

## 다공 세라믹 컵을 이용한 디지털 토양수분 장력계 개발

정인규 장영창 김기복 김용일 정선옥

### Development of a Digital Soil Tensiometer using Porous Ceramic Cups

I. K. Jung Y. C. Chang K. B. Kim Y. I. Kim S. O. Chung

#### Abstract

This study was conducted to develop a 100 kPa soil tensiometer mainly consisted of a porous ceramic cup, water-holding tube, and a digital vacuum gauge, through theoretical design analysis and experimental performance evaluation. Major findings were as follows.

1. Theoretical analysis showed that air entry value of a porous media decreased as the maximum effective size of the pore increased, and the maximum diameter of the pores was 2.9  $\mu\text{m}$  for measuring up a 100 kPa of soil-water tension.
2. Property analysis of tensiometer porous cups supplied in Korean domestic market indicated that main components were  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with a porosity range of 33.8~49.3%.
3. The porous cup selected through sample fabrication and air-permeability tests showed weight ratios of 87% and 11% for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$ . The analysis of SEM (scanning electron microscope) images showed that the sample was sintered at temperatures of about 1150  $^\circ\text{C}$ , which consisted of pores with sizes of up to 25% of those for commercial porous cups.
4. The prototype soil tensiometer was fabricated using the developed porous cup and a digital vacuum gauge that could measure water tension with a pressure of 85 kPa in air tests.
5. In-soil tests of the prototype conducted during a period of 25-day drying showed that soil-water tension values measured with the prototype and commercial units were not significantly different, and soil-water characteristic curves could be established for different soils, confirming accuracy and stability of the prototype.

**Keywords :** Soil sensor, Soil water tension, Tensiometer, Porous cup

### 1. 서론

토양수분 및 수분을 통한 양분공급은 작물생육 상태를 결정하는 매우 중요한 요소이다(Barber, 1984). 과수원, 시설재배지 등 관수가 중요한 지역에서 비용 투입을 수분과 비용투입을 최소화하면서 고품질 농산물을 생산하기 위해서는 최적 수분관리 기술이 필요하며 이를 위해서 수분을 계속하고 제어하는 기계기술이 중요하다. 토양수분은 농경지 위치별, 깊

이별, 시기별 차이가 크기 때문에 이 변이를 모니터링하고 작물생육에 적절한 토양 수분 조건을 유지하는 기술이 중요하며 이를 위하여 토양수분을 손쉽게 현장에서 측정할 수 있는 센서가 필수적이다(김과 이, 1996; 엄기철, 2003).

토양수분은 토양의 용적수분함량(%)이나 토양수분장력(kPa)으로 나타낸다. 수분함량을 측정하는데 전통적으로 오븐건조법을 사용하고 있으나 토양샘플채취 및 분석의 비용과 시간을 최소화하기 위하여 현장에서 직접 빠르게 측정하는

The article was submitted for publication in December 2007, reviewed and approved for publication by editorial board of KSAM in December 2007. The authors are In-Kyu Jung, Agricultural Researcher, National Institute of Agricultural Engineering, Suwon, Young-Chang Chang, Professor, Konkuk University, Chungju, Ki-Bok Kim, Yong-II Kim, Principal Research Scientist, Safety Metrology Group, Division of Metrology for Quality Life, Daejeon, and Sun-Ok Chung, Full Time Instructor, Chungnam National University, Daejeon, Korea. Corresponding author: S. O. Chung, Full Time Instructor, Chungnam National University, Daejeon, 305-764, Korea; E-mail: <sochung@cnu.ac.kr>.

센서가 다양하게 개발·이용되고 있다(Hillel, 1980). 토양의 수분함량을 측정하는 방법에는 석고블럭 내에 설치된 전극판의 전기저항변화를 이용하는 방법, 중성자 산란을 이용한 방법, 발전회로에서 송신된 신호가 토양과 간섭한 후 수신된 신호의 주파수 특성으로 토양 정전용량 또는 임피던스를 측정하여 수분을 구하는 주파수영역법(frequency domain reflectometry) 센서, 신호의 송수신 시간으로 토양유전상수를 측정하는 시간영역법(time domain reflectometry) 센서 등이 있다(Soil Science Society of America, 2002).

