J. Soil Groundwater Environ. Vol. 26(6), p. 157~164, 2021
https://doi.org/10.7857/JSGE.2021.26.6.157
ISSN 1598-6438 (Print), ISSN 2287-8831 (Online)

≪ **Research Paper** ≫

토양 온도, 수분, EC 모니터링을 위한 다양한 EC 센서 비교 및 농경지 토양에서 이온 함량과 EC의 상관관계 평가

박진희[1] · 성좌경[2]*
[1]충북대학교 환경생명화학과
[2]충북대학교 식물자원학과

Comparison of Various EC Sensors for Monitoring Soil Temperature, Water Content, and EC, and Its Relation to Ion Contents in Agricultural Soils

Jin Hee Park · Jwakyung Sung*
[1]Chungbuk National University, Department of Environmental and Biological Chemistry
[2]Chungbuk National University, Department of Crop Science

ABSTRACT

Smart agriculture requires sensing systems which are fundamental for precision agriculture. Adequate and appropriate water and nutrient supply not only improves crop productivity but also benefit to environment. However, there is no available soil sensor to continuously monitor nutrient status in soil. Electrical conductivity (EC) of soil is affected by ion contents in soil and can be used to evaluate nutrient contents in soil. Comparison of various commercial EC sensors showed similar water content and EC values at water content less than 20%. Soil EC values measured by sensors decreased with decreasing soil water content and linearly correlated with soil water content. EC values measured by soil sensor were highly correlated with water soluble nutrient contents such as Ca, K, Mg and N in soil indicating that the soil EC sensor can be used for monitoring changes in plant available nutrients in soil.

Key words : EC sensor, Nutrient, Nitrate, Water content, Smart farm

1. 서 론

정보통신기술(ICT) 등 첨단기술의 발달은 농업의 생산, 가공, 유통 등 모든 부분에 획기적인 변화를 유도하였는데, 대표적인 변화가 작물의 생산과정에 필요한 정보를 기계학습을 통해 자동제어하는 디지털 기반의 스마트 농법이다(Gondchawar and Kawitkar, 2016). 우리나라의 스마트팜 재배면적은 405 ha(2014)에서 5948 ha(2020)로 약 15배로 성장하였으며, 2022년까지 7000 ha를 목표로 하고 있다(MAFRA, 2021). 스마트팜의 보급 확산은 안정적인 작물 생산을 위한 기상, 토양 및 작물에 대한 대량정보 및 정확한 정보분석능력을 필요로 하고 있으며, 그에 따라 다양한 센서들이 활용되고 있다(Jagannathan and Priyatharshini, 2015). 시설 스마트팜의 경우, 작물 생산에 필요한 기본 정보(온도, 일사량, 양수분 등)의 획득이 용이하나 노지 스마트팜은 작물 재배환경이 변화가능한 조건이므로 보다 정교한 센서 및 센서를 통해 얻어진 정보의 정확도 향상이 필요하다(Kim and Park, 2021).

특히, 농경지 토양에서 정밀한 양수분 관리를 위해 최근 센서를 활용한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 토양 중 양분 함량에 대한 정보를 얻기 위한 다양한 방법들이 있는데, 토양을 채취하여 전처리 등 일련의 과정을 거쳐 기기를 이용하여 분석하는 방법, 센서를 이용하여 양분의 상대적인 양을 측정하는 방법 등이 가장 일반적으로 활용되고 있다(Kim and Park, 2021). 기기분석법은 비교적 정확한 토양 양분 함량에 대한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있지만, 전처리 등에 소요되는 시간으로 인해 실시간으로 토양 양분 정보를 얻기 위한 방법으로는 효율성이

주저자: 박진희, 부교수
*교신저자: 성좌경, 조교수
Email: jksung73@chungbuk.ac.kr

Received : 2021.12.06 Reviewed : 2021.12.09
Accepted : 2021.12.16 Discussion until : 2022.02.28

떨어지는 한계가 있다. 이러한 농업현장에서의 문제를 해결하기 위해 정확도는 약간 감소하지만 실시간 토양 양분 정보를 얻을 수 있는 방법들이 개발되어 왔는데, 대표적인 방법이 센싱기술이다. 현재 가장 범용적으로 사용되는 센싱 방법은 EC 센서를 활용하는 것이다(Gholizadeh and Amin, 2011). 그러나, 전기전도도(electrical conductivity, EC) 센서의 경우, 토양의 온도와 수분함량에 의해 크게 영향을 받으며 EC 값에 관여하는 전해질의 종류가 다양하여 사용자가 원하는 특정 원소의 함량에 대한 정보를 얻는 데에는 한계가 있는 실정이다(Robinson et al., 1999; Kim et al., 2014; Othaman et al., 2020).

