

연속 가압 함수특성 시험 평가에 관한 연구

Assessment of Continuous Pressurization Method for Soil-water Characteristic Curve

박 현 수¹ Park, Hyun-Su 김 병 수² Kim, Byeong-Su
이 어 령³ Lee, Eo-Ryeong 박 성 완⁴ Park, Seong-Wan

Abstract

The soil-water characteristic curve (SWCC) plays an important role in determining the soil suction parameters required to predict the seepage or shear behaviors of unsaturated soils. In addition, path dependency of the SWCC affects the mechanical and hydrologic behaviors. In general, there is a disadvantage that it takes a long time to measure both the drying and wetting paths of the SWCC by a stepwise pressurization method. Thus, the continuous pressurization method as an improved testing method for the SWCC was suggested, and the testing time for two paths of the SWCC was significantly shorter than the conventional methods. For the applicability evaluation of this method, the results of the SWCC obtained by the stepwise pressurization method and the evaporation method in this study were compared to the result obtained from this method. As a result, it was found that the difference among three methods was negligible, and the testing time of the continuous pressurization method was greatly decreased. Therefore, it can be said that it is possible to quickly and accurately measure the SWCC under various conditions by the continuous pressurization method.

요 지

함수특성 곡선은 불포화 지반의 침투 또는 전단 거동 예측을 위해 필요한 입력 변수 중 하나이며, 불포화 함수특성의 이력현상에 따라 다른 거동을 보이기 때문에 건조과정과 습윤과정이 고려되어야 한다. 보편적으로 단계적 가압식을 이용하여 함수특성 곡선을 획득하지만, 함수특성 곡선의 건조과정과 습윤과정을 모두 측정하기 위해서는 오랜 시간 소요된다는 단점이 있다. 연속 가압시험법은 이러한 단점이 개선되었으며, 기존의 시험 방법보다 측정시간이 크게 단축되는 결과가 나타났다. 하지만, 새롭게 제안된 연속 가압시험법의 결괏값에 대한 검증이 부족한 상황이다. 이에 본 연구에서는 연속 가압방법으로 획득한 함수특성 곡선을 기존의 시험법인 단계 가압방법과 증발방법의 결과와 비교하였다. 비교 결과, 서로 다른 시험법으로 획득한 함수특성 곡선과 차이가 거의 존재하지 않았으며, 측정시간이 크게 단축되는 결과를 보였다. 따라서, 연속 가압방법을 통하여 다양한 조건에서의 함수특성 곡선을 빠르고 정확하게 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

Keywords : Soil-water characteristic curve (SWCC), Continuous pressurization method, Drying and wetting path

1 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook Univ.)

2 정희원, 오카야마 국립대학교 조교수 (Member, Assistant Prof., Graduate School of Environment & Life Science, Okayama Univ., Japan)

3 비희원, 단국대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook Univ.)

4 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environment Eng., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3472, Fax: +82-31-8021-7213, spark@dankook.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

함수특성 곡선(soil water characteristic curve, SWCC)은 흡수력과 함수비(또는 체적 함수비)의 관계를 나타내며, 지반으로부터 물이 증발하는 건조과정과 지반으로 물이 침투하는 습윤과정으로 나뉜다. 두 곡선 사이에는 이력현상이 존재하여, 동일 함수비에서 다른 흡수력을 갖는 특징이 있다. 불포화 함수특성 곡선은 불포화 지반의 침투 또는 전단 거동을 예측하는 데 필요한 입력 변수 중 하나이며, 이력현상으로 인해 불포화 지반의 침투 시와 증발 시 거동이 다르게 예측되기 때문에 두 곡선을 획득하여 현장 조건에 맞게 적용해야 한다(Park et al., 2017).

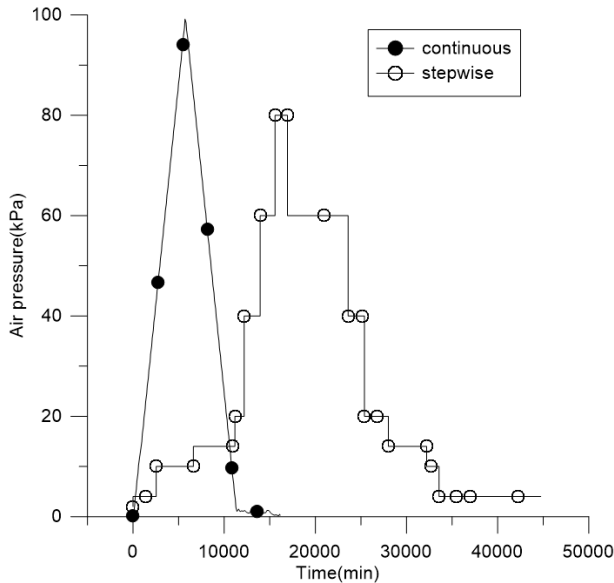
함수특성 곡선을 획득하기 위해 사용되는 일반적인 시험 방법은 Hanging column, Pressure extractor, Chilled mirror hygrometer, Filter paper, Tensiometer 등이 있다(Hilf, 1956; Spanner, 1951; Gee et al., 1992; Houston et al., 1994; Likos and Lu, 2003). 이러한 시험법은 많은 연구자에 의해서 사용되고 있지만, 시험법이 복잡하고, 획득하는 데에 시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 최근에는 이러한 문제점을 보완하기 위해서 다양한 시험법이 개발되고 있으며, TDR(Time Domain Reflectometry) 또는 텐시오미터(Tensiometer)와 같은 측정 장비를 시료 내부에 설치하여 흡수력과 체적 함수비를 정확하게 측정하고 자동 측정시스템으로 측정이 편리해지고 있다(Song et al., 2010; Schindler et al., 2012; Wayllace and Lu, 2012; Hatakeyama et al., 2015; Hong et al., 2016). Abe et al.(2006)은 텐시오미터를 적용하는 것뿐만 아니라 연속 가압방법이라는 새로운 개념의 함수특성 시험법을 제시하였으며, 이는 공기압을 단계적으로 가압하지 않고 연속적으로 가압한다는 점에서 다른 시험법과 큰 차이가 존재한다. 하지만, 이는 시료에 텐시오미터를 수평으로 삽입하는 방법이었기 때문에 텐시오미터 삽입이 어렵고 삽입 시 교란이 될 가능성이 컸으며, 텐시오미터 삽입 시 시료 용기의 측면에 매번 실리콘 접착제를 사용하여야 하는 비효율적인 측면으로 인해 널리 사용되지 못했다(Hatakeyama et al., 2015). Hatakeyama et al.(2015)는 이러한 단점을 보완하여 수직으로 텐시오미터가 삽입될 수 있도록 하였고, 단계 가압방법과 연속 가압방법에 따른 비교를 수행하였다. 하지만, 이는 기존의 정량화된 시험 방법과의 비교가 이뤄지지 않아 연속 가압방법이 기존의 시험법에 비해 함수특성 곡선을 정