토양수분장력을 측정하는 방법은 작물이 토양으로부터 수분을 섭취하는데 필요한 에너지를 직접 측정할 수 있다는 장점으로 인하여, 현재까지 많이 사용되고 있으며, 일반적으로 토양 수분 장력계(soil tensiometer)를 사용한다. 수분장력계는 물이 담겨진 관, 토양과 접촉하는 다공컵부, 부압을 측정하는 진공계이지 등으로 구성되어 있으며, 토양내 수분을 제거하는데 필요한 에너지를 습도와 다공컵내의 물이 평형상태 일 때의 부압을 측정하는 도구로, 주로 사용되는 기종은 실제 농경지 유효 수분 장력 한계값 80 kPa 수준을 가진(Hillel, 1980) 1 bar용량(101.3 kPa)의 수분장력계이다. 최근에는 수분장력을 디지털 형태로 출력받아 수분장력이 일정 수준 이하이면 관개를 실시하는 통합 수분측정 및 제어 시스템이 외국에서 수입되어 사용되고 있다. 현재 국내에서는 수분장력계의 디지털화에 대한 연구가 진행되고 있는 수준이고(이 등, 2004) 실제 사용되고 있는 센서기반형 자동수분조절기는 전량 미국, 유럽, 일본 등 해외에서 수입하고 있다. 따라서, 유통 비용 추가로 제품 가격이 생산지의 2배 이상으로 고가이고, 다공컵 부분이 깨지는 등 지속적인 유지보수 및 기술지도가 어렵다.

본 연구는 수입에 의존하고 있는 토양수분관리시스템 구성 요소 중 핵심부품인 디지털 토양수분장력계를 국산화하기 위해 수행되었다. 구체적인 연구의 목표는 1) 이론분석 및 제작시험을 통해 다공컵 구성 재료의 적절한 성분조합으로 1 bar 용량

의 다공컵을 제작하고, 2) 디지털 출력이 가능한 시작기를 개발하고, 3) 상용제품과 비교성능시험을 실시하는 것이었다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 장력한계치와 다공컵 유효공극 직경 관계 이론분석

토양 수분 장력 측정의 원리는 다공질체를 경계로 구분되어 있는 장력계내의 물과 토양의 상대적인 압력차이에 의하여 장력계내의 물이 토양쪽으로 이동함에 따라 발생하는 장력계내 부압(-압력)을 측정하는 것으로, 측정할 수 있는 부압의 한계치는 다공질체가 포함하고 있는 공극의 최대 유효반경에 따라 달라진다. 수분장력계 또는 핵심요소인 다공질 컵은 측정하고자하는 장력 한계치로부터, 공극의 최대 유효반경을 구하고, 이러한 최대 유효반경을 만족시킬 수 있도록 구성물질을 혼합, 처리하여 개발한다(Stannard, 1992). 같은 구성물질을 사용하더라도, 첨가제의 종류와 양, 가공 온도, 압력, 시간 등에 따라 다공질체의 공극형성이 영향을 받기 때문에 주로 경험적인 방법이 이용된다.

그림 1은 내벽에 물이 채워져 있고, 외벽이 토양과 접촉하고 있는 다공컵과 이때 다공컵 내외부의 압력상태를 보여주고 있다. 측정하고자 하는 수분장력의 최대값( $U_a - U_w$ , Air-entry value)과 다공컵 공극 최대 유효반경( $R_s$ )의 관계는 식 (1)로 나타낼 수 있다(Lu and Likos, 2004). 본 연구에서는  $R_s$ 를 만족시키기 위한 다공컵을 제조하고자 하는 것이다.

$$(U_a - U_w) = \frac{2T_s}{R_s} = \frac{4T}{D_s} \tag{식 1}$$

여기서,  $U_a$  = 공기압(kPa),  $U_w$  = 수분압(kPa),  $T_s$  = 다공컵과 물의 접촉각(contact angle) 0에서의 수분-공기 표면장력(72 mN/m at 25°C),  $R_s$  = 다공컵 공극 유효반경( $\mu\text{m}$ )

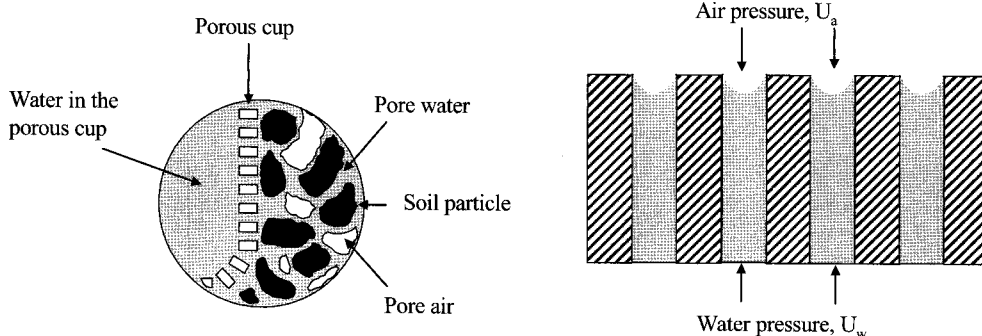


Fig. 1 Interface between porous cup and soil particles (left) and idealized air-water pressure model.

