

노지 과수원에서 토양수분센서 설치 위치에 따른 토양수분 변화 비교

김종균¹ · 김현석² · 강경진³ · 김종윤^{4*}

¹고려대학교 식물생명공학과 대학원생, ²경상북도농업기술원 청도복숭아연구소 소장,

³충청남도농업기술원 스마트원예연구과 연구사, ⁴고려대학교 식물생명공학과 교수

Comparison of Soil Moisture Changes Based on the Installation Position of Soil Moisture Sensors in the Korean Orchard Field Soils

Jong Kyun Kim¹, Hyunseok Kim², Kyeong-Jin Kang³, and Jongyun Kim^{4*}

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

²Chief of Research Institute, Peach Research Institute of Gyeongsangbukdo Agricultural Research and Extension Services, Cheongdo 38315, Korea

³Researcher, Chungnam Agricultural Research and Extension Services, Yesan 32418, Korea

⁴Professor, Department of Plant Biotechnology, Korea University, Seoul 02841, Korea

Abstract. For efficient soil water management in open fields, the proper use of soil moisture sensors is a prerequisite. Particularly in open-field environments like orchards with extensive root systems, the appropriate positioning of sensors is very important. The present study was conducted to identify the optimal placement of soil moisture sensors by assessing changes in soil water potential across various positions within orchard field soils after installing tensiometers. In apple and Asian pear orchards located in two regions of Korea, nine soil water potential sensors (TEROS 21, METER Group) were installed at distances of 20, 40, and 60 cm from the tree trunk and depths of 10, 20, and 30 cm from the soil surface, and monitored the soil water potential changes over two years. Results indicated that the positions closer to the tree trunk and the soil surface exhibited more pronounced changes in soil water potential. The greatest magnitude of change in soil water potential was observed at a distance of 20 cm and a depth of 10 cm, suggesting this position as the most suitable for soil moisture sensor installation. However, variations in the degree and pattern of changes in soil water potential were noted across sensor positions due to root system growth over time. Therefore, periodic observation and adjustments in sensor placement would be advisable to accurately monitor the soil moisture condition in long-term crops such as fruit trees in open fields.

Additional key words: apple, Asian pear, automated irrigation system, efficient irrigation, soil water potential

서 론

최근 기후변화로 인한 빈번한 가뭄과 홍수와 같은 재배 환경 변화로 인하여 효율적으로 자원을 이용하며 효과적으로 작물 재배 환경을 제어할 수 있는 스마트 농업에 대한 관심이 늘어나고 있다(Walter 등, 2017). 4차 산업혁명과 함께 발전된 다양한 환경 측정 기술을 이용하여 효율적인 작물 생산을 위한 복합환경제어는 주로 시설 재배에서 많은 연구가 이루어지고 있으나, 실제 생산 현장에서는 노지 재배의 비율이 높으며, 노지에서의 작물 재배를 모두 시설 재배로 대체할 수 없기 때문

에 노지에 적합한 재배 환경 조절에 대한 연구가 필요한 실정이다(Kim와 Park, 2021). 광과 온습도 등 지상부 환경의 제어가 가능한 시설 재배와 다르게 노지 재배는 작물 생육 환경이 날씨의 영향을 직접적으로 받아 환경 제어가 어려우나, 근권부 환경의 경우 오래전부터 관수와 시비를 통한 환경 조절이 꾸준히 이루어져 왔으며 지상부 환경에 비해 상대적으로 조절이 용이하다(Predieri 등, 2003). 노지 근권부 환경 조절은 주로 양수분 관리를 통해 이루어지게 되며, 이를 효율적으로 관리하기 위해 노지 기상 환경 측정값을 통한 증발산량 예측 모델(예, Penman-Monteith 공식)이 전세계적으로 많이 사용되고 있으나, 최근에는 토양수분센서 및 다분광영상기법 등을 활용하는 첨단 기술들이 다양하게 시도되고 있다(Garg 등, 2016; Zinkernagel 등, 2020).

토양 내의 수분을 측정하는 방법으로는 실제 토양의 증량 및

*Corresponding author: jongkim@korea.ac.kr

Received April 1, 2024; Revised April 25, 2024;

Accepted April 27, 2024

용적을 측정하여 중량수분함량(gravimetric water content) 또는 용적수분함량(volumetric water content)을 계산하는 방법, 토양수분장력(soil water potential), 중성자산란법, 석고 블록법, 토양의 유전상수를 측정하는 TDR(time domain reflectometry), FDR(frequency domain reflectometry) 등의 방법이 있다(Jones, 2004; Su 등, 2014). 실제 토양의 중량 및 용적을 측정하기 위해서는 토양의 시료를 직접 채취하여 진행해야 하므로 실제 현장에서 실시간으로 토양 수분의 변화를 측정하기는 어렵다. 이에 비해 토양수분센서는 현장에 적용하여 직접적인 측정이 가능하며, 다양한 종류의 토양수분센서별로 각각의 장단점이 있으나 적용 현장에 알맞은 토양수분센서를 선정하여 이용하게 되면 실시간으로 토양수분을 측정하여 관리할 수 있다는 장점은 동일하여, 토양수분센서를 이용한 효율적 관수 방안 연구가 꾸준히 이루어지고 있다(Nam 등, 2020; Thompson 등, 2007; Yu 등, 2021).

