다공질 세라믹 추를 이용한 중량 토양수분함량 측정 센서의 성능 검증

김기덕¹ · 서종택² · 유동림¹ · 김창석¹ · 지삼녀¹ · 홍순춘³ · 김성겸^{4*}

¹농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구소 농업연구사, ²농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구소 농업연구관,

³농촌진흥청 국립식량과학원 고령지농업연구소 농업연구원, ⁴경북대학교 농업생명과학대학 원예학과 교수

Validation on Performance of Soil Moisture Sensor using Weighing Porous Ceramic Cone Filled with Soil

Ki-Deog Kim¹, Jong-Taek Suh², Dong-Lim Yoo¹, Chang-Seok Kim¹, Sam-Nyu Jee¹,
Soon-Choon Hong³, and Sung Kyeom Kim^{4*}

¹Researcher, Highland Agriculture Research Institute, National Institute of Crop Science, Pyeongchang 25342, Korea

²Senior Researcher, Highland Agriculture Research Institute, National Institute of Crop Science, Pyeongchang 25342, Korea

³Research Assistant, Highland Agriculture Research Institute, National Institute of Crop Science, Pyeongchang 25342, Korea

⁴Professor, Department of Horticultural Science, College of Agricultural & Life Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Abstract. A simple soil moisture measurement method based on the weight of soil cone was developed. Soil cone is a conical porous ceramic cup filled with soil. In the three soil samples (fine sandy soil, silt loam, and sandy loam), the soil moisture content by core method and FDR (Frequency domain reflectometry) method showed a linear relationship with the regression coefficients of 0.92 - 0.98 and 0.97 - 0.99, respectively. The volumetric moisture content of the soil inside the soil cone to the soil cone water weight and the FDR sensor value showed a relationship with regression coefficient of 0.96 and 0.97, respectively. The relationship between the soil cone weight and the FDR sensor value ($r^2 = 0.99$, $p < 0.001$) was highly significant. Therefore, it was possible to measure soil moisture content by weighing of soil cone.

Additional key words : Frequency domain reflectometry sensor, Soil water content, soil cone, Tensiometer, Time domain reflectometry sensor

서 론

작물 재배 토양 내 수분을 잘 관리하는 것은 매우 중요한 일이다. 그런데 토양 수분은 동일한 공간일지라도 시간이나 기상 및 작물의 생육 특성에 따라 달라지므로(Hur 등, 2009), 토양 내 수분 함량을 정확히 측정해야만 작물의 생장 상태에 따라 필요로 하는 물을 공급할 수 있다. 따라서, 주기적인 토양 수분의 측정이 필요하다(Kim과 Lee, 1996). 토양 수분 함량을 측정하는 방법으로 직접법과 간접법으로 나눌 수 있는데, 직접법은 토양 시료를 건조 전 후의 무게 차이로 측정하는 것이고, 간접법은 현장에서 토양 파괴없이 연속적으로 측정하는 것으로 석고저항법, 장력계법, 유전율법(Frequency domain reflectometry; FDR and Time domain reflectometry; TDR) 및 중성자법 등이 있다(Novak와 Hlavacikova, 2019). 석고저

항법(Gypsum block)은 연속측정이 가능하나, 측정 오차가 다른 토양 수분 함량 측정법보다 상대적으로 더 크고(Eom 등, 1988), 건조토양 측정에 적합하다(Oh 등, 1998). 전기저항법은 2개의 전극을 내장한 다공질의 흡습체(석고블록)를 토양 내에 매설하여 흡습체의 물과 토양수분이 평형이 되었을 때 전극 간 전기저항을 측정하여 함수량을 간접적으로 측정하는 방식으로 계측 범위가 넓어 측정오차가 커질 수 있다. TDR법은 신속 정확하고 비파괴적으로 연속 측정이 가능하나 비용이 다소 높은 편이다(Campbell, 1990). 중성자법도 비파괴 연속 측정이 가능하나 비용이 고가이고 취급 접근성이 떨어진다. 장력계법(Tensiometer)은 습윤·건조가 반복되면서 초벌 구이컵과 토양 사이에 밀착도가 떨어지면 정확성이 낮아지는 등 주기적인 관리를 하는 번거로움이 있다. 이들에 반해 용적 수분 함량 측정을 위한 코어 채취법은 체적수분함량의 측정에서 정확하며 비용이 적게 드는 방식임에도 토양 채취나 조작이 번거로워서(Evett 등, 2012) 재배 현장에서 실용적 차원으로 토양 수분 측정에 잘 활용되고 있지 않은 실정이다. 이밖에