EC 센서를 활용한 실시간 토양 양분 진단은 정확한 양분을 진단할 수는 없지만 초기 양분 함량을 분석한 후 시간에 따른 변화를 판단하여 토양의 양분 함량이 감소했을 때 추가적으로 처리할 수 있는 판단 기준이 될 수 있어 연구뿐만 아니라 농경지 최적 관리방안을 지도하는 현장에서 양수분을 관리하는데 있어 효율성을 높일 수 있는 수단이다. 따라서 본 연구는 현재 이용 가능한 EC 센서 중 주로 사용되는 센서들에 대해 토양 EC 센서값이 토양 온도 및 수분함량에 의해 어떻게 영향을 받는지 비교하였으며 비료 처리에 따른 원소 함량과의 상관관계를 분석하여, 농경지 토양 양분 함량 예측의 정확도를 높이기 위한 EC 센서 활용법을 제공하기 위하여 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1. 토양 시료 채취 및 특성 분석

실험에 사용한 토양 시료는 괴산의 밭에서 채취하였으며 풍건 후 2 mm 이하로 체질하여 실험에 사용하였다. 채취한 토양의 토성은 micro-pipette법을 이용하여 분석하였다(Miller and Miller, 1987). 토양의 pH와 EC 분석을 위해 토양 5 g을 코니컬 튜브에 취하고 25 mL의 초순수를 첨가하고 30분간 진탕 후 pH와 EC를 측정하였다. 토양의 유기물 함량은 Walkley-Black 방법을 이용하여 분석하였다(Walkley-Black, 1934). 물과 ammonium acetate로 추출 가능한 원소 함량을 분석하기 위해 5 g의 토양에 각각 고액비가 1:5와 1:10이 되도록 초순수와 1 M ammonium acetate(pH 7)를 첨가하고 30분간 진탕하면서 추출하였다. 추출액은 0.22 μm 주사기 필터로 여과하여 유도결합플라즈마 원자 방출분광법(ICP-AES Avio 500, Perkin Elmer, USA)을 이용하여 분석하였다. 토양의 cation exchange capacity(CEC)는 암모늄아세테이트로 추출된 Ca, K, Na, Mg 함량으로 계산하였다. 물로 추출한 용액의 암모늄태 질소 함량은 indophenol blue법(Scheiner, 1976)을 이용하여 분석하였으며 질산태 질소 함량은 vanadium reduction법(Schnetger and Lehners, 2014)으로 분석하였다.

2.2. 수분함량 변화에 따른 센서 모니터링

풍건 후 2 mm 이하로 체질한 토양을 상부 지름이 250 mm, 하부 지름이 200 mm인 화분에 160 mm 높이로 채웠다. 토양의 건조 무게는 6180 g이었으며 1200 mL의 물을 첨가하고 건조시키면서 토양온도, 수분함량, 전기전도도(EC)를 모니터링하였다. 실험은 충북대학교 온실에서 수행하였으며 실험 기간 동안 대기의 온도와 vapor deficit를 ATMOS 14(Meter Environment, USA)를 이용하여 모니터링하였다. 토양 EC 센서는 토양 온도와 수분함량을 동시에 측정할 수 있으며 센서는 문헌 조사를 통해 최근 연구에 주로 사용하는 센서 목록을 조사한 후 Teros 12(Meter Environment, USA), 5TE(Decagon, USA), Hydra Probe(Stevens Water, USA)를 모니터링용으로 선택하였으며 Teros 12와 5TE 센서는 ZL6 데이터 로거(Meter Environment, USA)를 이용하여 매 15분마다 측정값을 얻었고 Hydra Probe는 DT80 데이터 로거(Data Taker, Thermo Fisher Scientific Pty Ltd, Australia)를 이용하여 매 10분마다 데이터를 기록하도록 하였다(Table 1). WT1000N(Mirae Sensor, Republic of Korea) 센서는 실시간 측정이 되지 않아 측정할 때마다 측정값을 수기로 기록하였다. 토양에 물을 첨가하고 건조시키기 전 rhizon sampler(Eijkelkamp Agrisearch Equipment, The Netherlands)를 삽입하고 주사기로 토양의 공극수를 채취하였으며 0.22 μm 주사기필터로 여과하고 질산을 3방울 떨어뜨린 후 ICP-AES를 이용하여 공극수의 원소 함량을 분석하였다.