토양수분센서를 현장에서 알맞게 사용하기 위해서는 각 현장에 적합한 센서 선정, 센서 보정, 센서 설치 위치 등 고려해야 할 점들이 많이 있다. Evett 등(2006)은 3개의 다른 토양에서 TDR 타입 센서, 중성자 수분 측정기 등의 여러 토양수분 측정 방법들의 센서 정확성, 온도 민감성, 센서 설치 깊이에 따른 민감성을 비교하였고, Mittelbach 등(2012)은 토성, 토양 온도, 용적밀도, 토양 염분과 관수 방법 등 여러 가지 변인들로 인해 토양수분센서 측정값이 영향을 받을 수 있어 4가지 토양수분센서를 비교하는 실험을 진행하였다. Lee 등(2022)은 토성이 다른 토양에 따라 FDR 타입 센서를 알맞게 보정하는 방법을 제시하였으며, Kang 등(2019)은 식물의 뿌리가 자람에 따라 토양수분센서의 측정값에 영향을 미칠 수 있으나, 이를 고려하여 관수개시점을 보정하면 효율적 관수가 이루어질 수 있다고 보고하였다. 또한, 노지 토양에서는 수분을 측정하기에는 토양의 유전상수를 측정하는 FDR 타입 센서보다 토성과 유기물 함량에 영향을 덜 받으며 측정할 수 있는 토양수분장력 센서(tensiometer)가 더 적합하다는 연구가 있다(Jiang와 He, 2021). 토양수분장력은 식물이 토양으로부터 물을 잡아당기는 힘으로 토양의 수분 상태를 측정할 때 대표적으로 사용하며, 토양수분장력 센서는 다른 토양수분센서들에 비해 토양별 보정작업이 필요하지 않다는 장점을 가지고 있다(Hoppula와 Salo, 2007).

적합한 토양수분센서의 선정 및 보정뿐 아니라, 작물의 수분을 알맞게 조절하기 위해서는 센서 설치 위치에 대한 고려도 매우 중요하다. 이를 위한 기존 연구로는 최적 센서 설치 위치들이 현장과 작물 특이적으로 사용자의 경험에 의해 결정되는 경우가 많으며(Coelho와 Or, 1996), 과수원과 같이 범위가 넓은 노지의 경우 센서 설치 위치에 따라 센서 측정값에 차이

가 크게 나타난다(Domínguez-Niño 등, 2020)고 보고된 바 있다. 또한, 뿌리의 발달로 인한 밀도의 변화가 토양수분 변화에 큰 영향을 끼치며, 센서는 뿌리 밀도가 가장 높은 곳에 설치되어야 한다는 선행 연구가 있다(Amiri 등, 2022; Müller 등, 2016). 이처럼 작물의 효율적인 관수를 위해서는 실제 작물이 수분을 흡수하는 부위의 토양수분을 측정하는 것이 필요하고, 이에 알맞게 센서 설치 위치를 선정하는 것이 중요하다.

그러나 노지 과수원에서는 적절한 센서 설치 위치 관련된 연구가 부족한 실정이며, 현장에서 생산하고 있는 과수의 뿌리 위치 및 밀도를 정확하게 파악하거나 이를 위해 다수의 센서를 현장에 설치하는 것은 현실적으로 어렵다. 이에 본 실험에서는 노지 과수원에서 각 과수의 수간으로부터 다양한 거리와 깊이에 토양수분장력 센서를 설치하여 각 위치의 토양수분장력 값을 측정하고, 센서 설치 위치에 따라 토양수분 변화를 비교하였다. 이를 통해 과수 근권부의 어떤 위치에서 토양수분장력 값의 변화가 가장 크게 나타나는지 분석하여 이를 통해 노지 과수에 적합한 토양센서 설치 위치를 확인하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 식물 재료 및 노지 과수원 특성

본 실험은 사과와 배를 재배하고 있는 국내 두 지역에 위치한 과수 포장에서 수행되었다. 사과의 경우, 경상북도 안동에 위치한 안동시 농업기술센터 사과 포장(양질 사토)에서 4m × 1m로 식재된 2022년 기준 4년생 후지/M9 품종을 스프링클러관수 방법을 이용하여 재배하였다. 배의 경우, 충청남도 예산에 위치한 충청남도농업기술원의 과수시험포장(사질식양토)에서 6m × 3m로 식재된 2022년 기준 19년생 신고 품종을 점적관수 방법으로 재배하였다. 관수는 각 과수원별 기존 관행 관수 방법에 따라 관리하였다.

