

노지 과수원 토성별 수분보유 특성 및 FDR 센서 보정계수 비교

이기람¹ · 김종균¹ · 이재범¹ · 김종윤^{2*}

¹고려대학교 식물생명공학과 대학원생, ²고려대학교 식물생명공학과 교수

Comparisons of Soil Water Retention Characteristics and FDR Sensor Calibration of Field Soils in Korean Orchards

Kiram Lee¹, Jongkyun Kim¹, Jaebeom Lee¹, and Jongyun Kim^{2*}

¹Graduate Student, Department of Plant Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

²Professor, Department of Plant Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

Abstract. As research on a controlled environment system based on crop growth environment sensing for sustainable production of horticultural crops and its industrial use has been important, research on how to properly utilize soil moisture sensors for outdoor cultivation is being actively conducted. This experiment was conducted to suggest the proper method of utilizing the TERS 12, an FDR (frequency domain reflectometry) sensor, which is frequently used in industry and research fields, for each orchard soil in three regions in Korea. We collected soils from each orchard where fruit trees were grown, investigated the soil characteristics and soil water retention curve, and compared TERS 12 sensor calibration equations to correlate the sensor output to the corresponding soil volumetric water content through linear and cubic regressions for each soil sample. The estimated value from the calibration equation provided by the manufacturer was also compared. The soil collected from all three orchards showed different soil characteristics and volumetric water content values by each soil water retention level across the soil samples. In addition, the cubic calibration equation for TERS 12 sensor showed the highest coefficient of determination higher than 0.95, and the lowest RMSE for all soil samples. When estimating volumetric water contents from TERS 12 sensor output using the calibration equation provided by the manufacturer, their calculated volumetric water contents were lower than the actual volumetric water contents, with the difference up to $0.09 - 0.17 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ depending on the soil samples, indicating an appropriate calibration for each soil should be preceded before FDR sensor utilization. Also, there was a difference in the range of soil volumetric water content corresponding to the soil water retention levels across the soil samples, suggesting that the soil water retention information should be required to properly interpret the volumetric water content value of the soil. Moreover, soil with a high content of sand had a relatively narrow range of volumetric water contents for irrigation, thus reducing the accuracy of an FDR sensor measurement. In conclusion, analyzing soil water retention characteristics of the target soil and the soil-specific calibration would be necessary to properly quantify the soil water status and determine their adequate irrigation point using an FDR sensor.

Additional key words: automated irrigation system, irrigation, retention curve, soil moisture sensor, soil water, volumetric water content

서 론

최근 부각되고 있는 지속가능한 농업을 위해 효율적인 작물 환경 조절을 통한 최적 작물 생산 방안에 대한 다양한 연구 및 현장 적용이 이루어지고 있다. 주로 시설 온실 내 광, 온도, 이산화탄소와 같은 환경조건을 대상으로 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 작물 생산의 대부분을 차지하고 있고 환경조절

이 상대적으로 어려운 노지에서의 환경조절 기술 역시 필요한 상황이다. 노지에서 작물 환경조건 중 우선하여 제어하게 되는 토양 수분은 작물이 알맞게 생육하는 데에 기본적이며 중요한 요소로, 작물의 생육 단계뿐 아니라 주변 환경의 영향으로 계속해서 변화하기에 작물의 최적 생산을 위해서는 지속적인 관리를 요한다. 또한 최근 전 세계적으로 문제가 되고 있는 기후변화로 인해 농업에서의 물 자원 효율적 이용 방안에 대한 관심이 더욱 고조되고 있으며, 토양 수분을 효율적으로 관리하기 위한 다양한 관수 방법(스프링클러, 점적, 미세관수 등)의 개발과 작물의 주변 환경조건에 따라 관수 개시 시점 및

*Corresponding author: jongkim@korea.ac.kr

Received September 29, 2022; Revised October 18, 2022;

Accepted October 19, 2022

관수량을 자동으로 제어하는 기술을 사용해 노동력과 비용을 절감하는 연구들이 수행되고 있다(Heermann, 1996; Kim 등, 2014). 특히 토양 수분을 실시간으로 측정할 수 있는 다양한 센싱 기술 개발과 이를 활용한 자동관수 시스템을 통해 작물 생육에 알맞은 토양 수분 환경을 조성함과 동시에 효율적인 물 이용으로 최적 작물 생산에 대한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다(Kim, 2014; Li, 2012; Pereira, 1999).

토양 내 수분 환경을 제시하는 기준으로는 토양이 지니고 있는 보수력을 측정하는 토양수분장력이나 토양 내 실제 수분의 함량을 주로 이용한다. 토양의 보수력은 토양수분장력계를 통해 측정할 수 있으나 탈기수의 지속적인 보급 등 관리가 필요하고, 현장 설치에 있어 다양한 주변 환경에 영향을 받는 단점이 있다(Teixeira 등, 2003). 토양 수분함량을 측정하는 방법으로는 건조 전 토양의 무게와 건조 후의 무게를 비교하여 그 비율을 계산한 중량수분함량을 측정하는 건조중량법과 토양의 부피에 대한 토양수분의 비율을 계산한 용적수분함량이 있으나, 토양 채취 과정에서 작물의 뿌리 손상을 일으킬 수 있으며, 실시간 측정이 어려운 단점이 있다. 반면, 비파괴적으로 토양 수분함량을 측정하는 방법으로 중성자법, 전기저항법, time domain reflectometry(TDR), frequency domain reflectometry(FDR) 등의 방법이 있으며(Novák and Hlaváčiková, 2019), 그 중 물의 유전상수(dielectric constant)를 통해 토양 내 수분함량을 측정하는 센서(TDR, FDR)가 현장에서 가장 널리 사용되고 있다(Adeboye 등, 2021; Böhme 등, 2013). 특히 FDR 센서는 비교적 가격이 합리적이고 관리가 용이하여 생산 현장에 적합한 토양 센서로 다양한 자동관수 시스템에 활용되고 있으나, 정확한 수치 측정을 위해서는 각 배지에 알맞은 센서 보정(calibration)작업이 요구되는 단점이 있다(Jones, 2004; Kim, 2014; Muñoz-Carpena, 2004).