2.3. 토양 센서 값과 토양의 원소 함량 비교

농경지 토양의 구역을 나누어 각각 화학비료, 유기질비료, 퇴비를 밑거름으로 처리하고 질소와 칼륨을 웃거름으로 처리하면서 밑거름과 웃거름의 비율을 다르게 하여 6개의 처리구로 처리한 후 토양에 Teros 12 센서를 각 처리구마다 한 개씩 토양 표면으로부터 10 cm 깊이에 삽입하고 토양 bulk EC를 모니터링하였다. 토양의 bulk EC를 모니터링하면서 1달 간격으로 2회 토양 시료를 센서 삽입 위치 주변에서 채취하였으며 토양을 풍건하고 2 mm 이하로 체질한 후 토양의 pH와 EC를 분석하였다. 토양을 물로 추출한 후 질산태 질소, 암모늄태 질소 함량을

Table 1. Information on soil sensors used in this study

Sensor name	Manufacturer	Measuring type	Parameters measured	Shape
Teros 12	Meter Environment	Frequency domain reflectometry	Temperature, volumetric water content, electrical conductivity	
5TE	Decagon	Frequency domain reflectometry	Temperature, volumetric water content, electrical conductivity	
Hydra Probe	Stevens Water	Time domain reflectometry	Temperature, volumetric water content, electrical conductivity	
WT1000N	Mirae Sensor	Frequency domain reflectometry	Temperature, volumetric water content, electrical conductivity	

section 2.1에서 설명한 것과 같이 분석하였으며 원소 함량은 ICP-AES를 이용하여 분석하였고 ammonium acetate로 추출 가능한 원소 함량도 분석하였다. 토양 센서값과 원소 함량과의 상관관계를 비교하기 위해 토양을 채취한 날의 센서 EC 값을 사용하였으며 Xlstat을 이용하여 상관분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도 변화에 따른 수분 센서 값 변화

토양 센서를 적용하는 환경은 온도와 습도 등이 변화하는 환경이기 때문에 온실의 환경을 모니터링하면서 토양의 센서 값 변화를 관찰하였다. 온실에서 낮의 온도는 초반에는 35°C 이상까지 올라갔으며 밤에는 20°C 정도였고 시간이 지나면서 낮의 온도는 25°C 밤의 온도는 5~10°C 수준으로 온도변화가 크게 나타났다(Fig. 1). 토양 온도의 경우 센서별로 차이가 없었으며 대기 온도와 비교했을 때 온도 변화의 패턴은 같았으나 온도 변화의 폭이 대기보다 크지 않았다(Fig. 2).

토양의 수분 함량은 온도변화에 따라 변화하는 경향을 보였으나 최고 온도와 최저 온도에서의 수분함량 차이가 0.5~1%로 수분함량을 판단하는데 영향을 미칠 만큼 값 변화가 크지는 않았다(Fig. 3). 일반적으로 수분 함량은 토양 온도 증가에 따라 증가하기 때문에 정확한 센서값을 얻기 위해서는 보정이 필요하다(Chen et al., 2019). 자유수의 유전율은 1도 증가할 때마다 약 0.5% 감소하지만 수분함량이 20%일 때 20도의 온도 변화가 발생할 경우 수분함량에서는 1.2%의 차이가 발생하기 때문에 무시해도 될 정도이지만 수분함량이 높아지면 보정이 필요할 수도 있다(Campbell et al., 2009).

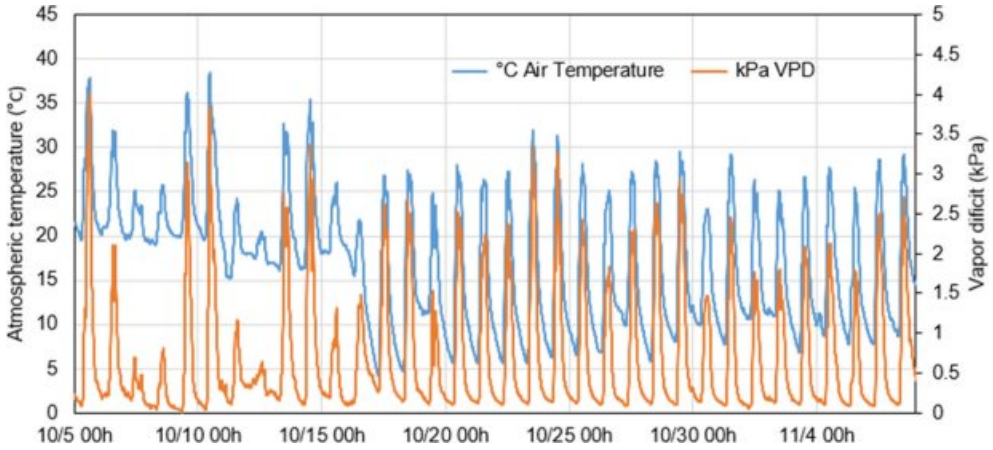

Fig. 1. Atmospheric temperature and vapor pressure deficit in greenhouse during experiment.

