

# 피스톤 펌프 기법을 이용한 흙-수분 특성곡선 측정방법

## Determination of the Soil-water Characteristic Curve Using the Flow Pump Technique

황 창 수\*<sup>1</sup> Hwang, Chang-Soo

김 태 형\*<sup>2</sup> Kim, Tae-Hyung

### Abstract

The soil-water characteristic curve (SWCC) represents the essential constitutive relationship for solving various problems in unsaturated soil mechanics. A reliable and convenient experimental method is needed for the determination of the SWCC in engineering applications. This study introduces and proves that the suction-saturation experimental measurement based on the flow pump technique is a convenient and accurate method for obtaining the SWCC. The flow pump technique provides complete control over the test conditions and is capable of detecting all the important elements of the SWCC. In particular, it is capable of defining continuous drying and wetting curves, the moment of air occlusion, and the hysteretic behavior of unsaturated soils. Not only the optimal testing procedure but also the analysis technique for the flow pump technique has been established in this study. Especially, the method of the suction drop measurement was developed to measure the SWCC. This method is a convenient and time saving method without losing accuracy.

### 요 지

흙-수분 특성곡선은 토질역학에서 불포화토의 근간이 되는 중요한 물성함수로 불포화토 연구에 있어서 가장 중요한 요소이다. 따라서 이러한 흙-수분 특성곡선을 보다 정확하고 빠르게 또 편리하게 측정할 수 있는 신뢰성 있는 방법이 불포화토 연구에 있어서 우선적으로 요구되고 있다. 본 연구에서는 피스톤 펌프 기법을 이용한 흙-수분 특성곡선 측정방법을 보완, 발전시켰다. 이 방법은 기존의 흙-수분 특성곡선 측정방법들보다 측정하기에 편리하고 빠르며 더욱 정확한 측정이 가능하다. 또한 전체실험 과정을 통하여 완전한 통제가 가능하며 컴퓨터를 이용한 자동화 및 정밀측정이 가능하기 때문에 흙-수분 특성곡선의 상세한 부분까지 연구할 수 있다. 한 점 한 점이 아닌 연속적인 건조곡선이나 습윤곡선의 측정이 가능하고 건조곡선에서의 공기침입값위치라든지 습윤곡선에서의 공기폐색위치등도 측정 가능하다. 또한 불포화토의 특성중의 하나인 흙-수분 특성곡선의 이방성 측정도 가능하다. 본 연구에서는 실험방법상의 기법을 개발했을 뿐만 아니라 실험결과에 대한 구체적인 해석도 이루어졌다. 실례로 석션조절기법(suction drop measurement)이라는 방법을 개발했으며 이 방법을 이용하면 흙-수분 특성곡선을 보다 편리하고 또 짧은 시간 내 정확하게 측정할 수 있다.

**Keywords :** Flow pump technique, Soil-water characteristic curve, Suction-saturation test, Unsaturated flow

\*1 정회원, 미국 콜로라도 주립대학교 토목환경건축공학과 박사후 연구원 (Member, Post Doc., Dept. of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Univ. of Colorado at Boulder, Colorado, U.S.A., changsoo.hwang@colorado.edu)

\*2 정회원, 현대건설(주) 기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)

## 1. 서론

토질역학 분야에서 불포화토의 연구는 일반적으로 세 가지의 서로 다른 접근방법으로 생각할 수 있다. 첫 번째는 불포화토에 대한 이론적인 접근이며, 두 번째는 불포화토의 물성을 측정하는 실험적인 접근이며, 마지막 세 번째는 불포화토의 거동 예측에 초점을 둔 접근 방법이다. 이때 흠-수분 특성곡선(soil-water characteristic curve)은 불포화토를 이해하고 해석하는데 있어서 필수적인 요소를 제공한다. 다시 말해서 흠-수분 특성곡선은 앞에서 말한 불포화토의 연구에 있어서 서로 다른 세 가지의 접근 방법들을 상호 연결시켜주는 중요한 다리 역할을 한다(Barbour, 1998).

불포화토에서의 흠-수분 특성곡선은 포화토와는 달리 비선형함수로 나타나기 때문에, 정확한 흠-수분 특성곡선에 대한 정보없이 불포화토에서의 물의 흐름을 예측하기가 불가능하다. 흠땀의 경우, 땀 내부에서의 물의 흐름에 대한 예측은 땀의 유지, 관리에 있어서 무엇보다도 우선되어야 할 문제이다. 흠땀을 건설한 후 처음 물을 채우는 과정과 우기와 건기사이에서의 수위변화에 따른 흠 땀내의 수위(침윤선)변화는 불포화 상태에서 일어남으로 불포화토에서의 흠-수분 특성곡선에 대한 이해가 우선되어야 한다(Hwang, 1999).

흠-수분 특성곡선은 간극수압 또는 부간극수압과 포화도 사이의 관계를 나타내어주는 불포화토 고유의 물성이므로, 일반적으로 실험 측정으로만 구할 수 있다. 그러므로 정확하고 제대로 된 흠-수분 특성곡선을 측정하는 것이 불포화토 연구에 있어서 그 첫 번째이며, 나아가 정확한 흠-수분 특성곡선 없이는 정상적인 불포화토 연구가 불가능하다.