*Corresponding author: skkim76@knu.ac.kr

Received February 25, 2021; Revised April 13, 2021;

Accepted April 23, 2021

도 토양 수분 측정 방법으로 가시광선 및 근적외선을 이용한 토양 수분의 측정(Fouad 등, 2014), 토양의 열적 특성 값을 측정하여 토양의 다점 측정이 가능한 섬유 Bragg 격자 광학 센서(Wang 등, 2020)를 이용한 토양 수분 측정 방법에 관한 연구가 이루어 졌고, 국내에서는 유전율식 센서의 국산화 연구(Oh 등, 1998), 정밀도 향상을 위해 2개의 주파수 임피던스 변화를 이용한 토양수분의 측정(Kim 등, 2003), 디지털 토양수분 장력계에 관한 연구(Jung 등, 2007)가 있었지만 토양 수분 함량 측정에 관한 연구는 미흡하다.

작물 재배 중 토양 수분 함량은 잎에서의 증산과 토양 지표면에서의 증발이나 강우와 인위적인 관수에 의한 변화가 크며, 이에 따라 토양 수분이 낮은 쪽으로 이동이 끊임없이 일어나게 된다. 본 연구의 가설은 세라믹 추를 활용한 토양 수분 함량 측정 센서는 토양의 동적인 수분 함량 변화를 측정할 수 있다. 그리고 본 연구의 목적은 물이 잘 흡수하고 통과되는 다공질 세라믹 콘으로 만들어 진 세라믹 추를 토양에 설치해 두고 현장에서 바로 중량의 변화로부터 토양 수분 함량을 측정하기 위한 방법을 개발하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 세라믹 추 이용 토양수분 함량 측정 방법

새롭게 개발된 토양수분 센서의 구성은 세라믹 콘(용기),

soil cone(세라믹 콘) = 토양추, 덮개(PVC)로 구성되어 있다 (Fig. 1). 토양 수분의 평형을 이루기 위하여 세라믹 콘 안의 토양으로 수분이 들어오거나 나가거나 하면서 세라믹 콘 무게가 변화하고 이를 세라믹 콘 내의 토양 무게를 재서 토양수분 함량을 측정하는 방식이다. 세라믹 추 중량의 실측에서는 세라믹 추 내부 세라믹 콘에 포함된 수분과 내부 토양 중량을 구분하여 측정하는 것이 번거롭다. 그래서 세라믹 추 전체 수분 중량에 따라 세라믹 추 내부 토양의 용적 수분함량을 산정하여 시험 토양의 토양 수분 함량을 산출하고자 하였다. 세라믹 추의 무게는 세라믹 콘 자체의 무게, 세라믹 콘에 포함된 수분의 무게, 건조 토양의 무게, 이에 포함된 수분의 무게로 표기할 수 있다. 세라믹 콘 자체의 무게와 건조 토양의 무게 또는 부피는 미리 측정되었으므로, 세라믹 추의 무게를 측정했을 때 수분 전체 중량은 세라믹 추 총 무게에서 세라믹 콘의 무게와 건조 토양의 무게를 뺀 값이 된다.

2. 토양시료 및 세라믹 추 제작과 설치

본 연구에서 세라믹 추에 의한 토양수분 함량과 코어에 의한 용적 수분 함량의 차이를 알아보기 위하여 3종의 토양 시료를 사용하였다(Table 1). 강원도 강릉의 성산(37°43'N 128°49'E, 해발 121m)과 구정(37°43'N 128°52'E, 해발 46m) 그리고 강원도 평창의 대관령(37°40'N 128°42'E, 해발 742m) 3곳의 지역에서 토양 시료를 채취하였다. 토성은 비중계법으로 측정

Fig. 1. Soil cone used in the test (A), and schematic diagram of porous ceramic cone filled with soil (B) and soil cone with rain shield (C).

Table 1. Soil textures and physical characteristics of soil used in the test.