2. 토양수분장력 센서 설치

토양수분장력 센서 설치 위치에 따른 토양의 수분장력 변화를 살펴보기 위해 TEROS 21(METER Group, Pullman, WA, USA) 센서를 9개 지점에 설치하여 2022년과 2023년 2년간의 토양수분장력 값 변화를 데이터로거(CR1000X, Campbell Scientific, Logan, UT, USA)를 통해 수집하였다(Fig. 1). 다양한 위치에 센서를 설치하기 위하여, 각 과수의 수간으로부터 거리 20, 40, 60cm, 토양 표면으로부터 깊이 10, 20, 30cm로 과수원마다 9개의 센서를 설치하였으며, 1분 간격으로 측정된 토양수분장력 값의 평균을 1시간 간격으로 수집하였다.

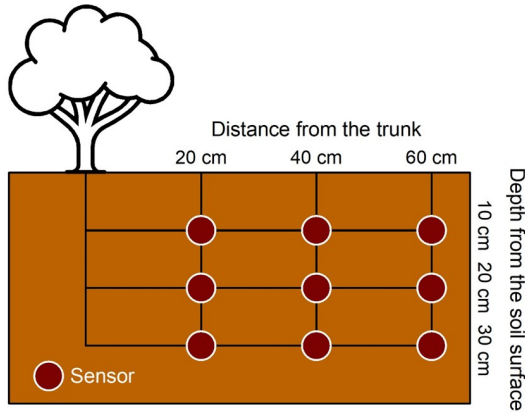


Fig. 1. Diagram of nine different tensiometer sensor installation positions (three distances from the trunk × three depths from the soil surface) in apple and Asian pear orchards in Korea.

3. 센서 설치 위치별 토양수분 변화 분석

작물의 뿌리가 물을 흡수하게 되면 뿌리 주변의 토양 내의 수분이 감소하며 토양수분장력 값(kPa)이 떨어지게 된다. 이에 토양수분장력 값의 변화가 크게 나타나는 부위에서 작물이 물을 활발하게 흡수하는 부분이라고 판단하여, 자연 강우를 포함한 관수 기간 사이의 토양수분장력 값의 변화를 조사하였고, 센서 설치 위치별 토양수분장력 값의 변화를 비교 분석하였다. 이를 위해 연도별로 토양수분장력 값이 감소하였다가 포화되는 구간을 나눠 그 구간 동안의 토양수분장력 값의 최솟값과 최댓값을 구해 차이를 계산하여 토양수분장력 값의 변화를 정량화하였다. 사과 과수원에서는 2022년 9개 구간(6월-11월), 2023년 12개 구간(3월-10월)을 분석하였으며, 배 과수원에서는 2022년 6개 구간(2월-11월), 2023년 9개 구간(3월-10월)을 분석하였다. 데이터 분석을 위해 SAS 통계 프로그램(SAS 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA)을 이용하여 토양수분장력 센서 설치 깊이, 거리, 토양수분장력 값의 변화 구간을 세 요인으로 한 삼원 분산 분석(three-way analysis of variance)을 진행하였다. 또한, 쌍별 비교(pairwise comparison)를 이용하여 평균치검정을 진행하여 센서 설치 위치별 토양수분장력 값의 변화를 비교하였다.

결과 및 고찰

1. 사과 과수원에서의 토양수분장력 변화

사과 과수원의 경우 토양수분장력의 변화는 주로 뿌리의 수분흡수가 왕성한 봄, 여름 시기(5월-10월)에 보였으며, 겨울철의 변화는 적은 것으로 나타나 과수원 토양의 수분 환경을 알맞게 제시해 주고 있는 것으로 나타났다(Fig. 2). 이는 목본

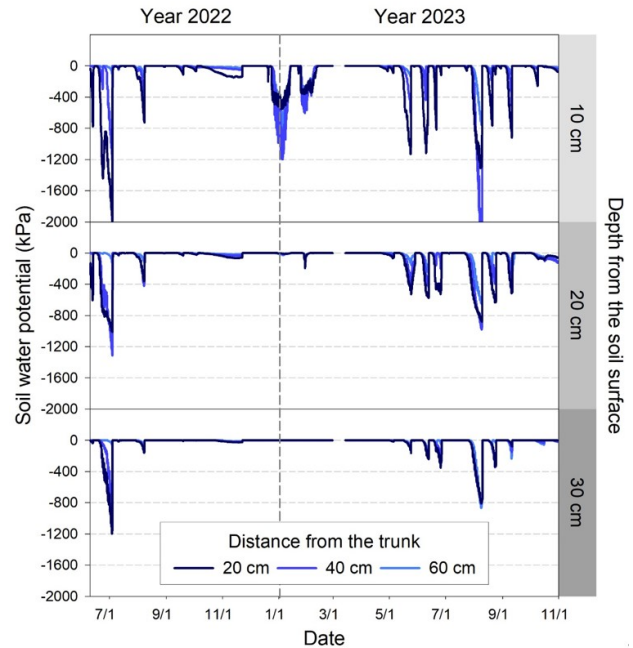


Fig. 2. Soil water potential changes of nine different tensiometer sensor installation positions (three distances from the trunk × three depths from the soil surface) in the apple orchard in Gyeongbuk in Korea over two years.