시판되는 환경측정 센서들은 출고되기 전 공장 교정(factory calibration)을 통해 센서별로 같은 환경에서 일정한 센서 측정값(Raw)을 출력하도록 조정된다. 그러나 FDR 센서의 경우 측정하는 배지의 성질에 따라 실제 수분함량에 따른 센서 측정값에 차이가 발생하며, 이에 따라 센서 제조사에서는 대표적인 배지 종류에 적합한 여러 개의 센서 보정식들을 제공하고, 사용하는 배지에 맞춰 적용하길 권장하고 있다(Doležal 등, 2008; Ramson 등, 2021). 그러나 이 보정식들은 제조사에서 측정한 토양을 기준으로 보정되어 있어, 실제 측정할 토양 및 상토의 물리적 특성에 따라 적합하지 않을 수 있고, 특정한 수분 범위를 벗어나면 토양수분함량을 측정하는 데 있어 정확성이 떨어지기 때문에 측정값의 신뢰도가 낮아지게 된다(Rhie와Kim, 2017; Veldkamp과 O'Brien, 2000). 이에 FDR 센서의 활용 시, 정확한 토양수분함량을 측정하기 위해서는

사용할 배지에 알맞은 보정식 도출이 선행되어야 한다고 보고된 바 있다(Kang 등, 2019; Nagahage 등, 2019). 또한, 토양수분함량만으로는 식물이 이용할 수 있는 수분의 정도를 파악하기 어려우므로, 특정 토양의 수분보유곡선(soil water retention curve)을 이용해 토양의 보수력과 토양수분함량의 관계를 확인하고, 이를 통해 작물의 최적 생육을 위한 적정 관수시점을 토양의 보수력 기반으로 제시할 수 있다(Geroy 등, 2011).

이에, 본 실험은 노지 과수원에서 FDR 센서를 활용하여 토양의 용적수분함량을 측정하고 관수 계획에 이용할 시, FDR 센서 보정식에 따른 토양 용적수분함량 수치 차이와 관수에 적합한 용적수분함량 수치를 제시하기 위하여 수행되었다. 이를 위해 국내 세 지역의 과수원에서 토양을 채취하여 토양별 수분보유특성을 조사하고, 토양별 FDR 센서 보정을 진행하여, 각 토양에 따른 관수를 위한 적정 수분함량 범위와 FDR 센서 보정식의 보정계수 도출 및 비교를 통해 노지 토양에서 FDR 센서 활용시 알맞은 이용 방안을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 토양 시료의 채취 및 토성 분석

본 실험은 국내 세 지역에 위치한 과수원의 토양을 시료로 하여 수행되었다. 충청북도 옥천에 소재하고 있는 충청북도 농업기술원 포도 다래 연구소의 비가림 재배 포도원(CB, 36° 33'N 127° 76'E, 해발 119m), 충청남도 예산에 소재하고 있는 충청남도농업기술원의 배 포장(CN, 36° 74'N 126° 81'E, 해발 43m), 경상북도 안동에 소재하고 있는 안동시 농업기술센터 사과 포장(GB, 36° 54'N 128° 80'E, 해발 107m)에서 각 과수를 재배하고 있는 토양 시료를 채취하였다. 토성 분석 및 토양별 보수력 조사에 사용한 토양 시료는 지표로부터 20cm 깊이로 기준으로 각 3곳 이상을 임의로 선정해 균일하게 수집하였다. 각 수집 토양별로 비중법을 사용하여 토성을 분석하였으며, 각 토양의 보수력은 각각의 토양수분보유곡선을 통해 최대용수량, 포장용수량, 영구위조점을 조사하였다.

2. 토양별 수분보유곡선 측정

토양별 수분보유곡선을 통해 토양수분장력에 따른 토양수분함량을 측정하기 위해 토양수분 보수력 측정기(HYPROP; METER Group, Pullman, WA, USA)를 사용하였다. 각 과수원에서 채취한 토양 시료별로 균질화한 시료를 소분하여 물을 담고 용기의 상부를 막은 상태로 24시간 이상 포화시킨 후, 높이 5cm, 지름 8cm의 원통형 전용 용기에 포화한 상태로 충전하였다. 자연 상태에서 건조 상태를 지속하며 1.25cm과 3.75cm에 위치한 토양장력센서와 HYPROP 전용 저울을 컴퓨터에

연결하여 약 6일간의 토양 샘플의 토양수분장력과 용적수분 함량 변화를 측정하였다(Schindler 등, 2015). 이후 측정 결과를 HYPROP Fit 소프트웨어의 traditional constrained van Genuchten-Mualem model(Van Genuchten, 1980)을 적용하여 토양 시료별 수분보유곡선을 분석하였고, 이를 통해 각 토양 샘플의 최대용수량(maximum water holding capacity, 0kPa), 포장용수량(field capacity, -33kPa), 영구위조점(permanent wilting point, -1,500kPa)과 각각에 해당하는 용적수분함량 값을 도출하였다.