Location	Soil texture	Bulk density (Mg m ⁻³)	Solid phase (%)	Porosity (%)
Seongsan, Gangreung (Soil 1)	Fine sandy loam ^z	1.22	45.9	54.1
Gujeong, Gangreung (Soil 2)	Silt loam ^y	1.25	47.1	52.9
Daegwallyeong, Pyeongchang (Soil 3)	Sandy loam ^x	1.26	47.5	52.5

^zSenogsan (soil1) Silt 15.2%, Sand 76.2%, Loam 8.6%.

^yGujeong (soil2) Silt 65.1%, Sand 14.9%, Loam 20%.

^xDaegwallyeong (soil3) Silt 22.4%, Sand 63.6%, Loam 14%.

하였다. 2mm체를 통과한 풍건시료를 105°C에서 18시간 건조시킨 후 50g을 채취하여 250mL 비이커에 넣고 5% sodium hexamataphate 100mL를 첨가하고 토양이 충분히 젖을 때까지 흔들어 주고 18시간 침지후 분산컵에서 5분간 교반하였다. 분산된 시료를 1L 침강실린더로 옮긴 1L로 맞추었다. Hand stirrer로 1분간 20회 흔들어 정지한 후 2, 5, 15, 30, 60, 240, 600분에 비중을 측정하였다. 비중 측정후 U.S. No. 270 체로 습식체별하여 물로 세척한후 105°C에서 건조하여 각각의 무게를 달았다. 토성의 판정은 미국 농무성법의 분류기준을 따랐다. 각각의 토성은 세사양토, 미사양토 및 사양토였으며, 용적밀도, 고상 및 기상의 분포는 각각 $1.22 - 1.66 \text{ Mg/m}^3$, 45.9 - 47.5% 및 52.5 - 54.1%였다.

본 연구에서 사용된 다공질 세라믹 컵 산백토(도예용, 동영 세라믹스, 경주시, 대한민국)로 만들었다. 발에 세라믹 추를 설치하고 수거하는 것이 쉽고, 토양에 밀착이 잘 되도록 하기 위해 상부의 직경 5cm, 두께 5mm, 길이 10cm의 원추형으로 만들었으며(Fig. 1), 900°C에서 초벌구이 하였다. 대관령의 밭 토양(Table 1)을 채취하여 그늘에서 말린 후 2mm체로 정선하여 세라믹 추에 충전하였다. 세라믹 추에 채운 후 토양을 안정화시키기 위해 세라믹 추를 물속에 24시간 담가 두었다가 꺼내어 105°C의 건조기에서 48시간 건조하여 사용하였다. 세라믹 추에 채워진 토양의 무게는 50g이었다. 수분 측정 토양은 그늘에서 말려 2mm체로 정선한 다음 플라스틱 용기(63L, 가로×세로×높이: 55×36×32cm)에 채우고 충분히 관수하여 토양을 포습시킨 후 다음 세라믹 추 모양으로 토양을 파 내고 세라믹 추와 토양이 잘 밀착되도록 지그시 눌러 토양에 고정하고 보호 덮개를 씌웠다(Fig. 1). 플라스틱의 재질(PVC)의 보호 덮개는 강우와 일사에 의한 토양 수분함량 측정에 간섭을 줄 수 있기 때문에 그리고 이물질들이 들어가지 않도록 차단하기 위한 것이다.

3. 토양 물리성 측정, 세라믹 추 센서에 의한 토양수분 측정

토양의 용적밀도는 Campbell과 Henshall(1991)의 방법으로 부피 100mL의 코어로 채취하여 105°C의 건조기에서 48시간 건조하여 측정하였다. 이때 토양의 수분 함량은 코어 채취법, gypsum block(Watermark, Irrometer Inc. USA) 및 FDR 센서(WaterScout SM100, Spectrum Technologies, Inc. USA)을 사용하여 측정하였으며, 세라믹 추의 무게는 세라믹 추를 설치한 후 24시간이 경과한 후에 측정하였다. 일반적인 밭토양(사양토)를 사용하였으며 임의로 5수준 토양 수분 조건에 세라믹 추를 설치하고, 4일이 경과 후, 일부 토양의 시험 토양에 물을 추가하여 토양 수분의 함량을 증가시켰 때의 토양 수분 함량을 측정하였다.