식물 뿌리에서의 수분흡수가 계절별로 차이가 있다는 선행연구와 유사한 결과를 보였다(Nadezhkina 등, 2008). 겨울철(12월-2월)에 토양 표면으로부터 얇은 곳에 설치되어 있는 구간에서 토양수분장력 값이 급격하게 감소한 구간이 있었는데, 이는 토양온도가 영하로 내려가면서 토양 표면으로부터 10cm 깊이 위치의 토양수분장력 값의 변화가 나타난 것으로 판단된다. 실제 노지 토양의 경우 영하의 조건에서는 토양 내 수분이 얼게 되고, 온도가 1°C가 감소할 때마다 토양수분장력이 점차적으로 감소할 수 있다는 연구 결과(Spaans와 Baker, 1996)와 마찬가지로, 본 연구에서는 겨울철 영하의 온도가 토양수분장력 측정값에 영향을 미친 것으로 판단된다.

토양수분장력 센서가 설치되어 있는 위치별로 사과의 수간으로부터 거리 및 토양 표면으로부터 깊이에 따라 토양수분장력 값이 변화하는 양상은 비슷하였으나, 그 변화 정도가 다르게 나타났으며, 가장 크게 변화된 위치에서는 -2,000kPa 정도까지 토양수분장력 값이 감소하였다. 센서가 사과의 수간으로부터 가깝게 설치되어 있을수록, 토양 표면으로부터 얇게 설치되어 있을수록 토양수분장력 값의 변화가 크게 나타났으며, 이는 2022년과 2023년 모두 비슷한 양상을 보였다. 이는 사과의 수간에 가까운 곳일수록 수분을 흡수하는 뿌리의 활동이 왕성하며, 거리가 멀고 깊이가 깊어질수록 뿌리의 밀

도는 감소하기 때문에(Bréda 등, 1995) 수간에서 가까운 곳의 토양수분장력이 더 크게 변한 것으로 판단된다. 이러한 토양수분장력 값의 변화 정도는 토양수분장력 값이 크게 변할 때 (<-400kPa)뿐만 아니라, 포장용수량 구간(-10~-33kPa)을 포함한 과수가 수분을 이용하는데 용이한 토양수분장력 범위 (>-100kPa) 구간에서도 유사한 결과를 보여 사과 수간으로부터 가까울수록, 토양 표면으로부터 얕을수록 토양수분장력 센서의 측정값 변화가 가장 확연하게 드러나는 것으로 나타났다.

사과 과수원에서는 2022년의 경우 총 9개 구간, 2023년의 경우 총 12개의 구간에서 토양수분장력의 변화가 있었다. 센서 설치 위치별로 각 구간의 토양수분장력 변화를 정량화하여 비교한 결과, 센서가 설치되어 있는 거리와 깊이에 따라 통계적으로 유의한 차이가 나타났으며, 2022년과 2023년 모두 사과의 수간으로부터 가장 가까운 곳에 설치한 20cm × 10cm (과수의 수간으로부터 거리 × 토양 표면으로부터 깊이) 지점에서 변화가 크게 나타났다(Table 1). 대체로 과수의 수간으로부터 거리가 가까울수록, 토양 표면으로부터 깊이가 얕을수록 토양수분장력의 변화가 크게 나타났으며, 수간으로부터 거리 60cm의 경우는 깊이에 따른 토양수분장력 변화 값의 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 토양수분장력 변화의 경우 연도에 따른 차이가 나타났는데, 2022년의 경우 수간에서 멀어질수록 토양수분장력 변화가 감소하여 거리 60cm 지점에서 토양수분장력의 변화는 37kPa 정도 이하로 토양수분의 변화가 거의 없는 것으로 보였으나, 2023년에는 거리 60cm 지점에서 토양수분장력 변화가 100kPa 이상으로 증가하였다. 이는 사과의 뿌리가 성장하여 사과의 수간으로부터 더 떨어진 위치에서도 수분흡수가 일어난 것으로 파악된다. 또한, 2022년의 경우 40cm × 10cm 지점의 토양수분장력

변화는 다른 위치와 마찬가지로 20cm × 10cm 지점의 토양수분장력 변화의 50%보다 적게 나타났으나, 2023년의 경우 20cm × 10cm 지점과 유의한 차이 없이 높게 나타나, 본 위치에서의 수분흡수가 증가한 것으로 나타났으며, 이는 뿌리의 성장과 관련이 있는 것으로 판단된다. 이는 과수의 수령에 따라 혹은 새로운 뿌리 발달에 따라 수분을 왕성히 흡수하는 위치가 변화할 수 있으며, 이를 고려하여 토양수분센서의 설치 위치를 선정해야 한다는 점을 시사한다.

