大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第30卷 第4C號 · 2010年 7月
pp. 185~191

체적압력판추출기의 측정법 개선에 관한 연구

Study on the Improvement for Measuring Procedures of Volumetric Pressure Plate Extractor

유건선*
Yoo, Kun-Sun

Abstract

Volumetric pressure plate extractor (VPPE) can be used for measurement of the soil-water characteristic curve in the laboratory using the axis-translation technique. The volume of extracted water from the soil specimen in VPPE can be measured continuously during the test without stoppage of air pressure for the measurements. However, the water volume measurement in VPPE using an air trap, a ballast tube, a burette, and a vacuum device so as to maintain a constant pore-water pressure in the soil specimen, is quite complicated and tedious. In order to improve the measuring problems of VPPE, a modified volumetric pressure plate extractor (MVPPE) was developed and tested on residual soil specimens. In addition, the modified apparatus can measure the volume of the extracted water using both Method A and Method B of ASTM D 6836-02 depending on the range of matric suction. Measuring principles and the improvements of MVPPE and typical results obtained from the tests are discussed in the paper.

Keywords : *unsaturated soil, matric suction, pressure plate, soil-water characteristic curve*

요 지

축전이기법을 사용하는 체적압력판추출기(이하 체적압력판)로 실내시험실에서 함수특성곡선을 구할 수 있다. 체적압력판을 사용하면, 매 단계마다 공기압을 차단하지 않고 시험하는 동안 흙시료로부터 추출되는 간극수의 부피를 연속적으로 측정할 수 있는 장점이 있다. 반면에, 시료내 간극수압을 일정하게 유지하기 위하여, 에어 트랩, 발라스트 튜브, 저장뷰렛, 진공펌프 등을 사용하는 체적압력판의 추출수 부피측정은 매우 복잡하고 지루한 작업을 수반한다. 이러한 문제점을 개선하고자 수정 체적압력판을 개발하여 풍화잔류토에 대한 시험을 수행하였다. 수정 시험기는 매트릭석션의 범위에 따라 ASTM D 6836-02의 Method A와 Method B 두 방법 모두 사용하여 추출수의 부피를 측정할 수 있다. 본 논문에서는 수정 시험기의 측정원리, 개선점, 시험결과 및 토의를 서술하였다.

핵심용어 : 불포화토, 매트릭석션, 체적압력판, 함수특성곡선

1. 서 론

함수특성곡선은 흙의 투수성과 전단강도에 영향을 미치는 불포화토의 중요한 성질이다. 함수특성곡선을 구하기 위하여 사용하는 상용 시험기는 측정방법에 따라 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째는 시료의 무게변화를 측정하는 방법(무게측정법)을 사용하는 압력판추출기(Pressure Plate Extractor, PPE, 이하 압력판)이며, 둘째는 시료로부터 추출된 물의 부피를 측정하는 방법(부피측정법)을 사용하는 체적압력판(Volumetric Pressure Plate Extractor, VPPE) 이다. 대표적인 상용 시험기인 템페셀(Tempe Pressure Cell)은 압력판의 일종이다. 이 시험기들은 모두 축전이기법(Axis Translation technique)에 의한 매트릭석션(matric suction)을 사용하여 흙으로부터 간극수를 추출한다. 무게측정법은 측정이 용이하여 실무에서 많이 사용하고 있으나 매 단계마다 공기압을 차단하고 시료무게를 측정함에 따라 발생하는 응력이력에 따른 시료의 교란가능성과 습윤과정의 함수특성곡선을 구할 수 없다는 단점이 있다. 반면에, 부피측정법은 추출수에 포함되어 있는 확산공기를 제거한 순 추출수의 부피를 측정하기 위하여 다소 복잡한 과정을 거치기 때문에 실무에서는 거의 사용되지 않치만 매 단계 마다 공기압을 차단하지 않고 연속적으로 건조과정 및 습윤과정 함수특성곡선을 구할 수 있다는 장점이 있다.

Leong et al.(2004)은 기존 압력판의 세라믹 디스크 하부에 홈이 파인 water chamber를 만들고 cross-flow system을 도입하여 확산공기를 제거함으로써 건조과정과 습윤과정

*정회원 · 한라대학교 토목공학과 교수 (E-mail : ksyoo@halla.ac.kr)

의 함수특성곡선을 구하였으며, Padilla et al.(2005)는 air pump를 사용하여 확산공기를 제거하고 두개의 volume indicator tubes를 도입하여 건조과정과 습윤과정의 함수특성곡선을 구하였다. 한편 최근에 압력판을 사용하여 함수특성곡선을 측정하는 방법을 제시한 ASTM D 6836-02(2007)에서는 한 세트의 시험기에 한 개의 시료를 측정할 경우, 부피측정법(Method A and B)을, 여러 개의 시료를 동시에 측정할 경우, 무게측정법(Method C)을 권하고 있다. 부피측정법에서는, 시료로부터 간극수를 추출하기 위하여 매트릭석션이 작은 단계(0-80kPa)에서는, “Hanging column”방법(Method A)을 사용하여 시료에 직접 부압(negative pressure)을 작용시키며, 매트릭석션이 이 보다 큰 단계(0-1500kPa)에서는 시료에 공기압을 가하여 축전이기법에 의한 매트릭석션을 작용시킨다(Method B). 그러나 이 부피측정법에서는 시험 도중에 세라믹필터 바로 아래에서 발생하는 확산공기를 제거하기 어려워 측정되는 추출수의 부피에 오차가 있을 수 있다. 본 연구에서는 한 세트의 시험기에서 시료를 이동시키지 않고 작은 매트릭석션에서부터 큰 매트릭석션에 이르기까지 연속적으로 함수특성곡선을 구할 수 있는 개선된 수정체적압력판(Modified Volumetric Pressure Plate Extractor, MVPPE)을 사용한 부피측정법을 제안하였으며, 시험과정과 시험결과를 서술하였다.

