

Research Trends Using Soil Sensors for Precise Nutrient and Water Management in Soil for Smart Farm

Han Na Kim¹ and Jin Hee Park^{2*}¹Master Student, Department of Environmental and Biological Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea²Associate Professor, Department of Environmental and Biological Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea*Corresponding author: pjinh@chungbuk.ac.kr

ABSTRACT

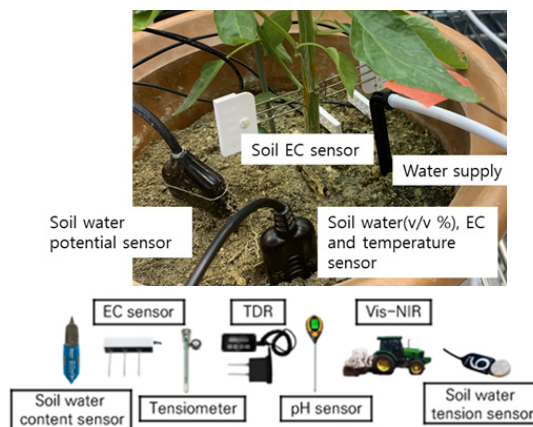
Received: May 20, 2021**Revised:** July 24, 2021**Accepted:** August 3, 2021

ORCID

Jin Hee Park

<https://orcid.org/0000-0002-9434-1361>

The imbalance of nutrient and water supply can negatively affect crop productivity and environment. Therefore, it is necessary to monitor nutrient and water status of soil and precision management of the soil is required. Soil water content can be measured using sensors such as frequency domain reflectometry (FDR) and time domain reflectometry (TDR). Tensiometer was commonly used to determine irrigation timing and amount to supply water. Organic matter in the soil can be measured using a near infrared spectrometer (NIR) sensor, which showed good correlation with soil organic matter contents. On-the-go pH sensor was used for pH mapping of soil with high resolution. Generally, organic matter and pH sensors are less used for soil based smart farm system than soil moisture sensors, but used for the characterization of soil. There are no available sensors to monitor nutrient levels in soil directly. To use ion selective electrodes, soil solution should be extracted. Instead, monitoring soil EC can be used to manage nutrients in soil since the soil EC is related to nutrients in soil solution. However, EC and nutrient availability in soil are affected by various factors such as soil water content, temperature and soil texture. Therefore, calibration of EC based on soil texture, CEC, soil organic matter, and etc. is required. Recent researches for soil based smart farm focused on wireless sensors, plant wearable sensors, and intelligent agriculture systems. Combined monitoring of environmental conditions and plant biometric information will achieve smart and precision agriculture.

Keywords: Nutrient, Real time, Sensor, Smart farm, Water

Various soil sensors to monitor soil water, temperature, pH, organic matter and EC.



Introduction

기후변화에 관한 정부 간 협의체 (The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, 2014) 5차 평가보고서에 따르면 전 지구 연평균 강수량은 현재 대비 약 5 - 10% 증가하는 것으로 나타났다. 기후 변화에 의해 유발되는 가뭄과 홍수의 빈도가 증가하고 강우의 지역적 편중에 의해 작물의 물 수급에 불균형이 나타나고 있어 지역과 작물에 따른 정밀한 수분 공급이 필요하다 (Nam et al., 2016). 농업 생산성은 토양 수분 함량에 따라 크게 달라지기 때문에 (Choi et al., 2010) 이와 같은 추세가 계속된다면, 기후변화에 취약한 분야인 농업이 악영향을 받을 것이다.

최근 나타나는 이상 기후와 과잉의 비료 공급에 의한 양수분의 불균형은 작물의 생산성과 환경에 부정적인 영향을 줄 수 있어 농경지의 지속가능성을 유지하기 위해서는 농경지 양수분관리가 중요하다. 전국 밭토양 비료 성분의 과잉 비율을 조사한 결과 유효인산의 경우 지속적으로 증가하여 적정 범위 기준을 20% 초과하였으며 치환성 양이온의 과잉 비율도 증가하였다 (Kim et al., 2019b). 따라서 작물을 재배하면서 토양의 양수분을 정밀하게 관리하면 작물의 품질을 향상시킬 수 있다 (Lee et al., 2010). 이를 위해서는 정보통신기술 (information and communications technology, ICT)을 이용한 자동 물관리 시스템의 구축이 필요한데, ICT기반 지표관개 토양 수분 모니터링 시스템 개발은 관개에 필요한 물 공급량을 절감할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이러한 ICT기반 물 관리 시스템은 밭작물의 작물 생산성 및 식량 자급률 향상에 기여할 것으로 기대된다 (Kwon et al., 2019).

최근 ICT를 접목한 스마트팜 (smart farm)이 농업 분야에서 확산되고 있으며, 생산, 유통 및 소비의 전 과정에 걸쳐 디지털화와 지능정보화가 요구된다. 스마트팜은 네트워크, 로봇 등 자동화 기술을 융합하여 모바일 기기 등을 이용하여 농업 환경을 모니터링하고 제어함으로써 생산성 향상, 비용 절감뿐만 아니라 농업인 삶의 질을 향상시키는 고효율의 농업 형태를 의미한다 (Heo et al., 2016). 따라서 스마트팜에서는 실시간 측정이 가능한 센서를 활용하여 농업 환경을 관측하고 양분 함량을 모니터링하면서 작물 생육 단계에 따라 양분의 공급량을 조절하는 것이 필요하다. 이러한 형태의 스마트팜은 주로 온실 환경에 적용되었으며 온실 스마트팜의 경우 주로 수경재배를 기반으로 다양한 환경 정보와 양액의 pH, EC 정보를 수집하여 작물 생육에 최적인 환경 조절 및 양수분 공급을 조절한다.

온도와 습도, 관수, 관비의 제어가 가능한 원격 재배 시스템의 효율성이 높은 온실과 달리 노지는 작물 생육 환경이 다양하고 온실 스마트팜에서 사용하는 센서와 기술을 노지 스마트팜에 적용하기에 부지가 넓으며 환경을 조절하기 어렵기 때문에 다양한 변수가 발생하는 등의 한계가 있다 (Yun et al., 2017). 또한 노지는 토경 재배를 기반으로 하는데 토양의 양분을 실시간으로 모니터링할 수 있는 센서가 현재 없어 EC 센서로 양분을 제어하는 수경재배에 비해 양분 관리와 정밀 농업의 어려움이 있다. 그러나 수경재배는 집단 감염의 위험성이 크고 (Park et al., 2019a), 넓은 부지에서의 공간의 활용성, 다량 생산에 어려움이 있으며 노지에서의 작물 재배를 모두 온실에서의 수경재배로 대체할 수 없기 때문에 노지 스마트팜의 구축이 필요하다.

노지 스마트팜은 시공간 변이 분석에 의한 적시적지적량 투입하는 기존의 정밀농업과 달리 ICT 기술을 활용하여 실시간으로 생육 환경을 분석하고 자동화된 양수분 관리가 이루어지는 농업 시스템을 의미한다 (Kim and Choe, 2016). 노지 스마트팜에서는 생육 정보 수집 및 모니터링 방법에서 지온, 토양 수분, 토양 수분장력 등이 수집항목이다 (Jeon et al., 2019). 이러한 인자들은 토성, 유기물 함량과 같은 토양 특성에 의해 영향을 받기 때문에 노지 토양의 특성에 따라 다양한 값을 나타낼 수 있다. 또한 토양의 생물학적 반응은 농업 생태계의 중요한 기능으로서 양수분 사용 효율에 영향을 미치기 때문에 토경재배에서는 농작물과 토양의 여러 요인들의 관리가 어떻게 상호 작용하는지 고려해야 한다 (Lijbert et al., 2007).

노지 스마트팜에서는 센서를 활용한 자동화 양수분 관리를 통한 에너지 (물, 비료) 사용 효율화가 요구된다(Fig. 1). 작물의 종류, 특성에 따라 최적 재배 조건의 토양 환경이 다르고 필요한 양분, 수분량이 달라 관리하기 어렵기 때문에 토양 환경의 모니터링을 통한 최적 환경 조성이 필요하다 (Heinonen, 1985). 따라서 온도, 습도, 광량, 강우량과 같은 환경 센서뿐만 아니라 토양의 양분, 수분, pH 등을 모니터링할 수 있는 센서가 필요하다. 또한, 토양 별 위치, 토성, 수분 함량, 농지, 기상 등 농업관련 자료들을 연계 및 공유하는 빅데이터 시스템의 구축이 필요하다 (Lee, 2020). 노지의 경우 수정재배를 주로 하는 온실 스마트팜과 달리 양분과 수분이 토성, 유기물 함량, pH, 양이온교환용량 (cation exchange capacity, CEC) 등의 영향을 받고 이용가능 양분 함량은 토성별 유효 수분에 따라 변화하기 때문에 정확한 측정이 요구되지만 작물이 이용할 수 있는 양분을 토양에서 실시간으로 측정할 수 있는 센서가 존재하지 않아 어려운 실정이다. 따라서 본 리뷰 논문에서는 토경재배에서 효율적 양수분 관리를 위해 토양 수분, pH, 유기물, EC 센서를 활용해 토양 양수분을 계측하여 정밀 양수분 관리에 이용하는 사례들을 파악하여 노지 스마트팜에 활용할 수 있을지 평가하였다.