### 나. 다공컵 및 통합 시작기 제작

시작기 제작을 위하여 상용 다공컵 물성분석, 샘플제작 및 통기성 시험, 통합 시작기 제작 3단계 과정으로 진행하였다. 상용 다공컵 물성분석은 우리나라 수입업체를 통해 공급되고 있는 기종 중에서 3가지 기종의 수분장력계용 다공컵을 4개씩 샘플하여 서울시 금천구에 위치한 요업기술원(www.kicet.re.kr)에 성분조성 및 기공율 분석을 의뢰하였다.

샘플제작은 상용 다공컵에 대한 요업기술원의 성분 및 기공 분석 결과에 기초하여 세라믹 제조업체를 통해 제작하였다. 크기는 상용 다공컵의 크기와 유사하게 외경 22 mm, 토양과 접촉하는 부분의 길이는 65 mm로 하였다. 목표가 다공컵 구성 성분의 비율을 조절하여 상용 수분장력계보다 안정적으로 1 bar용 장력계를 개발하는 것이다. 따라서, 성분 비율을 바꾸면서 제작된 다공컵을 기존 상용 장력계에 장착하여 그림 2와 같은 실험장치를 구성하여 통기성을 검토하였다. 실험장치는 압축기, 압력 조절기, 수분장력계, 수조로 이루어졌으며, 다공컵으로부터 수조로 공기방울이 배출되기 시작할 때까지 압축기에서 제공하는 압력을 0에서부터 0.1 bar 간격으로 증가시켰다. 압축기(Model: UD-2025, United, China)로 압축공기를 공급하면서, 단계적인 과정을 살펴보기 위하여 압력 증가 사이에 1분의 시간 간격을 두었으며, 상용 다공컵보다 더 높은 압력에서 공기방울이 배출되는 샘플을 최종 선정하였다. 통합 시작기는 선정된 다공컵, 디지털 진공게이지(부압 센서)를 상용 수분장력계 본체에 결합하여 제작하였다. 사용한 디지털 진공게이지(Model: PSA-V01, Autonics, Yangsan, Gyeongnam province, Korea)는 -101.3 kPa까지 부압을 측정하며 정밀도는 ±2% F.S.이었다.

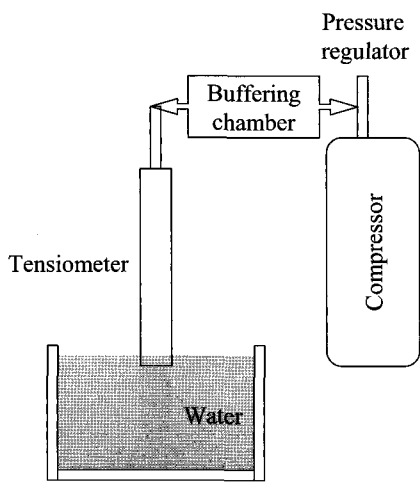


Fig. 2 Experimental setup for air permeability of the fabricated porous cup.

### 다. 시작기 성능평가

통합시작품 성능평가는 최대 측정 장력 범위 검증을 위한 대기 중 시험, 시작기의 안정성과 토양수분함량과의 관계도 출을 위한 토양 중 시험으로 이루어진 2단계 과정으로 실시하였다. 대기 중 시험은 시작기와 상용 수분장력계에 물을 채우고 대기 중에 방치한 상태에서 장력계내의 수분이 완전히 대기 중으로 증발할 때까지 수분장력 변화를 모니터링 하였으며, 시작기와 상용 수분장력계를 각각 3개씩 사용하였다.

토양 중 시험은 그림 3에서 보는 바와 같이 구성하였다. 토양이 담겨질 용기(container)의 바닥에 일정 간격으로 작은 구멍을 내어 물이 자유롭게 이동하도록 하였으며 그 위에 천을 2겹 위치시켜 용기내로 들어온 물이 전면으로 잘 퍼지도록 하였다. 이러한 토양 용기를 물이 들어 있는 용기에 넣으면, 물은 외부의 수분압력과 토양의 모세관 현상에 의해 토양 용기 상단까지 올라와 토양은 전체적으로 포화수분함량을 가지게 된다. 그 다음 물이 담겨진 용기에서 나머지 물을 제거하면, 시간이 경과함에 따라 상온 통풍 상태에서 토양속의 물은 감소하게 된다.