2. 기존 부피측정법의 원리 및 시험방법

2.1 체적압력판의 구조

그림 1에 기존 체적압력판에서 추출수의 부피를 측정하기 위하여 사용되는 부착물을 나타내었다(Soilmoisture Equipment Corp., 1985). 이 부착물은 흙의 건조과정과 습윤과정에 관련되는 함수특성곡선의 이력을 연구하기 위하여 사용될 수 있기 때문에 “이력 부착물(hysteresis attachments)”로 불린다(Fredlund and Rahardjo, 1993). 이력부착물은 에어트랩, 발라스트 튜브, 및 저장 뷰렛으로 구성되어 있다. 에어트랩은 세라믹 디스크를 통하여 확산될 수 있는 공기를 모으는데 사용된다. 에어트랩 상부에는 추출수의 부피를 측정하는데 참고가 되는 레벨마크가 표시되어있다. 발라스트 튜브는 대기압 상태에서 흙시료로부터 흘러나오거나 들어가는 추출수를 임시적으로 저장하는 수평 공간의 역할을 한다. 이 튜브에도 참고점으로서 레벨마크가 표시되어있다. 저장뷰렛은 단순히 에어트랩 또는 발라스트 튜브에 물을 공급하거나 시험도중 발생하는 발라스트 튜브내 여분의 물을 회수하는 역할을 한다. 따라서 매단계 시험 전후, 저장뷰렛내 물부피의 변화는 흙시료내 간극수의 부피변화와 같다.

2.2 체적압력판의 시험방법

시험과정은 다음과 같다. 시료링에 흙시료를 담아 포화된 세라믹 디스크 상부에 올려 놓는다. 시료를 포화시키고, 이력 부착물을 시험기에 연결시킨다. 저장뷰렛으로부터 물을 공급받아 에어트랩과 발라스트 튜브를 레벨마크까지 채운다. 시험에 앞서 연결튜브를 롤러로 눌러 왼쪽방향으로 이동시킴으로써 세라믹 디스크 바로 밑에 붙어있는 공기방울들을 씻어내어야 한다. “펌핑”으로 불리는 이러한 조치는 에어트랩의 물을 연결튜브를 통해 세라믹 디스크 하부의 파여진 홈을 따라 강제로 순환시킴으로써 씻어낸 공기방울들을 에어트랩에 모은다. 에어트랩에 갇힌 공기방울들은 레벨마크까지 수위를 조정함으로써 제거된다. 이러한 수위의 조정은 에어트랩 상부에 작은 진공압력을 가한 채 스톱코크를 개폐함으로써 이루어진다. 발라스트 튜브의 레벨마크의 위치를 세라믹 디스크의 표면레벨과 일치시킴으로써, 이력 부착물 내의 모든 물의 전수두를 영으로 동일하게 유지하여야 한다. 발라스트 튜브에는 다음 단계의 증가된 매트릭석션 하에서 흙시료로부터 추가적으로 추출될 물의 양을 가늠하여 충분한 공간을 확보하여야 하며, 통상적으로 발라스트 튜브에 저장뷰렛이 연결된 부분에서 오른쪽으로 10mm 떨어진 곳에 포지션마크를 하고 이보다 오른쪽 공간을 비워둔다.