4. 수분 함량 변화에 따른 세라믹 추 수분 함량 변화

수분 함량이 낮은 토양, 물을 충분히 공급하여 과습한 토양 등 5수준의 토양 수분 조건이 되도록 물량을 달리하여 공급한 후 24시간 동안 실온에 두어 안정시킨 후 세라믹 추를 토양 표면에서 5cm 깊이로 설치하였다. 토양수분 수준은 Fig. 2와 같다. 토양수분 level 4 및 5가 각각 10 및 5%에서 level 1, 2 및 3은 각각 15, 25 및 30%로 설정되었다. 수분 함량(volume/volume) 약 40%의 토양에 세라믹 추, 세라믹 콘과 FDR 센서(WaterScout SM100, Spectrum Technologies, Inc. USA)를 설치하여 두고 FDR 센서의 토양 수분 함량을 기준으로 12%까지 건조시킨 다음 다시 수분을 보충하여 토양 수분 함량을 증가시켰을 때, 세라믹 콘 내부의 토양 및 세라믹 콘의 수분 함량과 FDR 센서에 의한 토양 수분 함량의 변화를 조사하였다.

5. 통계 분석

토양수분 측정에 관한 모든 데이터들은 SAS 프로그램(Statistical analysis system ver.9.4, USA)을 이용하여 회귀분석(linear 및 non-linear 모델)을 수행하였고, 결정계수 값으로 세라믹 추 토양수분 함량 측정 센서의 성능(정밀도)을 검증하였다.

결과 및 고찰

1. 5가지 토양 수분 함량의 측정

토양 수분에 따른 세라믹 추의 반응성을 알아보기 위해, 5수준의 토양 수분 조건에 세라믹 추를 설치하고 경시적으로 세라믹 추의 무게를 측정하였을 때의 수분 함량의 변화를 살펴 보았다. 세라믹 추의 토양 수분 함량보다 더 낮았던 토양에서는 1일 후에 토양 수분 함량이 약간 낮아졌고, 수분 함량이 더

Fig. 2. Changes in soil water content in response to changes in surrounding soil moisture. The arrow indicates the time of water supply.

높은 토양에서는 세라믹 추의 토양 수분 함량이 더 높아졌다. 관수에 의해 토양 수분 함량을 높인 토양에서는 약 20%에서 26~27%로 토양 수분이 증가하였다(Fig. 2). 즉 세라믹 추 주위의 토양 수분 함량이 주변 토양의 수분 조건에 반응하여 변화되는 것을 확인할 수 있었다.

2. 토성에 따른 세라믹 추 수분 중량과 용적 수분 함량의 경시적 변화

공극률이 52-54%의 3종의 토양(세사양토, 미사양토, 사

Fig. 3. Changes in water weight of soil cone and volumetric water content with measured FDR sensor according to the texture of the soil. The values of dotted line were converted according to conversion ratio to make the water content values of the soil cone equal to the volumetric content of the test soil measured with the FDR sensor before water supply. The arrow indicates the time of water supply.

양토)에서 세라믹 추에 의한 중량의 변화와 FDR 센서에 의한 용적 수분 함량의 경시적 변화를 측정하였다. 관수하여 토양 수분 함량을 증가시키고 세라믹 추에 의한 수분 중량값을 관수 직전의 토양 수분 함량값을 기준으로 변환했을 때, FDR 센서에 의한 토양 수분 함량과 수분 중량 변환값이 유사하게 변동되는 것을 확인할 수 있었으나, 수분 중량 변환값은 2일 정도 오랜시간을 경과해야 FDR 센서에 의한 토양 수분 함량과 동일한 값을 보였다(Fig. 3). 이는 세라믹 추의 세라믹 콘의 두께가 5mm였고, 여기에 채운 토양이 너무 건조한 토양이었기 때문에 토양 수분의 이동이 상당히 지연되었기 때문이라고 생각된다. 따라서 이동 시간을 최대한 단축하기 위해서는 세라믹 추의 두께를 더 얇게 하고, 채우는 토양의 양과 수분의 상태도 적절히 조절해야 할 것으로 판단된다.