일반적으로 흠-수분 특성곡선을 측정하는 방법에는 수직기둥방법(vertical column method) (King, 1898; Hassler & Brunner, 1945)과 원심분리기(centrifuge)를 이용한 방법(Briggs & McLane, 1907)이 있으며, 현재까지 많이 사용되어지는 방법중의 하나인 압력셀 방법이 여러 연구자들에 의해 제안, 개선되었다(Gardner et al., 1922; Richards, 1928; Richard & Gardner, 1936; Corey, 1994).

본 연구에서 사용되어진 피스톤 펌프 기법(flow pump technique)은 포화투수계수(saturated hydraulic conductivity)의 측정방법을 개선하기 위해서 1966년 Olsen에 의해서 처음 도입되었다(Olsen, 1966). 그후 1991년 Znidarcic, Illangasekare, 그리고 Manna가 피스톤 펌프

기법을 응용한 방법을 흠-수분 특성곡선을 측정하는데 이용하였다(Znidarcic et al., 1991). 피스톤 펌프 기법을 이용한 흠-수분 특성곡선 측정방법을 이용하면 한 점 한 점이 아닌 연속적이고 완전한 흠-수분 특성곡선의 측정이 가능하다. 또한 이 방법을 이용하면 단지 흠-수분 특성곡선을 구하는 것 뿐 만이 아니라, 흠-수분 곡선에 대한 보다 자세한 연구를 할 수 있다. 이 방법은 상대적으로 비용이 저렴하며, 자동화가 가능하고, 실험진행자에 따른 측정오류의 영향을 덜 받으며, 비교적 짧은 시간에 흠-수분 특성곡선을 측정 할 수 있다.

## 2. 배경이론 축이동기법 (Axis Translation Technique)

불포화토를 대상으로 부간극수압을 측정하는데 있어서 극복해야 될 문제점들 중의 하나가 바로 공동현상이다. 만약 실험중 부간극수압이 절대영기압으로 다가가면 물 속에 녹아있던 공기방울들이 다시 기포화하는 공동현상이 일어나며, 이렇게 되면 더 이상의 실험은 진행될 수가 없다. 이 공동현상을 방지하는 방법으로서는 1956년 Hilf가 제안한 축이동기법이 많이 이용된다(Hilf, 1956). 이 방법을 사용하면 그림 1에서 보듯이 400 kPa의 배압을 가하여 부간극수압의 측정범위를 절대기압 상에서는 80 kPa에 불과했던 것을 축이동기법이 적용된 압력계상에서는 400 kPa까지 늘일 수 있다. 그림 1의 경우, 400 kPa의 배압을 측정시 공시체에 가했지만, 가해진 배압은 측정시료 내의 간극공기압에 전달되고, 이 압력은 간극수압으로 전달된다. 모관흡수력(matric suction)의 정의는 간극기압과 간극수압의 차이에 의해 정해지므로, 배압에 의해 같은 정도의 압력변화가 생긴

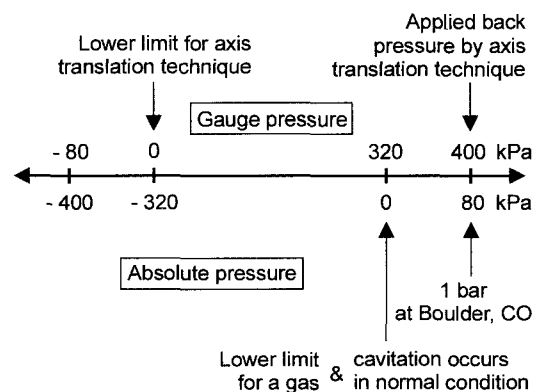


그림 1. Comparison between a gauge pressure and an absolute pressure for the axis translation technique with respect to Boulder, Colorado, USA.

간극기압과 간극수압에 따른 모관흡수력은 축이동기법이 적용된 상황과 적용되기 전의 상황에도 차이가 없다.

### 3. 실험장치

피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법의 주요 실험장치로는 피스톤 펌프, 변환기(transducer), 삼축압축기(triaxial cell), 다공석(porous stone) 등이 있다(그림 2).

#### 3.1 피스톤 펌프

피스톤 펌프는 크게 전동(driving mechanism) 부분과 실린더 부분으로 나눌 수 있다. 전동 부분은 Harvard Apparatus Company에서 제작된 single syringe infusion-withdrawal pump, model 901로서 펌프의 속도와 방향을 실험에 맞게 조정할 수 있다. 펌프의 유속범위는  $2.90 \times 10^{-2} \text{ mm}^3/\text{sec}$ 에서  $1.34 \times 10^2 \text{ mm}^3/\text{sec}$ 이며 측정대상 불포화토의 부간극수압에 따라 펌프의 속도를 조정할 수 있다. 펌프의 방향을 조정함으로써 흡수분 특성곡선의 건조곡선과 습윤곡선을 측정할 수 있다. 펌프 실린더 부분의 전