그럼에도 불구하고, 20cm × 10cm 지점의 토양수분장력 값이 계속해서 가장 높은 변화를 보여, 노지 사과 과수원에서 토양수분장력 센서를 설치하여 토양수분을 측정할 경우, 20cm × 10cm 지점이 적합할 것으로 나타났다. 이러한 결과는 관수개시 여부를 파악하기 위해 가장 적절한 센서 설치 위치는 과수의 수간에서부터 가까운 거리 10cm, 깊이 10cm에 설치하는 것이 좋다는 선행 연구 결과(Jiao 등, 2021)와 비슷하나, 사과의 적합한 관수시점을 구명하기 위해 센서 설치 위치를 깊이 20cm와 40cm에 설치하여 진행했던 선행연구(Kim, 2019)와는 다소 다른 결과를 보였다. 이는 선행연구에서의 사과나무 수령(6년생)이 본 연구와 차이가 있었기 때문이라고 생각되며, 본 연구 결과에서도 수령이 증가하며 왕성한 뿌리의 위치가 변경될 수 있음을 보여, 센서를 적정 위치에 설치하더라도 지속적인 관리와 주의가 필요할 것으로 판단되었다.

2. 배 과수원에서의 토양수분장력 변화

배 과수원의 경우 사과 과수원과 마찬가지로 토양수분장력의 변화가 봄, 여름 시기(5월-7월)에 주로 보였으며, 겨울철의 변화는 적게 나타났다(Fig. 3). 2022년에 비해 2023년에 봄, 여름 시기에 변화폭이 더 적게 나타났는데, 이는 배 과수원 지역의 2022년의 강우량(158mm)에 비해 2023년 강우량

Table 1. The average fluctuation magnitude of changes in soil water potential (in kPa) for different sensor installation positions in the apple orchard in Gyeongbuk in Korea over two years. Mean separation among the sensor installation positions within a year followed by the analysis of variance with pairwise comparison at $\alpha=0.05$. *, **, and *** indicate significance at $P < 0.05$, 0.01, and 0.001, respectively.

Depth from the soil surface	Year 2022 (n = 9)			Year 2023 (n = 12)		
	Distance from the trunk			Distance from the trunk		
	20 cm	40 cm	60 cm	20 cm	40 cm	60 cm
10 cm	431.39 a	201.30 b	36.60 c	540.25 a	397.79 ab	111.60 d
20 cm	236.27 b	205.48 b	32.39 c	319.97 bc	251.38 bcd	144.92 d
30 cm	161.90 b	120.62 bc	14.80 c	167.19 cd	164.86 cd	134.14 d
P-value						
Distance	< 0.001 ***			< 0.001 ***		
Depth	0.003 **			< 0.001 ***		
Distance × Depth	0.031 *			0.015 *		

(554mm)이 많아서 토양수분장력 변화가 더 적게 나타난 것으로 판단된다. 또한, 겨울철(12월-2월)에 토양 표면으로부터 얇은 곳에 설치되어 있는 구간에서 토양수분장력 값이 -400kPa까지 감소하였는데, 사과 과수원의 결과와 마찬가지로 토양온도가 영하로 내려가면서 토양수분장력 측정값에 영향을 미친 것으로 보인다. 이를 통해 토양수분장력 값을 기반으로 자동관수를 진행하게 된다면 겨울철 영하의 기간에는 주의가 필요할 것으로 판단한다.

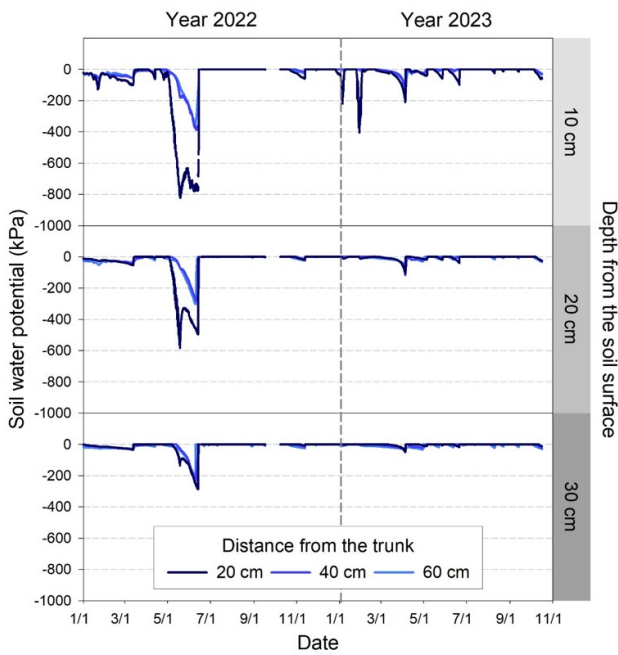


Fig. 3. Soil water potential changes of nine different tensiometer sensor installation positions (three distances from the trunk × three depths from the soil surface) in the Asian pear orchard in Chungnam in Korea over two years.

