

고추와 브로콜리 토양의 센서 전기전도도 값과 유효태 양분 함량의 관계 평가

신수경¹ · 김정연¹ · 박진희^{2*}

¹충북대학교 농화학과 대학원생, ²충북대학교 환경생명화학학과 교수

Evaluation of Plant Available Nutrient Levels Using EC Monitored by Sensor in Pepper and Broccoli Soil

Su Kyeong Sin¹, Jeong Yeon Kim¹, and Jin Hee Park^{2*}

¹Graduate Student, Department of Agricultural Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²Professor, Department of Environmental and Biological Chemistry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

Abstract. For appropriate nutrient management and enhanced plant growth, soil sensors which reflect soil nutrient levels are required. Because there is no available sensor for nutrient monitoring, electrical conductivity (EC) sensor can be used to evaluate soil nutrient levels. Soil nutrient management using EC sensors would be possible by understanding the relationship between sensor EC values and soil temperature, moisture, and nutrient content. However, the relationship between soil sensor EC values and plant available nutrients was not investigated. Therefore, the objectives of the study were to evaluate effect of different amount of urea on soil EC monitored by sensors during pepper and broccoli cultivation and to predict the plant available nutrient contents in soil. During the cultivation period, soil was collected periodically for analyzing pH and EC, and the available nutrient contents. The sensor EC value increased as the moisture content increased, and low fertilizer treated soil showed the lowest EC value. Principal component analysis was performed to determine the relationship between sensor EC and available nutrients in soil. Sensor EC showed a strong positive correlation with nitrate nitrogen and available Ca. In addition, sum of available nutrients such as Ca, Mg, K, P, S and N was positively related to the sensor EC values. Therefore, EC sensors in open field can be used to predict plant available nutrient levels for proper management of the soil.

Additional key words: EC sensor, nitrate, precision agriculture, smart farm

서 론

제4차 산업혁명 이후 많은 디지털 기술이 개발되면서 공업 뿐만 아니라 농업에도 많은 영향을 주었다. 그 중에서도 최근 정보통신기술(ICT)과 농업이 접목된 정밀 농업이 많은 주목을 받고 있다(Walter 등, 2017). 기존 농업 방식은 토지의 정확한 특성을 고려하지 않고 보편적이고 평균적인 토지의 상태에 따라 양수분을 관리하였다. 반면, 정밀 농업이 도입된 후 토지의 물리, 화학적 특성을 고려하여 맞춤 관리함으로써 투입되는 자원을 최소화하고 생산량은 최대화할 수 있게 되었다(Zhang 등, 2002). 정밀 농업 중 한 분야인 시설 스마트팜은 작물 재배 환경이 외부 환경에 영향을 받지 않도록 설계되어 있어 온도, 일사량, 이산화탄소 등 환경 조건을 비교적 쉽게 모니터링하고 조절할 수 있지만 노지는 작물이 외부 환경에 그대

로 노출되어 영향을 받으므로 환경에 대한 정보를 모니터링하기 어렵다. 따라서 노지에서 정밀한 양수분 관리를 위해 정확한 토양 정보를 얻을 수 있는 센서를 필요로 한다(Kim과 Park, 2021).

작물의 생산성에 영향을 미치는 요인에는 온-습도, 일사량, 토양 pH 등이 있지만 가장 중요한 조건 중 하나는 토양 양분이다(Boyer, 1982). 기후환경과 같은 조건은 조절하기 어렵지만 토양 양분은 조절이 가능하기 때문에 적절한 관리를 통해 작물 생산성을 높일 수 있다. 토양 양분은 기기분석법을 통하여 정확한 값을 알아낼 수 있지만 샘플링과 전처리 과정에서 많은 시간이 소비되어 효율적이지 못하다는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 양분을 모니터링할 수 있는 센서를 이용할 수 있으나 특정 원소 함량을 동시에 측정할 수 있는 센서는 개발되지 않아 대부분 전기전도도(electrical conductivity, EC) 센서를 활용한다(Gholizadeh 등, 2011). 전기전도도 값은 염류 이온을 판단하는 척도로 사용되고 있으며 토양의 온도가 증가하면 이온의 이동과 전위가 증가하여 EC 측정값이 높아

*Corresponding author: pjinh@chungbuk.ac.kr

Received October 13, 2023; Revised October 17, 2023;

Accepted October 18, 2023

질 수 있고 수분 함량이 높을 때 EC도 증가하는 경향이 있다 (Othaman 등, 2020; Park과 Sung, 2021). 이처럼 EC 센서는 사용자가 원하는 특정 원소 함량을 알 수 없고 토양의 온도, 수분 함량 그리고 토성에 따라 크게 달라지기 때문에 실시간 양분 모니터링에 어려움이 있다. 그러나 EC 센서와 온도, 수분 함량, 양분 함량과의 관계를 파악하면 EC 센서를 토양의 양분 함량을 모니터링하는데 사용할 수 있을 것이다.