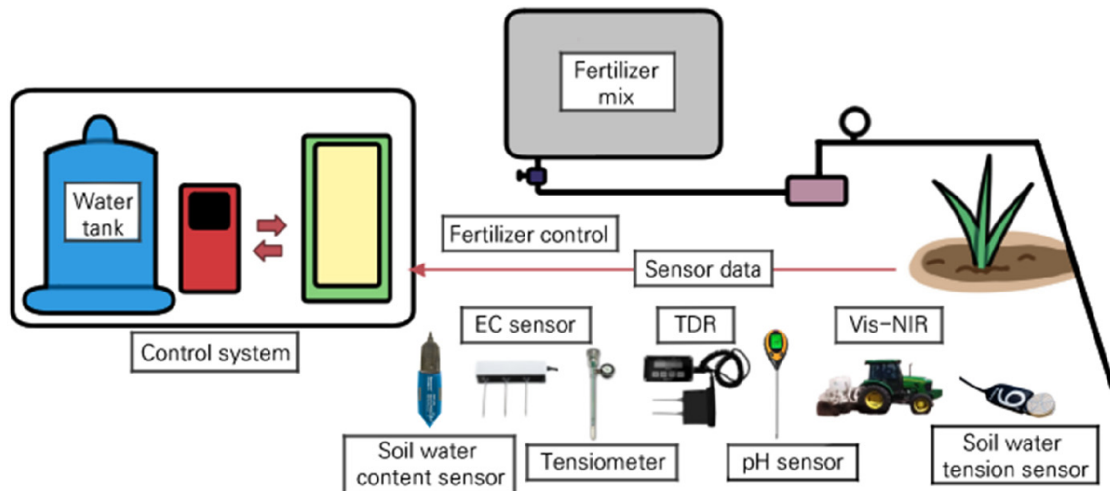


Fig. 1. Conceptual diagram of smart farm system using soil sensors for precision management of soil water and nutrients.

Types of Soil Sensors and Application

토양 수분 함량 측정 센서 일반적인 농업환경에서 작물 생육에 가장 큰 제한 요인으로 작용하는 것은 물이다 (Boyer, 1982). 수분함량은 관개나 수분수지 평가를 위한 기본적인 자료로 사용된다. 토양수분 함량은 중량수분함량과 용적수분함량으로 구분된다. 중량수분함량은 건토 중량법으로 측정하며 용적수분함량은 시간 영역 반사법 (time domain reflectometry, TDR)과 시간-주파수 영역 반사파 계측 (frequency domain reflectometry, FDR) 방식의 토양 수분 계측기를 이용한 센서 측정 방법, 중성자 탐사법 (neutron probe)을 이용한 코스믹레이 (cosmic-ray) 토양수분 측정 방법을 이용한다 (Kim et al., 2015).

TDR 센서는 전기적인 펄스의 전송시간을 이용해 수분함량을 측정하며 다른 수분 센서에 비해 가격이 비싸다. TDR을 이용한 토양수분 함량의 측정은 전자기파의 걸보기 유전율의 변화를 이용하여 토양에서 실시간으로 쉽게 측정할 수 있으며 탐침 (rod)의 수가 두 개 혹은 세 개 또는 실린더 형태로 되어 있는 것이 일반적이다 (Hur et al., 2007).

FDR 센서는 전기용량(capacitance)을 이용하여 공명 진동수의 변화를 측정하여 수분 함량을 측정한다. FDR 센서도 TDR 센서와 마찬가지로 토양 EC나 유기물 함량의 영향을 받는다. 따라서 토양수분센서의 경우, 토양의 특성에 따라 센서의 보정이 필요하다. 유기물 함량과 수용액 중의 전해질(EC, pH)의 영향을 받으므로 이를 보정해야 하지만 적절하게 보정을 한 후에는 계속해서 사용할 수 있다(Kim, 2014). 토양 수분센서를 통해 수분함량을 측정했을 때, 출력 값은 전압(voltage)값인 경우 변환하는 수식을 사용하여 보정한 후, 수분함량(%) 값으로 표시할 수 있다. 일반적으로 센서 제조사에서 보정을 하지만 사용할 현장의 토양 특성에 따라 센서 검증을 하고 얻은 계수로 보정하면 정확하고 신뢰도 높은 자료를 얻을 수 있다(Moon and Lim, 2015).

실시간으로 수분 변화를 계속하기 위해 많은 연구자들은 토양수분 센서를 이용하고 있으며 이렇게 측정한 토양 용적 수분 함량을 통해 작물의 수분 수지나 뿌리를 통한 수분 흡수, 물과 양분의 이동, 관개효율이나 관개패턴, 증발산 등의 연구를 수행하고 있다. 또한 토양 수분 센서를 사용하면 높은 정확도로 토양 수분 함량을 파악할 수 있다는 장점이 있다(Herkelrath et al., 1991). 우리나라의 대표적 토양인 사양토에서 두 가지 형태(TDR, FDR)의 토양수분 센서의 정확성 검증을 통해 대부분의 센서들이 1.4 - 2.8% 정도의 오차를 나타내 현장 측정에서 문제가 없음을 보였다(Hur et al., 2009).

토양의 유효수분은 토성, 유기물 함량 등에 영향을 받아 토양 특성에 따라 값이 달라지기 때문에 노지 농업에서 물 관리에 적용하기 전 유효수분의 수분함량 범위를 평가해야 한다. 수분 장력의 경우 값 자체로 유효수분을 판단할 수 있기 때문에 수분함량 대신 토양 내 수분 장력이 관수시기와 관수량을 평가하는데 유용하다(Smajstrla and Locascio, 1996).

토양 수분 장력 센서 장력계와 저항블럭은 토양수분 장력을 측정하는 대표적인 방법으로서, 각각 진공관의 압력 게이지, 전기저항센서를 이용해 토양수분장력을 측정하는 방법이다. 토양수분 장력은 텐시오미터(tensiometer)를 활용해 측정하며, 식물 뿌리의 물 흡수와 직접적인 연관이 있기 때문에 식물의 관개와 급수 기준 설정에 활용할 수 있다(Lee et al., 2020). 수분 장력을 측정할 수 있는 다양한 센서들은 스마트팜 분야에 활용되어 관수 시점을 결정하는데 사용될 수 있으며, 장력센서는 토성, 온도 등의 영향을 적게 받기 때문에 수분 관개 제어에 활용되고 있다(Ling, 2004; Seo et al., 2017). 그러나 텐시오미터는 토양 하부 7 cm 이하를 측정하기 어려우며, 약간 비틀어 고정시킨 다음 틈이 없도록 벤토나이트로 채워 물이 흐르지 않게 설치하거나 공기가 차지 않도록 주기적으로 증류수를 공급해야 하는 등의 문제점이 있다(Park et al., 2010).

국내 노지 농업에서 토양 수분센서를 관개에 활용하는 것은 시범 사업을 수행하고 있는 단계에 있다. 2018년 스마트팜을 온실에서 노지로 확대하기 위한 모델개발 사업을 처음 추진하였으며 2019년 채소류로는 배추, 양파, 대파, 과수로는 사과, 블루베리, 감귤, 특용작물로는 삼백초를 대상으로 자동관수 시스템을 구축하였으며 이는 더 확대될 것이다(Kim and Sim, 2019). Nebraska의 대규모 옥수수 농가를 대상으로 한 연구에 따르면 토양수분센서를 활용하여 측정한 수분 부족 임계값과 작물 시물레이션, 실시간 날씨 데이터를 조합하여 관개를 제어한 결과, 수확량이 크게 감소하지 않으면서 33%의 물을 절약해 노지 스마트팜에서 활용성이 높은 것으로 나타났다(Irmak et al., 2012). 온실과 달리 공간 변이가 큰 노지에서 토양수분센서를 활용해 관개를 제어하는 것이 어렵기 때문에 국내에서 노지 스마트팜은 아직 연구개발 단계에 있으나 넓은 부지에서의 빅데이터를 수집해 센서를 보정하고, 센서 설치 지점과 관개일정에 대한 기준을 설정하고 자동화 시스템을 구축해 개발하는 것이 필요하다고 판단된다.

