

3.2 실험방법

제작된 공시체는 비닐팩에 보관 후 24시간 뒤 삼축압축시험기 중앙 하단부판 위에 위치한 세립다공석판 (high-air entry disk)위에 놓여지게 되며, 상단부판은 공시체가 상부에 위치하게 된다. 오링(O-ring)과 라텍스 멤브레인을 이용하여 하단부판, 공시체, 상단부판 주위를 밀봉한 후 삼축압축셀을 닫는다. 이후 라텍스 멤브레인에 고정되어진 공시체와 상하단부판을 Bellofram사에서 제작한 피스톤을 활용하여 실험과정동안 수직변위의 변화에 영향을 미치지 않을 정도의 매우 약한 수직압을 이용하여 고정시킨다.

본 실험과정 중 가장 중요한 부분 중 하나는 함수특성곡선 측정 실험 전 공시체의 초기 포화도를 결정하기 위하여 공시체와 플로우 펌프 시스템을 완전히 포화시키는 것이다. 공시체를 삼축압축기에 위치하기 전 진공 펌프를 활용하여 배압챔버, 차압변환기, 플로우 펌프, 각종 연결 밸브의 물 안에 존재하는 공기를 일차적으로 제거한다. 이후 공시체를 삼축압축시험기 안에 위치하고 삼축압축

챔버를 닫은 후 물을 채우기 시작하며, 동시에 공시체 상부에 최소 한시간 이상 진공을 가한다. 이후 진공펌프와 공기가 없는 압력수를 활용하여 물을 공시체의 하단부로부터 상단부로 흘러 보내 공시체의 포화도를 증진시킨다. Rad와 Cough[15]에 따르면 진공펌프를 활용하여 높은 진공압을 이용할 경우 Skeptom의 B계수 측정 없이 짧은 시간 안에 공시체의 포화를 촉진시킬수 있다. 물이 공시체를 통과한 후 구속압과 배압을 약 24시간 가하여 간극에 남아있는 공기방울을 간극안으로 녹여 흡수시켜 공시체 완전 포화를 촉진시킨다.

불포화토의 함수특성곡선을 측정하기 전 공시체의 상하단부에는 배압이 가해지고 있다. 따라서, 불포화토의 흐름 실험을 위하여 공시체의 상부는 공기압이 가해지고 하부는 수압이 가해지는 조건으로 변환시켜야 한다. 오른 쪽 배압 챔버에서 가해지는 수압밸브를 닫고 차압변환기 상부에 연결된 밸브를 개방하여 배압 챔버 내의 작은 관을 통해 공기를 주입시켜 공시체의 상부 잔류하고 있는 물을 제거시킨다. 따라서, 흡입력은 간극수압과 간극공기압의 차이로 정의되어지므로 함수특성곡선 측정 실험을 수행하기 전 실험공시체의 흡입력은 0이 되어진다. 이후 적절한 플로우 펌프 흐름속도를 결정한 후 흡입력 조절 기법에 의한 함수특성곡선을 측정을 시작한다.

3.3 실험결과

실험과정동안 흡입력 값은 차압변환기에서 측정된 공시체 상부의 공기압과 하부에서 작용하는 플로우 펌프에 의한 수압의 변화 차이로 데이터 계측 시스템을 통하여 얻어낼 수 있다. 실험공시체의 포화도의 경우 플로우 펌프 내의 피스톤의 움직임을 통하여 누적흐름체적을 활용하여 계산되어진다. 데이터 계측 시스템에서 제어 가능한 플로우 펌프 움직임의 정밀도는 0.001mm이다.

흡입력 조절 기법을 활용한 실험은 건조과정으로 시작하여 건조과정에서의 마지막 함수특성곡선 지점을 측정 한 후 플로우 펌프의 작동 방향을 반대로 하여 습윤과정을 수행한다. 표 2와 3은 두가지 시료에 대하여 건조과정 및 습윤과정에서 함수특성곡선을 측정하기 위하여 플로우 펌프를 이용하여 공시체 하단에 가해진 흐름속도를 나타내고 있으며, 일반적으로 불포화토의 투수계수는 흡입력이 증가할수록 작아지는 경향을 지니고 있어 건조과정동안 흡입력 범위가 높아질수록 느린 플로우 펌프 흐름속도를 가해주었으며, 습윤과정동안에는 반대로 빠른 플로우 펌프 흐름속도를 가해주었다. 두가지 시료 모두 건조과정과 습윤과정에서 다섯 개의 흡입력 지점에서의 함수특성곡선을 측정하기 위하여 플로우 펌프의 흐름속도를 각각 다섯 구간에 대하여 적용시켰다.