따라서 본 연구의 목적은 EC 센서를 활용해 식물이 이용할 수 있는 토양의 양분 함량을 예측할 수 있는지 평가하는 것이다. 이를 위해 토양 유효태 양분의 실측값과 추출법으로 분석한 pH와 EC, 토양 온도 및 수분 함량 등에 따라 달라지는 EC 센서 모니터링 값을 비교, 분석하였다. 노지는 고추와 브로콜리 재배 토양을 대상으로 하였으며 비료 처리에 따른 원소 함량과 EC 센서 모니터링 값 사이의 상관관계를 분석하여 EC 센서의 활용가능성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 고추와 브로콜리 생육 및 비료 처리

고추(*Capsicum annuum* L.)는 전라북도 정읍시의 노지 포장에 정식하여 4개월(22.04.30 - 22.09.16)간 생육하였다. 요소 비료와 monoammonium phosphate(MAP)를 고추 표준 시비량(Korea Soil Information System, 2023)에 따라 10번에 나누어 관비 형태로 처리하였다. 칼륨은 충분하여 시비하지 않았으며 적정 처리구(control), 수분부족 처리구(low water)는 질소와 인을 각각 $22.8\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}$, $23.8\text{g P}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 처리하였다. 수분부족 처리구의 수분상태는 강우를 제외하고 장력이 -100kPa 이하로 유지되도록 하였다. 비료부족 처리구(low fertilizer)는 요소 비료는 처리하지 않고 MAP를 $23.8\text{g P}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 10회 나누어 관비 처리하였으며 비료과잉 처리구(high fertilizer)는 요소 비료를 표준 시비량의 3배인 $68.4\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 처리하고 MAP를 $23.8\text{g P}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 처리하였다.

브로콜리(*Brassica oleracea* var. *italica*)는 충북대학교 부속농장 노지 포장에 정식하여 10주(23.04.10 - 23.06.15)간 생육하였다. 비료는 브로콜리 표준 시비량(Korea Soil Information System, 2023)에 따라 2번에 나누어 요소 비료와 염화 가리를 처리하였다. 적정 처리구와 수분부족 처리구는 요소

비료 $14.7\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}$ 와 염화加里 $3.15\text{g K}\cdot\text{m}^{-2}$ 를 처리하고 수분 부족 처리구에는 관계하지 않았다. 비료부족 처리구는 요소 비료를 처리하지 않고 염화加里만 $3.15\text{g K}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 처리하였으며 비료과잉 처리구는 요소 비료를 표준 시비량의 3배인 $44.1\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 처리하고 염화加里를 $3.15\text{g K}\cdot\text{m}^{-2}$ 로 처리하였다.

2. 센서를 이용한 토양 EC 모니터링

작물 재배 기간동안 센서를 사용하여 토양의 EC를 모니터링하였다. 각 처리구마다 작물과 작물 사이 토양 표면으로부터 약 10cm 깊이에 TEROS 12 센서(METER Group, USA)를 설치하였고 센서는 ZL6 데이터 로거(METER Group, USA)에 연결하여 토양의 수분 함량, 온도, bulk EC 값을 하나의 센서로 동시에 측정하였다. 측정된 값은 매 15분마다 수집하였다. 유효태 양분 함량과 EC 센서값의 비교를 위해 모니터링한 EC 값을 수분 함량에 대하여 보정하였다.

3. 고추와 브로콜리 토양 분석

시험 전 토양의 기본 특성 분석을 위해 채취한 토양을 풍건한 후 2mm 체를 통과시켜 분석에 사용하였다. 토양을 5% sodium hexametaphosphate 용액으로 분산시켜 비중계를 이용해 토성을 분석하였다(Gee와 Bauder, 1979). 토양의 pH와 EC를 측정하기 위해 토양 5g에 초순수 25mL를 첨가하여 180rpm에서 30분간 진탕하였다. 진탕 후 토양이 가라앉도록 정지하고 pH/conductivity meter(A215 pH/Conductivity Benchtop Multiparameter Meter, Thermo-Fisher Scientific, USA)를 사용하여 초순수로 추출한 용액의 pH와 EC를 측정하였다. 토양 유기물 함량은 Walkley-Black법에 따라 분석하였다(Walkley와 Black, 1934). 유효태 질소 함량 분석을 위해 건조하지 않은 토양 2g에 2 M KCl 20mL를 첨가하여 180rpm에서 30분간 추출하였다. 추출한 용액은 $0.45\mu\text{m}$ 주사기 필터로 여과한 후 indophenol-blue법과 VCl(III)-reduction법에 따라 각각 암모늄태 및 질산태 질소 함량을 분석하였다(Novamsky 등, 1974; Doane과 Horwath, 2003). 고추와 브로콜리 토양의 기본 특성 분석 결과는 Table 1에 나타내었다.

고추와 브로콜리 정식 후 재배기간동안 센서를 설치한 주변의 토양을 주기적으로 채취하여 1:5 추출법으로 pH와 EC를

Table 1. Physicochemical properties of pepper and broccoli cultivated soils.