최근 토양수분의 지속적인 모니터링은 전자파를 이용해 층위별로도 가능하다. 이러한 센서들은 현재 상태의 토양 수분 함량을 표시하지만 지속적인 모니터링을 통해 토양 내에서의 수분 상태와 이동을 분석할 수 있다. 심토에 있는 토양수분이 퍼텐셜의 차이에 따라 위로 이동하는 것을 이용하여 토양수분 변동량을 분석할 경우 증발산량을 산정할 수 있을 것이다. 층위별 토양수분 센서를 통해 토양의 포화수분함량, 증발산량, 토양수분의 상승량, 적정관개시점, 강우에 의한 영향 등 다양한 정보도 얻을 수 있다 (Gaskin and Miller, 1996). 센서는 데이터로거와 같은 데이터 수집 장치에 연결하여, 지속적으로 증발산량이나 토양수분함량의 시기적 변화에 대한 모니터링이 가능하고 농업, 원예, 잔디 관리에서 관수 설정을 위한 자료로 사용할 수 있다. 이는 ICT기술이 접목된 스마트팜 연구의 시스템적인 요소들과 결합하였을 때 실시간으로 다양한 정보를 얻으며 물부족이나 과잉에 대한 신속한 대응이 가능할 것으로 판단된다 (Seo et al., 2012).

Table 1. Soil moisture sensors and factors affecting the value.

Sensor name	Sensor type	Measured soil water	Influencing factors	References
Hydra probe	Dielectric impedance	Volumetric soil water content	Clay content	Seyfried et al. (2005)
Theta probe	Dielectric impedance	Volumetric soil water content	Soil particles Discrepancies between measurement volume and installation depth	Schmutz and Namikas (2011)
SM300	Dielectric impedance	Volumetric soil water content and soil temperature	Temperature Salinity Soil type	Vaz et al. (2013)
ECH2O probe model EC-5	Dielectric constant	Volumetric soil water content	Temperature Soil variability Discrepancies between measurement volume and installation depth	Bogena et al. (2007)
Water content reflectometer	Time-domain measurement	Volumetric soil water content	Temperature Soil type	Seyfried and Murdock (2001)
TRIME-IT/-EZ	Time-domain measurement	Volumetric soil water content	Temperature Soil type Discrepancies between measurement volume and installation depth	Blonquist Jr et al. (2005)
10HS	Time-domain measurement	Volumetric soil water content	Temperature Humidity Soil type Discrepancies between measurement volume and installation depth	Decagon Devices (2009)
CS616	Frequency-domain measurement	Volumetric soil water content	Temperature Discrepancies between measurement volume and installation depth	Campbell Scientific (2006)
SISOMOP	Frequency-domain measurement	Volumetric soil water content	Temperature Discrepancies between measurement volume and installation depth	Schlaeger (2007)
Tensiometer	Soil water tension	Water potential	Pressure Discrepancies between measurement volume and installation depth	Richards (1942)

현재 사용가능한 토양 수분 센서는 텐시오미터와 용적 수분 함량을 측정하는 Hydra probe 등이 있으며 몇몇 토양 수분 센서의 종류와 센서 값에 영향을 미치는 인자들을 Table 1에 나열하였다 (Radhi and Mohammed, 2017; Janani and Pavitra, 2019). 토양 수분 함량의 경우 토양 특성에 따라 영향을 받으며 장력의 경우 측정할 수 있는 범위에 한계가 있기 때문에 센서를 활용한 물관리 시 두 가지 센서의 값을 종합하여 관리하는 것이 좋으며 온도, 습도, 누적 광량 등의 환경 요인도 고려해야 한다.

토양 pH 모니터링 전통적인 토양 화학성 분석법은 분석에 오랜 시간이 소요되며 전문인력이 요구되기 때문에 주기적인 분석이 어려운 실정이다. 따라서 기온, 날씨 등에 따라 변화하는 토양의 화학적 특성을 실시간으로 분석하는 방법을 개발하기 위해 pH를 포함한 토양의 실시간 성분분석 시스템 개발을 위한 기초연구 등이 수행되고 있으며 스마트팜 기술에도 활용되고 있다 (Yun et al., 2014). 작물의 생육에는 토양의 수분, 전기전도도 (EC), 산도 등이 많은 영향을 준다. 특히 토양 pH는 양분의 용해도와 미생물의 활성, 토양 화학 반응에 영향을 주기 때문에 작물의 영양분 흡수에 있어 고려해야 할 항목이다.

미국에서 2003년 보급된 Veris 센서 (MSP3, U series 등)는 트랙이나 트랙터에 연결하여 이동하면서 pH를 측정할 수 있도록 만든 센서이다. 이 센서를 이용해 미국 중서부의 pH 지도를 만들 수 있었으며 다양한 토양에 대한 pH 지도의 제작이 가능하다. pH 센서의 판독 값은 토양 시료에 대해 보정하여 연구소에 정기적으로 데이터를 전송할 수 있으며, 실험실에서 표준 분석법으로 토양 pH를 측정한 값과 센서 pH 측정값 사이에 높은 선형 관계가 나타났다. 그러나 이를 석회요구량으로 활용하기 위해서는 추가 보정이 필요하며 토양 온도, 습도 등의 영향을 받으므로 추가 센서를 활용한 정보를 이용하여 정확도를 개선하기 위한 연구가 필요하다.

정밀 농업에 대한 요구가 증가하면서 밀도 높은 토양 시료 채취와 분석이 필요하기 때문에 토양 분석을 빠르게 수행하면서 비용을 절감하기 위해 실시간 센서 모니터링 및 데이터 처리 방법으로 대체해야 하는데, 이러한 pH 센서를 활용했을 때 가능할 것으로 평가된다 (Erickson, 2004; Schirrmann et al., 2011; Bongulto et al., 2016). 실제 스마트팜 농가에서 DHT11 토양 pH 센서를 활용하여 토양의 산도를 실시간으로 측정하여 비료 시비를 알맞게 조절한 사례가 있다 (Gay, 2018).

국내에서도 실시간으로 토양의 수분, EC와 pH를 동시에 측정 가능한 센서가 개발되었다. 토양 센서의 측정 항목은 토양 pH, EC, 함수율, 온도이며, pH는 이온선택성전극과 기준 전극의 전위차로 pH를 측정한다. pH가 높아질수록 전위차가 높아져, pH와 전위차의 상관관계가 0.99 이상으로 높게 나타났다. 또한 온도를 측정하여 EC의 온도 보정에 사용하였다 (Hong et al., 2016).

토양에서 실시간으로 pH를 측정할 수 있는 센서를 이용해 pH를 측정한 결과와 측정에 영향을 주는 요인들, 그리고 추출법으로 pH를 분석하여 상관성을 평가한 결과를 Table 2에 나타내었다. 센서를 이용하여 pH를 측정한 결과는 추출법으로 분석한 토양 pH와 비교하여 설명력이 0.5 이상으로 나타났다. 센서를 이용한 토양의 pH 측정에 영향을 미치는 인자는 토성, 온도, EC, 수분함량 등이었으며 점토 함량이 높을수록 pH가 낮게 측정되고, 온도가 높을수록 pH가 높게 측정되는 등의 경향이 나타났다 (Adamchuk and Rossel, 2010; Gay, 2018). pH는 수소이온의 농도를 의미하기 때문에 토양수분 함량에 의해 영향을 받는다. 토양 EC는 토성, 용적밀도, 염도, 수분함량에 의해 영향을 받기 때문에 토양 특성을 보여주는 인자로 사용할 수 있으므로 pH 측정 결과에 도입하여 pH 완충 능력을 예측하는데 활용할 수 있다 (Staggenborg et al., 2007). 토양은 완충용량을 가지고 있어 토양의 pH는 외부 요인에 의해 쉽게 변화하지 않

때문에 노지 스마트팜에서 실시간 상시 측정이 요구되지 않는 항목이다. 그러나 농경지의 전반적인 토양 특성을 평가하기 위해 넓은 면적에 걸친 pH의 변동을 모니터링하며 이러한 장치를 토양에 적용하기 위해서는 토양 특성에 따른 다양한 인자들에 대한 보정이 이루어져야 한다.

Table 2. Real-time soil pH sensors.