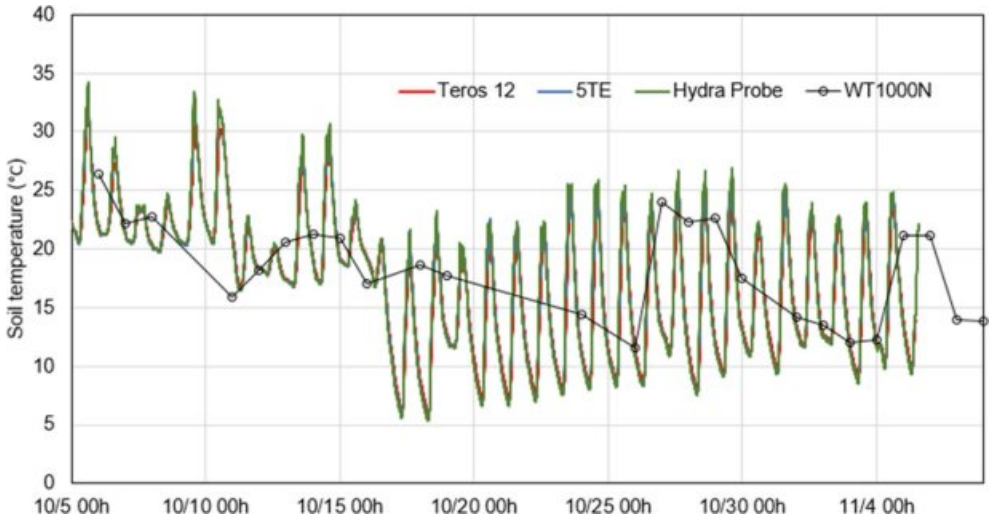

Fig. 2. Soil temperature monitored using various soil sensors.

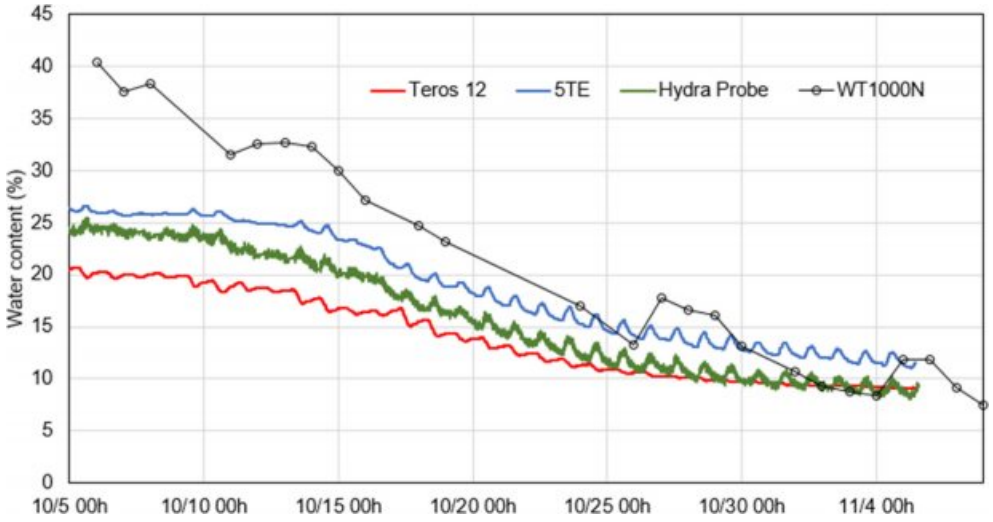

Fig. 3. Monitoring of water content while drying of the soil using various soil sensors.

첨가한 물의 양으로 계산한 초기 수분함량은 24%로 Hydra Probe의 값이 가장 가까운 값을 나타냈으며 시간이 지나면서 수분이 감소하여 수분 함량이 10% 이하로 내려갔을 때는 Teros12와 유사한 값을 나타냈으며 5TE의 수분함량 값은 두 센서보다 높았고 WT1000N센서의 값은 가장 높게 나타나 수분 함량이 높을 때는 정확하지 않은 것으로 판단되나 토양이 건조되면서 모든 센서의 수분 함량 차이가 5%의 범위에 있었다(Fig. 3).