성능평가를 위해 두 가지 서로 다른 크기를 가진 토양입자를 준비하였는데, 생황토를 풍건(air-dried)하고 2 mm 체를 통과시키고, 다시 0.5 mm 체를 통과시켜 0.5-2 mm 토양(비교적 입자크기가 큰 soil, Soil A), 0.5 mm 이하 토양(비교적 입자크기가 작은 soil, Soil B)으로 분류하였다. 각 토양에 대하여 그림 3(오른쪽)에서 보는 바와 같이 제작된 수분장력계와 상용 수분장력계를 2개씩 총 4 곳에 설치하였다. 포화수분 상태에서부터 시작하여 25일간 토양을 상온 통풍 건조시키면서 10분에 1회씩 디지털 진공게이지 출력을 저장하였다. 또한, 시험 토양에 대하여 토양 수분 장력과 수분 함량의 관계를 확립하기 위하여 probe의 길이가 120 mm, 정밀도 ±3%인 상용 토양 수분 센서(Model: WT-1000A, RFSENSOR, Seoul, Korea)를 그림 3과 같이 3곳에 설치하고 무선 데이터 로거(Model: WP-600, RFSENSOR, Seoul, Korea)로 10분에 1회씩 저장하였다. 수분장력계의 다공컵(길이 65 mm) 중간부분과 수분 함량 센서 probe(길이 120 mm)의 중간부분은 토양 표면으로부터 100 mm 깊이에 위치하도록 하였다. 실험장면을 그림 4에 나타내었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 이론분석에 의한 다공컵 유효공극 직경 결정

측정하고자 하는 최대 토양 수분 장력(air-entry value)과 공극 최대 유효직경의 이론적인 관계를 그림 5에 나타내었다.

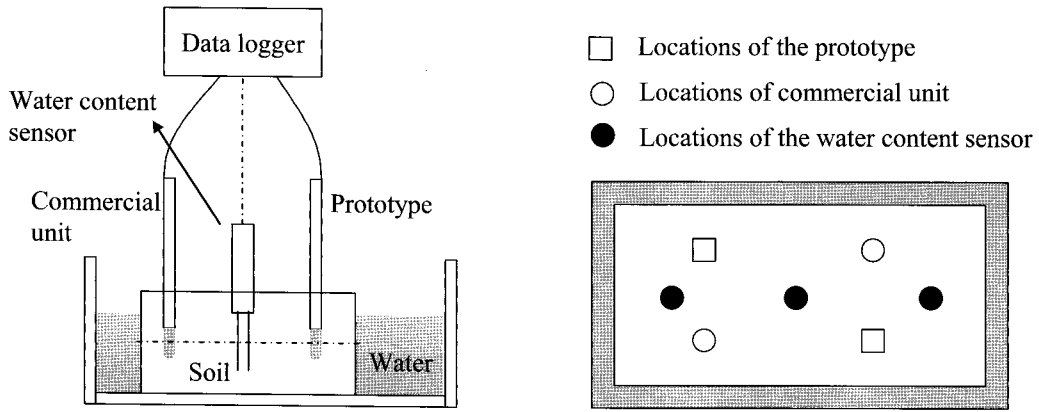


Fig. 3 Experimental setup for in-soil tests (left) and locations of the sensors (right).

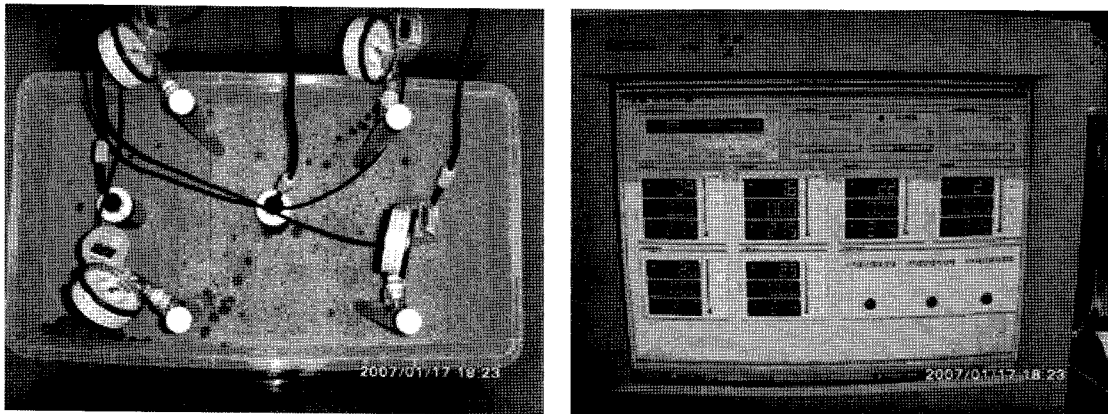


Fig. 4 View of the sensors installed in the soil container (left) and data logging screen (right).