확하게 측정하는지에 대한 논의는 여전히 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 가장 일반적으로 사용되는 단계 가압방법과 이를 개선한 연속 가압방법, 그리고 자연상태에서 흡수력이 변화하는 원리와 가장 유사한 증발방법으로부터 얻어진 결과의 비교를 통해 연속 가압방법과 기존의 시험 방법의 차이를 확인하였고, 적용 가능성에 대하여 알아보았다.

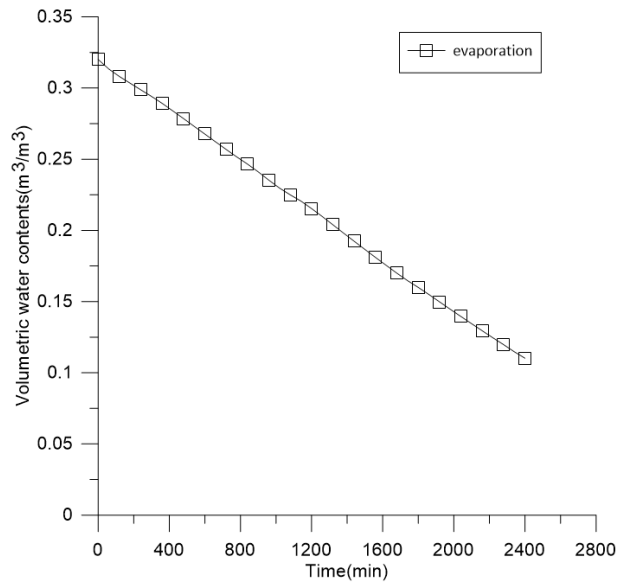
2. 함수특성 제어 방법

함수특성 곡선은 시료의 밀도, 입도 분포 등에 따라 시료가 갖는 간극 구조가 달라서 동일한 포화도에서 흡수력이 다르게 측정된다(Mualem, 1976; Bachmann and van der Ploeg, 2002). 따라서, 시료의 입도 분포, 밀도 등과 같이 각 지반의 조건에 맞는 함수특성 곡선을 획득하여 다양한 불포화 지반의 공학적 문제를 해결해야 한다.

함수특성을 획득하는 방법은 다양하게 존재하며, 크게 흡수력을 제어하여 획득하는 방법과 함수비를 제어하여 획득하는 방법으로 구분할 수 있다(Liu et al., 2016). 일반적으로 가장 많이 사용되는 방법은 흡수력을 제어하는 방법이며, 이는 시료에 공기압을 가하여 시료로부터 배출되는 유체의 양을 측정하여 함수특성 곡선을 획득하게 된다. 공기압을 가압하는 방법은 기존에는 단계 가압방법(stepwise pressurization method)만이 존재하였으나, 최근에 연속 가압방법(continuous pressurization method)이 추가되어 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 단계 가압방법은 Fig. 1(a)와 같이 단계적으로 공기압을 가압하고, 가입된 공기압에 의해 시료 내부에서 발생하는 과잉 간극수압 또는 배출되는 유체의 변화량이 “0”이 될 때까지 유지한 후에 다음의 공기압을 가하여 주는 방법이다. 흡수력은 공기압과 간극수압의 차로 얻을 수 있으며, 이때, 간극수압은 “0”이 되기 때문에 공기압의 크기가 흡수력이라고 할 수 있다. 또한, 함수특성 곡선은 배출되는 유량을 측정하여 획득할 수 있으며, 이를 통하여 함수특성 곡선을 획득하게 된다. 반면에, 연속 가압방법은 Fig. 1(a)와 같이 공기압을 일정한 속도로 증가시키는 방법이며, 시료 내부에 텐시오미터를 삽입하여 간극수압의 변화를 측정함으로써, 공기압과 간극수압의 차로 흡수력을 획득하기 때문에 시료 내부에 발생하는 간극수압이 “0”이 될 때까지 유지해 줄 필요가 없다(Kato et al., 2016). 함수비 변화는 가압과정에 따라 배출되는 유량을 측정하여 시료의 체적 함수비를 계산하여 주며, 이



(a) Stepwise and continuous pressurization methods



(b) Evaporation method

Fig. 1. Soil-water characteristic control method according to time

렇게 계산된 체적 함수비와 흡수력의 관계를 통하여 함수특성 곡선을 획득하게 된다. 따라서, 연속 가압방법은 간극수압이 “0”이 될 때까지 기다릴 필요가 없으므로, 단계 가압방법보다 함수특성 곡선을 획득하는 데에 필요한 소요시간을 단축할 수 있다.