Soil pH sensor	Factors affecting sensor measurement	Correlation with pH measured by extraction method	References
DHT11 sensor (D-Robotics UK)	Soil temperature	Accuracy : $\pm 5\%$	Gay (2018)
Mobile sensor platform equipped with dual pH sensors (Model MSP, Veris Technologies)	Soil EC	R^2 : 0.75 - 0.83 (0 - 7.5 cm depth) R^2 : 0.53 - 0.79 (7.5 - 15 cm depth)	Staggenborg et al. (2007)
Proximal soil sensing (PSS)	Soil texture Soil EC	R^2 : 0.68	Adamchuk and Rossel (2010)
Real-time soil pH measuring device	Soil EC	R^2 : 0.86	Hong et al. (2016)
Real-time soil sensor (RTSS, SAS 1000, SHIBUYA MACHINERY Co., Ltd.)	Soil moisture Soil freshness	R^2 : 0.58 (H ₂ O) R^2 : 0.71 (1:2.5 KCl) R^2 : 0.62 (1:1 H ₂ O) R^2 : 0.72 (1:25 H ₂ O)	Kodaira and Shibusawa (2013)
Veris pH Manager™	Blockage by residual straw and weed roots	R^2 : 0.63 - 0.84	Schirrmann et al. (2011)

토양 유기물 측정 센서 토양의 유기물은 토양의 물리적 특성에 영향을 미치며 양분의 공급을 조절하고 미생물의 활성에 영향을 미친다. 따라서 토양의 유기물 함량이 농경지에서 중요한 인자이며 토양에 전자파 에너지를 투입하고 반사될 때 생기는 에너지 차이를 수치화하여 토양 유기물 함량과의 상관관계로 토양 내 유기물 함량을 측정할 수 있다. 일반적으로 유기물과 토양 색은 상관성이 있으며, 토양 색이 어두우면 유기 물질 또는 유기 탄소가 포함되어 있다고 판단한다 (Billmeyer and Saltzman, 1981). 건조 지역 토양에서 색상 센서를 활용해서 토양 유기물 함량을 평가한 결과 수분이 있는 토양에서 건조한 토양보다 토양 유기물 함량과 색상 센서 사이에 상관성이 더 높게 나타나 유기물 함량을 잘 예측할 수 있었다 (Raeesi et al., 2019).

근적외선 (near-infrared spectrometer, NIR) 센서는 유기물 색상의 스펙트럼을 측정하여 반사율 데이터를 활용해 토양 유기물과 토양 수분 함량을 예측할 수 있다. 토양 유기물의 경우 520, 960 및 1,120 nm 대역의 파장에서 민감하게 반응하고, 수분은 1,450 및 1,900 nm에서 민감하게 반응하여 측정한다 (Daniel et al., 2004; Loshelder, 2020). 토양 지표면에서의 수분함량과 유기물 함량 분석 결과, 수분 측정 오차보다 유기물 측정 오차가 더 적게 나타나 유기물 측정에서의 NIR 센서 활용성이 더 높을 것으로 판단된다. 그러나 이는 실험에 사용한 토성에 의해 영향을 받아 토성별 차이에 대한 보정도 필요하다 (Hummel et al., 2001). 센서 테스트 결과, 유기물과 수분 함량의 연관성이 나타났으며, 이 센서를 활용해 토양 유기물 함량을 측정하고 관리한다면 토양의 수분 함량 조절도 가능해 식물의 생산성도 높일 수 있을 것으로 판단하였다. 또한 유기물 이외의 화학성 분석을 위한 센서의 요소나 보정 값으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다 (Hummel et al., 2001).

휴대용 NIR 토양 센서도 개발되었는데, 이 센서는 토양의 양이온교환용량과 수분의 영향을 받는 단점이 있어 각 토성 별 함량 보정이 필요하다 (Sudduth and Hummel, 1993). 토양 유기물 센서를 실제 스마트팜 농가에서 사용하였을 때, 토양 비옥도에 대해 판단할 수 있고 이에 따른 비료 시비, 객토 등의 대처가 가능하여 재배 환경에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 시사된다 (Sparling et al., 2006).

실시간으로 토양 유기물 함량을 측정하는 센서도 국내에서 개발되었는데, 이 센서는 지표 아래 15 - 20 cm 부근에서 토양에 인공 광을 조사한 후 그 반사광을 측정한다. 이 센서를 위해 광원을 조사하고 그 반사광을 측정할 수 있는 시스템을 지표 아래 부분에 설계해야 하며 저장장치, GPS 수신 시스템 등을 탑재하고 작업할 수 있도록 해야 한다 (Sung et al., 2003). 이렇게 측정된 데이터로 빠르게 데이터 수집이 가능한 시스템을 이용하여 위치에 따른 토양 유기물 함량을 얻을 수 있으며, 시료 분석 결과를 이용해 토양 유기물 함량 분포 지도를 작성할 수 있다. 유기물 함량 분포 지도를 통해 농장의 질소 비료 시비량 지도도 작성할 수 있어 유기물 센서는 양분 관리와 양분 이용 효율을 높일 수 있고, 정밀 농업에서의 활용이 가능할 것으로 판단된다 (Cho et al., 2002).

Table 3. On-the-go soil organic matter sensors.

Soil organic matter sensor type	Factors affecting sensor measurement	Relationship between reflectance and organic matter	References
Handheld proximal sensor	Soil particles	$R^2 : 0.81$	Cozzolino et al. (2013)
On-the-go optical sensor	Gaps between soil and the sensor window	$R^2 : 0.91$	Kweon and Maxton (2013)
Prototype real-time soil organic matter sensor	Soil depth	$R^2 > 0.83$	Shonk et al. (1991)
Two light reflectance soil organic matter sensor	Soil moisture	Successfully predicted soil organic matter content for each of the thirty soils	Pitts et al. (1986)
VNIR-SWIR sensor	Selection of the proper spectral range of the sensor, preprocessing methods, and calibration techniques	$R^2 > 0.65$	Angelopoulou et al. (2020)
A real-time multi-spectral soil sensor		$R^2 : 0.76$	Shibusawa et al. (2005)
NIR reflectance sensor		Standard errors of prediction for organic matter : 0.62%	Hummel et al. (2001)
NIRS system sensor		$R^2 : 0.87$ (900 - 1,700 nm) $R^2 : 0.75$ (350 - 1,050 nm)	Christy et al. (2003)
Soil Organic Matter Sense (SOMSENSE)		$R^2 : 0.23$	Aimrun et al. (2014)

실제 vis-NIR 센서를 활용하여 덴마크의 농경지에서 토양 유기 탄소를 매핑하였다. 하나의 센서를 사용한 것과 EC, 온도 센서를 통합하여 얻은 데이터를 비교하였을 때 여러 센서를 조합한 것이 유기물 함량을 잘 예측하였으나 농지 특성에 따라 결과는 다를 수 있으므로 토양 특성에 맞는 보정이 이루어져야 한다 (Knadel et al., 2015). 호주에서는 vis-NIR과 remote sensing을 이용하여 토양 유기탄소를 예측한 결과를 비교하였다. 북서부의 버티졸 (vertisols)로 구성된 토양에서 remote sensing을 이용하여 토양 유기물 함량을 예측한 결과 remote sensing은 vis-NIR 보다 정확도가

좋지 않았으나 토양 유기물 함량을 예측하는데 활용될 수 있을 것이라는 가능성을 보였다 (Gomez et al., 2008). Table 3은 토양 유기물 센서의 사용 예와 측정에 영향을 미치는 인자들과 측정 정확도에 대하여 정리한 것이다. 분광학적 방법을 이용해 토양 유기물을 분석하는 센서의 경우 토양 입자, 수분, 토양 깊이, 토양과 센서 윈도우와의 차이에 의해 영향을 받으나 대부분의 경우 설명력이 0.6 이상으로 높게 나타났다.

이온 선택성 전극을 이용한 양분 모니터링 환경에 대한 중요성이 인식됨에 따라 농업에서 작물에 적절한 양분을 공급하면서 환경으로의 양분 유출을 감소시키고 토양오염을 방지하기 위한 토양 관리방안이 요구된다. 토양에서 작물이 이용할 수 있는 양분 함량은 계속 변화하기 때문에 양분 함량의 실시간 모니터링을 통한 정확한 양의 양분 공급이 요구된다. 또한 신속한 토양 검정과 시비 처방을 위해서는 현장에서 신속하게 양분 함량을 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 이를 위해 전기화학센서(electrochemical sensor)를 이용할 수 있는데 K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- 등을 분석하기 위해 이온 선택성 전극(ion selective electrode, ISE)으로 이루어진 전위차 측정 센서를 이용한다. 이온 선택성 전극은 그 기작이 잘 밝혀진 화학센서이다 (Bakker et al., 2000).

이온 선택성 전극은 세라믹 기판 위에 칩 형태의 전극에 최적화된 조성의 이온 선택성 막을 올려 다중 이온 센서를 제작한 후 흐름계주입분석법(flow injection analysis)으로 토양 추출 시료 중 이온의 농도를 정량할 수 있다 (Shin et al., 2009). 그러나 이온선택전극을 이용한 토양 NO_3^- 값이 토양 화학분석 방법과 비교하여 낮은 수준을 나타냈으며 토양 NO_3^- 의 실시간 측정을 위하여 측정법 보완이 필요하며 양분 제어에 적용하기 위해서는 더 연구가 필요하다 (Park and Noh, 2019). 특히 이온 선택성 전극을 이용한 양분 분석은 토양을 추출한 후 추출액을 이용한 분석이 수행되어야 하기 때문에 토양 내에 센서를 삽입하여 실시간으로 변화하는 양분 모니터링이 불가능하다. 따라서 이러한 양분 모니터링을 대신하여 간접적으로 양분을 실시간 평가할 수 있는 토양의 EC 모니터링이 양분 평가법으로 제안되고 있다.