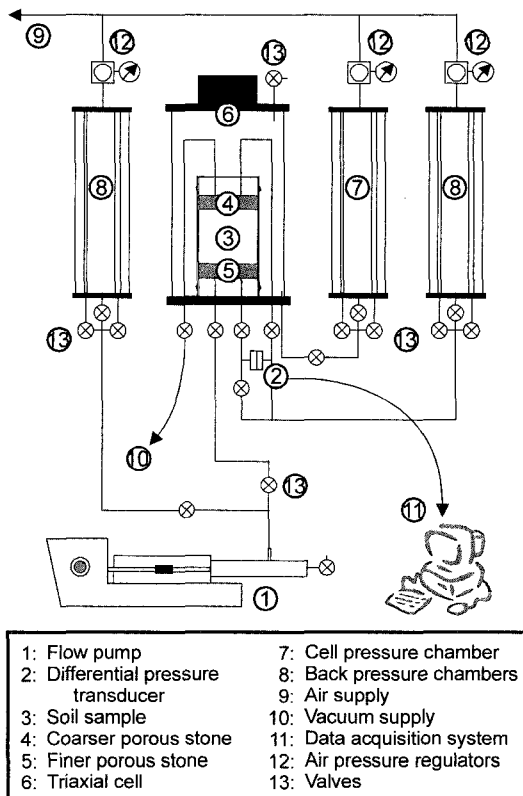


그림 2. Schematic drawing of the suction-saturation test based on the flow pump technique

체길이는 228.6 mm이며 직경은 12.7 mm이다. 이 피스톤 펌프는 연속적이고 안정적인 물의 흐름을 제공해준다.

#### 3.2 변환기

간극수압 또는 부간극수압의 변화를 측정하기 위해서 Validyne Engineering Corporation 사의 DP-15 압력차이 변환기(differential pressure transducer)가 사용되었다. 변환기 내부에 설치되어져 있는 격판(diaphragm)이 변환기 양쪽에 전해진 압력차를 전기적 신호로 변환시켜준다. 변환기는 흙 공시체의 위쪽과 아랫부분에 연결되어져 있으며 공시체 위부분에서는 배압에 의한 기준 압력(reference pressure)이 공시체 밑부분에서는 피스톤 펌프의 작동에 따른 유도압력(induced pressure)이 작용하는데 이 압력차이를 측정하게 된다(그림 2).

실험이 시작되기 전, 변환기에 대한 보정이 요구되는데, 이는 측정대상 불포화토의 예상되는 부간극수압의 범위에 따라 각기 다른 격판을 사용해야 되기 때문이다. 측정되어진 전기신호값(milli voltage)을 격판에 대한 보정으로 수두 값으로 변환시킬 수 있으며 본 연구에 사용되어진 격판의 보정치는 60.2 mm/mVolt이다.

#### 3.3 삼축압축기와 고정판

피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법을 위해서는 개조된 삼축압축기가 사용되었으며 흙 공시체를 고정하고 펌프 작동에 따른 물의 흐름을 원활히 해주기 위해서 공시체 위와 아래에 설치된 고정판이 제작되어졌다. 고정판의 개량과 제작은 본 연구의 많은 개선 중의 하나로 보다 원활한 물의 흐름을 제공하기 위해서 고정판의 면에 많은 홈(groove)을 만들었다. 또한 실험의 불확실성을 최소화하기 위해서 기존의 고정판보다 단순하게 제작하였다(그림 2, 그림 3).

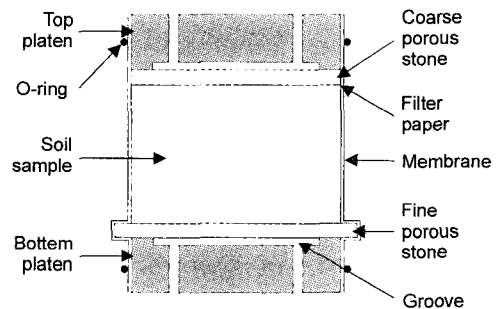


그림 3. Schematic drawing of the specimen assembly

### 3.4 다공석

세립다공석(fine porous stone or high air entry value porous stone)과 조립다공석(coarse porous stone)이 실험에 사용되었다. 세립다공석은 Soil Moisture Equipment Corporation 사에서 제작된 것으로 세라믹 재질이다. 흡공시체의 아래쪽에 설치되진 세립다공석은 공기와 흡입자들의 아래쪽으로의 이동은 제한하지만 피스톤 펌프의 작동에 의한 물의 흐름은 제한하지 않는다. 세립다공석을 선택할 때에는 측정하고자 하는 불포화토의 부의 간극수압보다 큰 공기침입값을 선택해서 원활한 물의 흐름을 제공하며 또 세립다공석으로 인한 부의 간극수압의 유발을 방지해야 한다. 본 실험에서는 공기침입값이 0.5 bar인 세립다공석이 사용되었다. 본 실험에서는 세립다공석의 직경이 흡시료의 직경보다 큰 것으로 사용되었는데, 이러한 서로 다른 직경크기의 배열은 고무막(latex rubber membrane) 설치 후 공기와 흡입자들의 아래쪽으로의 이동을 보다 확실하게 방지하는데 도움을 준다(그림 3). 본 실험에서 사용된 세립다공석은 현재 비교적 널리 사용되는 흡수분 특성곡선 측정방법의 하나인 압력셀방법에서의 모세관장벽(capillary barrier)과 유사한 역할을 한다(Corey, 1994).