다공컵 공극 최대 유효 크기가 증가함에 따라 최대 장력 측정 값은 감소하였으며, 특히 100 kPa(1 bar) 부근에서 민감한 것으로 나타났다. 현장에서 많이 사용되고 있는 상용 토양수분 장력계의 측정 범위인 100 kPa까지의 수분장력 측정을 위한 유효 최대 공극 직경은 식 1을 이용하여 계산한 결과 2.9  $\mu\text{m}$  이었으며 그림 5에 나타내었다. 이는 표 1에서 보는 바와 같이 상용 다공컵의 air-entry value와 다공질체 유효 공극 직경의 관계도 이론적인 관계와 같이 air-entry value를 증가시키기 위하여 다공질체 유효 공극 직경을 감소시켜야 함을 확인할 수 있다. 또한, 같은 장력범위의 다공질 세라믹에서 유효직경을 증가시켜 반응속도(또는 수분 흐름, flow)를 다르게 할 수 있음을 나타내고 있다 (예, 1 bar용 vs. 1 bar high flow용).

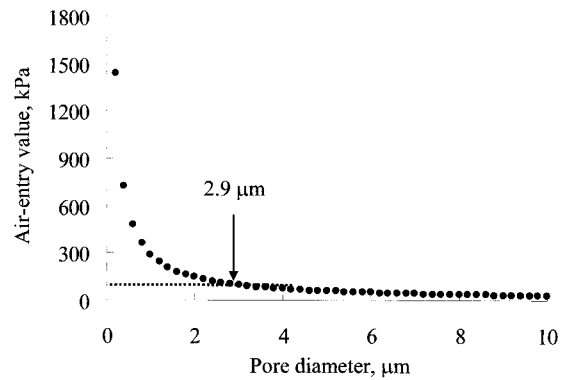


Fig. 5 Theoretical relationship between air-entry value and pore diameter.

Table 1 Effective pore diameter vs. air-entry value for commercial porous ceramic (from Lu and Likos, 2004)

Air-entry value (kPa)	Approx. pore diameter ( $\mu\text{m}$ )	Type of porous ceramic
48-62	6.00	1/2 bar high flow
138-207	1.70	1 bar
131-193	2.50	1 bar high flow
262-310	1.10	2 bar

나. 다공컵 및 통합 시작기 제작

토양 수분 장력을 100 kPa까지 측정하기 위한 다공컵 유효 최대 공극 직경 2.9  $\mu\text{m}$ 을 만족시키기 위하여 우선 국내에서 많이 유통되고 있는 3가지 기종(SD, SM, DK)의 다공컵에 대한 물성분석 결과는 표 2와 같다. 요업기술원의 수는 intrusion법에 의한 기공율은 33.8~49.3% 범위이었으며, Talc (MgO, 활석)을 포함한 SD 샘플을 제외하고는 산화알루미늄 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )과 이산화규소( $\text{SiO}_2$ )가 주요 성분이었으며 산화알루미늄은 63.5~92.1% 범위에 있었다. 또한, 전자현미경 영상을 살펴본 후 성분의 소결상태와 조직감(texture)의 거칠기로 추정하여 1000°C 내외의 온도에서 소결되었을 것이라는 요업기술원의 의견을 얻었다.

Table 2 Main components and porosity of the three commercial sample and prototype porous cups

Sample	Component (%)	Porosity (%)
SD	$\text{SiO}_2$ (60.1%)	33.8%
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (3.56%)	
	MgO (27.6%)	
SM	$\text{SiO}_2$ (6.76%)	49.3%
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (92.1%)	
DK	$\text{SiO}_2$ (33.0%)	40.7%
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (63.5%)	
Prototype	$\text{SiO}_2$ (11.0%)	43.8%
	$\text{Al}_2\text{O}_3$ (87.0%)	

산화알루미늄과 이산화규소의 조성비, 가공 온도 등을 변화시키면서 샘플을 제작하고 통기성 시험을 실시한 결과 본 연구에서 목표로 하는 다공컵을 제작할 수 있었다. 그림 6은 SM 샘플과 본 연구에서 제작된 다공컵에 대한 통기성 시험 장면이다. SM 샘플은 5회 실험한 결과 그림 6에 원형으로 표시한 바와 같이 대부분 250 kPa 이하의 압력에서 공기방울

배출이 관찰되었으나, 시작품은 모두 700 kPa까지도 공기방울 배출이 관찰되지 않았다. 고압에 의한 시험장치의 손상위험으로 인하여 더 이상 압력을 증가시키지 않았으나, 이 결과로부터 본 연구에서 개발된 다공컵이 상용 다공컵보다 통기성이 낮음을 확인할 수 있었다.