함수비 제어 방법은 Fig. 1(b)와 같이 함수비 변화에 따른 흡수력 변화를 측정하여 함수특성 곡선을 획득하는 방법이다(Schindler and Muller, 1980). 이는 포화된 시료를 상온에 두어 습도 차이로 인해 시료의 함수비가 감소하고, 감소한 함수비에 따른 흡수력을 측정하여 함수특성 곡선을 획득하는 방법이다. 흡수력은 공기압과 간극수압의 차로 획득하며, 여기서 공기압은 “0”이라 가정하므로 간극수압이 흡수력이 된다고 할 수 있다. 또한, 함수특성 곡선은 시료의 무게가 감소하는 양을 바탕으로 측정하게 된다. 이 방법은 기존의 가압방법에 비해 실제 지반에서 발생하는 원리를 적용하였기 때문에 가압방법보다 자연적으로 건조과정을 획득하는 방법이라고 할 수 있다(Toll et al., 2013).

3. 텐시오미터를 통한 흡수력 측정

지반의 흡수력을 측정하는 방법은 간접적인 방법과 직접적인 방법이 있으며, 간접적인 방법에는 Filter paper와 Thermal conductivity 센서를 이용하는 방법이 있고, 직접적인 방법에는 텐시오미터가 있다(Fredlund and Rahardjo,

1993). 간접적인 방법의 경우, 보정 과정이 필요하며, 이러한 보정 과정은 만족할만한 신뢰도를 갖고 있지 않다. 반면에, 텐시오미터와 같이 직접 측정하는 방법은 간접 측정 방법보다 사용이 쉽고, 신뢰도가 높은 결과를 제공한다(Trantino and Mongiovi, 2001). 따라서, 지반의 흡수력을 정확하게 측정하기 위해 텐시오미터가 널리 활용되고 있다(Singh and Kuriyan, 2003; Sun et al., 2010; Lourenco et al., 2011). 일반적으로 텐시오미터는 세라믹 디스크와 수분을 담아두는 공간과 압력 센서로 이뤄지며, 흙과 세라믹 디스크 내부에 존재하는 물의 상대적인 압력 차이로 인해 텐시오미터 내부의 물이 흙으로 유출됨으로써 부압이 발생하고, 이를 압력 센서로 측정하여 흡수력을 획득하게 된다(Stannard, 1992). 텐시오미터는 일반적으로 100kPa까지 측정할 수 있으며, 이는 100kPa 이상의 압력에서는 텐시오미터 내부에 캐비테이션(Cavitation)이 발생하여 측정할 수 없기 때문이다. 캐비테이션은 유체 내에 압력 차이에 의해 공동이 생기는 현상을 말하며 대부분 세라믹 디스크 안에 존재하는 공기가 압력 차이로 인해 발생하게 된다. 이를 최소화하기 위해서는 높은 포화도를 갖도록 하여야 한다(Trantino and Mongiovi, 2001). 이를 보완하여 1500kPa까지 측정이 가능한 텐시오미터가 개발되었지만, 현재까지 개발된 기계의 크기가 크기 때문에 시료의 치수가 증가하여야 한다. 따라서, 실내시험에 사용되는 텐시오미터는 100kPa까지 측정이 가능한 장치가 사용되고 있다.

4. 시험 방법

연속 가압방법을 통해 획득한 함수특성 곡선을 다양한 시험법과 비교하기 위해서 단계 가압법과 증발법을 통해 획득한 결과를 비교하였다. 시험에 사용된 시료는 Table 1과 같으며, 단일 입경으로 존재하는 주문진 모래와 함수특성 곡선의 세립분이 함유된 풍화토를 사용하였으며, 시료의 밀도와 초기 함수비는 주문진 모래의 경우 상대밀도 80%로 성형하였으며, 풍화토의 경우 경기도 양평 지역 지반의 조건을 적용하였다. 각 시험에 사용된 시료의 크기는 지름과 높이가 각각 다르며, 단계 가압방법은 지름이 6.3cm에 높이가 3.5cm이고, 연속 가압방법은 지름이 5cm에 높이가 5cm이며, 증발방법은 지름이 8cm에 높이가 5cm이다.

단계 가압방법은 현장의 밀도와 함수비로 생성된 시료를 완전히 포화시킨 뒤에 Fig. 2(a)와 같이 시료를 거치한 뒤에 상부에서 공기압을 단계적으로 변화시켰다. 건조과정은 공기압을 증가시키고 습윤과정은 공기압을 감소시켰으며, 배수량은 하부의 세라믹 디스크와 연결된 뷰렛을 통하여 측정하였다. 또한, 단계 가압방법의

경우, 세라믹 디스크에 따라서 최대 가할 수 있는 공기압이 달라지며, 세라믹 디스크의 공기 함유도에 따라 투수 계수가 다르므로 그에 따른 영향이 있을 것으로 판단되었다. 따라서, 단계 가압방법 이외의 텐시오미터를 사용하는 실험에서 1bar(약 100kPa)의 세라믹 디스크를 사용하므로 동일한 조건의 세라믹 디스크를 사용하였다. 또한, 앞에서 언급된 바와 같이 세라믹 디스크가 완전히 포화 되지 않으면 캐비테이션이 발생할 수 있으므로 이를 방지하기 위해서 진공 펌프를 사용하여 세라믹 디스크의 공기를 최대한 제거해 주었다.

연속 가압방법은 현장의 밀도와 함수비 조건으로 시료를 제작하고, 제작된 시료를 완전히 포화시킨 뒤, 시료 하부에 텐시오미터가 삽입될 수 있도록 같은 크기의 공간을 만들었다. 이는 Fig. 2(b)과 같이 연속 가압방법은 텐시오미터를 활용하며, 텐시오미터를 시료 중앙부에 삽입하기 때문에 이러한 공간을 만드는 작업이 필요하다. 또한, 텐시오미터를 비롯한 모든 배수 경로가 포화 될 수 있도록 포화 과정을 수행하였다. 포화 과정 후, 형성된 공간에 텐시오미터를 삽입하고 안정화 단계를 마친 뒤에 공기압을 가하였다. 공기압의 주입 속도는