3. FDR 센서 용적수분함량 수치 보정

본 실험에서는 각 토양의 용적수분함량 측정을 위하여 FDR 센서인 TEROS 12(METER Group, Pullman, WA, USA)를 4개 사용하여 각 토양에 알맞게 보정 작업을 진행하였다. TEROS 12 센서는 SDI-12 형식의 통신방식을 가지고 디지털 값을 출력하는 센서이므로 CR1000 데이터로거(Campbell scientific, Logan, UT, USA)의 control port에 연결하였으며, 4초마다 각 센서에서 읽히는 Raw 값을 측정하였다. 각 토양 시료는 다양한 토양 용적수분함량 처리를 제공하기 위하여 2 주 이상 풍건한 토양을 사용하였으며, 보정 시 오차를 줄이기 위해 동일한 용적밀도를 갖도록 440mL씩 24개 이상 소분하였다. 소분한 시료는 0mL부터 220mL까지 20mL 간격으로 수분을 더한 뒤 균일하게 혼합하였으며, 2번씩 반복하여 총 12 수준의 수분함량 24개 시료를 준비하였다. 각 토양 시료는 440mL 화분에 동일한 부피를 유지하며 충전한 뒤 중량을 측정하였으며, 이때 CB, CN, GB 토양의 용적밀도는 각각 1.36 ± 0.10 , 1.30 ± 0.16 , $1.33 \pm 0.14 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (mean $\pm$ SD)이었다. 다양한 토양 및 수분함량 시료별로 화분 위에서 TEROS 12 센서를 수직으로 꽂아 센서의 Raw 값 수치를 기록하였다. 센서 Raw 값의 측정 이후 각 토양 시료를 80°C 건조 오븐에서 1 주 일 이상 충분히 건조한 뒤, 건조토양 중량을 측정하였다. 습윤 토양과 건조토양의 중량 차이를 통해 토양 내 수분함량을 계산하였으며, 이를 440mL로 나누어 토양 용적수분함량을 산출하였다. 시료별로 센서의 Raw 값에 따른 토양 용적수분함

량에 대응하여 회귀 분석(선형 회귀 분석, 3차 회귀 분석)을 진행하여 토양별 보정식을 도출하였다.

4. 통계 분석

토양별로 TEROS 12 센서 보정을 위하여 각 센서의 Raw 값에 대응하는 토양 용적수분함량의 상관관계를 Sigmaplot 11.0(Systat Software, San Jose, CA)을 이용하여 선형 회귀 분석 및 3차 회귀 분석을 수행하였다. 각 회귀식의 결정계수(R^2) 값을 이용하여 보정식의 해석 능력을 비교하였으며, 토양 및 보정식(제조사 제공 mineral soil 보정식, 선형 회귀 보정식, 3차 회귀 보정식)별로 보정식의 산출값이 실제 측정값과 얼마나 유사한지 평균제곱근오차(RMSE, root mean square error)를 이용하여 비교하였다.

5. 노지 과수원 FDR 센서 실측 데이터 비교

토양별 보정식의 적용에 따라 토양수분함량 측정의 차이를 알아보기 위하여, 각 과수원에 FDR 센서를 설치하여 실측 토양수분함량의 변화를 비교하였다. 시료를 채취한 각 지역의 토양에는 관수 지점으로부터 20cm 지하 지점에 TEROS 12 센서를 설치하고 각 과수의 생육이 활발한 6월 중 2 주 기간의 데이터를 수집하여 각 보정식(제조사 제공 mineral soil 보정식, 3차 회귀 보정식)을 대입한 용적수분함량 변화를 비교하였다.

결과 및 고찰

1. HYPROP를 이용한 토양별 수분보유곡선 도출

본 실험에 사용된 국내 세 지역 과수원의 토양 분석 결과 충청북도 옥천 포도원의 CB 토양은 사질양토, 충청남도 예산 배포장의 CN 토양은 사질식양토, 경상북도 안동 사과 포장의 GB 토양은 양질 사토 성질의 토양으로 확인되었다(Table 1). 각 토양 시료의 토성에 따라 수분보유곡선을 분석한 결과, 토양 시료 종류에 따라 최대용수량, 포장용수량, 영구위조점 범위에서의 용적수분함량과 보수력 도달 양상에서 차이가 나타

Table 1. Soil type and the volumetric water contents according to the maximum water holding capacity, field capacity and permanent wilting point of the soil samples from orchards (CB, Chungbuk; CN, Chungnam; GB, Gyeongbuk).

Soil sample	Soil type	Soil volumetric water content ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)		
		Maximum water holding capacity (0 kPa)	Field capacity (-33 kPa)	Permanent wilting point (-1,500 kPa)
CB	Sandy loam	0.477	0.332	0.170
CN	Sandy clay loam	0.440	0.304	0.221
GB	Loamy sand	0.405	0.170	0.087

남을 확인하였다(Table 1, Fig. 1). 사질 성분이 많은 GB 토양은 최대용수량, 포장용수량, 영구위조점에 해당하는 용적수분함량 값이 다른 CB, CN 토양에 비해 낮게 나타났다. 특히, 포장용수량, 영구위조점에 해당하는 용적수분함량은 매우 큰 차이가 있어, 용적수분함량이 동일한 $0.17\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 일 경우 GB 토양은 작물에 충분한 수분을 공급할 수 있는 포장용수량에 근사한 수분 상태를 가지는 것으로 나타났으나, CB 토양은 작물에 심각한 건조를 야기할 수 있는 영구위조점에 가까운 수분 상태를 가지는 것을 확인할 수 있었다. CN 토양의 경우 $0.17\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 용적수분함량은 영구위조점 이후의 수치로 토양 자체로도 매우 건조한 상태이므로, 토성을 고려하지 않은 단순 용적수분함량 기준으로는 토양 수분 해석에 큰 오류를 범할 수 있다. Fig. 1의 토양별 수분보유곡선을 살펴보면 특히 사질 성분이 많이 함유된 GB 토양의 경우 다른 CB와 CN 토양에 비하여 포장용수량 구간($-10 \sim -33\text{kPa}$)에서 더 급격한 토양수분함량 감소를 확인할 수 있었다. 또한 CB와 CN 토양 사이에서도 각 토양의 수분보유곡선에서 -100kPa 를 기점으로 장력이 증가할수록 CB 토양이 CN 토양보다 토양 용적수분함량의 감소가 빠르게 나타났다. 이러한 토양별 수분보유곡선의 차이는 토양의 입자 분포와 용적밀도, 유기물의 양 등 여러 요소에 따라 토양 내 수분함량에 따른 토양수분장력의 변화 양상이 다르기 때문이다(Arya와 Paris, 1981). 따라서 토양 용적수분함량을 기준으로 관수 기준점을 정하거나 토양의 수분 상태를 비교하기 위해서는 각 토양의 물리적 분석과 수분보유곡선의 분석이 반드시 선행되어야 할 것이며, 토양의 물리적 성질에 기반한 수분 상태를 기준으로 삼아야 할 것이다(Caron 등, 2016). 이러한 토양의 수분보유특성을 토양 센서 보정을 수행하기 전에 파악한다면, 실제 작물의 생육에 필요한 적정