한편, FDR 센서로 측정된 용적 토양 수분 함량 선이 토양의 종류에 따라 서로 다르게 나타났지만 세라믹 추 수분 중량값은 토양의 종류와 관계없이 유사하게 나타나 이는 토양의 종류에 대한 반응이 둔감하기 때문으로 판단된다. 토양 수분 센서는 토양의 공극률과 같은 물리성이나 구성 성분, 답압 등의 조건에 따라 측정값이 달라지기 때문에 올바른 토양 수분 함량 측정을 위해서는 적용 토양에 따른 센서 보정이 필요하며 (Lim과 Kim, 2020), 또한 상용 센서들이 측정의 정도를 높이기 위해 제작 시 발생하는 기계적인 오차와 현장 사용 시에 발생하는 측정 오차를 감안해 보정하는 것에 비추어 볼 때 (Hur 등, 2009), 세라믹 추에 의한 토양 수분의 측정은 측정 토양에 따라 보정하는 번거로움을 줄일 가능성도 있다고 생각된다.

3. 세라믹 추에 의한 용적 수분 함량과 코어채취법 및 FDR 센서의 관계

토양 수분 조건을 5수준으로 달리 하였을 때, 3종의 토양에서 각각 세라믹 추에 의한 토양 수분 함량과 코어 및 FDR 센서로 측정된 용적 수분 함량을 측정하고 이들 값의 세라믹 추에 의한 용적 수분 함량의 관계를 분석하였다. 직선 회귀선의 기울기(0.52-0.82)는 토양에 따라 약간의 차이를 나타냈으며, 결정 계수가 모두 0.97을 상회하는 아주 밀접한 직선적 관계를 나타냈다(Fig. 4). 즉, 세라믹 추에 의한 용적 수분값은 범용적으로 활용되고 있는 FDR 센서나 코어에 의한 용적 수분 함량과 깊은 관련성이 있는 것으로 판단된다.

세라믹 추 전체 수분 중량과 세라믹 추 내부 토양의 용적 수분 함량의 관계를 살펴보면, 3종의 토양에 설치한 세라믹 추의 토양 수분 중량과 세라믹 추 내부 토양의 용적 수분 함량의 회귀식의 결정계수는 0.91-0.99였으며, 토성에 따른 차이는 크지 않았다(Fig. 5-A). 따라서 Fig. 4 회귀식의 차이는 토양의

종류에 따른 차이이기 보다는 설치한 세라믹 콘 자체 무게의 차이, 세라믹 콘 내부 토양의 균일도, 측정 토양의 수분 함량 차이와 재질 불균일성에 의한 차이일 것으로 추정되나, 이에 대한 검토는 좀 더 이루어져야 할 것으로 보인다. 이와 같이 측정 오차를 줄이기 위해서는 세라믹 추 제작의 균일성과 세라믹 콘 내부 토양의 균일도를 높이고, 세라믹 콘에 채워진 토양의 양을 적절히 조절하는 것이 좋을 것으로 필요하다고 판단되며, 수분의 이동이 잘 될 수 있도록 하여 측정의 정도가 더 향상시킬 필요가 있다고 생각된다. 또한 앞에서 측정된 값들을 토양에 따른 구별없이 모두 통합하여 세라믹 추 수분 중량과 세라믹 추 내부 토양 용적 수분 함량의 관계를 살펴보았을 때, 결정계수 0.92의 회귀식으로 나타나(Fig. 5-B) 세라믹 추의 수분 중량으로부터 시험 토양의 용적 수분 함량을 산출할 수 있을 것으로 판단하였다.

4. 수분 함량 차이에 따른 세라믹 추의 수분 함량 변화

세라믹 콘과 그 안에 채워진 토양의 수분 함량 값을 측정 시작 시 FDR 센서로 측정 한 시험 토양의 수분 함량과 동일하게 만들기 위해 수분 함량 값을 변환하였을 때, 이들 각각의 수분 함량 변화는 Fig. 6과 같다. 토양 수분이 낮아지다가 다시 높아질 때의 각각 그래프 선의 변곡점의 위치가 동일하게 나타났다. 토양이 건조되다가 다시 높아질 때 그 변화의 변곡점이 동일하게 나타나는 것으로 보아 주변 토양의 수분 변화가 반영되어 세라믹 추의 중량 변화의 반응이 잘 나타나고 있다고 판단된다.