그림 7과 8은 Hwang과 Kim[1]이 제안한 흡입력 조절 기법을 활용하여 얻어진 결과 값이다. 두 그림에서 나타난 바와 같이 함수특성곡선의 측정이 정상상태에서 이루어지게 하기 위해서 건조과정 동안 다섯 번과 습윤과정 동안 네 번에 걸쳐 플로우 펌프가 멈춰진 것을 볼 수 있다. 즉, 흐름속도를 가하여 특정 흡입력에 도달하면 측정된 응답 흡입력이 정상상태에 도달할 때까지 기다려 함수특성곡선 지점을 측정 한 후 다음 단계의 함수특성곡선 지점을 측정하기 위하여 흡입력 조절 기법을 반복적으로 활용하였다. 그림 7(b)와 8(b)는 실험과정동안 실험 공시체의 수직변위량을 나타내고 있다. 실험과정동안 수직변위량은 공시체의 간극률 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 포화도 및 체적함수량 계산 시 실험과정동안의 체적변화는 없다고 가정하였다.

[표 2] 각 단계별 흐름속도(보니토사)

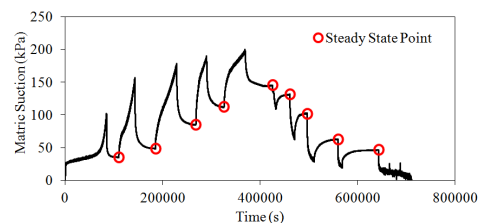
[Table 2] Flow rates of each stage(Bonny silt)

Drying Cycle		Wetting Cycle	
Suction Range(kPa)	Flow Rate(m/s)	Suction Range(kPa)	Flow Rate(m/s)
0→100	1.3×10^{-7}	46→0	1.3×10^{-7}
44→150	6.6×10^{-8}	62→24	8.8×10^{-8}
48→172	3.3×10^{-8}	90→32	4.4×10^{-8}
84→184	2.2×10^{-8}	120→50	2.2×10^{-8}
112→194	1.1×10^{-8}	134→98	1.1×10^{-8}

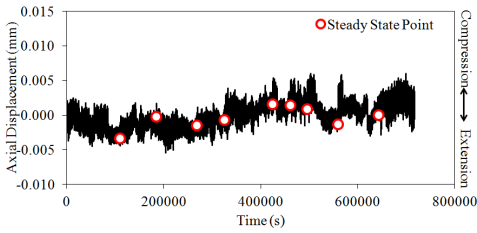
[표 3] 각 단계별 흐름속도(화강풍화토)

[Table 3] Flow rates of each stage(Weathered granite)

Drying Cycle		Wetting Cycle	
Suction Range(kPa)	Flow Rate(m/s)	Suction Range(kPa)	Flow Rate(m/s)
0→10	6.4×10^{-8}	8→1	6.4×10^{-8}
5→14	5.3×10^{-8}	12→3	6.4×10^{-8}
7→25	2.6×10^{-8}	30→5	5.2×10^{-8}
11→42	2.6×10^{-8}	42→11	3.9×10^{-8}
21→82	2.1×10^{-8}	58→30	2.6×10^{-8}



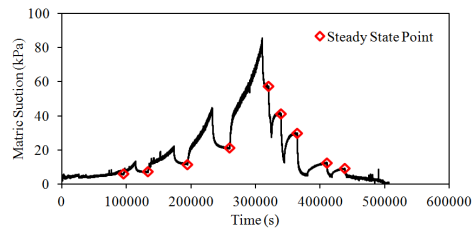
(a)



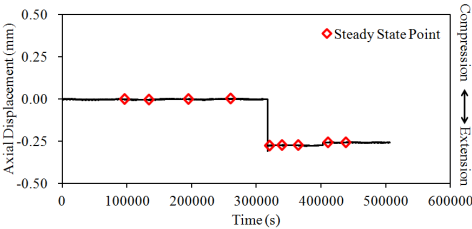
(b)

[그림 7] 시간에 따른 응답흡입력과 수직변위 변화측정 결과(보니토사)

[Fig. 7] Suction response and axial displacement during test (Bonny silt)



(a)



(b)

[그림 8] 시간에 따른 응답흡입력과 수직변위 변화 측정 결과 (화강풍화토)