배 과수원은 사과 과수원에 비해 상대적으로 토양이 습한 환경이 유지되어 센서 설치 위치별 토양수분장력 변화 정도가 사과 과수원에 비해 작았으며, 최대 -800kPa 정도까지 감소하였다. 이는 사과 과수원 토양(양질 사토)이 배 과수원 토양(사질식양토)에 비해 높은 함량의 모래 성분으로 인해 상대적으로 낮은 수분 보유력을 가지고(Kim 등, 2009), 배 과수원에서 관행 관수를 진행할 때 토양을 상대적으로 습하게 유지하여 나타난 결과라고 판단된다. 이러한 결과는 토성, 관수 방법, 기상 조건에 따라 센서 측정값의 대표성이 다양하다는 이전 연구 결과와 유사하다(Soulis와 Elmaloglou, 2016). 그러나, 사과 과수원과 마찬가지로 토양수분장력 센서가 설치되어 있는 위치별로 토양수분장력 변화 양상은 비슷하여, 배의 수간으로부터 거리가 가까울수록, 토양 표면으로부터 깊이가 얇을수록 변화가 크게 나타났다.

배 과수원에서는 2022년의 경우 총 6개 구간, 2023년의 경우 총 9개의 구간에서 토양수분장력의 변화가 확인되었으며, 센서 설치 위치별로 각 구간의 토양수분장력 변화를 정량화하여 비교한 결과, 사과 과수원과 마찬가지로 2022년, 2023년 모두 20cm × 10cm 지점에서 토양수분장력 변화가 가장 크게 나타났다(Table 2). 2023년에는 모든 지점에서 2022년에 비해 변화량이 감소하였는데, 이는 강우량의 차이 및 토양이 지속적으로 습한 환경을 유지한 데 기인한 것으로 판단된다. 이에 센서 설치 위치별 토양수분장력 값의 변화 양상의 차이를 보기 위해서는 토양의 다양한 수분 조건을 보여줄 수 있는 알맞은 관수 조절이 선행되어야 할 것으로 보인다. 그럼에도 불구하고, 토양수분장력 변화 값은 배의 수간으로부터 거리가 가까울수록, 토양 표면으로부터 깊이가 얇을수록 유의하게 큰 값을 보였으며, 2023년의 경우는 수간으로부터 거리가 가까운 곳에서는 깊이에 따른 변화 차이가 더 명확하게 나타나

Table 2. The average fluctuation magnitude of changes in soil water potential (in kPa) for different sensor installation positions in the Asian pear orchard in Chungnam in Korea over two years. Mean separation among the sensor installation positions within a year followed by the analysis of variance with pairwise comparison at $\alpha=0.05$. **, ***, and ^{NS} indicates significance at $P < 0.01$, 0.001, and no significance, respectively.

Depth from the soil surface	Year 2022 (n = 6)			Year 2023 (n = 9)		
	Distance from the trunk			Distance from the trunk		
	20 cm	40 cm	60 cm	20 cm	40 cm	60 cm
10 cm	174.41 a	76.62 bc	78.49 bc	58.39 a	31.72 b	28.89 bc
20 cm	111.27 b	55.86 c	67.02 bc	23.35 cd	20.19 de	19.82 de
30 cm	54.83 c	58.03 c	50.91 c	10.88 f	11.98 ef	20.44 d
P-value						
Distance		0.004 **			< 0.001 ***	
Depth		0.005 **			< 0.001 ***	
Distance × Depth		0.078 NS			< 0.001 ***	

($P_{Distance \times Depth} < 0.001$), 뿌리의 분포에 따라 토양수분장력 변화 양상이 다르게 나타날 수 있음을 시사하였다. 사과 과수원 과 마찬가지로 배 과수원에서도 토양수분장력 센서를 설치하여 토양수분을 측정할 경우, 과수의 수간으로부터 가장 가까운 20cm × 10cm 지점이 적합할 것으로 나타났다.