여기서 토양 수분이 낮아지는 조건에서는 세라믹 콘 내부 토양의 수분 함량이나 시험 토양의 수분 함량이 동일한 변화를 보였지만, 수분이 다시 증가하는 변곡점 이후에는 FDR 센서에 의한 토양 수분 함량이 더 빠르게 나타나 둘 사이의 간격이 더 벌어지는 변화를 보였다(Fig. 6). 이는 건조할 때는 세라믹 콘 바깥의 토양이 더 잘 마르므로 토양 수분이 세라믹 콘 내부

Fig. 4. The relationship of water content of soil filled in the ceramic cone to water content by core method (A) and the water content of test soil measured with FDR sensor (B).

Fig. 5. The relationship between water content of soil filled in the ceramic cone and water weight of soil cone installed at 3 different soils, respectively.

Fig. 6. Changes of water contents of ceramic cone, soil filled in ceramic cone, and tested soil measured with FDR sensor. According to the respective conversion ratios to make the moisture content values of the ceramic cone and of the soil filled in the ceramic cone equal to the water content of the test soil measured with FDR sensor at the beginning of the measurement, the water content values measured were converted.

토양에서 세라믹 콘을 거쳐 FDR 센서가 설치되어 있는 시험 토양으로 수분이 이동하지만, 다시 수분이 시험 토양에 공급 되어 그와 반대 방향으로 토양 수분의 이동에서 일어나기 때문이라고 생각된다. 다시 가습하는 조건일 때는 수분 공급 이 FDR 센서 위치와 가깝다는 것과 세라믹 콘에 의한 지연으로 말미암아 FDR 센서값의 증가가 빠르게 나타난다. 따라서 세라믹 콘 내부 토양의 반응이 다소 늦게 나타난 때문으로 해석된다. 토양 수분은 계속 유동하기 때문에 토양 수분의 이동은 토양 중에서 끊임없이 일어나지만 실제로 토양 수분의 평형은 거의 이루어지지 않으므로(Lim, 1984), 따라서 토양 수분이 건조할 때와 다시 가습했을 때의 차이가 다소 있을 것으로 판단된다.

한편, 시험에 사용한 세라믹 콘은 FDR 센서를 기준으로 토양 수분 함량이 25% 이상이 되었을 때 일정한 값을 보이고 더 이상 증가하지 않은 것으로 보아 세라믹 콘이 수분으로 포화 되었을 것으로 판단되며, 토양 수분 함량이 25% 이하로 되었을 때 급격히 감소하고, 다시 토양 수분 함량이 증가되었을 때 급격하게 상승하였고 25%에 도달한 후에는 토양 수분 함량이 증가하지 않는 마찬가지 모습을 보였다. 이런 결과로 미루어 볼 때, 세라믹 콘에 의한 간섭을 최소화하는 것이 측정 정도를 높일 것으로 판단되며 따라서 세라믹 콘의 밀도와 두께를 적절히 조절해야 할 것으로 판단된다.

한편, FDR 센서에 의한 토양 수분 함량과 세라믹 추 내부 토양의 용적 수분 함량과의 관계는 결정계수 0.96, 표준오차 0.06 및 제공근의 오차는 4.86의 직선 회귀식으로 나타났으며 (Fig. 7-A), 이 때 세라믹 추 중량과의 관계는 결정계수 0.97,

Fig. 7. The relationship between water content of soil filled in the ceramic cone (A) $n=20$, total weight of the soil cone (B) $n=20$ and water content of test soil measured with FDR sensor. Model testing showing the relationship between volumetric water content calculated from regression equation that measured with FDR sensor (C) $n=12$. *** significantly different at 0.001 of probability level.