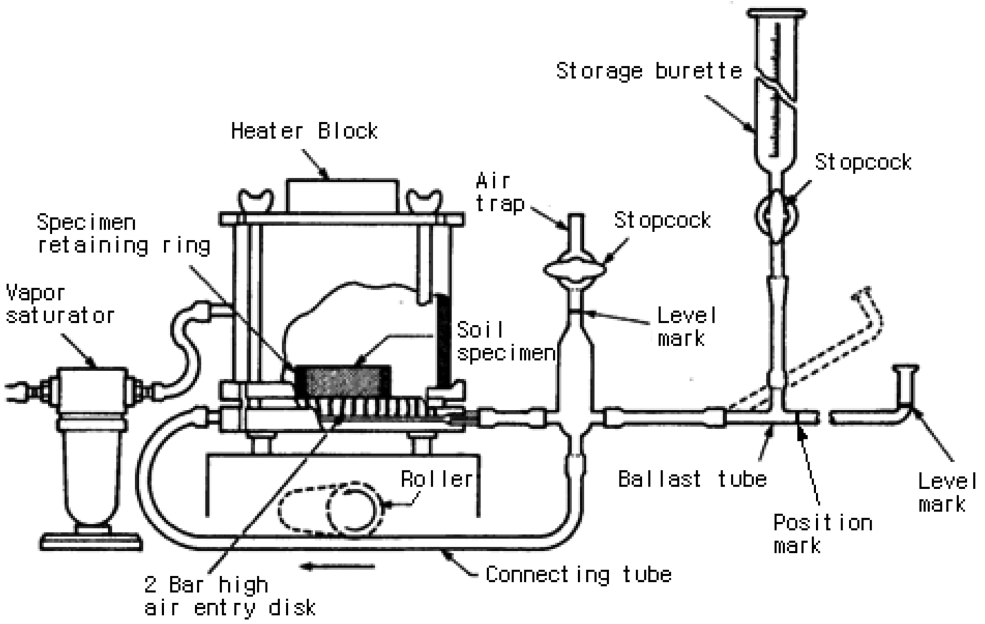

그림 1. 기존 체적압력판의 모식도(Soilmoisture Equipment Corp., 1985)

2.3 건조과정의 함수특성곡선

시험기 내에 작은 공기압력을 증가시켜 흙시료에 작은 매트릭석션을 가한다. 흙시료의 간극수는 세라믹 디스크를 통하여 발라스트 튜브로 추출되기 시작한다. 발라스트 튜브가 추출수로 꽉 차면 물을 저장뷰렛으로 이동시킨다. 이러한 이동은 저장뷰렛 상부에 작은 진공압력을 가한 상태에서 저장뷰렛의 상부 스톱코크를 조심스럽게 개폐함으로써 이루어진다. 흙시료로부터 추출되는 물의 이동은 가해진 매트릭석션 하에서 평형에 도달될 때 중단된다.

확산공기는 위에서 언급한 펌핑방법을 사용하여 세라믹 디스크 바로 밑에 파여있는 홈으로부터 주기적으로 제거된다. 시험 도중에 시험기내의 공기는 흙시료의 간극수와 세라믹 디스크의 물을 통하여 확산되어 용액 상태로 세라믹디스크를 통과한 후 세라믹디스크 바로 밑에 파여진 홈에서 대기압에 노출되면서 용액으로부터 공기방울을 생성한다. 이러한 확산공기는 발라스트 튜브에서 측정되는 추출수의 부피를 증가시켜 정확한 추출수의 부피측정을 방해하므로 주기적으로 제거되어야 한다. 또한 세라믹디스크 하부에 확산공기가 모여있으면 습윤과정에서 흙시료에 의하여 물이 빨려 올라가는 것을 방해한다.

매트릭석션을 증가시킬 때마다 위에서 언급한 과정을 건조과정 함수특성곡선이 완료될 때까지 반복한다. 2회에 걸친 연속적인 평형압력에 대하여 저장뷰렛내 물 부피변화를 통하여 그 흙의 함수비 계산에 필요한 자료를 얻는다.

2.4 습윤과정의 함수특성곡선

건조과정을 완료하자마자, 습윤과정의 시험을 이어서 할 수 있다. 시험기 내의 공기압력을 감소시킴으로써 매트릭석션을 감소시킨다. 공기압력의 감소는 발라스트 튜브로부터 흙시료 속으로 물의 흐름을 유발한다. 역방향 흐름에 필요한 물의 부피가 발라스트 튜브내 물의 부피를 초과할 경우, 저장뷰렛의 스톱코크를 조심스럽게 개폐하여 발라스트 튜브에 물을 공급하여야 한다. 발라스트 튜브로부터 흙시료로 물이 이동하는 것을 멈출 때 평형에 도달한 것이다. 이 때 에어트랩과 발라스트 튜브의 수위를 레벨마크에 각각 다시 맞춘 후, 저장뷰렛 눈금을 읽어 물부피 변화를 계산한다. 매트릭석션을 감소시킬 때마다 이 과정을 원하는 범위의 습윤과정 함수특성곡선이 얻어질 때까지 반복한다. 필요하다면, 연속적인 건조과정 및 습윤과정의 함수특성곡선을 주기적으로 측정할 수 있다.

마지막 매트릭석션에 상응하는 흙시료의 최종 함수비는 시험종료후에 측정된다. 최종 함수비와 이전 매트릭석션 사이에서의 물부피 변화를 사용하여 각 매트릭석션에 상응하는 함수비를 각각 계산한다.