조립다공석(coarse porous stone)은 흡공시체의 윗쪽에 설치되었다. 조립 다공석은 세립다공석과는 달리 물과 공기의 흐름은 허용하되 흡입자의 윗쪽으로의 이동만 제한한다.

### 4. 실험시료의 물리적 특성

실험시료로는 Ottawa Silica Company에서 가공한

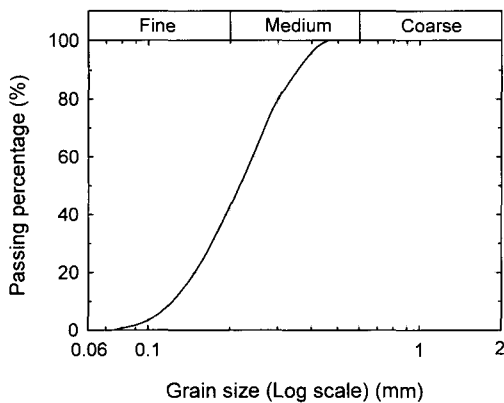


그림 4. Grain size distribution of F-75 Ottawa sand

F-75 Ottawa silica 모래가 사용되었다. Ottawa 모래는 세립질의 자연산 이산화규소 모래로서 비교적 균질한 입경분포( $C_u = 2$ )를 가지며(그림 4) 평균입자크기가 0.22 mm이다. Ottawa 모래의 비중은 2.63이며 입경분포는 그림 4에 제시되었다. Ottawa 모래의 포화투수계수는 간극률이 0.39일때  $2.24 \times 10^{-4}$  m/sec이다.

### 5. 실험절차

#### 5.1 실험준비

모래는 건조상태에서 점착력이 없으므로 일반적인 다점으로는 시료준비가 불가능하고, 삼축압축기 내에서 몰드와 메브레인을 사용해 성형을 한 뒤 구속압을 가하기 전까지는 진공을 가해서 모양을 유지한다. 모래시료와 조립다공석 사이에는 여과지(filter paper)를 사용하여 모래입자의 유출을 방지한다. 그림 3과 같이 모래시료가 삼축압축기 내에 설치되면 진공을 가한 뒤 삼축압축기 셀에 물을 채우고 구속압력을 가한다. 본 실험에서는 500 kPa의 구속압력을 사용했는데, 이렇게 비교적 높은 구속압력을 사용한 이유는 첫째, 모래시료를 포화시키기 위해 유리하며, 둘째, 2장의 배경이론에서 설명한 축이동기법을 적용할 수 있기 때문이다.

#### 5.2 실험시료의 포화

본 실험에 있어서 중요한 점들 중의 하나가 초기값을 아는 것이다. 만약 실험을 시작하기 전에 실험시료가 100% 포화되어있지 않으면 실험 측정값의 초기값을 정하는데 많은 어려움이 있다. 그러므로 본 실험에서는 실험이 시작되기 전에 실험시료를 100% 포화시킨 후 흡수분 특성곡선을 측정했다.

보다 확실한 실험시료의 100% 포화를 위해서 본 실험에서는 3 가지의 각기 다른 과정을 적용했다. 실험시료의 포화도를 확인하기 위해서 Skempton의 B-값을 측정하는 실험도 병행하였다 (Skempton, 1954). 실험시료를 포화시키기 위한 첫 번째 방법은 5.1절에서 언급했듯이 진공을 이용했는데, 이 방법의 장점은 Rad 와 Clough에 의해 보고되었다 (Rad & Clough, 1984). 두 번째 방법은 5.1절에서 언급했듯이 높은 구속압력을 이용한 것이다. 실험시료를 포화시키기 위하여 시료에 진공을 가한 뒤, 물 속에 녹아있는 공기를 제거한 증류수를 실험

시료의 진공이 된 간극에 채워 넣었다. 이때 높은 구속 압력의 범위 내에서 높은 배압을 가함으로써 실험시료의 포화상태를 보다 확실하게 했다. 간극속에 남아있을 수 있는 공기방울에 높은 배압을 가함으로써 Henry의 법칙에 따라 남아있던 공기방울을 간극수 안으로 녹여 흡수시키는 것이다. 실험시료를 포화시키는 마지막 단계로는 비교적 오랜 시간 동안(본 실험에서는 하루를 소요) 물을 천천히 실험시료의 아래쪽에서 위쪽으로 흘러 보냄으로서 실험시료의 간극 안에 남아있을 수 있는 공기방울을 제거했다. 그후 포화된 실험시료의 포화도를 확인하기 위해서 B-값을 측정하는 실험을 실시하였다.