통기성 시험을 통과한 샘플에 대하여 요업기술원에 주사전자현미경 영상 촬영, 조성비 및 기공율 조사를 의뢰하였다. 그림 7에서 보는 바와 같이 기존 상용 제품인 SM 샘플에 비하여 시작품의 다공질 입자와 공극 크기가 현저히 작음을 확인하였고 이는 DK 및 SD 샘플과 비교하였을 경우에도 유사한 결과를 얻었다. 정량적인 평가는 어려웠으나 육안으로 볼 때 100 kPa용 상용제품은 최대 공극 직경이 2.9  $\mu\text{m}$ 와 큰 차이를 보이지 않았으나, 시작품의 공극이 상용제품의 공극보다 매우 작음을 알 수 있었다. 그림 5로부터 판단할 때 시작품의 air-entry value는 공극 직경 0.73  $\mu\text{m}$ 에 해당하는 400 kPa으로 목표로하는 100 kPa 장력범위는 충분히 달성할 수 있을 것으로 판단되었다.

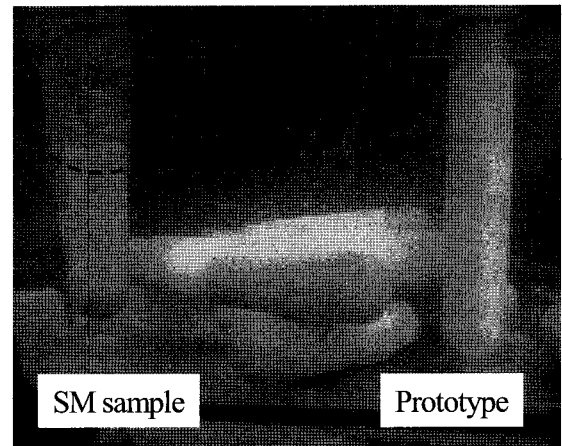


Fig. 6 View of the air permeability test for SM sample (left) and prototype (right) cups.

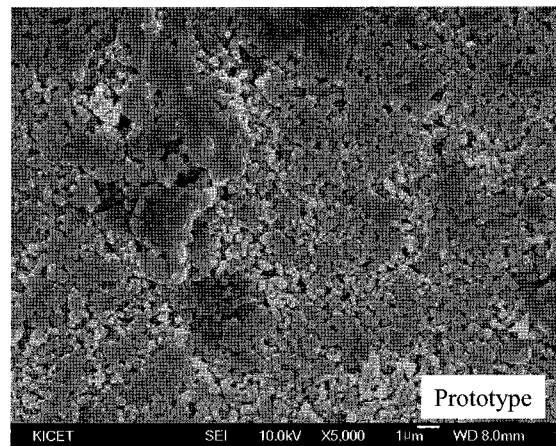
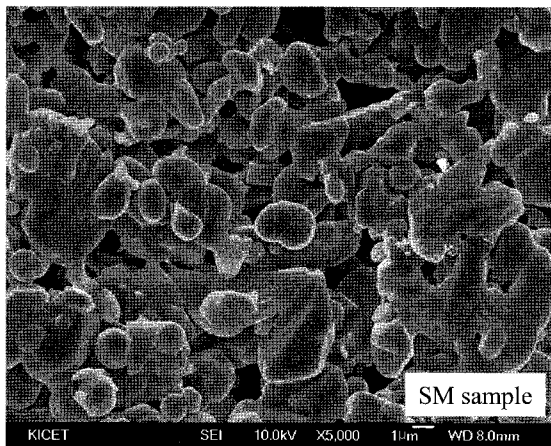
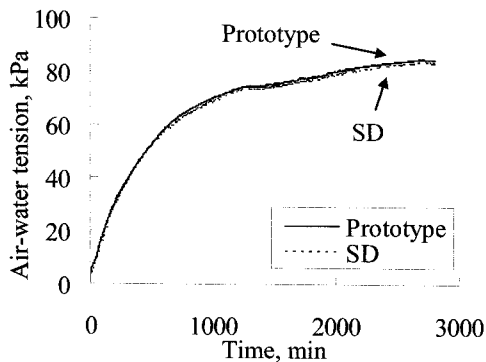


Fig. 7 Scanning electron microscope (SEM) image of SM sample (left) and prototype (right) porous cups.

최종 선정된 다공컵은 중량비율로 산화알루미늄 87.0%, 이산화규소 11.0%, 규조토(조공제) 1.5%, 해교제(산토프코(주) 5468) 0.5%를 배합하고 성형한 다음 1150℃까지 소결 온도를 상승시키고 자연 냉각하여 얻을 수 있었다. 선정된 다공컵의 표 2에서 보는 바와 같이 기공율이 43.8%로 상용 제품 DK와 SM 샘플 기공율 범위에 있었으며 산화알루미늄과 이산화규소의 조성비율도 마찬가지로였다.