3. 개선된 부피측정법의 원리 및 시험방법

3.1 개선된 체적압력판의 구조

개선된 체적압력판의 구조는 그림 2(a)와 같으며, 그림 1의 기존 시험장비 중에서 단지 이력부착물 시스템(에어 트랩, 발라스트 튜브, 저장뷰렛) 만을 개선하였다. 따라서 시료 및 시료링, 세라믹 디스크(high air entry disk) 등을 포함하는 체적압력판셀의 구조는 그림 1과 같다. 이력부착물 시스템에 대한 개선은 기존 장비의 에어트랩 상부에 물을 채운 폐쇄뷰렛을 꺼꾸로 연결하였고, 발라스트 튜브와 저장뷰렛 대신에 개방뷰렛을 스프링에 연결하여 상하로 이동가능한 스프링 지지대(캔틸레버)에 매달았다. 폐쇄뷰렛은 에어트랩을 통하여 모아진 확산공기의 부피를 측정하는데 사용되며, 개방뷰렛은 흙시료로부터 흘러나오거나 들어가는 추출수를 저장하는 역할하며 추출수의 부피를 측정하는데 사용된다. 그림 2와 그림 3에서 세라믹 디스크 표면을 기준으로 할 경우, 시험전 폐쇄뷰렛 상부 수위면에서의 압력수두는 $H_p = -h_{a1}$이며 위치수두는 $H_e = h_w + h_{a1}$이므로 전수두는 $H_t = H_e + H_p = (h_w + h_{a1}) + (-h_{a1}) = h_w$이며, 이때 폐쇄뷰렛 내 공기압력은 $u_{a1} = -\gamma_w h_{a1}$이다. 시험중 폐쇄뷰렛 상부 수위면에서의 압력수두와 위치수두는 확산공기의 유입으로 인하여 각각 $H_p = -h_{a2}$와 $H_e = h_w + h_{a2}$가 되므로 전수두는 $H_t = H_e + H_p = (h_w + h_{a1}) + (-h_{a1}) = h_w$가 된다. 이때 폐쇄뷰렛 내 공기압력은 $u_{a2} = -\gamma_w h_{a2}$이다. 한편 세라믹 디스크 표면에서의 압력수두와 위치수두는 시험전이나 시험중에 관계없이 각각 $H_p = h_w$와 $H_e = 0$이므로 전수두는 $H_t = H_e + H_p = h_w + 0 = h_w$가 되며, 개방뷰렛내 수위면에서의 압력수두와 위치수두는 시험전이나 시험중에 관계없이 각각 $H_p = 0$와 $H_e = h_w$이므로 전수두는 $H_t = H_e + H_p = 0 + h_w = h_w$가 된다. 따라서 그림 3에서 보는 바와 같이 세라믹 디스크 하부는 물론 폐쇄뷰렛과 개방뷰렛 내 모든 물의 전수두, H_t는 시험도중 항상 같은 값을 가지므로, 흙시료의 간극수는 오직 가해진 매트릭석션에 의해서만 이동된다. 매 단계 시험 전후, 개방뷰렛내 물부피의 변화는 흙시료내 간극수의 부피변화와 같다. 시험 도중 개방뷰렛의 수위가 항상 기준레벨에서 유지되려면, 흙시료로부터 개방뷰렛으로 물이 추출되는 건조과정시험에서는 스프링이 늘어나야 하는 반면에 개방뷰렛으로부터 흙시료로 물이 빨려 들어가는 습윤과정시험에서는 스프링이 줄어들어야 한다. 이러한 스프링의 상수, K는 다음 식을 사용하여(Grand Le and Rupert, 1955), 개방뷰렛의 수위가 기준레벨에서 ±10mm 이내의 변위를 유지되도록 구하였다;

$$K = \frac{Gd^4}{8ND^3} \tag{1}$$

여기서, K : 스프링 상수[N/mm]
G : 강성계수[N/mm^2]
d : 스프링 코일의 직경[mm]
N : 감긴 코일 수
D : 스프링의 평균 직경[mm]

3.2 개선된 체적압력판의 시험방법

시험과정은 다음과 같다. 시료링에 흙시료를 담아 포화된 세라믹 디스크 상부에 올려 놓는다. 시료를 포화시키고, 이력부착물을 시험기에 연결시킨다. 개방뷰렛에 물을 공급하여 에어트랩 상부까지 물을 가득 채우고 에어트랩 상부의 스톱코크를 잠근다. 폐쇄뷰렛 상부에 약간의 공간을 남기고 물을 채운 후 스톱코크를 잠근 채 에어트랩 상부에 꺼꾸로 연결한다. 에어트랩의 상부 스톱코크를 열고 이어서 폐쇄뷰렛의 스톱코크를 연다. 이때 폐쇄뷰렛 내의 공기는 두 뷰렛의 수