### 5.3 피스톤 펌프 작동

실험시료의 포화도를 확인 한 뒤, 흡-수분 특성곡선 측정을 시작하기 전, 조립 다공석을 포함한 실험시료의 윗부분에 위치한 물을 모두 제거하였다. 흡-수분 특성곡선 측정 전에 실험시료 윗부분의 물을 제거하는 이유는 흡-수분 특성곡선을 측정하기 시작하면 피스톤 펌프의 작동으로 실험시료내의 간극수를 움직임으로서 실험시료의 포화도를 낮춰 가는데 이와 같이 실험시료 윗부분에 위치한 물을 먼저 제거함으로써 실제 실험시간을 많이 단축시킬 수 있다. 이렇게 펌프의 작동에 의해 변화되는 실험시료의 포화도와 또 그에 상응하는 실험시료 내부의 (부)간극수압 변화를 함께 측정함으로써 흡수분 특성곡선을 구할 수가 있다. 이때 피스톤 펌프는 실험계획에 따라 적절한 속력과 방향으로 작동되었다.

### 5.4 흡-수분 특성곡선 측정을 위한 석션조절기법

피스톤 펌프의 작동 속도와 방향에 따라 흡 공시체 내에서는 펌프 작동에 상응하는 변화가 발생된다. 특히 이때 흡 공시체의 아랫부분에서 유발되는 물의 흐름은 경우에 따라서 공시체내에서 각기 다른 간극수압분포 또는 함수비분포(water content profile)를 야기 시킨다 (그림 5). 그림 5(a)의 경우는 펌프의 유속이 상대적으로 빠르고 또 펌프의 방향이 흡 공시체부터 물을 배출하는 방향이기 때문에, 다른 부분과 비교해서 흡 공시체의 아랫부분에서 부의 간극수압이 발달되며 또 상대적으로 작은 함수비분포를 보여주고 있다. 이 경우는 간극수압 또는 함수비가 흡 공시체 전역에 걸쳐 균질하지 않기 때문에 간극수압과 함수비의 측정값이 흡 공시체를 대표

하는 물-수분 특성곡선을 나타낸다고 할 수 없다. 일반적으로 피스톤 펌프 기법에서 포화도의 계산은 펌프 작동으로 배출된 물의 양에 기준을 두는데, 그림 5(a)에서와 같이 흡 공시체 내부에 간극수가 균질하게 분포하지 않는 경우에 있어서는 펌프작동으로 배출된 물의 양으로 계산된 포화도가 흡 공시체 전체를 대표한다고 할 수 없다. 이와 같이 공시체 내부에 균질하게 분포하는 정상적인 포화도와는 달리, 균질하게 분포하지 않는 포화도의 경우 겉보기 포화도(bulk specimen saturation)라고 정의 내렸다. 또 이때 측정되어진 간극수압을 정상적인 간극수압과는 달리 석션반응치(measured suction response)라고 정의 내렸다. 그러므로 그림 5(a)의 경우에는 측정값이 흡-수분 특성곡선에서의 간극수압과 포화도를 나타내지 않고, 불균질하게 분포하는 석션반응치와 겉보기 포화도를 나타낸다.

그림 5(b)는 흡 공시체내의 간극수압분포와 함수비 분포가 공시체 전역에 걸쳐 균질하게 분포하고 있음을 보여준다. 이 경우는 펌프의 방향에 관계없이 펌프의 속도가 적절하게 조절되었는데, 여기서 “적절하다”는 표현은 펌프의 속도가 사용된 시료의 불포화투수계수(unsaturated hydraulic conductivity)와 같거나 작다는 뜻이다. 그러므로 이때 측정되어진 간극수압과 포화도는 흡-수분 특성곡선에서의 그것과 같은 흡시료 전체를 대표한다고 하겠다.

그림 5(c)는 (a)의 경우와는 펌프의 방향이 반대가 되는 경우로서, 펌프의 속도는 (a)의 경우처럼 상대적으로 빠르지만 펌프의 방향은 흡 공시체 안으로 물이 유입하는 방향이다. 이 경우 역시 (a)의 경우처럼 측정되어진 간극수압과 포화도는 균질한 분포를 보이는 흡 시료를

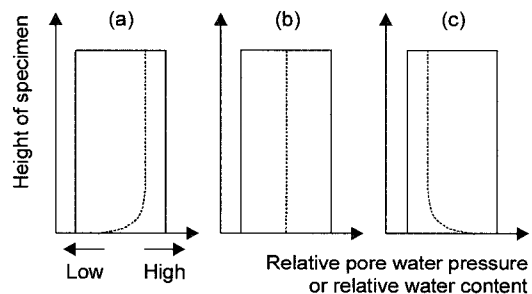


그림 5. Relative pore water pressure or relative pore water content profiles with respect to different flow rates and directions: (a) a case with a faster flow rate in withdrawal mode, (b) a case with proper or slower flow rates in both directions in order to obtain the soil-water characteristic curve, and (c) a case with a faster flow rate in infusion mode

대표하는 것이 아니라 불균질한 분포를 보이는 석션반응치와 겉보기포화도를 나타낸다.

이상에서 설명했듯이 적절하지 못한 펌프의 속도로 실험을 진행하면 흡수분 특성곡선이 아닌 석션반응치와 겉보기포화도를 측정하게 된다. 하지만 만일 적절한 펌프의 속도로 실험을 진행한다고 해도 또 다른 문제점이 발생할 수 있다. 불포화투수계수는 포화도와 함수관계를 가지므로 공식체로 사용된 흡시료의 포화도가 변화하면 불포화투수계수도 함께 변화하게 된다. 따라서 포화도가 변화하는 흡시료의 불포화투수계수에 맞춰 적절한 펌프의 속도로 실험을 조절하는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한 이렇게 실험을 진행시키자면 일반적으로 불포화투수계수는 포화투수계수에 비해 매우 작은 값을 가지므로 오랜 실험소요 시간이 요구될 것이다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 석션조절기법이라는 방법을 개발하였다.