**다. 시작기 성능평가**

선정된 다공컵과 디지털 진공게이지를 상용 SD 장력계에 장착하여 시작품을 완성하였다. 예비시험 결과, SD, SM, DK 수분장력계는 공통적으로 -80 kPa 정도의 토양 수분장력을 측정할 수 있었으나 다공컵과 디지털 진공게이지 장착이 용이한 SD 장력계를 선택하게 되었다. 그림 8은 시작품과 상용 SD 장력계에 대한 대기 중 시험결과이다. 시작품과 SD 장력계 3개씩을 사용하였으나 다공컵과 장력계 본체 연결부 공기 유입 등으로 인하여 1개씩에 대한 데이터는 제거하고 나머지 2개씩에 대한 장력변화를 평균하여 도시한 것이다. 장력변화가 거의 일어나지 않을 때까지 46.7시간이 소요되었으며 이때 장력은 시작품이 85.0 kPa, SD 제품이 83.7 kPa로 최대 1.3 kPa의 차이를 보였으나 이는 100 kPa 용량을 기준으로 1.3% 수준으로 시작품이 SD 상용제품과 유사하였다. 또한, 동일한 시험을 여러 번 반복한 결과, 정량적인 결과를 도출하지 못하였으나 SD 제품은 80 kPa 이상에서 주로 압력해제가 되었으나 시작품은 압력해제 없이 작동함을 알 수 있었다.

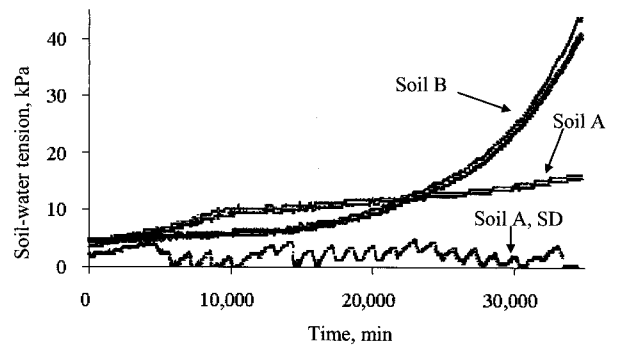


**Fig. 8** Results of in-air tests for SD and prototype tensiometers.

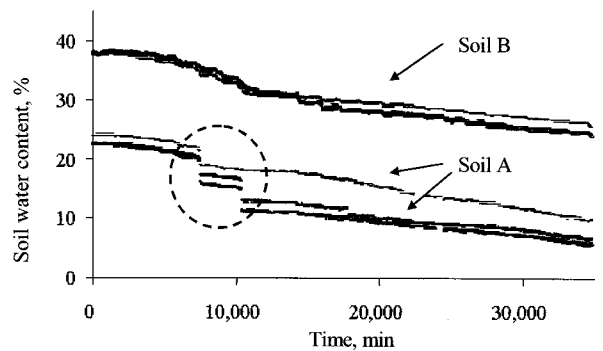
시작품과 상용제품의 성능, 토양수분함량과의 관계 고찰을 위한 토양 중 시험을 실시하였으며, 포화수분함량으로부터 25일간 상온 통풍 건조 시간에 따른 토양 수분장력과 수분함량 변화를 그림 9와 10에 각각 나타내었다. 그림 9에서, Soil A(0.5-2 mm 토양)와 Soil B(0.5 mm 이하 토양)에 대하여 시

작품과 SD 상용 제품이 매우 유사한 경향을 보였으며(여러 그래프가 거의 겹쳐있는 상태이므로 범례를 생략하였음), SD 제품은 Soil A에 대하여 시간이 얼마 지나지 않아 압력이 해제되어 불안정한 성능을 보였다.

그림 10에서 보는 바와 같이, 수분 함량 변화 또한 시간에 따라 Soil A와 B에 대하여 각각 유사한 경향이 관찰되었으나, 입자 크기가 상대적으로 큰 Soil A의 경우에는 Soil B에 비하여 센서 위치별 측정값의 변이가 다소 큰 것으로 나타났으며 특히 그림에 표시한 원형 부분과 같이 수분 변화가 급격하게 진행됨을 관찰하였다.



**Fig. 9** Plots of soil-water tension vs. time for soils A and B using SD and prototype tensiometers.



**Fig. 10** Plots of soil-water content vs. time for soils A and B using SD and prototype tensiometers.

토양 수분 장력과 용적수분함량의 관계를 정립하기 위하여 두 데이터를 비교하였다. 그림 9에서 압력이 해제된 데이터를 제외하고 그림 9의 수분 장력과 그림 10의 용적수분함량을 토양별로 평균값을 구하여 그 관계(토양 수분 특성 곡선, soil water characteristic curve)를 그림 11에 나타내었다. 그림 11은 Y축을 log scale로 나타낸 전형적인 토양 수분 특성 곡선의 형태로 나타났으며(Lu and Likos, 2004) 이 곡선으로부터 해당 토양의 air-entry value, 포화 수분 함량 등을 파악할 수 있다. 특히, 건조나 습윤 과정에 따른 수분함량 변화와 장력

변화의 관계를 알 수 있어 두 가지 변수 중 하나를 측정하여 나머지 변수의 값을 추정하는데 유용하게 사용된다.