3.2. 수분함량 변화에 따른 EC 센서 값 변화

토양의 전기전도도는 수분함량과 달리 온도변화에 따라 변화를 보이지 않았으며 수분 함량이 높을 때 전기전도도 값이 높게 나타났고 수분 함량이 감소하면서 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 센서로 측정한 전기전도도의 값은 수분함량이 20% 정도일 때 센서에 따라 0.47~0.65 mS/cm로 차이가 있었으나 수분이 감소함에 따라 차이가 없어 EC 값에 따른 차이보다는 수분 함량 차이에 의해 차이가 발생하는 것으로 판단된다. 토양을 초순수로 1:5의 비율로 추출하여 측정한 EC는 0.147 mS/cm로 센서로 측정한 EC와 직접적인 비교는 어려웠으나 추출법으로 분석한 EC는 시료 채취 시점의 EC 값을 보여주지만 센서 EC 값은 시간에 따른 변화를 보여주기 때문에 정확한 EC 값보다 시간에 따른 토양의 화학성 변화를 판단하는데 의의가 있다(Table 2).

WT1000N 센서의 값이 다른 센서와 차이가 나타나는 이유는 계산방식이나 측정하는 매체에 대한 보정 방식의 차이 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3, Fig. 4). 토양의 수분 함량을 측정하는 것은 유전율과 수분함량과의 관계를 이용해 측정한 유전율로부터 용적수분함량을 계산하는데 이러한 계산 방식이 센서에 따라 다를 수 있으며 측정 매체를 토양으로 하는지 토양이 아닌 다른 배지 형태 인지에 따라 보정하는 식이 다르기 때문이다. 또, EC를 bulk EC로 측정할지 pore water EC로 측정할지 선택하는 것에 따라 값이 달라지는데 pore water EC는 bulk EC로 계산할 수 있다. Teros 12와 5TE 센서의 경우 본 연구에서는 포화상태의 토양이 아니었기 때문에 bulk EC로 설정하고 측정하였다. WT1000N 센서는 실시간 측정하여 기록된 값을 사용한 것이 아니고 수동으로 측정한 것이므로 실시간 측정한 값과 직접적으로 비교하기는 어렵다. 따라서 토양 수분함량 변화와 EC 센서값의 상관관계 분석에 포함시키지 않았다(Fig. 5).

센서의 EC 값은 같은 센서로 측정한 토양의 수분 함량과 강한 양의 상관관계를 보였으며 수분함량이 증가할수록 EC도 높게 측정되었다(Fig. 5). 상관관계에서 기울기가 가장 큰 Teros 12 센서의 경우 수분함량이 감소되면서 EC가 급격히 감소하는 패턴을 보였으며 기울기가 완

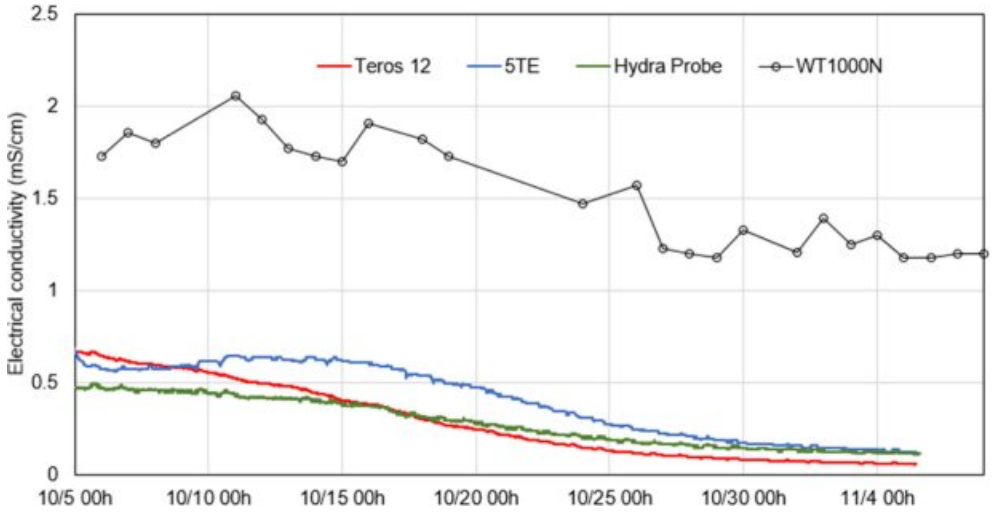

Fig. 4. Monitoring of soil EC while drying the soil using various soil sensors.