이상에서 논의된 적절하지 못한 펌프의 속도에 따른 문제점들은 피스톤 펌프 기법이 흡수분 특성곡선을 측정하는 여러 방법들 중 동적방법(dynamic method)이기 때문이다. 그러므로 이 문제를 해결하기 위해서는 흡수분 특성곡선을 측정할 때 동적방법인 피스톤 펌프 기법은 사용되지 정상상태(steady state)상에서 측정해야만 한다. 본 연구에서 개발한 석션조절기법은 이러한 동적방법인 피스톤 펌프 기법은 그대로 활용하되 흡수분 특성곡선의 각 측정값은 정상상태 상에서 이뤄지게 하는 방법이다. 석션조절기법에서는 미리 선택된 펌프의 속도로 측정하고자하는 흡수분 특성곡선의 포화도까지 펌프를 작동시킨 후, 측정하고자하는 포화도에 도달하면 펌프를 정지시켜 흡 공시체 내에 유발된 불균질한 간극수압이 균질해질 때까지 기다렸다가 간극수압과 포화도를 측정하는 방법이다. 이런 방법으로 측정하고자하는 포화도들에서 반복적으로 정상상태상의 간극수압과 포화도를 측정하면 동적방법은 이용하지만 정상상태상에서 흡수분 특성곡선을 측정할 수 있다. 이때 측정되어진 측정값은 두 가지를 나타내는데, 첫 번째가 흡수분 특성곡선이며 두 번째는 적절치 못한 펌프의 속도에 의한 불균질한 간극수압분포를 보이는 석션반응치와 겉보기포화도이다.

### 5.5 실험 측정값의 흡수분 특성곡선으로의 변환

실험을 통하여 얻어지는 측정값은 흡시료 내의 간극

수압변화에 의한 전기신호 값과 피스톤 펌프의 작동 시간 값이다. 전기 신호값은 격판(diaphragm) 보정 값에 따라 전기신호 값을 간극수압 값인 수두 값 또는 석션반응치로 변환할 수 있다. 그리고 시간 값은 펌프 작동으로 유발된 물흐름의 양으로서 흡 시료의 포화도 또는 겉보기 포화도로 계산된다(식 (1)).

$$S = S_0 \pm \Delta S = S_0 \pm \frac{Q \Delta t}{n V_t} \quad (1)$$

여기서,  $S$ 는 변화된 포화도,  $S_0$ 는 초기 포화도,  $Q$ 는 펌프의 유속(mm<sup>3</sup>/sec),  $\Delta t$ 는 펌프의 작동 시간(sec),  $n$ 은 간극률,  $V_t$ 는 흡 공시체의 총체적, 그리고  $\pm$ 는 펌프의 방향을 나타낸다.

## 6. 실험결과

그림 6은 Ottawa 모래시료에 대한 피스톤 펌프 기법을 이용한 측정결과를 보여준다. 실험은 100% 포화된 상태에서 유출모드로 시작되어 건조곡선을 측정한 뒤, 46시간이 경과 후 유입 모드로 전환되어 흡윤곡선을 측정하였다. 사용된 겉보기 속도(apparent or Darcian velocity)는  $6.61 \times 10^{-8}$  m/sec였다.

그림 7은 그림 6에서 측정되어진 Ottawa 모래시료의 측정결과를 석션반응치와 겉보기포화도 값으로 변환시킨 그림이다. 사용 되어진 펌프의 속도가 5.4절에서 논의한 것처럼 적절하지 못했기에 그림 7에 보여진 결과는 Ottawa 모래시료의 흡수분 특성곡선이 아니라 석션반응치(measured suction response)와 겉보기포화도 값이다. 그림 7의 y축의 수두값은 부의 간극수압값인 음수 값을 편의상 양수값으로 표시하였다.

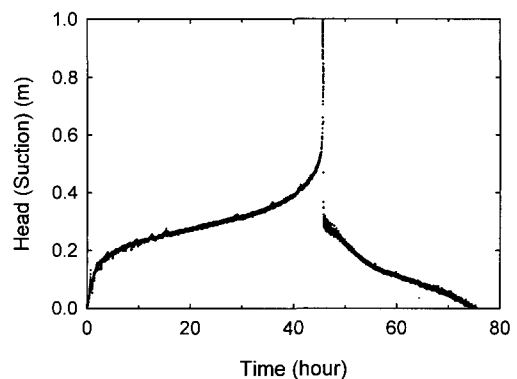


그림 6. The raw data of the Ottawa sand specimen from the suction-saturation test

그림 8은 피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법의 신뢰성을 보여주는 그림으로 Ottawa 모래시료에 대한 측정값의 반복성을 볼 수 있다.

그림 9는 피스톤 펌프의 방향에 따른 흡수분 특성곡선의 이방성 (hysteresis) 측정결과를 보여준다.