용적수분함량 범위를 미리 확인할 수 있고, 각 용적수분함량 수치와 이의 변화 양상을 이해할 때, 토양의 보수력 상황에 맞게 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 토양별 FDR 센서 용적수분함량 보정식 비교

TEROS 12 센서 제조사에서는 일반적인 광질 토양(mineral soil)에 적용할 수 있는 보정식을 제공하고 있으나, 토양별로 보정식을 구하여 적용하는 것을 추천하고 있으며 제조사가 제공하고 있는 광질 토양 보정식은 1차 회귀식, 무토양매지(soilless media) 보정식은 3차 회귀식을 제시하고 있다(METER Group, 2018). 본 연구 결과에서는 모든 토양에서 제조사가 제공한 광질 토양 보정식은 실제 용적수분함량에 비해 낮은 수치로 보정하였으며 토양에 따라 실제 용적수분함량에 비해 최대 $0.09 - 0.17\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ 가량 낮은 용적수분함량 수치를 보여, 제조사에서 제공한 보정식을 사용할 경우 실제 용적수분함량 예측에 오류가 있을 것으로 나타났다(Fig. 2). 반면 각 토양의 용적수분함량에 따른 TEROS 12 센서의 Raw 값을 기반으로 보정할 때, 선형 회귀 분석을 사용한 경우 CB, CN, GB 토양의 보정식 R^2 값은 각각 0.89, 0.97, 0.96이었으나, 3차 회귀 분석을 사용했을 때는 각각 0.95, 0.97, 0.99로 선형 회귀 분석보다 더 높은 R^2 값을 도출할 수 있었다(Table 2). 따라서 토양의 센서 보정 시 3차 회귀 분석을 사용하는 것이 선형 회귀 분석을 사용하는 것보다 더 정확한 보정식을 도출할 수 있는 적합한 방법으로 판단되었다. 또한, 보정식에 따른 토양 용적수분함량의 예측 값과 실제 용적수분함량 값의 차이를 RMSE로 비교 분석하였을 때, 모든 토양에서 3차 회귀 보정식이 가장 낮았으며, 제조사 보정식은 3차 회귀 보정식의 3배 이상의 RMSE 값을 지닌 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 FDR 센서의 알맞은 보정이 이루어지지 않을 경우 토양의 용적수분함량을 다르게 예측할 수 있으므로, FDR 센서 측정치를 통해 올바른 용적수분함량 수치로 변환하기 위해서 각 토양에 따른 FDR 센서의 보정이 반드시 선행되어야 함을 제시한다.

토양별 용적수분함량에 따른 TEROS 12 센서 측정치의 전체 범위는 토양 시료에 상관없이 건조한 조건의 수치(Raw ≈ 1900)와 포화에 가까운 수치(Raw ≈ 2700)에 큰 차이가 없었다(Table 3). 그러나 본 연구에서 산출한 3차 회귀 보정식을 통해 TEROS 12 센서의 기본 측정치를 기준으로 토양 보수력을 해석하는 데는 토양 시료에 따른 센서 측정치에 큰 차이가 있었다. 영구위조점에서는 CN 토양과 GB 토양에서 각각 2166, 1964의 센서 측정치를 보이며 최대 200 정도의 차이가 있었으며, 포장용수량의 경우 CB 토양과 CN 토양의 센서 측정치가 2498, 2451로 유사하게 나타났으나, GB 토양의 센서 측정

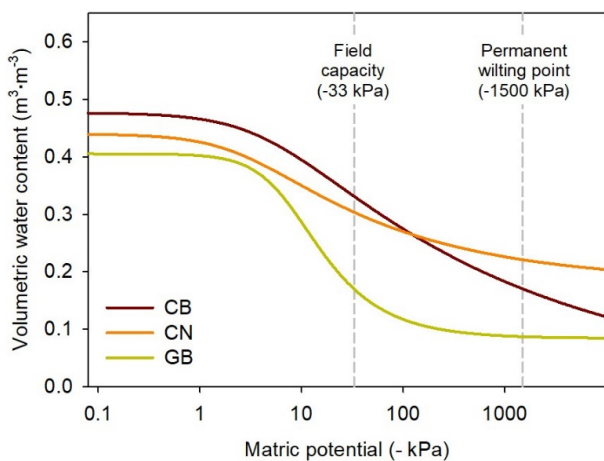


Fig. 1. Soil water retention curves of the soil samples from three orchards in Korea (CB, Chungbuk; CN, Chungnam; GB, Gyeongbuk).