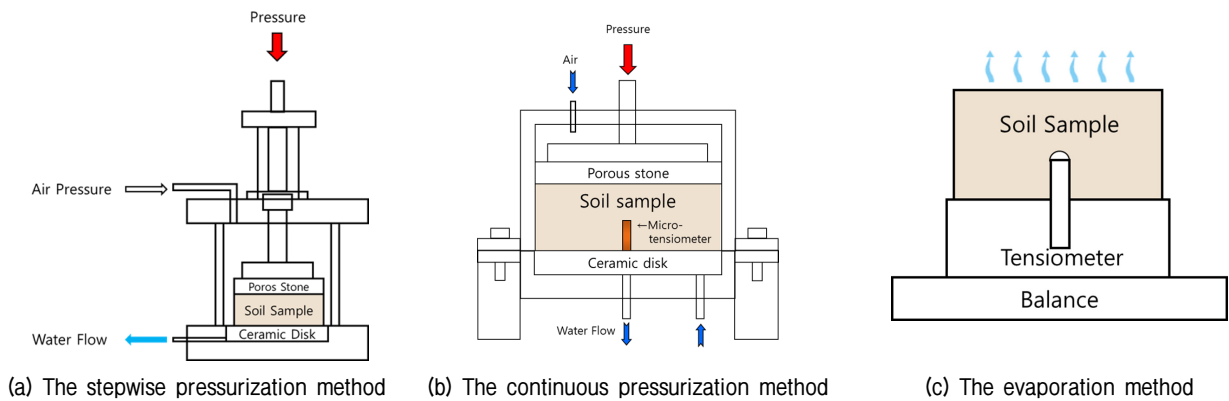


Fig. 2. Diagram of SWCC test method

Table 1. Physical properties of a soil sample

Properties	USCS	SP (Jumunjin)	SP (Weathered soil)
Percent passing weight 10% diameter (mm)	D ₁₀	0.44	1.70
Percent passing weight 30% diameter (mm)	D ₃₀	0.53	0.43
Percent passing weight 60% diameter (mm)	D ₆₀	0.67	0.17
C _u		1.52	10.00
C _c		0.96	0.64
G _s		2.64	2.70
Water content, <i>w</i> (%)		14.28	7.38
Dry unit weight, ρ _d (t/m ³)		1.54	1.62

1.02kPa/hr로 가하였으며, 최대 주입 압력은 주문진 모래의 경우 50kPa, 풍화토의 경우 100kPa까지 가하여 주었다. 시료에 가한 공기압의 속도는 표준사를 통해 수행된 시험결과를 바탕으로 결정되었으며, 표준사의 경우 4.164kPa/hr과 2.082kPa/hr의 속도로 시험을 수행하였을 때의 함수특성 곡선의 차이가 존재하지 않았다. 하지만, 현장 시료의 경우 세립분이 일부 포함되어 있으므로 표준사에 적용된 가압 속도의 절반에 도달하는 속도를 적용하였다. 건조과정이 종료된 이후에 같은 속도로 공기압을 0kPa까지 감소시켜주며, 감소시킨 이후 약 3일 정도의 시간 동안 공기압을 0kPa로 유지해 습윤과정을 획득하였다. 이는 공기압이 0kPa이 된 이후에도 간극수압이 존재하기 때문에 간극수압이 0kPa이 될 때까지 유지하였다. 공기압에 의해 배출된 배수량은 전자저울을 통해 실시간으로 측정되며, 흡수력 변화는 공기압과 텐시오미터를 통해 획득한 간극수압의 차로 획득된다.

증발방법은 연속 가압방법과 같이 텐시오미터를 사용하기 때문에 Fig. 2(c)와 같이 시료를 형성하고 포화시킨 후, 텐시오미터 삽입공간을 만들고, 그 안에 삽입하였다. 텐시오미터가 삽입된 시료를 저울 위에 거치한 뒤, 시료를 상온에 2~3일 정도 내버려 두었다. 시료 내에서 변화하는 함수비의 변화는 전자저울에서 변화하는 함수량을 측정하여 획득하게 되며, 간극수압 즉, 흡수력은 텐시오미터로 측정된다. 또한, 증발방법을 통하여 습윤과정을 획득하기 위해서는 시료 표면에 물을 주기적으로 주입할 수 있는 추가적인 장비가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 증발방법을 통하여 건조과정에 대한 함수특성만을 측정하여 비교하였다.

5. 함수특성 시험결과

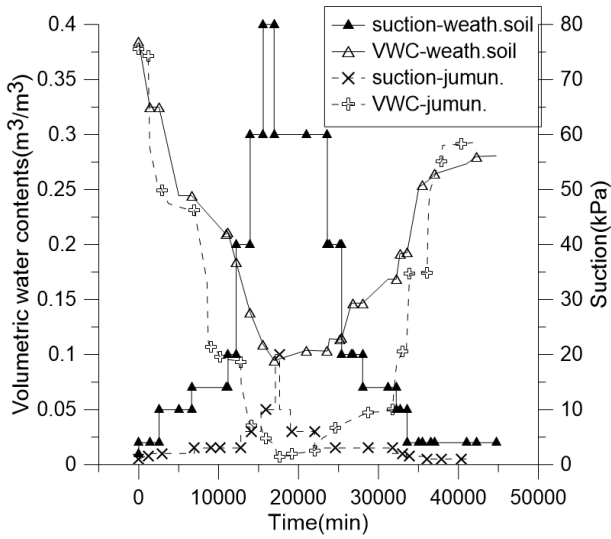
5.1 단계 및 연속 가압방법 결과

단계 가압방법에서 주문진 모래의 건조과정은 약 293시간(12일)이 소요되었으며, 풍화토는 약 282시간(약 12일)이 소요되었다. 습윤과정은 주문진 모래의 경우 약 402시간(약 16일)이 소요되었으며, 풍화토는 약 463시간(약 20일)이 소요되었다. 반면, 연속 가압방법에서 주문진 모래의 건조과정은 약 18시간(약 1일)이 소요되었으며, 풍화토는 약 97시간(약 5일)이 소요되었다. 습윤과정은 주문진 모래에서 약 166시간(약 7일)이 소요되었으며, 풍화토는 약 198시간(약 9일)이 소요되었다. 또