그림 10은 Ottawa 모래시료에 대한 석션조절기법에

의해 얻어진 결과를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 흡수분 특성곡선의 측정이 정상상태상에서 이뤄지게 하기 위해서 여러 번에 걸쳐 펌프가 멈춰진 것을 볼 수 있다. 그리고 매번 펌프가 정지될 때마다 측정값이 정상상태에 도달할 때까지 기다려졌다. 그림 10의 측정결과를 흡수분 특성곡선으로 변환시킨 그림이 그림 11

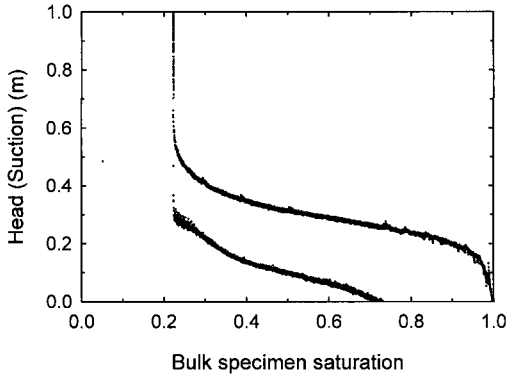


그림 7. The measured suction response versus bulk specimen saturation curve of the Ottawa sand specimen

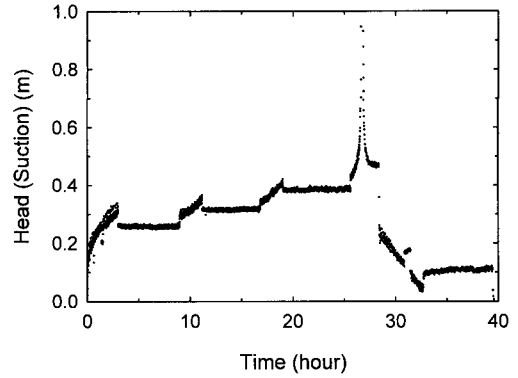


그림 10. The raw data of the Ottawa sand specimen from the suction drop measurement

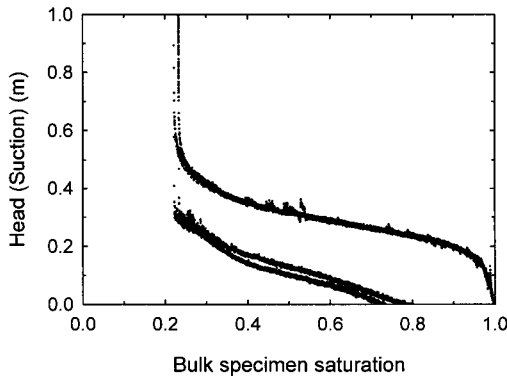


그림 8. Repeatability of the measured suction response versus bulk specimen saturation curves of the Ottawa sand specimen

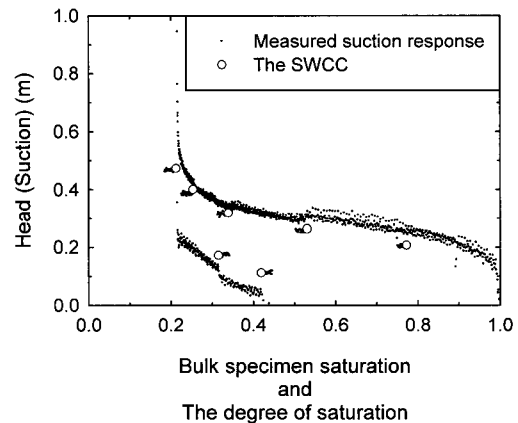


그림 11. The measured suction response versus bulk specimen saturation curve and the soil-water characteristic curve of the Ottawa sand specimen