토양 EC센서를 활용한 양분 예측 토양과 관개수의 EC는 작물에 대한 시설 재배지의 염류 집적을 판단하는데 매우 중요한 화학적 지표이다. EC는 용액에 존재하는 전해질 이온의 세기를 나타내며 염류나 비료 성분 등 전해질 이온이 많을수록 EC는 높아지게 된다. EC는 토양의 포화 반죽(saturated paste)을 이용하거나 토양 공극수를 채취해 측정하기도 하며 토양과 물의 1:5 추출액을 이용하는 등 다양한 방식을 이용해 측정한다. 따라서 토양에 EC 전극을 직접 삽입하여 측정하는 방법은 추출액을 이용한 EC 측정값과 많은 차이가 날 수 있어 농가에서 적용하기에 어려움이 있다.

EC 전극을 통해 측정한 토양의 EC 값과 토양 이온 함량의 관계에 대한 연구 결과를 보면 EC 전극을 이용해 양분 정량이 가능하다는 것을 알 수 있다 (Lee et al., 2017). 시비에 따른 토양 내 양분 수치 및 상관관계 분석을 위해 토양 센서(수분함량, 지온, EC)를 설치하고, 토양시료를 채취하여 토양 용액 내 EC, pH, 질산태 질소 값을 측정한 결과, 토양 센서로부터 측정된 값과 실제 토양 용액 내 측정값 간에는 다소 차이가 있었지만, 토양 용액 내 질산태 질소 값과 EC 간에는 유의한 상관관계가 발견되어 EC 센서의 측정으로 질소의 함량 제어가 가능할 것으로 기대된다 (Kim et al., 2019a). 또한 최적 토양 수분 함량을 모델링하는 연구에서도 EC와 질소의 밀접한 상관관계가 나타났으며 토양 수분 함량이 EC 센서를 사용한 토양 질소 함량 감지에 미치는 영향이 적으며 정확도가 높고 효율적이라는 결과가 도출되었다. 따라서 토양 EC를 모니터링하여 현장 조건에서 토양 질소 및 양분들의 함량을 실시간으로 감지할 수 있을 것으로 기대된다 (He et al., 2017). 그러나 노지의 경우 일반적으로 토양에 존재하는 질산태 질소의 함량이 낮아 EC 센서

를 통해 함량 변화를 구분하기 쉽지 않다. 또한 염류 함량이 높은 토양에서는 나트륨, 염소 이온 등이 EC와 상관관계가 높게 나타나기 때문에, 농경지에 따라 EC와 상관관계가 있는 이온들을 고려한 후, 센서를 활용해야 할 것으로 판단된다 (Hajrasuliha et al., 1991; Metternicht and Zinck, 1997).

토양 EC를 측정하는 센서 중 대표적으로 사용되는 Veris의 토양 EC 매핑 시스템 (mapping system)은 현장에서 EC 데이터를 빠르게 수집한다 (Moral et al., 2010). 카트가 필드를 통과할 때 EC 값을 수집하고 GPS 수신기를 사용하여 이를 지역별로 기록한다. 이 시스템은 에이커 (acre) 당 50 - 100개의 샘플을 생성하며, EC 및 GPS 데이터는 컴퓨터에 기록된다 (Veris Technologies, Inc., 2021). 특히 MSP3 모델은 유기물, pH와 EC를 측정하기 때문에 농가에서 가장 유용하게 사용되고 있다 (Table 4) (Veris Technologies, Inc., 2021). EM38 (Geonics, Canada) 센서는 기기의 반대쪽 끝에 있는 비전도성 막대에 1.0 m 간격으로 설치된 송신기와 수신기 코일로 구성되어 배터리의 교류로 전원이 공급되어 시간에 따라 변하는 자기장을 생성한다 (Heil and Schmidhalter, 2017). 이 자기장은 토양에 전류를 흐르게 하여 2차 자기장을 생성하는데 이는 염도, 토성, 수분 함량, 양분의 변화를 빠르고 정확하게 감지한다 (Table 4) (Heil and Schmidhalter, 2017).

Table 4. Nutrient level prediction using electrical conductivity sensor.

EC sensor	Soil properties related to EC	Nutrients related to EC	References
Veris 3100 ^R Six disc-shaped metal electrodes which penetrate 6 cm into soil	pH, EC1:2.5, CEC, SOM	Na ²⁺ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Cu ²⁺ , Ca ²⁺ , Zn ²⁺ , Fe ²⁺	Peralta and Costa (2013)
Veris 3100	pH, CEC, SOM	Total N, K	Gholizadeh et al. (2011)
Electromagnetic induction based EC sensor Coulter-based sensor (Veris 3100)	Clay content, CEC In some study fields : soil moisture, silt, sand, organic C and paste EC		Sudduth et al. (2005)
EM38 (Geonics Limited, Canada)	pH, CEC, SOM	Available N	Eigenberg et al. (2002)
Teros 12 (Meter Inc.)	Soil moisture, temperature		Mokari and Shukla (2019)

토양 내에 깊이 별로 삽입되는 전극 및 절연 관입부, 그리고 온도센서 등을 하나로 조합하여 만든 4전극센서는 염류가 집적된 시설 재배지 토양 내 깊이에 따른 EC를 간단하고 신속하게 측정할 수 있도록 한다 (Jang et al., 2010). 이는 토양의 물리적, 화학적 특성을 파괴하지 않고 직접 측정을 할 수 있는 방법으로써 정확도를 높이기 위해 EC 측정값을 온도 및 토양 수분에 대하여 보정하면 농산물 생산성 증대를 위한 최적 토양 조건을 파악할 수 있는 중요한 단서가 된다 (Jang et al., 2010). 이외에도 토양수분함량 및 EC를 실시간으로 측정할 수 있는 FDR 센서들이 개발되었으며, 이는 측정된 토양수분함량 및 EC에 따라 작물이 필요한 만큼의 관수/관비를 효율적으로 제어할 수 있는 자동 관수/관비 시스템에 이용하기에 적합한 센서로 판단되고 있다. EC는 토양 수분함량과 온도의 영향을 받는데 토양의 수분 함량이 증가하면 전용적 유전율 (bulk dielectric constant)이 증가하여 EC 값이 높게 측정되고, 온도가 증가하면 입자들의 이동성이 증가하기 때문에 EC 값이 높게 측정된다 (Robinson et al., 1999; Kim et al., 2014; Othaman et al., 2020). 따라서 올바른 토양수분센서와 EC센서의 활용을 위해 토양 특성이나 환경에 따른 센서 보정이 필요하며, 토양 EC와 식물이 이용 가능한 양분과의 관계, 식물의 생리반응과의 연계를 통한 센서 활용이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Recent Researches on Smart Farm Using Various Soil Sensors

수분 센서의 스마트팜 활용 사례를 살펴보면, 실제 폴리 하우스 (Poly house) 모델을 활용한 스마트팜 재배에서 토양 수분 센서를 통해 수집된 데이터는 서버로 전송되어 수분이 적정량보다 적을 경우 펌프를 사용하여 수분을 첨가하고 수분이 적정량보다 많을 경우 폴리 하우스 내부의 온도를 조정하는 등 필요한 조치를 수행한다 (Dagar et al., 2018). 국내에서는 수분 센서로 측정된 값을 안드로이드 기반의 애플리케이션으로 수신하여 물 공급 장치의 전원을 조작함으로써 인위적인 수분량의 조절이 가능한 하드웨어를 개발하였으며 (Lee et al., 2019), 저전력 광역 네트워크 무선 통신 방식인 로라 (LoRa)를 이용하여 토양 수분센서의 데이터를 수집하고 대기온도, 강수량을 고려하여 관수량을 설정하고 노지에 직접 적용하여 기초 정보를 입력한 후 각 농작물에 따라 적절하게 물을 관리하여 생산량까지 관리가 가능하다 (Youm et al., 2018). 또한 재배 장소의 환경정보를 확인하면서 토양 수분센서를 통해 수집한 데이터를 이용하여 시간과 위치에 관계없이 원격으로 자동 제어할 수 있는 스마트팜 플랫폼을 개발하여 실제 농가에 구현한 사례도 있다 (Kim et al., 2020).

EC센서를 스마트팜에 활용한 사례를 살펴보면, Kang et al. (2016)은 토양수분 및 EC센서를 이용한 자동급액시스템에서 고품질의 봄철 화단국화 (*Chrysanthemum paludosum*) 생산을 위한 적정수준의 EC를 구명하였다. 유리온실에서 16개의 토양수분 및 EC센서 (Decagon Devices, Pullman, WA, USA)를 CR1000 데이터 로거 (Campbell Scientific, Logan, UT, USA)에 연결하여 토양수분 및 EC센서의 수분함량 (volumetric water content, v/v)과 EC 측정값에 따라 물과 양분을 자동 관수/관비할 수 있는 시스템을 구축하였다.