표준오차 0.03 및 제공근의 오차는 1.02의 2차 회귀식으로 나타났다(Fig. 7-B). 이와 같은 방법으로 관계식을 도출하여 적용하면 토양의 수분 함량을 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 세라믹 추에 의한 토양 수분 함량 측정의 정도를 검증하였다. 세라믹 추의 중량과 FDR 센서에 의한 용적 수분 함량의 관계식으로부터 도출된 용적 수분 함량과 FDR 센서에 의

한 용적 수분 함량 사이는 결정계수 0.99, 표준오차 0.04 및 제곱근의 오차는 1.30의 함수관계를 보였다(Fig. 7-C). 그런데 본 검증은 FDR 센서값과 비교된 것으로 앞서 밝힌 Fig. 5에서 3종의 토양에 따른 결과에 나타났듯이 FDR 센서 측정값과의 회귀식의 결정계수보다 코어 측정값과의 회귀식의 결정계수가 더 높았던 결과로 미루어 볼 때, 세라믹 추 중량과 코어 측정법에 의한 용적 수분 함량의 관계는 더 밀접한 관계를 나타낼 것으로 추정되나 이에 관해서는 앞으로 더 분석되어야 할 것이다. 한편 세라믹 추에 의한 토양 수분의 측정은 자동 중량용 거동 장치를 이용하면 실시간 토양 수분의 측정이 가능하므로 자동 관수 분야에도 적용 가능할 수 있을 것으로 보인다(Ok 등, 2018). 일반적으로 널리 사용되고 있는 TDR 센서나 FDR 센서는 측정하기 간편하기는 하지만 센서와 토양 접촉면에 의한 측정 오차로 말미암아 정도를 높이는데 어려움이 있고(Wang 등, 2020; Topp와 Davis, 1985), 비교적 비싼 편이다. 결론적으로 세라믹 추는 저울만 있으면 측정이 가능하고 비파괴적으로 측정이 간단하면서 저렴하여, 앞으로 작물 재배에서 토양 수분 측정에 의한 합리적인 관수가 이루어지는데 어느 정도의 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

결 론

토양 수분 함량을 측정하는 세라믹 추에서 세라믹 콘의 형태는 토양 밀착성과 중량 측정을 위해 수시로 수거하기 쉽고, 이때 토양의 교란을 최소화하기 위해 원추형으로 만들었다. 세라믹 콘은 견고성을 유지하면서 수분 이동의 장애를 최소화하기 위하여 3mm 정도의 두께로 만들어 졌다. 세라믹 추를 이용하여 토양 수분을 측정함에 있어서, 세라믹 추의 무게는 FDR 센서에 의해 측정된 토양 수분 함량과 유사하게 변동되었다. 세라믹 추에 의한 토양 수분 함량은 3종의 토양 시료에 따른 반응의 차이는 크지 않았다. 세라믹 추에 의한 용적 수분 함량과 FDR 센서에 의한 토양 수분 함량의 관계는 3종의 토양 시료에 따라 결정계수 0.92 – 0.98의 직선적 관계를 보였으며, 마찬가지로 코어에 의한 용적 수분 함량과는 결정계수 0.97 – 0.99의 직선적 관계를 나타냈다. 또한 세라믹 추 수분 중량에 대한 세라믹 추 내부 토양의 용적 수분 함량은 결정계수 0.91 – 0.99의 2차 회귀식으로 표현되었다. 한편, FDR 센서에 의한 토양 수분 함량의 세라믹 추 내부 토양의 용적 수분 함량과의 관계는 결정계수 0.96의 직선 회귀식으로 나타났으며, 이때 세라믹 추 중량과의 관계는 결정계수 0.97의 2차 회귀식으로 나타났다. 세라믹 추에 의한 토양 수분 함량 측정의 정도를 검증하기 위하여 세라믹 추의 중량과 FDR 센서에 의한 용적 수분함량의 관계식으로부터 도출된 용적 수분 함량과 FDR

센서에 의한 용적수분함량의 관계는 결정계수 0.99의 고도로 유의한 결과를 보였다. 따라서 세라믹 추의 중량 변화로부터 토양 수분의 측정이 가능하다고 판단되며, 앞으로 농가 현장에서 이를 활용한 토양 수분 측정으로 더욱 합리적인 토양 수분 관리에 도움이 되기를 기대한다.