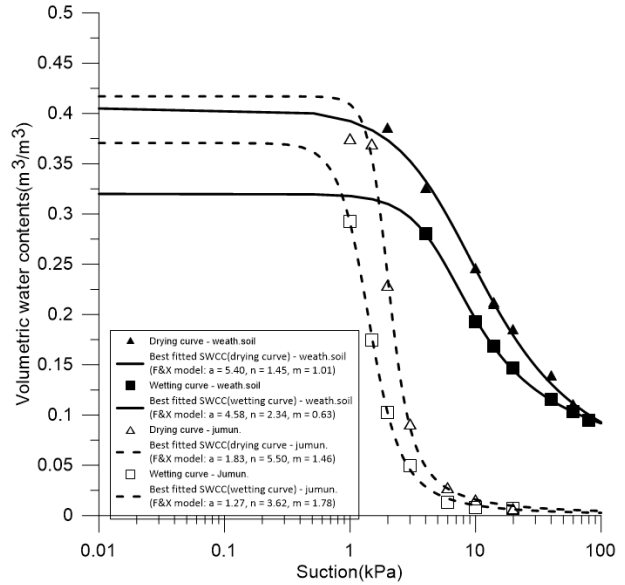
한, 증발방법의 건조과정을 획득하는 데에는 주문진 모래에서는 약 117시간(약 5일)이 소요되었으며, 풍화토에서는 약 40시간(약 2일)이 소요되었다. 주문진 모래의 경우 건조과정을 획득하는 과정에서 가장 작은 시간을 보인 것은 연속 가압방법이며, 풍화토에서는 증발방법이 가장 작은 측정시간을 보였다. 이러한 차이는 주문진 모래에서 함수비가 증발하는 시간보다 연속 가압 속도가 빠르기 때문이다. 따라서, 연속 가압방법의 경우 속도 조절을 통하여 단시간에 함수 특성 곡선을 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

단계 가압방법을 통해 획득한 시간에 따른 흡수력과 함수특성 곡선의 변화는 Fig. 3(a)와 같다. 그림에서 보이는 것과 같이 주문진 모래는 20kPa까지 공기압이 가하여 졌으며, 풍화토는 80kPa까지 공기압이 가해졌다. 각 시료에 따라 체적 함수비가 모래의 경우 0.041까지 감소하였으며, 풍화토에서는 0.095까지 감소하였다. 습윤과정은 주문진 모래의 경우 1kPa까지 감소하였으며, 풍화토는 4kPa까지 감소시켰다. 풍화토의 함수력이 2kPa인 값에서 함수특성 곡선이 갑자기 상승하는 결과를 보였으며, 시료를 해체한 결과 시료가 압축되어 부피가 감소하고 시료 밖으로 물이 유출된 결과를 보였다. 따라서, 이는 실험 오차라고 판단하였으며, 이에 4kPa까지의 데이터만을 비교하였다. 또한, 건조과정과 습윤과정의 초기 체적 함수비는 모래의 경우 0.085의 차이를 보였으며, 풍화토에서는 약 0.1 정도의 차이가 나타났다. 따라서, 두 시료 모두 이력현상이 크지 않은 것을 볼 수 있었다.

연속 가압방법에 따른 함수특성은 Fig. 4와 같으며, 주문진 모래의 경우 최대 40kPa까지 가압하였으며, 풍화토는 최대 100kPa까지 가압하였다. 체적 함수비는 주문진 모래의 경우 0.073까지 감소하였으며, 풍화토는 0.109까지 감소하였다. 주문진 모래의 경우 습윤과정에서 흡수력의 변동이 큰 것을 볼 수 있으며, 이는 텐시오미터가 0.1 정도의 오차범위를 갖고 있어 낮은 흡수력 구간에서 상대적으로 오차가 많이 발생하였다고 판단됩니다. 반면에, 풍화토의 경우 건조과정에서 약 3kPa 부근까지는 공기압이 증가함에 따라 함수특성 곡선의 변화가 거의 없는 경향을 보였으며, 공기압 3kPa 이후에 약 30kPa 부근까지 함수특성 곡선의 변화가 큰 경향을 보였다. 30kPa 이후에는 함수특성 곡선의 변화가 점차 감소하며, 잔류구간에 도달하는 것을 볼 수 있다. 반면에 습윤과정의 경우 공기압이 0kPa에 도달할 때까지 함수