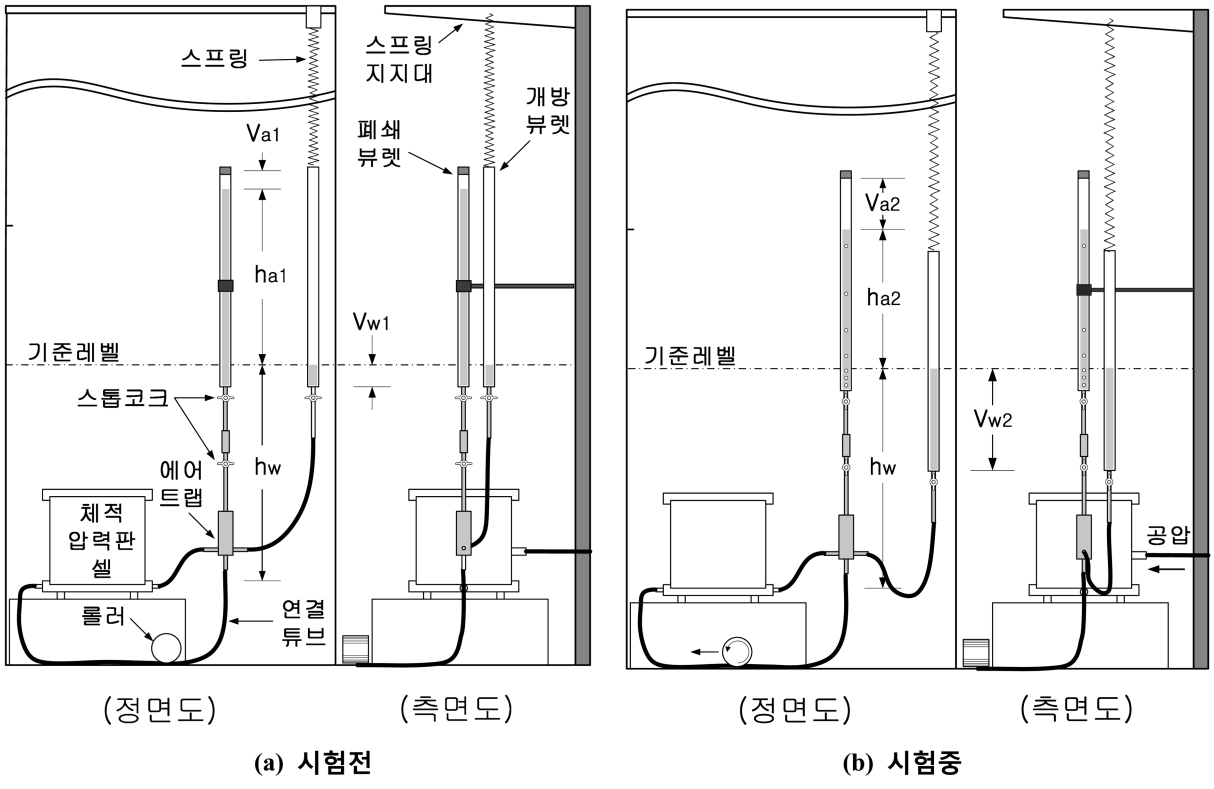

그림 2. 개선된 체적압력판의 모식도

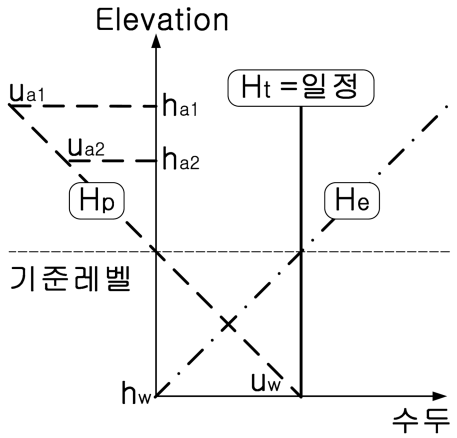

그림 3. 시험도중 뷰렛내 수두의 변화

위차이에 의해 발생하는 공기압력의 감소로 인하여 약간 팽창하며 이에 따라 폐쇄뷰렛의 수위는 약간 내려간다. 시험에 앞서 "펌핑"방법을 사용하여 에어트랩의 물을 연결튜브를 통해 세라믹 디스크 하부의 파여진 홈을 따라 물을 강제로 순환시킴으로써 씻어낸 공기방울들을 에어트랩에 연결된 폐쇄뷰렛 상부에 모은다. 스프링 지지대를 상하로 이동하여 개방뷰렛의 기준레벨을 세라믹 디스크의 표면레벨과 일치시킨다(그림 2에서 h_w=0). 개방뷰렛내에는 다음 단계의 증가된 매트릭석션 하에서 흙시료로부터 추가적으로 추출될 물의 양을 가늠하여 충분한 공간을 확보하여야 하며, 이를 위해 에어트랩의 수평밸브를 개폐하여 개방뷰렛의 수위를 하부로 낮춰 상부 공간을 비워둔다.

3.3 건조과정의 함수특성곡선

시험 초기에는 작은 매트릭석션을 정확하게 가하기 위하여, ASTM D 6836-02(2007)의 "Hanging column"(Method A) 방법을 사용한다. 이를 위하여 스프링 지지대를 아래로 이동하여 개방뷰렛의 기준레벨을 세라믹 디스크 아래로 필요한 만큼 낮춘다(그림 2에서 h_w<0)). 이때 세라믹 디스크 하부에는 $u_w = -\gamma_w h_w$ 크기의 부압력이 작용하며 이로 인해 흙시료의 간극수는 세라믹 디스크를 통하여 개방뷰렛으로 추출되기 시작한다. 개방뷰렛에 물이 유입됨에 따라 스프링은 그만큼 늘어나므로 개방뷰렛 내의 수위는 항상 기준레벨을 유지하게 된다. 만약 개방뷰렛 내의 수위가 기준레벨과 차이가 생기면 캔틸레버를 상하로 움직여 그 차이를 없앤다. 흙시료로부터 추출되는 물의 이동은 가해진 부압력하에서 평형에 도달될 때 중단된다. 시험 도중에 세라믹 디스크 하부에서 발생하는 확산공기는 위에서 언급한 펌핑방법을 사용하여 세라믹 디스크 바로 밑에 파여있는 홈으로부터 주기적으로 제거하여 폐쇄뷰렛에 모은 후 매 단계의 시험종료시 확산공기의 부피를 측정한다.

5kPa 이상의 큰 매트릭석션을 가할 때는 스프링 지지대를 위로 이동시켜 개방뷰렛의 기준레벨을 세라믹 디스크의 표면레벨과 일치시킨 다음($h_w = 0$, $u_w = 0$), 시험기내 공기압력(u_a)을 증가시켜 흙시료에 필요한 만큼의 매트릭석션($u_a - u_w = u_a$)을 가하여 시험을 한다.