Table 2. Physicochemical properties of tested soil

Soil texture	pH	EC (mS/cm)	Organic matter (%)	CEC ($cmol_c/kg$)
Sandy loam	5.46	0.147	2.86	6.4

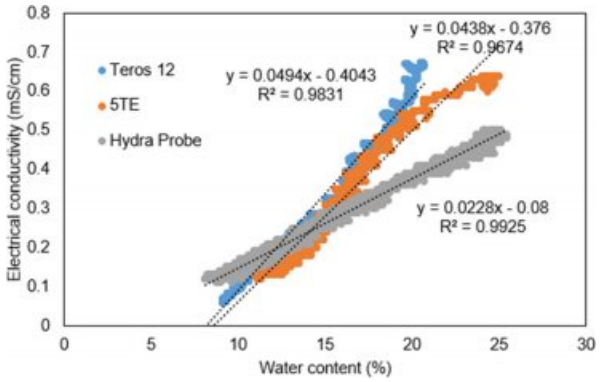

Fig. 5. Correlation of water content and electrical conductivity monitored by soil sensors.

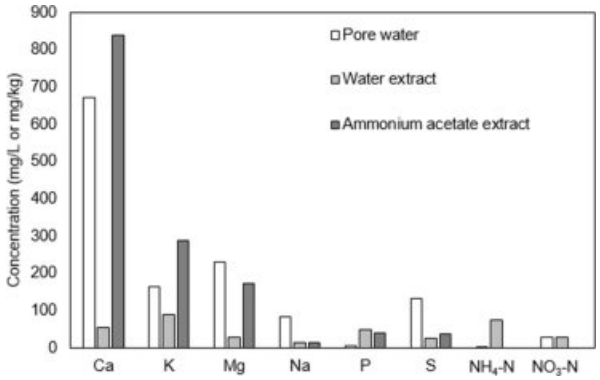

Fig. 6. Element concentrations in pore water of the soil and water and ammonium acetate extractable elements in soil.

만할수록 토양 수분 함량에 따른 변화가 크지 않았다. 5TE 센서의 경우 다른 센서와 비교해 R^2값이 크지 않았는데 이는 수분 함량이 다른 센서에 비해 높게 측정됐고 수분 함량이 높은 범위에서 EC값이 일정하게 감소하는 경향을 보이지 않았기 때문이다. 수분 함량을 Teros 12 센서로 측정한 20% 범위까지 제한하여 회귀분석을 하면 Teros 12 센서와 유사한 기울기와 R^2 값을 얻을 수 있다.

토양의 전기전도도는 토양 용액에 존재하는 원소와 관련이 있기 때문에 포화상태에서 공극수에 존재하는 원소와 물로 추출했을 때 추출된 원소의 함량, 교환성 원소 함량을 분석하였으며 공극수와 물로 추출한 용액에 존재하는 원소의 함량 분포가 다르게 나타났다. 공극수에 가장 높은 농도로 존재하는 원소는 칼슘이었으나 수용액에서는 칼륨의 함량이 가장 높았다(Fig. 6). 공극수와 수용액에 높은 농도로 존재하는 원소는 칼슘, 칼륨, 마그네슘으로 이러한 원소들의 함량 변화가 토양의 EC 변화를 유발할 것으로 판단된다. 본 연구에서는 질소의 함량이 높지 않았는데 이는 시료 채취 시기가 3월로 작물을 심기 전 토양으로 비료를 처리하기 전 토양이었기 때문이며 비료를 처리한 후에는 수용성 질산태 질소 함량이 높게 나타났다. 따라서 비료를 처리한 토양에서는 EC의 변화가 변동이 크지 않은 다른 원소보다 토양의 칼륨이나 질산태 질소 함량에 따라 변화될 것으로 예측된다. 토양의 전기전도도는 토양의 무기태 질소 함량과 유사한 상관관계가 있어 염 함량이 높지 않은 토양에서 토양의 무기태 질소 함량을 예측하는데 사용될 수 있다(Zhang and Wienhold, 2002).