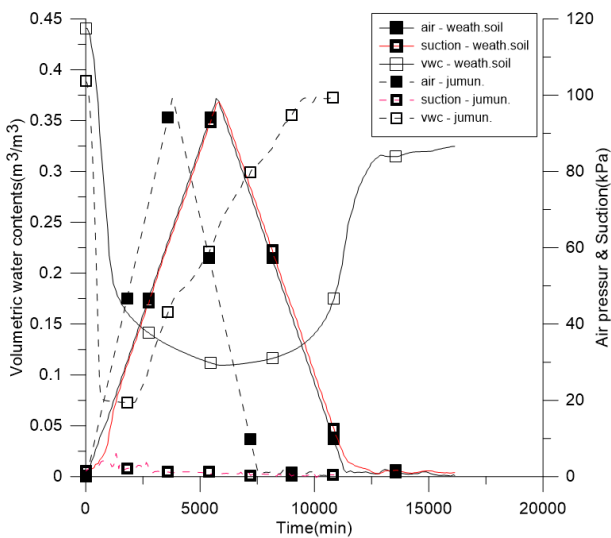


(a) Change of suction and volumetric water content over time

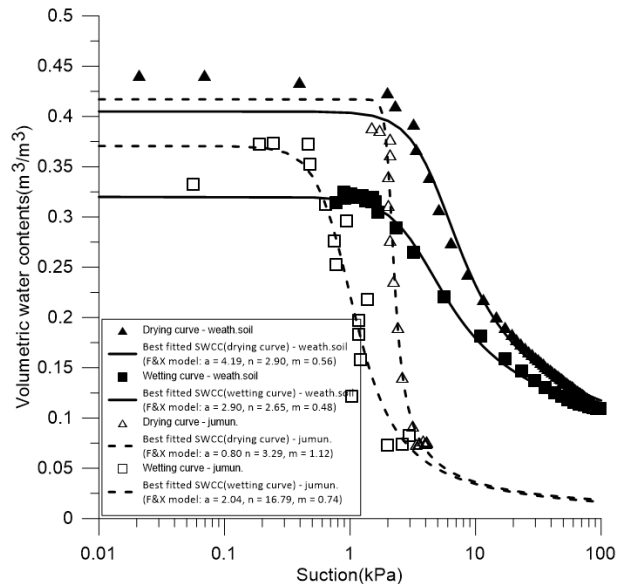


(b) Result of the SWCC

Fig. 3. The SWCC obtained by the stepwise pressurization method (F&X model is proposed by Fredlund and Xing (1994))



(a) Change of suction and volumetric water content over time



(b) Result of the SWCC

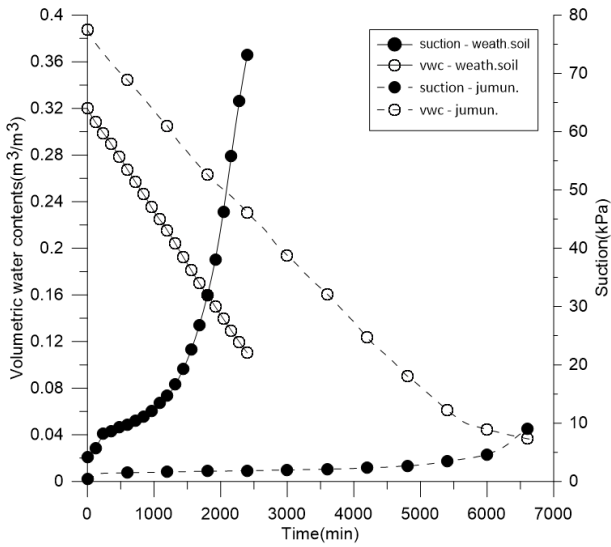
Fig. 4. The SWCC obtained by the continuous pressurization method (F&X model is proposed by Fredlund and Xing (1994))

특성 곡선의 변화가 작지만, 0kPa에 가까워질수록 함수 특성 곡선의 변화가 크게 발생하였으며, 0kPa에 도달한 이후에는 함수특성 곡선의 변화가 가장 크게 변화하였다. 이후에 공기압과 간극수압의 차이가 작아지므로 인해 흡수력이 감소하면서 함수특성 곡선의 변화가 작아지는 경향을 보였다. 기존의 단계 가압방법의 경우, 흡수력 변화에 따른 함수특성 곡선의 변화가 어느 흡수력에서 변화하는지를 판단하기는 어렵지만, 연속 가압방법의 경우, 이를 정확하게 확인할 수 있다는 장점이 있

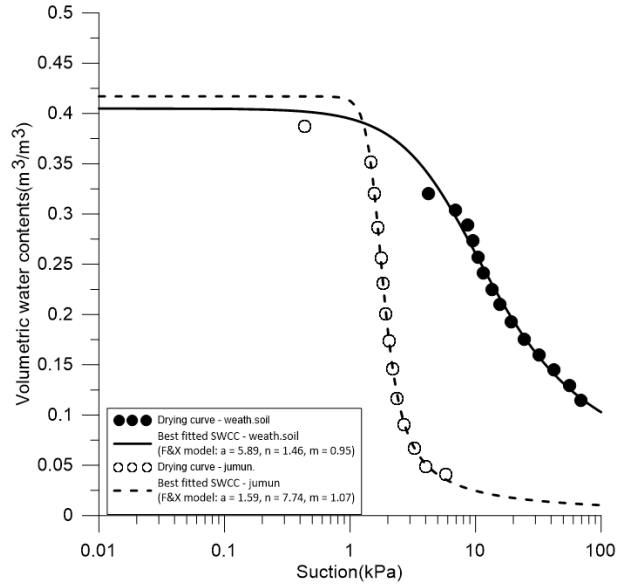
다. 따라서, 연속 가압방법에서는 함수특성 곡선의 중요한 인자 중의 하나인 공기 함입값(air entry value, AEV)과 잔류체적 함수비를 정확하게 확인할 수 있다고 판단된다.

5.2 증발방법 결과

증발방법을 통하여 획득한 함수특성 곡선은 Fig. 5와 같으며, 주문진 모래의 경우 흡수력이 최대 9kPa까지 측



(a) Change of suction and volumetric water content over time



(b) Soil-water characteristic curve

Fig. 5. SWCC obtained by the evaporation method (F&X model is proposed by Fredlund and Xing (1994))

정되었으며, 풍화토의 경우 최대 73kPa까지 측정되었다. 주문진 모래는 체적 함수비가 0.04까지 감소하였으며, 풍화토는 0.115까지 감소하였다. 증발방법은 가압법과는 다르게 함수비 변화에 따른 흡수력을 측정하기 때문에 Fig. 5와 같이 체적 함수비가 일정하게 변화하고, 흡수력이 비선형의 형태로 변화하였다. 모래의 경우 약 4kPa까지 흡수력이 일정하게 증가하였고 그 이후에는 기울기가 급격하게 증가하는 경향을 보였다. 풍화토의 경우 흡수력이 약 10kPa까지 일정하게 증가하였으며, 10kPa 이후에서 흡수력의 변화가 크게 변화하였다. 모래의 경우 잔류체적 함수비가 정확하게 측정되었으나, 풍화토에서는 완전한 수렴이 나타나지 않았다. 이는 흡수력이 100kPa 이후에도 체적 함수비가 감소하지만 캐비테이션의 영향으로 흡수력의 변화가 측정되지 않았기 때문이다.