[Fig. 8] Suction response and axial displacement during test (weathered granite)

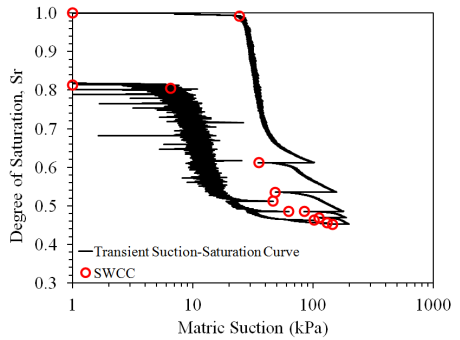
그림 9(a)와 10(a)는 그림 7(a)와 8(a)에서 측정되어진 응답흡입력에 상응하는 비정상흡입력-포화도 곡선과 함수특성곡선으로 플로우 펌프내 피스톤의 위치변화를 통하여 계산되어진 누적흐름체적변화를 이용하여 계산되었다. 그림 9(a)와 10(a)에서 나타난 표식점들은 각각 두 가지 시료에 대한 함수특성곡선을 나타낸다.

그림 9(a)와 10(a)에서 나타난 바와 같이 건조곡선 동안 같은 포화도 상에서 함수특성곡선 지점은 플로우 펌프에 의한 응답흡입력보다 작은 값을 보여주고 있으며, 습윤과정에서는 반대로 나타나고 있다. 이는 일반적으로 공시체에 가해지는 플로우 펌프 흐름 속도에 의하여 공시체 내의 흡입력 및 함수량 분포도가 불균질하기 때문이며 플로우 펌프가 멈춘 동안 공시체 내의 흡입력 및 함

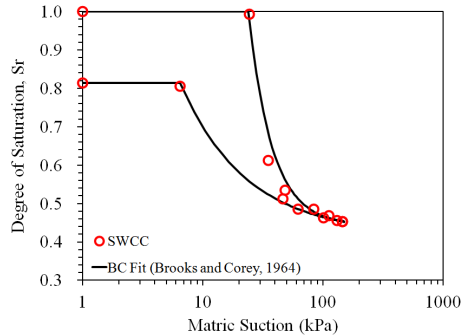
수량 분포도는 정상상태에 도달하기 위하여 균질하게 재배열되기 때문이다. 그림 9(b)와 10(b)에서 보여진 보니토사와 화강풍화토의 연속된 함수특성곡선은 최소자승법 (least square method)를 이용하여 Brooks and Corey 모델 [15]을 통해 표현하였다. Brooks and Corey 모델은 다음과 같다.

$$\theta = \begin{cases} \theta_s & \psi < \psi_{aev} \\ \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left(\frac{\psi_{aev}}{\psi} \right)^\lambda & \psi \geq \psi_{aev} \end{cases}$$

여기서 θ 는 체적함수비, θ_s 는 포화체적함수비, θ_r 은 잔류체적함수비, ψ 는 흡입력, ψ_{aev} 는 공기함입치, λ 는 공극분포지수이다.



(a)



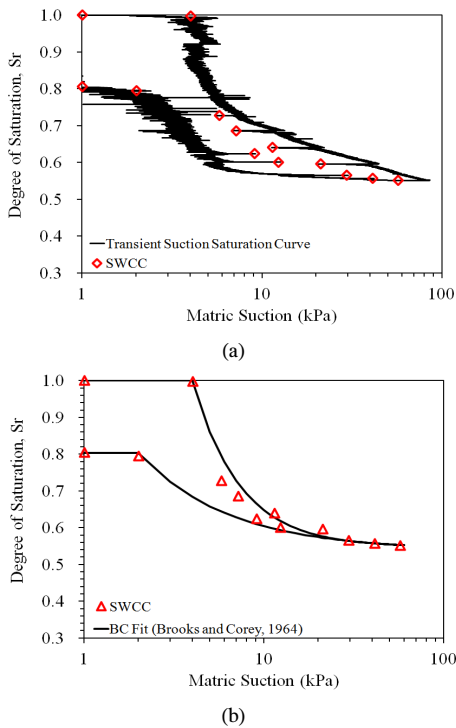
(b)

[그림 9] 비정상 흡입력-포화도 곡선 및 함수특성곡선 (보니토사)

[Fig. 9] Transient suction-saturation curve and SWCC(Bonny silt)