결론

노지 과수원에서의 효율적인 토양수분 측정을 위한 토양수분센서의 최적 설치 위치를 알아보기로 진행한 연구 결과, 사과와 배 모두 과수의 수간으로부터 거리 20cm, 토양 표면으로부터 깊이 10cm 지점에서 토양수분장력 값의 변화가 가장 크게 나타났으며, 이를 통해 해당 지점(20cm × 10cm)이 노지 과수원에 센서를 설치하여 토양수분을 측정하기에 가장 최적일 것으로 판단되었다. 그러나 다년간 센서를 통해 토양의 수분 변화를 측정했을 때, 시간이 지남에 따라 과수의 뿌리가 성장하고, 이에 따라 같은 지점에 설치된 센서에서 나타나는 변화의 양상이 달라질 수 있음을 확인하였다. 이에, 채소와 화훼작물과 같이 상대적으로 단기간에 재배하는 초본식물과는 다르게 오랫동안 노지에서 자라는 과수의 경우 과수의 크기나 뿌리의 생육을 고려하여 토양수분의 변화를 측정할 수 있도록 토양수분센서 설치 위치를 선정해야 할 것으로 판단되었다. 또한, 시간이 지남에 따라 토양수분의 변화가 활발해지는 위치가 변화될 수 있으므로 여러 개의 센서를 활용하여 최적 측정 위치를 변경하거나(Soulis와 Elmaloglou, 2018), 주기적인 관찰 및 보안을 통해 센서 설치 위치를 변경하는 노력도 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 현재 노지에서의 효율적인 양·수분 관리를 위한 스마트농업 기술 개발에 있어서 센서를 알맞게 설치하기 위한 기반 연구로서 그 의의를 지닌다. 그러나, 본 연구에서 제시한 바와 같이 노지 과수원의 토성, 관수 방법에 따라 토양수분장력 값 변화의 양상이 달라질 수 있는 것을 확인하였으므로, 이러한 토양수분센서의 최적 설치 위치를 확인하기 위해서는 과수 품종, 수령, 토성, 관수 방법 등에 따른 추가 연구가 필요할 것으로 판단한다. 또한, 센서 기반 스마트 농업을 올바르게 이해하고 활용하기 위해서는 센서 데이터 해석, 센서의 특성, 그리고 적절한 센서 설치 방법 등에 대한 교육이 필요할 것으로 보인다.

적요

노지 토양의 효율적인 수분관리를 위해서는 토양수분센서를 알맞게 사용하여야 하며, 특히 노지 과수와 같이 넓은 뿌리

환경을 가지는 토양 환경에서는 적합한 센서 설치 위치가 매우 중요하다. 이에 본 실험에서는 노지 과수원에서 다양한 거리와 깊이에 토양수분장력 센서를 설치하여 각 위치의 토양수분장력 값을 측정하고, 센서 설치 위치에 따른 토양수분 변화 정도를 비교하여, 이에 따른 최적 토양수분센서 설치 위치를 알아보기 위해 수행하였다. 국내 두 지역에 위치한 사과 및 배 과수원에서 각 과수의 수간으로부터 거리 20, 40, 60cm, 토양 표면으로부터 깊이 10, 20, 30cm로 각각 9개의 토양수분장력 센서(TEROS 21, METER Group)를 설치하여 2년간의 토양수분장력 변화 정도를 비교 분석하였다. 두 과수원 모두 센서가 과수의 수간으로부터 가까울수록, 토양의 표면으로부터 얇게 설치되어 있을수록 토양수분장력 값의 변화 정도가 크게 나타났으며, 20cm × 10cm(과수의 수간으로부터 거리 × 토양 표면으로부터 깊이) 지점에서의 토양수분장력 값의 변화 정도가 가장 큰 것으로 나타나 토양수분센서 설치에 가장 적합한 지점으로 판단되었다. 그러나 연도가 달라짐에 따라 과수의 뿌리가 성장하며 센서 설치 위치에 따른 토양수분장력의 변화 정도 양상이 조금씩 변하는 것을 확인할 수 있었다. 노지 과수와 같이 장기간 재배하는 작물의 토양수분 환경을 알맞게 측정하기 위해서는 현장에서의 주기적인 토양수분 변화 관찰 및 보안을 통해 센서 설치 위치를 변경하는 노력도 필요할 것으로 나타났다.

추가주제어: 배, 사과, 자동관수시스템, 토양수분장력, 효율적 관수

Literature Cited

- Amiri Z., M. Gheysari, M.R. Mosaddeghi, S. Amiri, and M.S. Tabatabaei 2022, An attempt to find a suitable place for soil moisture sensor in a drip irrigation system. *Inf Process Agric* 9(2):254-265. doi:10.1016/j.inpa.2021.04.010
- Bréda N., A. Granier, F. Barataud, and C. Moyne 1995, Soil water dynamics in an oak stand: I. Soil moisture, water potentials and water uptake by roots. *Plant Soil* 172:17-27. doi:10.1007/BF00020856
- Coelho E.F., and D. Or 1996, Flow and uptake patterns affecting soil water sensor placement for drip irrigation management. *Trans ASAE* 39(6):2007-2016. doi:10.13031/2013.27703
- Domínguez-Niño J.M., J. Oliver-Manera, G. Arbat, J. Girona, and J. Casadesús 2020, Analysis of the variability in soil moisture measurements by capacitance sensors in a drip-irrigated orchard. *Sensors* 20(18):5100. doi:10.3390/s20185100
- Evelt S.R., J.A. Tolk, and T.A. Howell 2006, Soil profile water content determination: Sensor accuracy, axial response, calibration, temperature dependence, and precision. *Vadose*