적 요

토양 콘의 무게를 기반으로 한 간단한 토양 수분 측정 방법이 개발되었다. 토양 콘은 토양으로 채워진 원추형 다공성 세라믹 컵이다. 세 가지 토양 샘플에서 코어 방법과 FDR (Frequency Domain reflectometry) 방법에 의한 토양 수분 함량은 직선 회귀식의 결정계수가 각각 0.92 – 0.98 및 0.97 – 0.99였으며, 선형 관계였다. 토양 세라믹 콘 내부 토양의 체적 수분 함량과 콘 내부 토양 수분 중량 및 FDR의 센서 값의 회귀 결과 결정계수가 각각 0.96 및 0.97였다. 토양 콘 중량과 FDR 센서 값($r^2 = 0.99, p < 0.001$) 사이는 높은 유의한 상관관계가 있었다. 따라서 토양 콘의 무게를 측정하여 토양 수분 함량을 측정할 수 있었다.

추가주제어: 유전율센서, 토양수분함량, 토양 콘, 텐시오미터

사 사

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01385901)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Campbell D.J., and J.K. Henshall 1991, Bulk density. pp 329-366. In K.A. Smith and C.E. Mullins (ed.) Soil analysis. Physical methods. Marcel Dekker, New York.
- Campbell J.E. 1990, Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. soil Sci. Soc. Am. J 54:332-341. doi:10.2136/sssaj1990.03615995005400020006x
- Eom K.C., K.S. Ryu, and K.T. Um 1988, Comparison of the measurement methods of soil water content by error analysis. Korean J. Soil Sci. Fert. 21:367-372. (in Korean)
- Fouad Y., D. Michot, Z. Thomas, R.V. Rossel 2014, Soil water content estimation using visible and near infrared spectroscopy. p. 588. In Proceedings of the 20th World Congress of Soil Science, Jeju, Korea. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE02447691>
- Hur S.O., S.K. Ha, and J.G. Kim 2009, Verificaion of TDR and FDR sensors for volumetric soil water content measurement in sandy loam soil. Korean J. Soil Sci. Fert 42:110-116. (in

- Korean)
- Jung I.K., Y.C. Chang, K.B. Kim, Y.I. Kim, and S.O. Chung 2007, Development of a digital soil tensiometers using porous ceramic cups. *J. of biosystems Eng* 32:448-454. doi:10.5307/JBE.2007.32.6.448 (in Korean)
- Kim C.K., and G.C Lee 1996, *New agriculture hydraulics*. Hyangmunsa, Seoul, Korea.
- Kim K.B., S.C. Kim, D.S. Joo, and D.J. Yoon 2003, Precision measurement of water content in soil using dual RF impedance changes. *J. Korean Soc. Agric. Machinery* 28:369-376. (in Korean)
- Lim S.E., and J.Y. Kim 2020, Comparison of soil moisture sensor calibrations for various soil types for strawberry cultivation. p. 28. In *Proceeding of the Society of People, Plants, and Environment 2020(1)*. Muan, Korea.
- Lim S.U. 1984, *Soil science theory*. Munundang, pp 102-103.
- Novak V., and H. Hlavacikova 2019, Soil water content and its measurement. In *Applied soil hydrology. Theory and applications of transport in porous media* 32:49-61. Springer, Cham.
- Oh Y.T., S.S. Oh, K.C. Song, J.S. Shin, and J.N. Im 1998, application of dielectric sensor for soil moisture measurement. *Korean J. Soil Sci. Fert* 31:85-94. (in Korean)
- Ok J.H., K.H. Han, Y.J. Lee, Y.S. Zhang, H.R. Cho, S.A. Hwang, S.S. Kim, J.H. Lee, and D.J. Kim 2018, Water balance for Chinese cabbage in spring season with different upland soils evaluated using weighable lysimeters. *Korean J. Soil Sci. Fert* 51:555-563. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.2018.51.4.555
- R. Evett S.R., R.C. Schwartz, J.J. Casanova.a, and L.K. Heng 2012, Soil water sensing for water balance, ET and WUE. *Agricultural Water Management* 104:1-9. doi:10.1016/j.agwat.2011.12.002
- Topp G.C., and J.L. Davis 1985, Measurement of soil water content using time-domain reflectometry in field evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J* 49: 19-24. doi:10.2136/sssaj1985.03615995004900010003x
- Wang M., X. Li, L. Chen, S. Hou, G. Wu, and Z. Deng 2020, A modified soil water content measurement technique using actively heated fiber optic sensor. *J. Rock Mech. Geotech. Eng* 12:608-619. doi:10.1016/j.jrmge.2019.11.003