5.3 각 시험법의 건조 및 습윤과정 비교 결과

Fig. 6은 각 시험법으로 획득한 건조과정 함수특성 곡선을 비교한 그래프이다. 그림에서 나타나는 바와 같이 각 건조과정은 초기 체적 함수비가 차이를 갖고 있지만, AEV 이상의 흡수력에서부터 차이가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이처럼 초기 체적 함수비의 차이가 발생하는 이유는 단계 가압방법의 경우 포화도가 약 95%이며, 연속 가압방법의 경우 포화도가 약 109%로 과포화되었고 증발법은 약 80%의 초기 포화도로 시험이 수행되었기

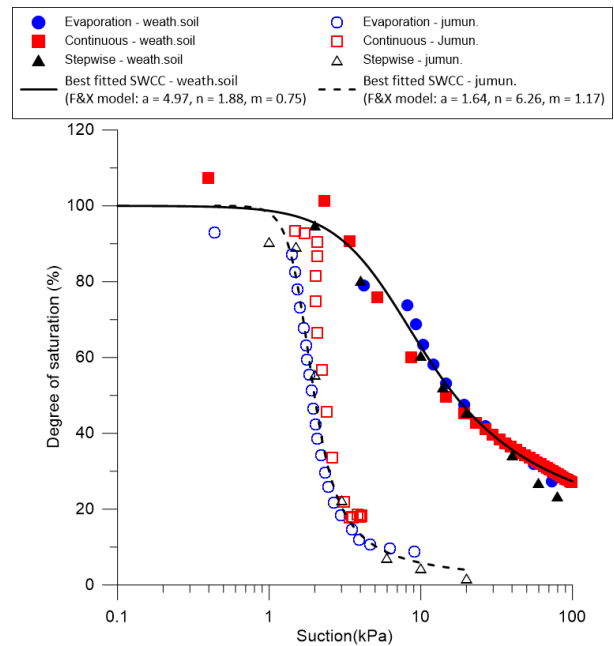


Fig. 6. Comparison of the drying path of the SWCC

때문이다. 이러한 차이는 충분히 포화 과정을 수행했음에도 불구하고 각 시험법의 시료 크기가 달라 100% 포화가 이뤄지지 않은 것으로 판단된다. 하지만, 서로 다른 입도 분포를 갖는 두 시료에서 AEV 이후의 함수특성이 거의 비슷한 그래프를 나타내는 것을 통하여 연속 가압방법을 사용하여 건조과정을 측정하는 것에 문제가 없다고 판단된다.

Fig. 7은 습윤과정의 함수특성을 비교한 그래프이며,

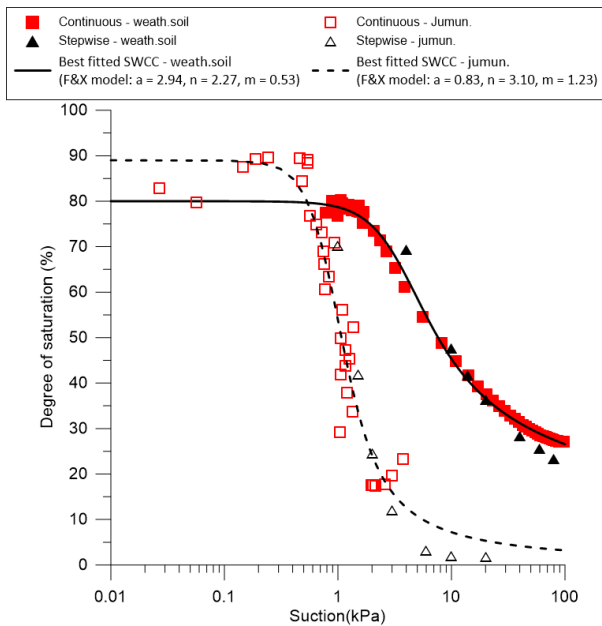


Fig. 7. Comparison of the wetting path of the SWCC

증발방법으로 습윤과정을 획득할 수 없어 단계 가압방법과 연속 가압방법을 통해 획득한 결과만을 비교하였다. 그림과 같이 낮은 흡수력 구간에서는 단계 가압방법과 연속 가압방법의 차이가 존재하였다. 주문진 모래의 경우 오차가 발생하였으나 전체적인 경향은 단계 가압방법과 비슷한 경향을 보였다. 또한, 풍화토의 경우 단계 가압방법을 통하여 습윤과정 함수특성 곡선을 획득하는 구간에서 4kPa 이하의 흡수력에서 시료의 함수특성 곡선이 급격하게 증가하는 현상이 발생하여 낮은 흡수력 구간에서 다소 오차가 존재하였다. 이는 단계 가압방법의 경우, 전자저울을 통해 측정되지 않아 정확하지 않고 실시간으로 측정된 데이터가 아니므로 오차가 발생하였을 것으로 판단된다. 반면에, 낮은 흡수력 구간을 제외한 습윤과정에서의 함수특성 곡선의 변화 구간에서는 단계 가압방법과 연속 가압방법의 함수특성 곡선의 차이가 매우 작으며, 습윤과정의 거동이 거의 일치하는 것으로 나타나고 있다. 또한, 이러한 경향은 입도 분포가 다른 두 시료에서 동일하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서, 단계 가압방법과 연속 가압방법으로 획득한 함수특성 곡선의 습윤과정은 앞에서의 건조과정과 같이 차이가 크지 않다고 판단된다.