매트릭석션을 증가시킬 때마다 위에서 언급한 과정을 건조과정 함수특성곡선이 완료될 때까지 반복한다. 2회에 걸친 연속적인 평형압력에 대하여 개방뷰렛내 물의 부피변화와 폐쇄뷰렛내의 확산공기의 부피변화를 통하여 그 흙의 함수비 계산에 필요한 자료를 얻는다. 이때 개방뷰렛으로 유입된 물의 부피변화(그림 2의 $\Delta V_w = V_{w2} - V_{w1}$)에는 폐쇄뷰렛에 확산공기가 모이면서 밀어낸 물의 부피(그림 2의 $\Delta V_a = V_{a2} - V_{a1}$)가 포함되어 있으므로 개방뷰렛내 물의 부피변화, ΔV_w에

서 폐쇄뷰렛내 확산공기의 부피변화, ΔV_a를 빼주어야 정확한 추출수의 부피, $\Delta V_w'$를 계산할 수 있다. 또한 확산공기의 부피변화를 계산할 때, 세라믹 디스크 하부의 공기압력과 폐쇄뷰렛내 공기압력이 다르므로 이에 따른 공기의 부피변화를 고려하여 다음과 같이 계산하여 보정된 부피변화, $\Delta V_a'$를 구한다:

$$\Delta V_w' = \Delta V_w - \Delta V_a' \quad (2)$$

여기서, $\Delta V_w'$: 추출수의 참부피

ΔV_w : 추출수의 겉보기 부피, $\Delta V_w = V_{w2} - V_{w1}$

$\Delta V_a'$: 보정된 확산공기 부피, $\Delta V_a' = \frac{\overline{u}_{a2} V_{a2} - \overline{u}_{a1} V_{a1}}{\overline{u}_w}$

$\overline{u}_{a1}$: 시험전 폐쇄뷰렛내 공기의 절대압력(그림 3)

h_{a1} : 시험전 기준레벨로부터 폐쇄뷰렛내 수위까지의 높이(그림 2a)

V_{a1} : 시험전 폐쇄뷰렛내 공기부피(그림 2a)

$\overline{u}_{a2}$: 시험종료시 폐쇄뷰렛내 공기의 절대압력(그림 3)

h_{a2} : 시험종료시 기준레벨로부터 폐쇄뷰렛내 수위까지의 높이(그림 2b)

V_{a2} : 시험종료시 폐쇄뷰렛내 공기부피(그림 2b)

$\overline{u}_w$: 세라믹 디스크 하부의 물의 절대압력(그림 3)

3.4 습윤과정의 함수특성곡선

건조과정을 완료하자마자, 습윤과정의 시험을 이어서 할 수 있다. 시험기 내의 공기압력을 감소시킴으로써 매트릭석션을 감소시킨다. 공기압력의 감소는 개방뷰렛으로부터 흙시료 속으로 물의 흐름을 유발한다. 역방향 흐름에 필요한 물의 부피가 개방뷰렛내 물의 부피를 초과할 경우, 개방뷰렛에 물을 공급하여야 한다. 개방뷰렛으로부터 흙시료로 물이 이동하는 것을 멈출 때 평형에 도달한 것이다. 이 때 개방뷰렛의 눈금을 읽어 물부피 변화를 계산한다. 매트릭석션을 감소시킬 때마다 이 과정을 원하는 범위의 습윤과정 함수특성곡선이 얻어질 때까지 반복한다. 필요하다면, 연속적인 건조과정 및 습윤과정의 함수특성곡선을 주기적으로 측정할 수 있다.

마지막 매트릭석션에 상응하는 흙시료의 최종 함수비는 시험종료후에 측정된다. 최종 함수비와 이전 매트릭석션 사이에서의 물부피 변화를 사용하여 각 매트릭석션에 상응하는 함수비를 각각 계산한다.

3.5 함수특성곡선 시험장비들의 특징 비교

2절과 3절에서 논의된 기존 체적압력판(VPPE)과 개선된 체적압력판(MVPPE)의 차이점과 상용 시험장비로서 무게측정법을 사용하는 템페셀(TPC)과 압력판(PPE)의 시험방법 및 특징을 비교하여 표 1에 정리하였다.

4. 시험결과와 토의

시험에 사용된 시료는 싱가폴에서 채취한 풍화잔류토로서 통일분류법에 의하면 ML로 분류된다. 본 시료는 Mazier sampler를 사용하여 채취된 불교란시료이며, 시료의 물성과 초기 조건을 표 2와 표 3에 각각 요약하였다.

4.1 함수특성곡선 시험결과

개선된 체적압력판(MVPPE)을 사용하여 건조과정-습윤과정-건조과정에 대한 함수특성곡선 시험을 실시한 결과를 그림 4, 5, 6에 나타내었다. 본 연구에 사용된 체력압력판의 세라믹 디스크의 공기함입값은 200kPa로서 시험 공기압은 최대 150kPa까지 가하였다. 그림 4에는 시험 도중에 세라믹 디스크를 통하여 확산되어 나온 공기의 부피를 나타내었다. 이때 발생하는 확산공기의 부피는 시험시간에 비례하므로 각 단계 마다 발생한 부피를 각 단계의 시험시간으로 나누어 단위시간당 부피로 표기하였다. 단위시간당 확산되는 공기의 부피는 매트릭석션의 크기에 비례함을 알 수 있다. 그림 5에는 각 단계 마다 개방뷰렛에서 측정된 겉보기 추출수의 부피로부터 각 단계 마다 발생한 확산공기의 부피를 뺀 순 추출수의 부피를 나타내었다.