그림 9와 10에서 나타난 바와 같이 건조과정과 습윤과정에서의 함수특성곡선은 많은 차이를 나타내고 있다. 일반적으로 이러한 건조과정과 습윤과정에서 나타나는 함

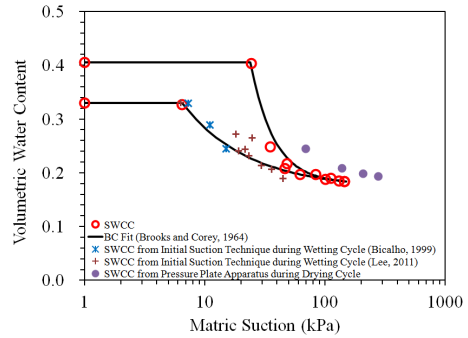
수특성곡선의 이력현상은 공시체의 불균질적인 간극분포로 인하여 건조와 습윤과정에서의 함수특성지점에 따라서 다른 모세관 상승을 유도하며 또한 건조와 습윤과정에서의 물과 공기사이의 각기 다른 접촉각에 의하여 발생되어진다. 또한 습윤과정 중 플로우 펌프에 의한 간극수는 큰 간극의 경우 저항력이 작기 때문에 물의 흐름은 큰 간극을 이용하여 작은 간극을 우회하게 되어 작은 간극에 존재하는 공기는 큰 간극사이로 갇혀지게 된다. 따라서, 같은 흡입력에서의 건조과정과 습윤과정의 포화도는 다르게 나타난다.



[그림 10] 비정상 흡입력-포화도 곡선 및 함수특성곡선 (화강풍화토)
 [Fig. 10] Transient suction-saturation curve and SWCC(Weathered granite)

그림 11은 함수특성곡선 측정을 위해 기존에 활용되고 있는 기법인 압력판과 초기흡입력 측정 기법과의 결과비교를 보여주고 있다. 압력판과 초기흡입력측정기법에 사용된 토사는 보니토사이며, 압력판에 사용된 보니토사의 공시체의 간극률은 0.35이며 초기흡입력 측정 기법에 사용된 공시체의 간극률은 0.40이다. 압력판을 활용한 함수특성곡선은 건조과정동안 측정된 결과값이며, 초기흡입력 측정 기법을 통해 얻어진 결과는 습윤과정을 대표하는 함수특성곡선이다. 그림 11에서 나타난 바와 같

이 흡입력 조절 기법과 압력판을 사용한 건조과정에서의 함수특성곡선 결과는 차이를 보여주고 있다. 이와 같은 이유는 현재 비교되어진 두 공시체의 간극률의 차이로 나타나는 현상이다. 하지만 습윤과정에서의 함수특성곡선의 경우 두 실험 기법을 통한 함수특성곡선은 거의 같은 간극률로 인하여 매우 비슷한 경향을 나타내고 있다. 이와 같이, 건조과정의 경우 다른 간극률로 인해서 직접적인 비교를 할 수는 없지만 본 연구에서 활용되어진 흡입력 조절 기법은 불포화토의 함수특성곡선을 측정하기에 효과적인 대안으로 판단되어진다.



[그림 11] 기존 측정기법과의 비교 (보니토사)
 [Fig. 11] Comparison of SWCC between suction control technique and existing measurement techniques (Bonny silt)

4. 결론

불포화토의 흐름특성과 관련된 지반공학적 문제들을 규명하기 위해서는 각 조건에 맞는 함수특성곡선 측정이 무엇보다도 중요하다고 할 수 있으며, 또한 불포화토의 흐름특성을 모사하기 위한 신뢰성과 편리성이 확보된 실험장비는 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 개발되어진 플로우 펌프 시스템의 흡입력 조절 기법을 이용하여 두 가지 토사에 대한 함수특성곡선을 측정하였으며, 다음과 같은 결과들을 도출하였다.

본 연구에서 활용되어진 플로우 펌프 시스템을 활용한 흡입력 조절 기법은 기존에 활용되고 있는 측정 기법들과의 비교를 통하여 건조과정과 습윤과정의 함수특성곡선, 즉 함수특성곡선의 이력현상을 규명하는데 효과적인 대안으로서 그 가치가 충분하다고 확인되었다. 또한 자동화된 실험장비 및 정밀도로 인하여 다른 측정기법에 비해서 빠른 시간 내에 함수특성곡선을 측정할 수 있으며 측정자의 미숙으로 인한 실수를 줄여 좀 더 정확한 실험 결과를 얻을 수 있다.