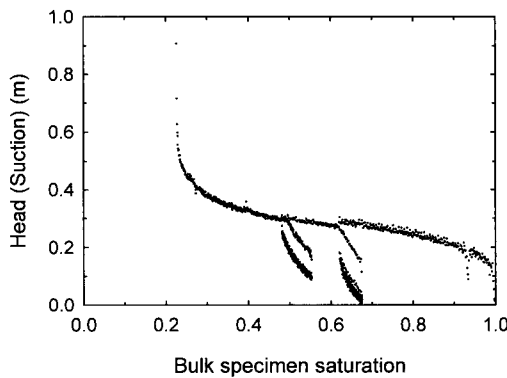


그림 9. Hysteresis of the Ottawa sand specimen

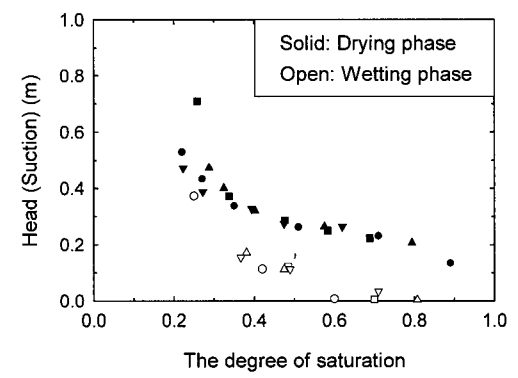


그림 12. Accumulated soil-water characteristic curves of the Ottawa sand specimens

에 보여진다. 그림에서 하얀 동그라미 표시가 흡수분 특성곡선을 나타내고 작은 검은 점들은 적절하지 못한 펌프 속도에 의한 석션반응치와 겉보기포화도 측정값을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 건조곡선 상에서는 같은 포화도 상에서 간극수압이 석션반응치 보다 작은 값을 보여주며, 습윤곡선 상에서는 반대로 나타난다. 이는 적절하지 못한 펌프 속도에 의한 불균질한 분포를 가졌던 흡수로 내의 간극수압이 펌프가 멈춰지는 시간 동안에 균질하게 재배열됨을 뜻한다. 이는 곳 측정값이 정상상태상에서 이뤄졌음을 의미한다. 그림 12는 여러 번의 실험에서 얻어진 흡수분 특성곡선을 함께 보여주고 있는데, 이 그림에서도 역시 피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법의 신뢰성을 다시 한번 확인할 수 있다.

## 7. 결론

본 연구의 주요 목적은 첫째, 피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법의 이상적인 실험방법을 개발하고, 둘째, 이렇게 측정된 흡수분 특성곡선의 신뢰도를 확인해서, 셋째, 보다 편리하고 효과적인 피스톤 펌프 기법을 또 다른 흡수분 특성곡선 측정방법으로 제시하는 것이었다. 다음은 본 연구결과로 얻을 수 있었던 결론들이다.

- (1) 본 연구에서 개발된 5장의 실험절차에 따른 6장의 실험결과에서 보여주듯이 피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법으로 구해진 Ottawa 모래시료에 대한 흡수분 특성곡선 측정결과들은 대체로 양호하였다.
- (2) 본 연구 결과 중 그림 8과 12에서 피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.
- (3) 피스톤 펌프 기법을 이용한 흡수분 특성곡선 측정방법을 이용할 경우 그림 6과 10에서 보듯이 다른 측정방법에 비해서 빠른 시간 내에 흡수분 특성곡선을 측정할 수 있다. 특히 실험장치의 자동화를 갖출 경우, 실험수행인 또는 연구자의 사람의 손이 필요치 않을 만큼 편리하고 효과적이며, 또 측정자의 미숙으로 인한 실수도 줄일 수 있다.

- (4) 이상에서와 같이, 토질역학에서 불포화도를 연구하는데 있어서 그 첫걸음이 되는 흡수분 특성곡선을 측정하는데 있어서 피스톤 펌프 기법의 활용은 또 다른 효과적인 대안으로서 그 가치가 충분하다고 하겠다.

## 참고 문헌

1. Barbour, S.L. (1998), "Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The Soil-Water Characteristic Curve: A Historical Perspective", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.5, pp.873-894.
2. Briggs, L.J. and McLane, J.W. (1907), "The Moisture Equivalent of Soils", U.S. Dept. Agr. Bur. Soils, Bulletin 45, p.23.
3. Corey, T. (1994), *Mechanics of Immiscible Fluids in Porous Media*, Water Resources Publications, Ft. Collins, Colorado, USA.
4. Gardner, W., Israelsen, O.W., Edlefsen, N.E., and Clyde, H. (1922), "The Capillary Potential Function and its Relation to Irrigation Practice", *Physical Review*, Second Series, p.196.
5. Hassler, G.L. and Brunner, E. (1945), "Measurement of Capillary Pressures in Small Core Sample", *Petroleum Technology Technical Paper*, pp.114-123.
6. Hilf, J.W. (1956), *An Investigation of Pore-Water Pressure in Compacted Cohesive Soils*, Ph.D. Thesis, Technical Memo No.654, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, Design and Construction Division, Denver, Colorado, USA.
7. Hwang, C. (1999), "Flow Processes in Unsaturated Soils", MS Thesis, University of Colorado at Boulder, Boulder, Colorado, USA.
8. Hwang, C. (2002), "Determination of Material Functions for Unsaturated Flow", Ph. D. Thesis, University of Colorado at Boulder, Boulder, Colorado, USA.
9. King. (1898), "U.S. Geological Survey Annual Report", II, pp. 59-294.
10. Olsen, H.W. (1966), "Darcy's Law in Saturated Kaolinite", *Water Resources Research*, Vol.2, No.2, pp.287-295.
11. Rad, N.S. and Clough, G.W. (1984), "New Procedure for Saturating Sand Specimens", *Journal of Geotechnical Engineering*, p.110.
12. Richards, L.A. (1928), "The Usefulness of Capillary Potential to Soil Moisture and Plant Investigators", *Journal of Agricultural Research*, Vol.37, pp.719-742.
13. Richard, L.A. and Gardner, W. (1936), "Tensiometers for Measuring the Capillary Tension of Soil Water", *Journal of the American Society of Agronomy*, Vol.28, pp.352-358.
14. Skempton, A.W. (1954), "The Pore Water Coefficients A and B.", *Geotechnique*, Vol.4, pp.143-147.
15. Znidarcic, D., Illangasekare, T.H., and Manna, M. (1991), "Laboratory Testing and Parameter Estimation for Two-Phase Flow Problems", ASCE, *Geotechnical Special Publication*, Vol.27, pp.1089-1099.

(접수일자 2003. 4. 28, 심사완료일 2003. 10. 2)