그림 6에는 매트릭석션의 변화에 따른 추출수의 부피변화로부터 체적함수비의 변화를 건조과정-습윤과정-건조과정에

표 2. 풍화잔류토의 물성

내용	값
액성한계	52%
소성한계	31%
비중	2.66
모래	38%
실트	34%
점토	28%
통일분류법	ML

표 3. 시료의 초기 조건

내용	값
부피	106cm^3
현장 함수비	32.4%
습윤단위중량	1.67g/cm^3
간극비	1.11

표 1. 함수특성곡선 시험장비의 시험방법 및 특징 비교

시험장비	시험방법 ASTM-D6836-02	매트릭석션 범위	시료개수/시험기	시료교란 가능성	건조+ 습윤과정반복	측정 난이도
TPC	Method C	0-100kPa	단수	○	불가	◎
PPE	Method C	0-500kPa	복수	△	불가	○
VPPE	Method B	0-200kPa	단수	◎	가능	△
MVPPE	Method A & B	0-200kPa	단수	◎	가능	◎

◎양호, ○보통, △불량

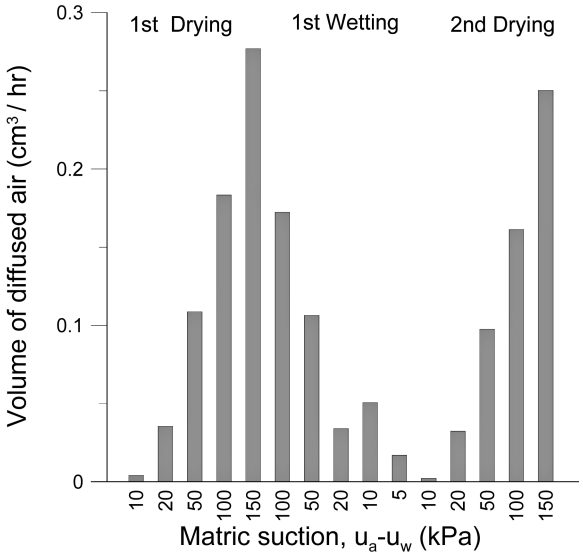

그림 4. 시험도중 세라믹 디스크를 통과하여 확산되는 공기의 부피

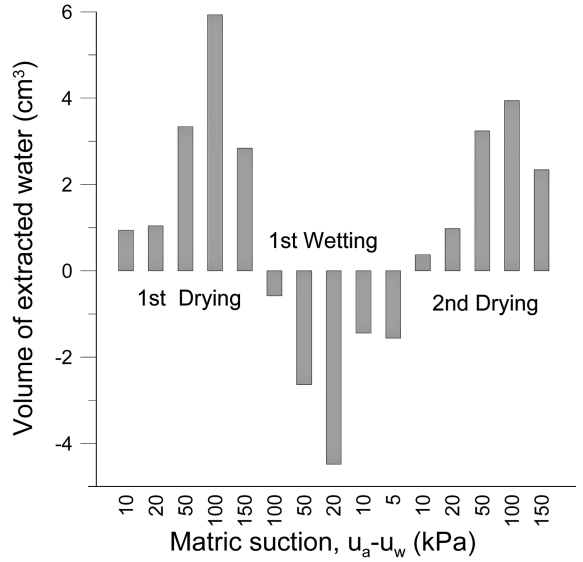

그림 5. 시험도중 발생한 순 추출수의 부피

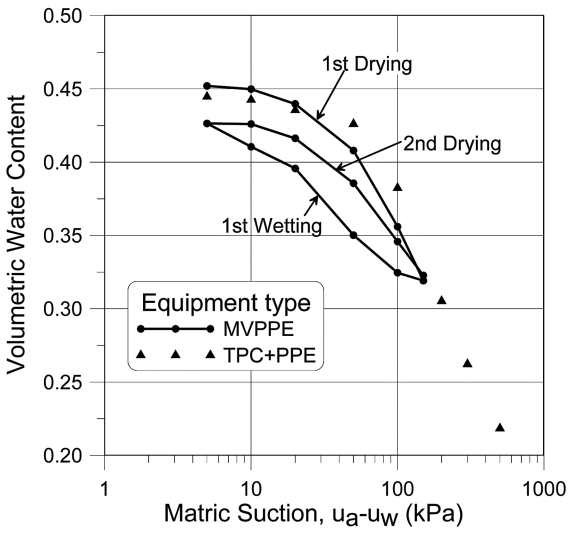

그림 6. 함수특성곡선의 시험결과

걸쳐 나타내었다. 참고로 이 그림에는 시추공내 다른 시료에 대하여 템페셀과 압력판을 사용하여 시험한 건조과정의 함수특성곡선을 함께 표시하였으며, 매트릭석션이 100kPa 보다 작은 경우에는 템페셀(TPC)을, 100~500kPa 범위에서는 압력판(PPE)을 사용하였다.