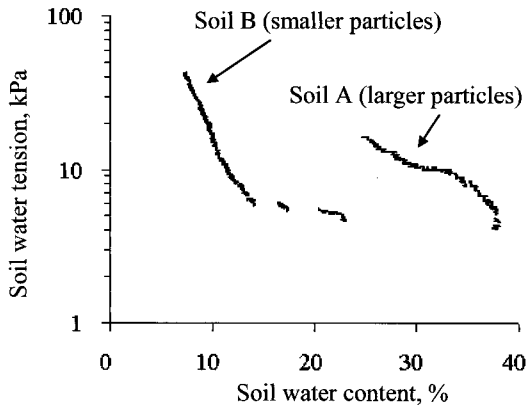


Fig. 11 Soil water characteristic curves developed for Soils A and B.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 토양 수분 측정 및 관리에 많이 사용되고 있는 토양 수분 장력계 국산화를 위하여 이론분석을 통한 다공 컵 유효 공극 결정, 다공컵 및 수분 장력계 시작품 제작, 성능 평가를 실시하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 이론 분석 결과, 다공컵 공극 최대 유효 크기 증가에 따라 최대 장력 측정값은 감소하였고 현장에서 주로 사용되고 있는 100 kPa 범위 수분장력 측정을 위한 유효 최대 공극 직경은 2.9  $\mu\text{m}$ 이었다.
- (2) 국내에서 주로 유통되는 수분 장력계 용 다공컵 3 기종에 대한 물성을 분석한 결과, 기공율은 33.8~49.3% 범위이었으며, Talc(활석)을 포함한 기종을 제외하고는 산화알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )과 이산화규소( $\text{SiO}_2$ )가 주요 성분이었으며 산화알루미늄은 63.5~92.1% 범위에 있었다.
- (3) 샘플제작 및 통기성 시험결과를 근거로 선정된 다공컵은 중량비율로 산화알루미늄 87.0%, 이산화규소 11.0%, 규조토(조공제) 1.5%, 해교제 0.5%를 배합하고 성형한

다음 1150 $^{\circ}\text{C}$ 까지 소결 온도를 상승시키고 자연 냉각하여 제작하였다.

- (4) 선정된 다공컵과 디지털 진공게이지를 이용하여 제작된 토양 수분 장력계 시작품(SD)의 성능을 상용제품과 비교하기 위하여 대기 중 상온통풍 상태에서 시험한 결과, 시작품이 85.0 kPa, SD 제품이 83.7 kPa로 최대 1.3 kPa의 차이를 보였으나 이는 100 kPa 용량을 기준으로 1.3% 수준으로 시작품이 SD 상용제품과 유사하고 압력해제 없이 안정된 작동상태를 보였다.
- (4) 시작품의 성능 및 토양 수분 함량과의 관계정립을 위한 토양 중 시험의 결과, 시작품과 상용제품은 모두 안정적으로 작동하였으며, 용적수분함량 센서 출력값과 전형적인 토양 수분 특성 곡선을 얻을 수 있었다.

#### 참고 문헌

1. Barber, S. A. 1984. Nutrient uptake by plant roots growing in soil. In Soil Nutrient Bio-availability: A Mechanistic Approach. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc.
2. Hillel, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press, INC.
3. Lu, N. and W. J. Likos. 2004. Unsaturated Soil Mechanics. New York, N.Y.: John Wiley & Sons, Inc.
4. Soil Science Society of America. 2002. Methods of Soil Analysis, Part 4 - Physical Methods, SSSA Book Series, No. 5. pp. 417-669. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisc., USA.
5. Stannard, D. I. 1992. Tensiometers-theory, construction, and use. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ. 15(1):48-58.
6. 김철기, 이기춘. 1996. 신고 농업수리학. 향문사.
7. 엄기철. 2003. 시설재배지의 관비기술개발 방향. 한국시설원예연구회 제 17회 심포지엄 자료집: 고품질 원예산물 생산 위한 관비재배 현황과 발전방향. pp. 2-15. 한국시설원예연구회, 부산.
8. 이용구, 김기덕, 남윤일, 조일환, 김태영, 남은영, 문보흠. 2004. 토양수분계측 및 자동관수용 텐시오미터. 대한민국 실용신안 등록번호: 20-0354141.