3.3. 비료 처리 토양에서 센서 EC 값과 원소 함량과의 상관관계

현재 농경지 토양에서 사용할 수 있는 질소, 칼륨, 인산 등 양분 함량을 모니터링할 수 있는 센서가 없기 때문에 EC 센서를 토양 양분의 경시적 변화를 모니터링하는데 사용할 수 있을지 평가하기 위해 다양한 비료로 토양을 처리하고 토양 EC 센서값과 추출액의 pH, EC, Ca, K, Mg, Na, P, S 함량의 상관관계를 분석한 결과를 Table 3에 나타내었다. 토양의 EC 센서값은 추출액으로 분석한 EC와 강한 양의 상관관계를 보여 EC의 변화를 반영하였으며 토양의 인을 제외한 모든 원소와 강한 양의 상관관계를 보였다($p<0.05$). Zhang(2008)의 연구에서도 토양의 전기전도도가 용출액의 reactive particulate P 함량과 음의 상관관계를 보였다. 인산은 일반적으로 유효도가 낮기 때문에 토양 용액 중에 존재하는 함량이 매우 낮으며 공극수에 존재하는 함량도 낮았기 때문에 토양 EC와 상관관계가 낮은 것으로 판단된다(Sigua et al., 2017). 인은 초기 채취한 시료와 1달 후 채취한 시료에서 수용성 함량의 차이가 크지 않았으나 Ca, K, Mg, NO_3^- 등의 원소는 초기 함량보다 감소해 시간에 따른 차이를 보였으며 센서의 EC 측정값도 초기보다 두번째 측정에서 감소하였다.

토양의 질소는 식물 생육에 가장 중요한 원소 중 하나이기 때문에 토양의 질소 함량을 센서를 이용해 측정하는 다양한 방법들이 제안되었으며 토양을 용액으로 추출한 후 이온 특이적 멤브레인을 이용해 분석하는 방법이 주를 이루지만 이러한 방법은 연속적으로 토양에서 용액을 추출하여 전극쪽으로 주입한 후 값이 측정되도록 해야 하는데 현재까지 실시간으로 측정하는 것은 불가능한 상황이다(Barnes et al., 2003; Dudala et al., 2020).

EC센서는 원소를 구분하여 평가하는 것이 아니기 때문에 원소의 몰수를 합산해 상관관계를 분석한 결과 상관계수가 0.915였으며 ionic strength와는 상관계수가 0.873으

Table 3. Correlation matrix for sensor EC value, measured pH and EC (1:5 water extract), and water extractable nutrient concentrations

Variables	Sensor EC	pH	EC (1:5)	Ca	K	Mg	Na	P	S	NO_3-N	NH_4-N
pH	-0.308	1									
EC(1:5)	0.925	-0.386	1								
Ca	0.889	-0.519	0.975	1							
K	0.820	-0.172	0.805	0.776	1						
Mg	0.861	-0.487	0.975	0.973	0.757	1					
Na	0.947	-0.349	0.942	0.898	0.776	0.881	1				
P	-0.654	0.489	-0.531	-0.604	-0.500	-0.573	-0.520	1			
S	0.698	-0.329	0.904	0.877	0.653	0.929	0.788	-0.254	1		
NO_3-N	0.922	-0.459	0.988	0.986	0.765	0.972	0.921	-0.614	0.868	1	
NH_4-N	0.643	-0.369	0.776	0.801	0.514	0.802	0.581	-0.293	0.794	0.788	1
Ionic strength	0.873	-0.449	0.988	0.984	0.783	0.992	0.904	-0.515	0.941	0.980	0.810

로 센서값이 토양의 주요 식물 영양 원소의 차이를 잘 나타내는 것으로 판단된다. 토양 EC 센서를 이용하여 비료를 처리한 논토양을 깊이에 따라 EC를 모니터링했을 때 EC는 양분 함량에 비례하고 토양의 깊이에 반비례하는 경향을 보였으나 질소, 인, 칼륨 같은 각각의 양분 함량을 구분할 수는 없었다(Othaman et al., 2020). 따라서 토양에서 식물이 쉽게 이용할 수 있는 원소 전체의 변동을 모니터링하는데 EC센서를 사용할 수 있으며 원소별 과부족을 판단하기 위해서는 토양 시료를 채취해 결과를 비교해야 한다. Ammonium acetate로 추출 가능한 교환성의 원소와 EC센서와의 상관관계도 분석하였으나 상관성이 없는 것으로 나타나 결과에 포함시키지 않았으며 식물은 수용성 원소 뿐만 아니라 교환성 원소도 이용할 수 있기 때문에 실제 식물이 이용 가능한 원소 함량은 EC로 예측한 값보다 높을 것으로 판단된다.