근적외선 스펙트럼 반사율을 이용하는 센서는 토양 색에 기초한 유기물 함량을 측정하고, 적절한 분석 기법을 적용할 경우 수분, CEC 및 기타 토양 매개 변수도 측정이 가능하다. 또한 토양에서 기계적, 음향 등의 다양한 반응을 융합하여 토양 다중 센서를 개발하는 연구도 진행 중에 있으며, 토양 강도 프로파일 센서 (soil strength profile sensor, SSPS)는 토양 강도를 측정하기 때문에 이 센서들과 토양양분 및 식물 반응들을 융합하여 연구한다면, 토양의 실시간 양분 제어에 크게 기여할 것으로 기대된다 (Chung et al., 2006; Bah et al., 2012; Naderi-Boldaji et al., 2019).

노지에서는 전기를 사용하는 것이 쉽지 않고 농지 면적이 넓어 여러 개의 센서를 하나의 데이터 로거에 연결하는 것이 어렵기 때문에 최근에는 선이 없는 센서가 개발되고 있다. 선이 없는 수분 센서를 활용하여 지하부에 센서를 설치하여 뿌리 부분의 수분 함량을 평가할 수 있다 (Soil Scout, 2021). 또한 노지 스마트팜에서는 전원 공급이 쉽지 않기 때문에 전원을 연결하지 않아도 되는 장치나 태양광 등을 이용해 자가발전이 가능한 장치가 개발되어야 하며 다양한 형태로 제공되는 데이터를 수집할 수 있는 플랫폼이 마련되어야 한다 (Yin et al., 2021).

스마트팜에서는 토양 센서뿐만 아니라 식물의 생육을 직접적으로 모니터링하면 더 효율적으로 양수분 공급을 조절할 수 있는데 최근 식물 줄기의 양쪽에 전극을 삽입하여 양수분의 이동을 평가할 수 있는 센서가 개발되었다 (Park et al., 2019b). 이 외에도 다양한 식물의 웨어러블 센서 (plant wearable sensor)가 작물의 생육 상태를 진단하는데 사용될 수 있는데 이에 대한 연구도 진행되고 있다. 웨어러블 센서는 식물의 생리적 상태를 실시간으로 추적하는데 사용되며 얇은 필름 형태로 된 식물에 비파괴적으로 장착할 수 있는 유연성 있는 장치이며 온도 습도와 같은 환경 인자들을 모니터링하고 식물 조직의 수분 포텐셜, 압력 변화, 휘발성 유기화합물과 같은 생물학적 인자들을 모니터링할 수 있다 (Yin et al., 2021).

최근의 센서 관련 연구는 클라우드를 기반으로 한 데이터 분석이 가능하도록 하는 것이며 축적된 데이터를 통하여 인공지능이 작물의 수확량을 최적화하는 환경을 센서 데이터를 기반으로 조성하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해

서는 먼저 센서 데이터가 정확해야 하며 다양한 데이터를 수집할 수 있는 시스템이 갖추어져야 한다.

Conclusions

농업 분야와 첨단기술과의 융복합으로 농업생산의 지능화 및 자동화 기술을 포함한 스마트팜 기술 개발을 통해 식물 생산성 및 삶의 질 향상이 요구되고 있다. 이를 위해서는 작물의 목표 수량에 따른 생육단계별 물과 비료의 적정공급기준을 설정하고 토양 특성별 유효 양수분의 실시간 모니터링을 통한 양수분 자동제어가 필요하다. 본 연구에서 소개한 센서들을 활용하면 토양 상태의 실시간 모니터링이 가능하다. 그러나 노지 스마트팜의 넓은 부지에서 센서의 위치에 따른 데이터의 공간 변이를 해소하기 위해 다양한 층위와 면적을 망라할 수 있는 센서 개발이 필요하며 센서값에 대한 빅데이터 수집과 보정이 필요할 것으로 판단된다. 최근에는 토양 수분 함량 측정을 통해 작물의 수분 흡수, 물과 양분의 이동, 관개 효율 평가, 증발산 등의 연구가 수행되고 있다. 토양 pH, 유기물 함량은 일반적으로 그 값이 토양에서 실시간 변화하지 않기 때문에 토양의 양수분 관리보다는 토양 특성 평가와 매핑을 위해 주로 사용되는 방법이다. 이와 같이 토양 수분, pH, 유기물 등을 직접 측정할 수 있는 센서들은 개발되었지만 토양 추출액을 사용하지 않고 토양 양분을 토양에서 직접적으로 측정할 수 있는 센서는 개발되지 않았다. 양분을 직접적으로 분석할 수 있는 이온선택성 전극은 토양 용액을 추출하는 과정이 필요하다. 따라서 토양 양분 함량을 토양 EC를 모니터링함으로써 간접적으로 예측할 수 있다. 토성에 따라 EC와 양분 농도의 상관관계를 확인한 결과, 원소에 따라 다르지만 상관성이 존재함을 확인하였으며 토성과 수분함량, 온도, 유기물 함량 등에 대한 보정이 이루어진다면 양분 함량을 모니터링하기 위한 간접적인 센서로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 수분, EC 측정의 두 가지 센서만으로 양수분 공급의 효율성과 정확성을 판단하기엔 어려움이 있다. 따라서 환경정보를 기반으로 식물의 생체정보, 생육 모델과 연계하여 실시간 지능형 관비 제어를 위한 프로그램의 개발과 관비량 보정계수 현장 적용 및 보완이 요구된다.

Acknowledgement

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호: PJ0156352021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

References

- Adamchuk, V.I. and R.V. Rossel. 2010. Development of on-the-go proximal soil sensor systems. p. 15-28. In R. Viscarra Rossel et al. (eds.) Proximal soil sensing. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- Aimrun, W., A. Gholizadeh, J.N.A. Asminda, and M.S.M. Amin. 2014. Development of on-the-go soil organic matter sensor. *Indian J. Agric. Sci.* 84(10):1201-1204.
- Angelopoulou, T., A. Balafoutis, G. Zalidis, and D. Bochtis. 2020. From laboratory to proximal sensing spectroscopy for soil organic carbon estimation—A review. *Sustainability* 12(2):443.
- Bah, A., S.K. Balasundram, and M.H.A. Husni. 2012. Sensor technologies for precision soil nutrient management and monitoring. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 7(1):43-49.
- Bakker, E., E. Pretsch, and P. Bühlmann. 2000. Selectivity of potentiometric ion sensors. *Anal. Chem.* 72(6):1127-1133.
- Billmeyer, F.W. and M. Saltzman. 1981. Principles of color technology. Elsevier, New York, USA.
- Blonquist Jr, J.M., S.B. Jones, and D.A. Robinson. 2005. Standardizing characterization of electromagnetic water

- content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems. *Vadose Zone J.* 4(4):1059-1069.
- Bogena, H.R., J.A. Huisman, C. Oberdörster, and H. Vereecken. 2007. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. *J. Hydrol.* 344(1-2):32-42.
- Bongulto, J.N.C., A.Y.L.O. Cabato, and R.B. Caldo. 2016. Design and implementation of smart farm data logging and monitoring system. *Laguna J. Eng. Comput. Stud.* 3(3):42-54.
- Boyer, J.S. 1982. Plant productivity and environment. *Science* 218(4571):443-448.
- Campbell Scientific. 2006. CS616 and CS625 water content reflectometers. Instruction Manual, Revision: 8/06.
- Cho, S.I., S.H. Choi, and Y.Y. Kim. 2002. Development of a mapping system for N-fertilizer amount using real-time soil organic matter sensor and DGPS. p. 486-493. In Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference, Korea.
- Choi, D.G., J.H. Ahn, D.J. Jo, and S.D. Kim. 2010. Estimating climate change impact on drought occurrence based on the soil moisture PDF. *J. Korea Water Resour. Assoc.* 43(8):709-720.
- Christy, C.D., P. Drummond, and D.A. Laird. 2003. An on-the-go spectral reflectance sensor for soil. Paper No. 031044. In Proceedings of the 2003 ASAE Annual Meeting, Las Vegas, Nevada.
- Chung, S.O., K.A. Sudduth, and J.W. Hummel. 2006. Design and validation of an on-the-go soil strength profile sensor. *Transactions of the ASABE.* 49(1):5-14.
- Cozzolino, D., W.U. Cynkar, R.G. Damberg, N. Shah, and P. Smith. 2013. In situ measurement of soil chemical composition by near-infrared spectroscopy: A tool toward sustainable vineyard management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 44(10):1610-1619.
- Dagar, R., S. Som, and S.K. Khatri. 2018. Smart farming - IoT in agriculture. p. 1052-1056. In Proceedings of the 2018 International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA), Coimbatore, India.
- Daniel, K.W., N.K. Tripathi, K. Honda, and E. Apisit. 2004. Analysis of VNIR (400-1100 nm) spectral signatures for estimation of soil organic matter in tropical soils of Thailand. *Int. J. Remote Sens.* 25(3):643-652.
- Decagon Devices. 2009. Soil moisture sensor operator's manual, Version 2.0.
- Eigenberg, R.A., J.W. Doran, J.A. Nienaber, R.B. Ferguson, and B.L. Woodbury. 2002. Electrical conductivity monitoring of soil condition and available N with animal manure and a cover crop. *Agric., Ecosyst. Environ.* 88(2):183-193.
- Erickson, B. 2004. Field experience validates on-the-go soil pH sensor. p. 1-4. In Proceedings of the Purdue Top Farmer Crop Workshop Newsletter.
- Gaskin, G.J. and J.D. Miller. 1996. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique. *J. Agric. Eng. Res.* 63(2):153-159.
- Gay, W. 2018. DHT11 sensor. p. 399-418. In *Advanced Raspberry Pi*. Apress, Berkeley, CA.
- Gholizadeh, A., M.S.M. Amin, A.R. Anuar, and W. Aimrun. 2011. Apparent electrical conductivity in correspondence to soil chemical properties and plant nutrients in soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 42(12):1447-1461.
- Gomez, C., R.A.V. Rossel, and A.B. McBratney. 2008. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma* 146(3-4):403-411.
- Hajrasuliha, S., D.K. Cassel, and Y. Rezaiejad. 1991. Estimation of chloride ion concentration in saline soils from measurement of electrical conductivity of saturated soil extracts. *Geoderma* 49(1-2):117-127.
- He, Y., S. Xiao, P. Nie, T. Dong, F. Qu, and L. Lin. 2017. Research on the optimum water content of detecting soil nitrogen using near infrared sensor. *Sensors* 17(9):2045.
- Heil, K. and U. Schmidhalter. 2017. The application of EM38: Determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. *Sensors* 17(11):2540.
- Heinonen, R. 1985. Soil management and crop water supply (No. Ed. 4). Swedish University of Agricultural Sciences.