치는 2090으로 토양에 따라 유사한 보수력을 측정하는 데 400 정도의 센서 측정치 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 FDR 센서를 통해 토양의 용적수분함량을 올바르게 측정하는 것도 중요하지만, 토양별 용적수분함량에 해당하는 토양 보수력을 제대로 이해하고, 이를 통해 용적수분함량 수치의 알맞은 해석이 필요하다는 것을 제시한다(Lekshmi 등, 2014).

FDR 센서를 통해 토양의 수분함량을 측정하고, 이를 통해 관수 개시점을 선정할 경우는 영구위조점 이상, 포장용수량

이하 수준 범위에서 관수 개시를 위한 수준을 선정하는 것이 타당할 것이다. CB 토양의 경우 센서가 측정할 수 있는 건조 토양에서 포화 수준까지 총 762구간의 센서 측정치 중 491구간이 관수 개시점 선정에 적합한 구간이나, GB 토양의 경우 전체 구간은 810으로 다른 토양과 큰 차이가 없었으나, 포장용수량 이상의 범위가 620구간으로 대부분을 차지하고, 관수 개시점 선정에 어려움이 있을 것으로 판단된다(Table 3). 이는

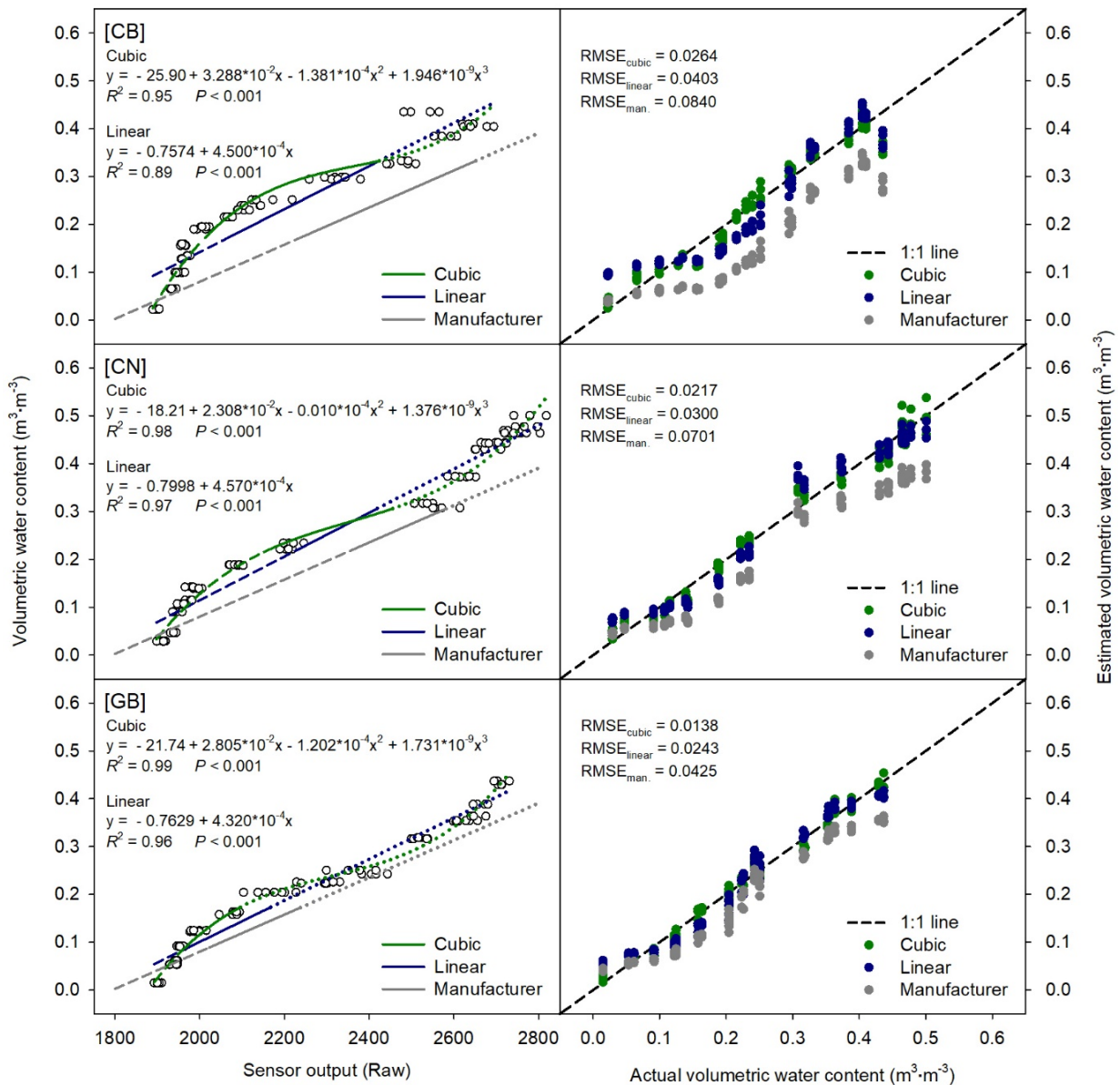


Fig. 2. Comparison of TEROS 12 sensor calibrations (left) and their estimations (right) of the soil samples from three orchards in Korea (CB, Chungbuk; CN, Chungnam; GB, Gyeongbuk). The calibration equations were acquired from cubic regression, linear regression, and mineral soil calibration equation in the manufacturer manual. Short dash line, solid line, dotted represent the ranges of below the permanent wilting point ($-1,500\text{kPa}$), field capacity (-33kPa), and above the field capacity, respectively.

Table 2. TERS 12 calibration coefficients of the soil samples from three orchards in Korea (CB, Chungbuk; CN, Chungnam; GB, Gyeongbuk). In linear calibration equation, volumetric water content ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) = $\beta_1 \times \text{Raw} + \beta_2$. In cubic calibration equation, volumetric water content ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) = $\beta_1 \times \text{Raw}^3 + \beta_2 \times \text{Raw}^2 + \beta_3 \times \text{Raw} + \beta_4$.