4. 결 론

토양의 실시간 수분함량과 온도, EC를 모니터링할 수 있는 센서는 센서 종류에 따라 수분함량과 EC가 정확하게 일치하지는 않았으나 5% 이내에서 차이가 있었으며 수분 함량이 감소하면서 그 차이가 줄어들었고 EC 값도 수분함량이 낮을 때 센서별 차이가 크지 않았다. 토양의 EC 센서값은 토양에 존재하는 수용성 양이온 함량과 강한 양의 상관관계를 보여 같은 토양에서 시간 경과나 비료 처리에 따른 총 양분 함량의 변화를 잘 반영하는 것으로 판단된다. 그러나 염 함량이 높은 토양의 경우 식물 양분이 아닌 Na 함량에 의해 영향을 받을 수 있다. 따라서 토양의 EC 센싱값을 절대적인 양분 평가 기준으로 사용할 수는 없으나 작물에 의한 양분의 고갈이나 추가적인 양분 처리의 판단 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

사 사

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

References

Barnes, E.M., Sudduth, K.A., Hummel, J.W., Lesch, S.M., Corwin, D.L., Yang, C., Daughtry, C.S., and Bausch, W.C., 2003, Remote-and ground-based sensor techniques to map soil properties, *Photogramm. Eng. Remote. Sensing*, **69**(6), 619-630.

Campbell, C.S., Campbell, G.S., Cobos, D.R., and Bissey, L.L., 2009, Calibration and evaluation of an improved low-cost soil moisture sensor, http://www.decagon.com. (accessed 04 December. 2021)

Chen, L., Zhangzhong, L., Zheng, W., Yu, J., Wang, Z., Wang, L., and Huang, C., 2019, Data-driven calibration of soil moisture sensor considering impacts of temperature: a case study on FDR sensors, *Sensors*, **19**(20), 4381.

Dudala, S., Dubey, S.K., and Goel, S., 2020, Microfluidic soil nutrient detection system: integrating nitrite, pH, and electrical conductivity detection, *IEEE Sensors J*, **20**(8), 4504-4511.

Gholizadeh, A., Amin, M.S.M., Anuar, A.R., and Aimrun, W., 2011, Apparent electrical conductivity in correspondence to soil chemical properties and plant nutrients in soil, *Commun. Soil Sci. Plant. Anal.*, **42**(12), 1447-1461.

Gondchawar, N. and Kawitkar, R.S., 2016, IoT based smart agriculture, *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.*, **5**(6), 838-842.

Jagannathan, S. and Priyatharshini, R., 2015, Smart farming system using sensors for agricultural task automation, 2015 IEEE

International Conference on Technological Innovation in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR) pp. 49-53.

Kim, H.N. and Park, J.H., 2021, Research trends using soil sensors for precise nutrient and water management in soil for smart farm, *Korean J. Soil Sci. Fert*., **54**(3), 366-382.

Kim, J.Y., Chung, S.O., Lee, D.H., Cho, Y.Y., Jang, S.H., and Choi, J.M., 2014, Calibration for proper usage of FDR soil moisture sensors, *Hortic*. 52.

MAFRA, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2021. Renew agriculture and rural areas with digitalization, low-carbon transition and regional New Deal.

Miller, W.P. and Miller, D.M., 1987, A micro-pipette method for soil mechanical analysis, *Commun. Soil Sci. Plant. Anal*., **18**(1), 1-15.

Othaman, N.C., Isa, M.M., Ismail, R.C., Ahmad, M.I., and Hui, C.K., 2020, Factors that affect soil electrical conductivity (EC) based system for smart farming application. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2203, No. 1, p. 020055). AIP Publishing LLC.

Robinson, D.A., Gardner, C.M.K., and Cooper, J.D., 1999, Measurement of relative permittivity in sandy soils using TDR, capacitance and theta probes: comparison, including the effects of bulk soil electrical conductivity, *J. Hydrol.*, **223**(3-4), 198-211.

Scheiner, D., 1976, Determination of ammonia and Kjeldahl nitrogen by indophenol method, *Water Res.*, **10**(1), 31-36.

Schnetger, B. and Lehners, C., 2014, Determination of nitrate plus nitrite in small volume marine water samples using vanadium (III) chloride as a reduction agent, *Mar. Chem*., **160**, 91-98.

Sigua, G.C., Stone, K.C., Bauer, P.J., Szogi, A.A., and Shumaker, P.D., 2017, Impacts of irrigation scheduling on pore water nitrate and phosphate in coastal plain region of the United States, *Agric. Water Manag*., **186**, 75-85.

Walkley, A. and Black, I.A., 1934, An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method, *Soil Sci.*, **37**(1), 29-38.

Zhang, M.K., 2008, Effects of soil properties on phosphorus subsurface migration in sandy soils, *Pedosphere*, **18**(5), 599-610.

Zhang, R. and Wienhold, B.J., 2002, The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH, *Nutr. Cycl. Agroecosystems*, **63**(2), 251-254.