- Heo, J.W., H.H. Kim, and G.I. Lee. 2016. Research trend of smart farm in Korea. p. 33. In Proceedings of the 2016 Annual Spring Conference of the Korean Society for Horticultural Science, Changwon, Korea.
- Herkelrath, W.N., S.P. Hamburg, and F. Murphy. 1991. Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry. *Water Resour. Res.* 27(5):857-864.
- Hong, Y.K., D.H. Im, S.C. Kim, J.S. Lee, D.H. Lee, S.K. Kim, S.R. Han, and G.H. Kim. 2016. Development of real time soil moisture, EC and pH sensor. p. 185. In Proceedings of the KSAM & KSPA 2016 Autumn Conference, Cheonan, Korea.
- Hummel, J.W., K.A. Sudduth, and S.E. Hollinger. 2001. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *Comput. Electron. Agric.* 32(2):149-165.
- Hur, S.O., K.H. Jung, C.W. Park, S.K. Ha, and J.G. Kim. 2007. Verification of soil volumetric water content measured by TDR, FDR sensors. p. 229-235. In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, Pyeongchang, Korea.
- Hur, S.O., S.K. Ha, and J.G. Kim. 2009. Verification of TDR and FDR sensors for volumetric soil water content measurement in sandy loam soil. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(2):110-116.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- Irmak, S., M.J. Burgert, H.S. Yang, K.G. Cassman, D.T. Walters, W.R. Rathje, J.O. Payero, P. Grassini, M.S. Kuzila, K.J. Brunkhorst, D.E. Eisenhauer, W.L. Kranz, B. VanDeWalle, J.M. Rees, G.L. Zoubek, C.A. Shapiro, and G.J. Teichmeier. 2012. Large-scale on-farm implementation of soil moisture-based irrigation management strategies for increasing maize water productivity. *Transactions of the ASABE* 55(3):881-894.
- Janani, E.S.V. and A.R.R. Pavitra. 2019. Cost effective smart farming with FARS-based underwater wireless sensor networks. p. 296-316. In Handbook of Research on Implementation and Deployment of IoT Projects in Smart Cities. IGI Global, Pennsylvania, USA.
- Jang, Y.S., S.O. Jeong, I.G. Jeong, and Y.K. Hong. 2010. Soil electrical conductivity meter and soil electrical conductivity measurement method using the same. South Korea Patent KR20100052082A.
- Jeon, M.H., Y.K. Jeong, C.H. Cho, Y.S. Lee, and H.K. Jeong. 2019. Big data collection and monitoring method of cucumber and eggplant smart greenhouse. p. 205. In Proceedings of the 2019 Annual Autumn Conference and a Commemorating Symposium of the Korean Society for Horticultural Science in Memory of the 60th Anniversary of Dr. Jangchun U (N. U)'s Death, Pyeongchang, Korea.
- Kang, S.H., Y.H. Rhie, and J.Y. Kim. 2016. Growth and flowering of *Chrysanthemum paludosum* 'Snowland' with various bulk EC thresholds with soil moisture sensor-based automated fertigation system. p. 55. In Proceedings of the 2016 Annual Autumn Conference of the Korean Society for Horticultural Science, Gwangju, Korea.
- Kim, J.H., E.S. Lee, D.C. Choi, M.S. Kim, S.J. Kim, N.J. Choi, and J.D. Lee. 2020. Design and implementation of automatic control smartfarm platform using IOT technology. p. 71-72. In Proceedings of the Korean Society of Computer Information Winter Conference 2020, Daejeon, Korea.
- Kim, J.Y. 2014. Efficient irrigation practice through soil moisture sensor based automated irrigation system in ornamental plant production. *Flower Res. J.* 22(2):48-53.
- Kim, J.Y., S.O. Chung, D.H. Lee, Y.Y. Cho, S.H. Jang, and J.M. Choi. 2014. Calibration for proper usage of FDR soil moisture sensors. p. 52. In Proceedings of the 2014 Annual Autumn Conference of the Korean Society for Horticultural Science, Changwon, Korea.
- Kim, K.H. and D.W. Sim. 2019. www.mafra.go.kr.
- Kim, M.Y. and Y.H. Choe. 2016. Appropriateness for building an open-air smart farm irrigation technology research case. *Mag. Korean Soc. Agric. Eng.* 58(4):30-37.

- Kim, M.Y., Y.H. Choi, Y.J. Kim, J.G. Jeon, and S.B. Lee. 2019a. Correlation relationship between soil NO₃-N concentration and soil EC. p. 158. In Proceedings of the 2019 Korean Society of Agricultural Engineers Annual Conference, Hongcheon, Korea.
- Kim, S.G., J.M. Park, G.Y. Kim, and M.H. Choe. 2015. Current status and prospect of ground observation soil moisture data in Korea. *Water for Future* 48(12):16-21.
- Kim, Y.H., M. Kong, E.J. Lee, T.G. Lee, and G.B. Jung. 2019b. Status and changes in chemical properties of upland soil from 2001 to 2017 in Korea. *Korean J. Environ. Agric.* 38(3):213-218.
- Knadel, M., A. Thomsen, K. Schelde, and M.H. Greve. 2015. Soil organic carbon and particle sizes mapping using vis-NIR, EC and temperature mobile sensor platform. *Comput. Electron. Agric.* 114:134-144.
- Kodaira, M. and S. Shibusawa. 2013. Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. *Geoderma* 199:64-79.
- Kweon, G. and C. Maxton. 2013. Soil organic matter sensing with an on-the-go optical sensor. *Biosyst. Eng.* 115(1): 66-81.
- Kwon, S.H., J.D. So, K.Y. Jung, S.H. Lee, J.S. Kim, J.M. Park, S.G. Kwon, and D.H. Kim. 2019. Development of ICT-based soil moisture monitoring system for surface irrigation. p. 128. In Proceedings of the KSAM & ARCs 2019 Autumn Conference, Chuncheon, Korea.
- Lee, J.H. 2020. (Revised) Japan's smart agriculture policy: The reality and implications. *GS&J Institute* 273:1-17.
- Lee, J.S., Y.H. Lee, J.Y. Kim, J.W. Park, E.M. Kim, and G.H. Han. 2017. Rapid determination of chloride in soil extract from reclaimed soil using EC electrode. p. 71. In Proceedings of the Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer Conference, Cheongju, Korea.
- Lee, S.Y., J.I. Byun, J.H. Choi, S.J. Joo, and Y.H. Kim. 2019. Small smart farm monitoring and management system. p. 455-457. In Proceedings of the 2019 KIIT · DCS Summer Conference, Daejeon, Korea.
- Lee, Y.H., S.T. Lee, E.S. Kim, W.D. Song, and C.W. Noh. 2010. Soil management of facility horticultural crops and preventive measures against continuous cultivation disorder. pp. 69-86. In Proceedings of the Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer Conference, Suwon, Korea.
- Lee, Y.J., G.Y. Kim, Y.G. Lee, J.H. Jeong, and M.H. Choe. 2020. Introduction and development direction of various soil moisture measurement methods. *Water for Future* 53(10):126-134.
- Lijbert, B., C.R. Peter, and G.B. George. 2007. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric., Ecosyst. Environ.* 121(3):233-244.
- Ling, P. 2004. A review of soil moisture sensors. *Assn. Flor. Prof. Bull.* 886:22-23.
- Loshelder, J. 2020. Soil moisture content determination by means of the electromagnetic spectrum. pp. 1-31. Civil Engineering Undergraduate Honors Theses, University of Arkansas, Fayetteville, AR.
- Metternicht, G. and J.A. Zinck. 1997. Spatial discrimination of salt- and sodium-affected soil surfaces. *Int. J. Remote Sens.* 18(12):2571-2586.
- Mokari, E., and M.K. Shukla. 2019. Field evaluation of TERSOS 12 sensor for estimating saturated extract EC in a clay soil. p. H53N-1980. In Proceedings of the AGU Fall Meeting, San Francisco, USA.
- Moon, D.Y. and K.S. Lim. 2015. Calculation of TDR sensor coefficient through measurement of soil sample. p. 76. In Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, Goseong, Korea.
- Moral, F.J., J.M. Terrón, and J.M. Da Silva. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil Tillage Res.* 106(2):335-343.
- Naderi-Boldaji, M., M.Z. Tekeste, R.A. Nordstorm, D.J. Barnard, and S.J. Birrell. 2019. A mechanical-dielectric-high frequency acoustic sensor fusion for soil physical characterization. *Comput. Electron. Agric.* 156:10-23.
- Nam, W.H., E.M. Hong, and J.Y. Choi. 2016. Climate change impact assessment on agricultural water resources for upland crops. p. 57. In Proceedings of the 2016 Korean Society of Agricultural Engineers Annual Conference,