6. 결론

함수특성 곡선을 빠르고 정확하게 획득하기 위해 제

안된 연속 가압방법은 기존 시험법들의 결과와 비교 및 평가를 통해 그 적용성에 대한 평가가 필요하다고 판단된다. 따라서, 본 논문에서는 주문진 모래와 풍화토에 대하여 수행된 연속 가압방법과 기존의 시험법의 시험 결과를 비교하였으며, 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 연속 가압방법은 기존의 시험법에 비해 건조과정과 습윤과정을 획득하는 데 걸리는 시간이 약 2배 이상 단축되었다. 따라서, 연속 가압방법을 통하여 다양한 조건의 함수특성을 빠르게 획득할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 단계 가압방법과 증발방법을 통해 획득한 결과를 비교하였을 때, 3개의 시험법으로 획득한 함수특성 곡선의 차이가 크지 않다. 따라서, 기존의 시험법에 대체하여 연속 가압방법을 통해 함수특성 곡선을 획득하는 것에 큰 문제가 없다고 판단된다.
- (3) 연속 가압방법은 기존의 시험법에 비해 빠르고 AEV와 잔류체적 함수비와 같이 함수특성 곡선에 중요한 인자들을 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 연속 가압방법을 적용하여 다양한 조건의 함수특성 곡선을 획득하고, 이를 비교하여 다양한 불포화 지반의 침투 또는 전단 거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1D1A1B03030797).

참고문헌 (References)

1. Abe, H., Morimoto, H., Toyoda, T., Kosan, J., Kmijo, T., and Eiji, M. (2006), "Studies on New Test for the Water absorbency of Unsaturated Soils", Report. (in Japanese)
2. Bachmann, J. and van der Ploeg, R. R. (2002), "A Review on Recent Developments in Soil Water Retention Theory: Interfacial Tension and Temperature Effects", *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol.165, No.4, pp.468-478.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons Inc., New York.
4. Gee, G. W., Campbell, M. D., Campbell, G. S., and Campbell, J. H. (1992), "Rapid Measurement of Low Soil-Water Potentials Using a Water Activity Meter", *Soil Science Society of America*

- Journal*, Vol.56, No.4, pp.1068-1070.
5. Hatakeyama, M., Kyono, S., and Kawahara, T. (2015), "Development of Water Retention Test Apparatus According to the Continuous Pressurization Method", Oyo Technical Report, No.34, pp.23-54. (in Japanese with English abstract)
 6. Hilf, J. W. (1956), "An Investigation of Pore Water Pressure in Compacted Cohesive Soils", US Dept. of Interior Bureau of Reclamation, Tech. Mem. 654.
 7. Hong, W. T., Jung, Y. S., Kang, S. H., and Lee, J. S. (2016) "Estimation of Soil-Water Characteristic Curves in Multiple-Cycles Using Membrane and TDR System", *Materials*, Vol.9, No.12, pp. 1-15.
 8. Houston, S. L., Houston, W. N., and Wagner, A. (1994), "Laboratory Filter Paper Suction Measurements", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.17, No.2, pp.185-194
 9. Kato, S., Hatakeyama, M., Abe, H., Kim, B. S., and Takeshita, Y. (2016), "Measurement of Soil Water Characteristic Curve with Continuous Pressurization Method", The 4th Japan-Korea Joint Workshop on Unsaturated Soils, Okayama, Japan, pp.1-6.
 10. Likos, W. J. and Lu, N. (2003), "An Automated Humidity System for Measuring Total Suction Characteristics of Clays", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No.2, pp.178-189.
 11. Liu, J. K., Chang, D., and Yu, Q. M. (2016), "Influence of Freezethaw Cycles on Mechanical Properties of a Silty Sand", *Engineering Geology*, Vol.210, No.5, pp.23-32.
 12. Lourenco, S. D. N., Gallipoli, D., Toll, D. G., Augarde, C. E., and Evans, F. D. (2011), "A New Procedure for the Determination of Soil-water Retention Curves by Continuous Drying Using High-suction Tensiometers", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.48, No.2, pp.327-335.
 13. Mualem, Y. (1976), "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media", *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.513-522.
 14. Park, H., Song, Y., and Park S. (2017), "Predicted Hydraulic Behavior in In-Situ Soil Slope Using the Path-Dependent Soil Water Characteristic Curve", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.4, pp.25-34.
 15. Schindler, U. and Muller, L. (1980), "Simplifying the Evaporation Method for Quantifying Soil Hydraulic Properties", *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol.169, No.5, pp.623-629.
 16. Schindler, U., Muller, L., da Veiga, M., Zhang, Y., Schlindwein, S., and Hu, C. (2012), "Comparison of Water-retention Functions Obtained from the Extended Evaporation Method and the Standard Methods Sand/kaolin Boxes and Pressure Plate Extractor", *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, Vol.175, No.4, pp.527-534.
 17. Singh, D. N. and Kuriyan, S. J. (2003), "Estimation of Unsaturated Hydraulic Conductivity Using Soil Suction Measurements Obtained by an Insertion Tensiometer", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40., No.2, pp.476-483.
 18. Song, Y. S., Lee, N. W., Hwang, W. K., and Kim, T. H. (2010), "Construction and Application of an Automated Apparatus for Calculating the Soil-Water Characteristic Curve", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.20, No.3, pp.281-295.
 19. Spanner, D. C. (1951), "The Peltier Effect and Its Use in the Measurement of Suction Pressure", *Journal of Experimental Botany*, Vol.2, No.5, pp.145-168.
 20. Stannard, D. I. (1992), "Tensiometers-Theory, Construction, and Use", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.15, No.1, pp.48-58.
 21. Sun, Y., Ren, S., Ren, T., and Minasny, B. (2010), "A Combined Frequency Domain and Tensiometer Sensor for Determining Soil Water Characteristic Curves", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.74, No.2, pp.492-494.
 22. Toll, D. G., Lourenco, S. D. N., and Mendes, J. (2013), "Advances in Suction Measurements Using High Suction Tensiometers", *Engineering Geology*, Vol.165, pp.29-37.
 23. Trantino, A. and Mongioli, L. (2001), "Experimental Procedures and Cavitation Mechanisms in Tensiometer Measurements", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.189-210.
 24. 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", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.35, No.1, pp.103-117.

Received : February 28th, 2019

Revised : September 2nd, 2019

Accepted : September 9th, 2019