- Zone J 5(3):894-907. doi:10.2136/vzj2005.0149
- Garg A., P. Munoth, and R. Goyal 2016, Application of soil moisture sensor in agriculture. Proc Int Conf Hydraul 8-10.
- Hoppula K.I., and T.J. Salo 2007, Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. Irrig Sci 25:401-409. doi:10.1007/s00271-006-0055-7
- Jiang X., and L. He 2021, Investigation of effective irrigation strategies for high-density apple orchards in Pennsylvania. Agronomy 11(4):732. doi:10.3390/agronomy11040732
- Jiao M., W. Yang, W. Hu, B. Clothier, S. Zou, D. Li, N. Di, J. Liu, Y. Liu, J. Duan, and B. Xi 2021, The optimal tensiometer installation position for scheduling border irrigation in *Populus tomentosa* plantations. Agric Water Manag 253: 106922. doi:10.1016/j.agwat.2021.106922
- Jones H.G. 2004, Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. J Exp Bot 55(407):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 H.N., and J.H. Park 2021, Research trends using soil sensors for precise nutrient and water management in soil for smart farm. Korean J Soil Sci Fertil 54(3):366-382. (in Korean) doi:10.7745/KJSSF.2021.54.3.366
- Kim H.J., D.W. Son, S.O. Hur, M.Y. Roh, K.Y. Jung, J.M. Park, J.Y. Rhee, and D.H. Lee 2009, Comparison of wetting and drying characteristics in differently textured soils under drip irrigation. J Bio-Environ Control 18(4):309-315. (in Korean)
- Kim W.I., 2019, Setting soil moisture tension for automated irrigation in apple orchard, Rural Development Administration Korea. (in Korean) Available via <https://www.nongsaro.go.kr/portal/ps/psb/psbb/farmUseTechDtl.ps?menuId=PS00072&farmPrcuseSeqNo=100000156897&totalSearchYn=Y> Accessed 24 April 2024
- Lee K., J. Kim, J. Lee, and J. Kim 2022, Comparisons of soil water retention characteristics and FDR sensor calibration of field soils in Korean orchards. J Bio-Environ Control 31(4): 401-408. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2022.31.4.401
- Mittelbach H., I. Lehner, and S.I. Seneviratne 2012, Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland. J Hydrol 430:39-49. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.041
- Müller T., C.R. Bouleau, and P. Perona 2016, Optimizing drip irrigation for eggplant crops in semi-arid zones using evolving thresholds. Agric Water Manag 177:54-65. doi:10.1016/j.agwat.2016.06.019
- Nadezhdina N., M.I. Ferreira, R. Silva, and C.A. Pacheco 2008, Seasonal variation of water uptake of a *Quercus suber* tree in Central Portugal. Plant Soil 305:105-119. doi:10.1007/s11104-007-9398-y
- Nam S., S. Kang, and J. Kim 2020, Maintaining a constant soil moisture level can enhance the growth and phenolic content of sweet basil better than fluctuating irrigation. Agric Water Manag 238:106203. doi:10.1016/j.agwat.2020.106203
- Predieri S., R. Dris, L. Sekse, and F. Rapparini 2003, Influence of environmental factors and orchard management on yield and quality of sweet cherry. J Food Agric Environ 1(2):263-266.
- Soulis K.X., and S. Elmaloglou 2016, Optimum soil water content sensors placement in drip irrigation scheduling systems: Concept of time stable representative positions. J Irrig Drain Eng 142(11):04016054. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001093
- Soulis K.X., and S. Elmaloglou 2018, Optimum soil water content sensors placement for surface drip irrigation scheduling in layered soils. Comput Electron Agric 152:1-8. doi:10.1016/j.compag.2018.06.052
- Spaans E.J., and J.M. Baker 1996, The soil freezing characteristic: Its measurement and similarity to the soil moisture characteristic. Soil Sci Soc Am J 60(1):13-19. doi:10.2136/sssaj1996.03615995006000010005x
- SU S.L., 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
- Thompson R.B., M. Gallardo, L.C. Valdez, and M.D. Fernández 2007, Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. Agric Water Manag 88(1-3):147-158. doi:10.1016/j.agwat.2006.10.007
- Walter A., R. Finger, R. Huber, and N. Buchmann 2017, Smart farming is key to developing sustainable agriculture. Proc Natl Acad Sci 114(24):6148-6150. doi:10.1073/pnas.1707462114
- Yu L., W. Gao, R.R. Shamshiri, S. Tao, Y. Ren, Y. Zhang, and G. Su 2021, Review of research progress on soil moisture sensor technology. Int J Agric Biol Eng 14(4):32-42. doi:10.34657/10037
- Zinkernagel J., J.F. Maestre-Valero, S.Y. Seresti, and D.S. Intrigliolo 2020, New technologies and practical approaches to improve irrigation management of open field vegetable crops. Agric Water Manag 242:106404. doi:10.1016/j.agwat.2020.106404