Soil sample	Linear calibration equation			Cubic calibration equation				
	β_1	β_2	R^2	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2
CB	4.500×10^{-4}	-0.7574	0.8914	1.946×10^{-9}	-1.381×10^{-4}	3.288×10^{-2}	-25.90	0.9535
CN	4.570×10^{-4}	-0.7998	0.9651	1.376×10^{-9}	-0.010×10^{-4}	2.308×10^{-2}	-18.21	0.9818
GB	4.320×10^{-4}	-0.7629	0.9638	1.731×10^{-9}	-1.202×10^{-4}	2.805×10^{-2}	-21.74	0.9884

Table 3. TERS 12 sensor output at dry soil, permanent wilting point (PWP), field capacity (FC), and near saturation, and the sensor output range of the soil samples from three orchards in Korea (CB, Chungbuk; CN, Chungnam; GB, Gyeongbuk).

Soil sample	Sensor output at a certain water holding status				Sensor output range			
	Dry soil ($< -1,500$ kPa)	PWP ($-1,500$ kPa)	FC (-33 kPa)	Near saturation (0 kPa)	Below PWP	PWP-FC	Above FC	Total
CB	1897	2007	2498	2659	110	491	161	762
CN	1910	2166	2451	2780	256	285	329	870
GB	1900	1964	2090	2710	64	126	620	810

CB 토양의 경우 영구위조점과 포장용수량 사이의 구간 용적수분함량 범위가 $0.162 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 임과 비교해 GB 토양의 경우 $0.083 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 로 그 범위가 좁으며(Table 1), 토양수분장력이 -33kPa 에서 -100kPa 로 감소하는 구간에서 용적수분함량이 급격히 떨어지는 것으로 보아(Fig. 1), GB 토양과 같이 모래가 많이 함유된 토양의 보수력을 측정하는 데 있어 FDR 센서의 해석 능력이 부족할 것으로 파악된다. FDR 센서를 사용하여 토양수분함량을 측정하고 이를 기준으로 관수 계획을 세울 경우, CB 토양과 같이 관수 개시점 선정을 위한 구간이 비교적 넓게 분포하면 관수 개시점을 효과적으로 선정할 수 있으나, GB 토양과 같이 그 구간이 너무 짧고 변화 폭이 작으며 해당 구간에서 급격한 수분 환경 변화가 있으므로 관수에 오류가 일어나기 쉽고, 이를 통해 과습 혹은 건조한 상태가 지속될 우려가 있다.

3. 노지 과수원 FDR 센서 측정 토양 수분 변화 비교

실제 각 지역의 과수원에서 얻어진 실시간 수분함량 모니터링 데이터에 토양별로 FDR 센서 보정식을 적용해 토양의 수분보유곡선과 보정식이 데이터의 해석에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 2주간 취득한 각 센서의 측정치에 기존 제조사 광질 토양 보정식과 본 연구에서 도출한 3차 회귀 보정식을 적용한 결과, 모든 토양에서 제조사 보정식보다 3차 회귀 보정식이 더 높은 용적수분함량 수치를 나타냈다(Fig. 3). 모든 과수원 토양의 수분 상황은 각 작물의 생육이 활발한 시기이므로 관수가 충분히 이루어지고 있었으나, CB 토양의 측정치에 제조

사 보정식을 적용한 경우 CB 토양의 영구위조점($0.17 \text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) 이하로 용적수분함량이 유지되는 형태로 나타나 토양이 건조한 상태로 해석될 수 있었다. 반면, CB 토양에 맞추어 보정한 3차 회귀 보정식을 적용하였을 경우 보정된 용적수분함량이 포장용수량에서 영구위조점 사이 구간의 수분 상태로 나타나 실제 상황에 알맞은 토양 수분 해석이 가능하였다. CN 토양의 경우 실제 토양이 과습한 상태로 유지되었으며, 3차 회귀 보정식이 적용된 용적수분함량이 포장용수량을 초과한 결과로 매우 습한 수분 상태를 보여줄 수 있었다. GB 토양에서도 마찬가지로 토양 수분이 영구위조점에 도달하기 전에 관수를 진행하였으며, 3차 회귀 보정식을 적용한 용적수분함량 수치가 관수 시점뿐만 아니라 실제 보수력에 알맞은 용적수분함량의 변화를 보여주었다. GB 토양에서는 제조사 보정식과 3차 회귀 보정식을 적용한 결과 다른 지역의 토양에 비해 변화가 적게 나타났는데, 이는 GB 토양의 영구위조점과 포장용수량 사이 구간이 다른 토양에 비해 좁기 때문이며(Table 3), 해당 구간에서 제조사 보정식과 3차 회귀 보정식의 토양수분함량 측정값이 비교적 적은 차이를 보인 것(Fig. 2)을 원인으로 생각할 수 있다. 이러한 보정식 적용 결과를 종합적으로 분석하면, FDR 센서 측정치에 각 토양에 알맞은 보정식을 사용할 경우 정확한 용적수분함량 데이터를 취득할 수 있으며, 이를 토양의 보수력에 따른 용적수분함량 변화와 더불어 해석하면 작물이 재배되고 있는 토성에 따라 실제 토양의 수분 상황을 더욱 정확하게 이해하고 관수 개시 기준 값을 선정하는 데 더욱 효과적일 것이다.