4.2 토의

체적압력판을 사용하여 함수특성곡선을 구할 경우, 추출수 부피는 반드시 확산공기 부피를 고려하여 보정되어야 한다. 기존 시험장비에서는 에어트랩에 모인 확산공기를 진공펌프를 사용하여 제거함으로써 보정하는 반면에, 개선된 시험장비에서는 폐쇄뷰렛에 모인 확산공기의 부피를 직접 측정하여 보정한다. 그러므로 개선된 시험장비로 함수특성곡선을 구할 경우, 확산공기의 부피측정은 매우 중요하다. 뷰렛 눈금읽기의 오차를 줄이기 위하여 폐쇄뷰렛과 개방뷰렛은 동일한 정밀도의 눈금을 갖는 뷰렛을 사용하여야 한다. 또한 개방뷰렛에서 추출수의 부피를 측정할 때 증발량을 고려하여야 한다. 따라서 시험기간 동안 뷰렛내 증발량을 측정하기 위하여 시험장소에 동일한 뷰렛을 추가로 설치하여 증발량을 측정하여야 한다. 뷰렛내 증발량은 시험실의 상대습도, 뷰렛의 단면적, 뷰렛내 수위까지의 깊이 등의 영향을 받는 것으로 조사되었다. 동일한 상대습도의 실내에서, 뷰렛의 단면적이 클수록, 뷰렛내 수위까지의 깊이가 얕을수록 뷰렛내 수위로부터의 증발량은 증가하였다. 기온 섭씨 25도, 상대습도 50%인 실내에서, 동일한 뷰렛내 수위까지의 깊이(0.24m)를 갖는 25cm^3, 50cm^3, 100cm^3 용량 뷰렛의 1일 증발량은 각각 0.018cm^3, 0.025cm^3, 0.046cm^{3}이었다. 각 뷰렛의 단면적, 0.71cm^2, 0.91cm^2, 1.67cm^{2}을 고려하면 1일 증발깊이는 각각 0.254mm, 0.275mm, 0.275mm로서 거의 동일하였다. 25cm^3 용량의 뷰렛에서 뷰렛내 수위까지의 깊이가 각각 0.24m와 0.08m일 때, 1일 증발량은 각각 0.018cm^{3}와 0.031cm^3 이었다. 따라서 개방뷰렛 상단에서 수위까지의 깊이가 증발량에 영향을 미침으로 각 단계 시험종료후 개방뷰렛내의 추출수를 주기적으로 배수함으로써 개방뷰렛내의 수위를 낮게 유지한다면 증발량을 크게 줄일 수 있다.

한편 개선된 시험장비와 기존 시험장비 모두 추출수의 부피변화를 뷰렛의 눈금에 의존하기 때문에 측정 정밀도는 전적으로 시험하는 사람의 경험에 달려있다. 따라서 체적압력판 시험의 정밀도는 동일한 사람에 의해 수행되어야 제고될 수 있다.

5. 결 론

불포화토의 중요한 물성인 건조과정과 습윤과정의 함수특성곡선을 구할 때 사용하는 기존 체적압력판 시스템의 복잡성과 지루한 측정작업을 개선하기 위하여 단순한 시스템의 시험장비를 개발하여 측정작업을 개선하였으며, 그 개선결과를 요약하면 다음과 같다:

1. 시험도중 시료내 간극수압(u_w)을 일정하게 유지하기 위하여, 기존 시험장비에서 사용하는 복잡한 이력부착물 시스템(에어트랩, 발라스트 튜브, 저장뷰렛, 진공펌프) 대신에 간단한 시스템(뷰렛과 스프링)을 도입함으로써 시험장비의

관리와 측정방법을 훨씬 단순화하였다.

2. 기존 시험장비는 ASTM D 6836-02의 Method B 한 종류의 시험방법만 적용할 수 있는 반면에, 개선된 시험장비는 ASTM D 6836-02의 Method A와 Method B 두 종류의 시험방법을 모두 적용할 수 있다.

참고문헌

ASTM Standard D 6836-02. (2007) Standard test Methods for: Determination of the Soil-Water Characteristic Curve for Desorption Using a Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, and/or Centrifuge. *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.09, ASTM D18 on Soil and Rocks.

Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993) *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, Wiley, New York, pp. 134-148.

Grand Le & Rupert (Editor) (1955) *The New American Machinist's Handbook*, McGraw-Hill Book Company, New York.

Leong, E.C., Tripathy, S., and Rahardjo, H. (2004) A modified pressure plate apparatus. *Geotechnical Testing Journal, ASTM International*, May, Vol. 27, No. 3, pp. 322–331.

Padilla, J.M., Perera, Y.Y., Houston, W.N., and Fredlund, D.G. (2005) A new soil-water characteristic curve device, *Proceedings of Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics – An International Symposium*, EXPERUS 2005, Trento, Italy, pp. 15-22.

Soilmoisture Equipment Corp. (1985) *Commercial Publications*, P.O.Box 30025, Santa Barbara, CA.

(접수일: 2010.1.27/심사일: 2010.3.11/심사완료일: 2010.4.13)