본 연구에서 활용한 함수특성곡선을 산정할 수 있는 흡입력 조절 기법은 향후 불포화토의 흐름특성과 관련된 지반공학적 문제들을 해결하기 위한 초석으로 활용하기 위하여 수행되어졌다. 본 연구는 한정된 간극률 및 순구속압 내에서 수행된 것으로 향후 연구결과와 폭넓은 활용을 위하여 함수특성곡선에 영향을 미치는 다양한 인자들(순구속압, 간극비, 입도분포, 유기물함량, 광물학적 특징 등)에 대한 변화를 통하여 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단되어진다.

References

- [1] C. S. Hwang and T. H. Kim, "Determination of the Soil-Water Characteristic Curve Using the Flow Pump Technique", Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 19, No. 5, pp. 155-162, 2003.
- [2] D. K. Cassel and A. Klute, "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, 1986.
- [3] J. Conca and J. Wright, "Diffusion Coefficients in Gravel under Unsaturated Conditions", Water Resour. Res., Vol. 26, No. 5, pp. 1055-1066, 1990.
- [4] J. F. Young, "Humidity Control in the Laboratory Using Salt Solution—A Review", J. Appl. Chem., Vol. 17, pp. 241-245, 1967.
- [5] J. G. Zornberg and J. S. McCartney, "Centrifuge Permeameter for Unsaturated Soils I: Theoretical Basis and Experimental Developments," J. Geotech. Geoenviron. Eng., Vol. 136, No. 8, pp. 1051-1063, 2010.
- [6] J. Lee, "Limits to Continuity of Water Flow in Unsaturated, Compacted Soils", Ph.D. diss., pp. 109-122, University of Colorado, Boulder, Colorado, 2011.
- [7] J. Lee and C. Yu, "A Study on Change of Soil-Water Retention Curve with Different Net Confining Pressures and Porosities Using a Suction-Saturation Control Technique", Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 54, No. 4, pp. 93-103, 2012.
- [8] J. M. Parks, M. A. Steward and J. S. McCartney, "Validation of a Centrifuge Permeameter for Investigation of Transient Infiltration and Drainage Flow Processes in Unsaturated Soils," Geotech. Test. J., Vol. 35, No. 1, pp. 1-10, 2012.
- [9] J. R. Nimmo, J. Rubin and D. P. Hammermeister, "Unsaturated Flow in a Centrifugal Field: Measurement of Hydraulic Conductivity and Testing of Darcy's Law", Water Resour. Res., Vol. 23, No. 1, pp. 124-134, 1987.
- [10] J. W. Hilf, "An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils", Ph.D. Dissertation, Technical Memo No. 654, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado, 1956.
- [11] K. V. Bicalho, "Modeling Water Flow in an Unsaturated Compacted Soil", Ph.D. diss., pp. 61-72, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1999.
- [12] L. J. Briggs and J. W. McLane, "The Moisture Equivalent of Soils", U.S. Dept. Agr. Bur. Soils, Bulletin 45, pp. 23. 1907.
- [13] N. Lu and W. J. Likos, "Automated Measurement of Total Suction Characteristics in the High Suction Range : Application to the Assessment of Swelling Potential", J. Trans. Res. Board, TRB, Washington DC, No. 1755, pp. 119-128, 2001.
- [14] N. Lu, J. Carrera and W. J. Likos., "Constant Flow Method for Concurrently Measuring Soil-Water Characteristic Curve and Hydraulic Conductivity Function", Geotech. Test. J., Vol. 29, No. 3, pp. 1-12, 2006.
- [15] N. S. Rad and G. W. Clough, "New Procedure for Saturating Sand Specimens", J. of Geotech. Eng., Vol. 110, No. 9, pp. 1205-1218, 1984.
- [16] R. Gardner, "The Method of Measuring the Capillary Tension of Soil Moisture over A Wide Moisture Range", Soil Sci., Vol. 43, pp. 277-283, 1937.
- [17] R. H. Brooks and A. T. Corey, "Hydraulic Properties of Porous Media," Hydrology Paper, Colorado State University, Ft. Collins, CO, p. 3, 1964.

이준용(Joonyong Lee)

[정회원]



- 2007년 5월 : 콜로라도주립대 토목공학과 (공학석사)
- 2011년 5월 : 콜로라도주립대 토목공학과 (공학박사)
- 2011년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>
불포화역학, 사면안정