결론

본 실험에서는 FDR 센서를 각 토양의 토성에 따라 올바르게 사용하기 위해 토양별 보정을 진행하고 실제 데이터에 적용하였다. 먼저 각 토양의 수분장력과 용적수분함량 간의 관계를 도출하여 각 토양의 수분보유특성을 조사하였고, 이를 이용하여 각 토양에 따라 용적수분함량 수치가 지니는 의미가 다르다는 점을 확인하였다. 또한, 토양별로 FDR 센서를 보정하였을 시 제조사가 제공하는 광질 토양의 보정식과 비교하여 RMSE를 3배 이상 줄일 수 있는 것으로 나타나 올바른 용적수분함량 측정을 위해서는 토양별로 FDR 센서 보정이 필요함을 재확인하였다. 토양에 따라 차이가 있었으나, 모래 함유량이 높은 사질토양의 경우 관수 개시점을 설정하기 위한 용적수분함량 구간이 상대적으로 좁아 토양에서의 FDR 센서 활

용에 한계가 있으므로, 추후 사질 토양의 수분 변화를 올바르게 해석할 수 있는 추가 연구가 필요할 것이 판단된다. 본 연구 결과를 통해, 토양에서 FDR 센서를 통해 토양수분의 변화를 알맞게 해석하고 관수 계획에 활용하기 위해서는, 토양별 수분보유특성을 파악하고, 토양별로 FDR 센서를 보정하는 것이 반드시 선행되어야 할 것이다.

적요

최근 원예작물의 지속가능한 생산을 위한 작물 생육환경 센싱 기반 복합환경제어시스템 연구와 산업적 이용이 부각되면서, 노지재배에 적용하기 적합한 토양센서 활용 방안 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구는 산업 및 연구 현장에서 많이 사용되고 있는 TEROS 12 FDR 센서(frequency domain reflectometry sensor)를 노지 과수원의 토양에 알맞게 활용하기 위하여 국내 세 지역 과수원 토양의 토성별 FDR 센서 활용 방법을 제시하고자 수행하였다. 실제 과수가 재배되고 있는 각 과수원에서 토양을 채취하여, 토성 및 토양수분보유곡선을 조사하였으며, 토양별 TEROS 12 센서 Raw 값과 이에 대응하는 용적수분함량 값을 선형 회귀 분석, 3차 회귀 분석을 통해 보정식을 얻은 뒤 제조사에서 제공하는 광질 토양 보정식과 비교 분석하였다. 채취한 세 과수원의 토양은 모두 토성이 달랐으며, 토성에 따라 각 보수력에 따른 용적수분함량 수치에 차이가 있었다. 또한, TEROS 12 센서 보정식에서는 모든 토양에서 3차 회귀 분석 보정식이 결정계수 0.95 이상으로 가장 높게 나타났으며, RMSE도 가장 낮게 나타났다. 제조사에서 제공하는 보정식을 사용하여 TEROS 12 센서의 용적수분함량을 보정할 경우 토양에 따라 실제 수치에 비해 최대 $0.09 - 0.17 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 가량 낮게 나타나, FDR 센서 사용시 적용 토양에 알맞은 보정이 반드시 선행되어야 함을 확인하였다. 또한 토성에 따라 토양의 보수력 구간에 따른 용적수분함량 범위의 차이가 있었으며, 토양 용적수분함량의 수치 해석에 보수력 정보가 수반되어야 할 것으로 나타났다. 또한, 사실이 많은 토양에서는 관수 개시점 측정을 위해 FDR 센서를 활용하는 데 있어 용적수분함량 측정 범위가 상대적으로 좁아 정밀도가 떨어질 것으로 판단되었다. 결론적으로 토양에서 FDR 센서를 통해 토양수분의 변화를 알맞게 해석하고 노지에서 알맞은 관수 시점을 선정하기 위해서는, 적용 토양의 수분보유특성을 파악하고 FDR 센서 보정을 선행하여 올바른 토양 수분 정보 제공이 필요할 것이다.

추가주제어: 관수, 용적수분함량, 자동관수시스템, 토양수분센서, 토양수분보유곡선

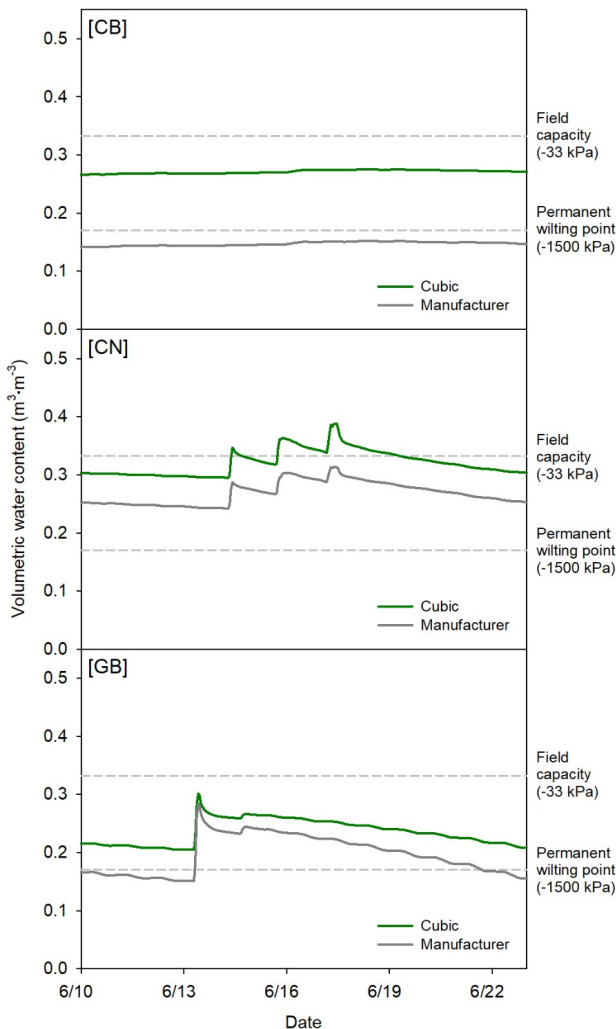


Fig. 3. Comparison of the data after cubic equation calibration and manufacturer calibration.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 농업정책지원기술개발사업(PJ015643)의 지원에 의하여 수행되었음.