- Daejeon, Korea.
- Othaman, N.C., M.M. Isa, S.A.Z. Murad, A. Harun, and S.N. Mohyar. 2020. Electrical conductivity (EC) sensing system for paddy plant using the internet of things (IoT) connectivity. p. 020005. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2203, No. 1), Putrajaya, Malaysia.
- Park, H.H., S.E. Han, E.J. Lee, and H.S. Kim. 2019a. Design and implementation of hydroponics system by control of hydroponic bed. p. 1346-1347. In Proceedings of the Korea Software Congress 2019, Pyeongchang, Korea.
- Park, H.J., J.H. Park, K.S. Park, and J.E. Son. 2019b. Evaluating plant stress conditions in paprika by comparing internal electrical conductivity, photosynthetic response, and sap flow. *Hortic., Environ. Biotechnol.* 60(1):41-48.
- Park, J.S. and A.S. Noh. 2019. Environmental conservation type eco-friendly soil and fertilization management research. Gyeonggi-do Agricultural Research & Extension Services, Hwaseong, Korea.
- Park, J.S., J.H. Park, J.H. Ju, and Y.H. Yoon. 2010. Effects of planting soil on the soil moisture and the growth of *Vitex rotundifolia* for green roof. *J. Korean Inst. Landscape Archit.* 38(3): 98-106.
- Peralta, N.R. and J.L. Costa. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comput. Electron. Agric.* 99:218-226.
- Pitts, M.J., J.W. Hummel, and B.J. Butler. 1986. Sensors utilizing light reflection to measure soil organic matter. *Transactions of the ASAE* 29(2):0422-0428.
- Radhi, L.A.A. and A.L.H.H. Mohammed. 2017. Design and implementation of a smart farm system. *J. Assoc. Arab Univ. Basic Appl. Sci.* 24(3):227-241.
- Raeesi, M., A.A. Zolfaghari, M.R. Yazdani, M. Gorji, and M. Sabetizade. (2019). Prediction of soil organic matter using an inexpensive colour sensor in arid and semiarid areas of Iran. *Soil Res.* 57(3):276-286.
- Richards, L.A. 1942. Soil moisture tensiometer materials and construction. *Soil Sci.* 53(4):241-248.
- Robinson, D.A., C.M.K. Gardner, and J.D. Cooper. 1999. Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity. *Journal of Hydrol.* 223(3-4):198-211.
- Schirrmann, M., R. Gebbers, E. Kramer, and J. Seidel. 2011. Soil pH mapping with an on-the-go sensor. *Sensors* 11(1): 573-598.
- Schlaeger. 2007. SISOMOP - Simple soil moisture probe. Schlaeger Measurement Techniques & Science.
- Schmutz, P.P. and S.L. Namikas. 2011. Utility of the delta-T theta probe for obtaining surface moisture measurements from beaches. *J. Coastal Res.* 27(3):478-484.
- Seo, M.C., H.S. Cho, W.T. Jeon, M.T. Kim, T.S. Park, K.Y. Seong, and, Y.K. Sonn. 2012. Interpretation of water in upland soil using profile soil moisture sensors. p. 71-72. In Proceedings of the Korean Society of Soil Sciences and Fertilizer Conference, Jeju, Korea.
- Seo, M.J., K.H. Han, H.R. Cho, J.H. Ok, Y.S. Zhang, Y.H. Seo, K.H. Jung, H.S. Lee, and G.S. Kim. 2017. Interpreting in situ soil water characteristics curve under different paddy soil types using undisturbed lysimeter with soil sensor. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 50(5):336-344.
- Seyfried, M.S. and M.D. Murdock. 2001. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content, and temperature. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65(1):28-34.
- Seyfried, M.S., L.E. Grant, E. Du, and K. Humes. 2005. Dielectric loss and calibration of the Hydra Probe soil water sensor. *Vadose Zone J.* 4(4):1070-1079.
- Shibusawa, S., K. Ehara, T. Okayama, H. Umeda, and S. Hirako. 2005. A real-time multi-spectral soil sensor: predictability of soil moisture and organic matter content in a small field. p. 495-502. In Proceedings of the Precision Agriculture '05. Papers Presented at the 5th European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, Sweden.
- Shin, K.S., W.J. Lim, S.E. Lee, J.S. Lee, and G.S. Cha. 2009. Development of extracting solution for soil chemical analysis suitable to integrated ion-selective micro-electrodes. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 42(6):513-521.

- Shonk, J.L., L.D. Gaultney, D.G. Schulze, and G.E. Van Scoyoc. 1991. Spectroscopic sensing of soil organic matter content. *Transactions of the ASAE* 34(5):1978-1984.
- Smajstrla, A.G. and S.J. Locascio. 1996. Tensiometer-controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. *Appl. Eng. Agric.* 12(3):315-319.
- Soil Scout. [Website]. 2021, June 24. URL: <https://soilscout.com/blog/how-to-use-wireless-soil-moisture-sensors-in-smart-farming-three-step-process>.
- Sparling, G.P., D. Wheeler, E.T. Vesely, and L.A. Schipper. 2006. What is soil organic matter worth?. *J. Environ. Qual.* 35(2):548-557.
- Staggenborg, S.A., M. Carignano, and L. Haag. 2007. Predicting soil pH and buffer pH in situ with a real-time sensor. *Agron. J.* 99(3):854-861.
- Sudduth, K.A. and J.W. Hummel. 1993. Soil organic matter, CEC, and moisture sensing with a portable NIR spectrophotometer. *Transactions of the ASAE* 36(6):1571-1582.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, W.J. Wiebold, W.D. Batchelor, G.A. Bollero, D.G. Bullock, and K.D. Thelen. 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Comput. Electron. Agric.* 46(1-3):263-283.
- Sung, J.H., S.R. Suh, I.G. Jung, C.K. Lee, and Y.B. Lee. 2003. Development of soil organic matter measuring system. p. 456-461. In *Proceedings of the Korean Society for Agricultural Machinery Conference*, Suwon, Korea.
- Vaz, C.M., S. Jones, M. Meding, and M. Tuller. 2013. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. *Vadose Zone J.* 12(2):1-16.
- Veris Technologies, Inc. [Website]. 2021, March 25. URL: <https://www.veristech.com/>
- Yin, H., Y. Cao, B. Marelli, X. Zeng, A.J. Mason, and C. Cao. 2021. Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture. *Adv. Mater.* 33(20):2007764.
- Youm, S., S. Hong, and W.K. Koh. 2018. The smart outdoor cultivation system using internet of things. *J. Korea Convergence Soc.* 9(7):63-68.
- Yun, H.W., C.H. Choi, Y.J. Kim, and S.J. Hong. 2014. Development of real-time chemical properties analysis technique in paddy soil for precision farming. *Korean J. Agric. Sci.* 41(1):59-63.
- Yun, N.G., J.S. Lee, G.S. Park, and J.Y. Lee. 2017. Current status of Korean smart farm policies and technology development. *Mag. Korean Soc. Agric. Eng.* 59(2):19-27.