Literature Cited

- Adeboye O.B., B. Schultz, A.P. Adeboye, K.O. Adekalu, and J.A. Osunbitan 2021, Application of the AquaCrop model in decision support for optimization of nitrogen fertilizer and water productivity of soybeans. *Inf Proc Agric* 8:419-436. doi:10.1016/j.inpa.2020.10.002
- Arya L.M., and J.F. Paris 1981, A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci Soc Am J* 45: 1023-1030. doi:10.2136/sssaj1981.03615995004500060004x
- Böhme B., M. Becker, and B. Diekkrüger 2013, Calibrating a FDR sensor for soil moisture monitoring in a wetland in Central Kenya. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 66:101-111. doi:10.1016/j.pce.2013.09.004
- Caron J., S. Bonin, S. Pepin, L. Kummer, C. Vanderleest, and W.L. Bland 2016, Determination of irrigation set points for cranberries from soil-and plant-based measurements. *Can J Soil Sci* 96:37-50. doi:10.1139/cjss-2015-0037
- Doležal F., T. Litschmann, J. Kučera, J. Peterková, J. Zavadil, J. Vacek, P. Pražák, E. Pilná, T. Bayer, and M. Nechvátal 2008, Field and laboratory ad hoc calibrations of Virrib and ThetaProbe dielectric sensors for soil moisture measurements. *Soil Water Res* 3:199-214. doi:10.17221/18/2008-SWR
- Geroy I.J., M.M. Gribb, H.P. Marshall, D.G. Chandler, S.G. Benner, and J.P. McNamara 2011, Aspect influences on soil water retention and storage. *Hydrol Process* 25:3836-3842. doi:10.1002/hyp.8281
- Heermann D.F. 1996, Irrigation scheduling. In L.S. Pereira, R.A. Feddes, J.R. Gilley, B. Lesaffre, eds, *Sustainability of Irrigated Agriculture*. Springer, Berlin, Germany, pp 233-249.
- Jones H.G. 2004, Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *J Exp Bot* 55:2427-2436. doi:10.1093/jxb/erh213
- Kang S., M.W. van Iersel, and J. Kim 2019, Plant root growth affects FDR soil moisture sensor calibration. *Sci Hortic* 252:208-211. doi:10.1016/j.scienta.2019.03.050
- Kim J. 2014, Efficient irrigation practice through soil moisture sensor based automated irrigation system in ornamental plant production. *Flower Res J* 22:48-53. (in Korean) doi:10.11623/fij.2014.22.2.2
- Kim J., J.D. Lea-Cox, M.Chappell, and M.W. van Iersel 2014, Wireless sensors networks for optimization of irrigation, production, and profit in ornamental production. *Acta Hortic* 1037:643-649. doi:10.17660/ActaHortic.2014.1037.82
- Lekshmi S.S.U., D.N. Singh, and M.S. Baghini 2014, A critical review of soil moisture measurement. *Measurement* 54:92-105. doi:10.1016/j.measurement.2014.04.007
- Li S. 2012, Application of the internet of things technology in precision agriculture irrigation systems. 2012 Int Conf Comput Sci Serv Syst, pp 1009-1013. doi:10.1109/CSSS.2012.256
- METER Group 2018, TEROS 11/12 Manual, Available via http://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf. Accessed 27 September 2022
- Muñoz-Carpena R. 2004, Field devices for monitoring soil water content. *EDIS:BUL343*. doi:10.32473/edis-ae266-2004
- Nagahage E.A.A.D., I.S.P. Nagahage, and T. Fujino 2019, Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. *Agriculture* 9:141. doi:10.3390/agriculture9070141
- Novák V., and H. Hlaváčiková 2019, Soil-water content and its measurement. In *Applied Soil Hydrology. Theory and Applications of Transport in Porous Media*, vol 32. Springer, Cham, pp 49-61. doi:10.1007/978-3-030-01806-1_5
- Pereira L.S. 1999, Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agric Water Manag* 40:153-169. doi:10.1016/S0378-3774(98)00118-8
- Ramson S.R.J., W.D. Leon-Salas, Z. Brecheisen, E.J. Foster, C.T. Johnston, D.G. Schulze, T. Filley, R. Rahimi, M.J.C.V. Soto, J.A.L. Bolivar, and M.P. Malaga 2021, A self-powered, real-time, LoRaWAN IoT-based soil health monitoring system. *IEEE Internet Things J* 8:9278-9293. doi:10.1109/JIOT.2021.3056586
- Rhie Y.H., and J. Kim 2017, Changes in physical properties of various coir dust and perlite mixes and their capacitance sensor volumetric water content calibrations. *HortScience* 52:162-166. doi:10.21273/HORTSCI11362-16
- Schindler U., G. von Unold, W. Durner, and L. Mueller 2015, Recent progress in measuring soil hydraulic properties. *Proc Int Conf Environ Civil Eng*, pp 46-51.
- Teixeira W., F. Sinclair, B. Huwe, and G. Schroth 2003, Soil water, In G. Schroth and F.L. Sinclair, eds, *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp 209-234.
- Van Genuchten M.T. 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J* 44:892-898. doi:10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x
- Veldkamp E., and J.J. O'Brien 2000, Calibration of a frequency domain reflectometry sensor for humid tropical soils of volcanic origin. *Soil Sci Soc Am J* 64:1549-1553. doi:10.2136/sssaj2000.6451549x