Soil	Texture	pH	EC ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	Organic matter (%)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Pepper	Loamy sand	6.9	162.8	0.48	28.3	2.32
Broccoli	Sandy loam	6.4	58.4	0.81	7.28	0.74

측정하고 유효태 양분 함량을 분석하였다. 풍건하여 2mm 이하로 체질한 토양 5g에 25mL의 초순수를 첨가하여 30분 진탕 후 용액의 pH와 EC를 측정하였다. 유효태 양분 함량 분석을 위해 토양 2g에 1M ammonium acetate 20mL 첨가하여 180rpm에서 30분간 진탕하였다. 추출액은 0.45µm 주사기 필터로 여과하여 유도결합 플라즈마 분광광도계(ICP-OES Avio 500, Perkin Elmer, USA)를 사용하여 유효태 양이온 함량을 분석하였다(Schollenberger와 Simon, 1945). 또한 암모늄태 및 질산태 질소 함량을 분석하기 위해 토양에 고액비가 1:10이 되도록 2 M KCl로 추출하여 각각 indophenol-blue법과 VCl(III)-reduction법으로 분석하였다(Novamsky 등, 1974; Doane과 Horwath, 2003).

4. 데이터 통계처리

실험 데이터의 통계 분석은 SPSS 27 소프트웨어(IBM, USA)를 사용하였다. 일원 배치 분산분석(One-way ANOVA)을 이용하여 비료 처리구별 토양 양분 함량 차이를 비교하였고 사후 분석은 Duncan's multiple range test(DMRT)를 실시하였다. 센서 EC 값은 수분 함량에 따라 변화하므로 EC 값은 수분 함량이 20%일 때의 값으로 보정하여 사용하였다. 센서로 모니터링한 토양 EC 값과 추출법 pH와 EC, 양분 함량 사이의 상관성을 판단하기 위해 XLstat(Addinsoft, USA)을 이용해 주성분 분석(Principal component analysis)을 실시하였다. 모든 통계분석의 유의 수준은 $p < 0.05$ 로 하였다.

결과 및 고찰

1. 고추와 브로콜리 생육 기간 동안 토양 EC 센서 모니터링

센서로 모니터링한 EC는 수분 함량이 높아지면 증가하였다(Fig. 1). 센서의 EC값은 토양 온도에 의해 영향을 받지 않았는데 이는 센서 자체적으로 온도에 대한 보정이 되어 있기 때문인 것으로 판단된다(Park과 Sung, 2021). 모니터링한 센서 EC와 토양 수분 함량은 수분 함량이 10-25%인 범위에서 직선의 상관관계($R^2 = 0.92$)를 나타냈으며 이 범위에서 센서 EC 값을 수분 함량에 대해 보정할 수 있다. 같은 양의 비료를 처리했으나 관계하지 않은 수분부족 처리구의 수분 함량은 다른 처리구와 비교하여 두드러진 차이가 나타나지 않았다. 이는 노지 실험이었으므로 작물 생육 기간 내린 비의 영향으로 수분 처리구의 수분 함량이 다른 처리구와 큰 차이가 나지 않아 수분부족 처리가 EC센서 값에 영향을 미치지 않았다.

센서로 모니터링한 EC 값은 비료 처리량이 가장 작은 비료 부족 처리구에서 낮았고 비료과잉과 적정 처리구에서 높았다. 생육 초반에는 비료과잉 처리구의 EC가 높았으나 생육 후기

로 갈수록 비료처리에 따른 센서 EC 값에 큰 차이가 없었다. Vyavahare 등(2023)의 연구에서도 비료 처리량이 가장 많은 처리구의 센서 EC 값이 가장 높았으며 작물이 성숙해지면 비료 처리량에 따른 센서 EC 차이가 두드러지지 않았다. 이는 적정 처리구의 작물 생육이 비료부족 처리구보다 좋았기 때문에 적정 처리구의 양분 흡수가 생육 후반부로 갈수록 더 많아 토양의 유효태 양분 함량은 차이가 나지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

고추 토양의 센서 EC 값은 $0.01 - 0.13 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 의 범위에서 측정되었으며 브로콜리 토양의 센서 EC 값은 $0.1 - 1.1 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 의 범위에 분포하였다. 고추 토양이 브로콜리 토양에 비해 센서 EC 값이 낮은 이유는 비료 처리량뿐만 아니라 토성이 다르기 때문인 것으로 판단된다. Table 1에서 고추 토양의 토성은 양질 사토이며 브로콜리 토양의 토성은 사양토로 브로콜리 토양이 고추 토양에 비해 점토 함량이 높다. 점토 함량은 토양 양분과 관련이 있으며 표면으로부터 30cm 깊이의 토양 EC와 양분 함량의 관계는 점토 함량과 양이온교환용량(CEC) 증가에 영향을 받았다. 점토 함량이 낮은 토양은 물로 포화된 공극이 적고 수분 함량이 낮아 EC가 낮다(Heiniger 등, 2003; Peralta 등, 2013). 수분은 이온을 가용화시키거나 이동도를 높여 수분이 증가하면 EC 값이 증가하고 토양 입자 크기에 따라 수분 보유 능력이 달라 점토 입자는 모래보다 많은 양의 수분을 함유할 수 있으므로 토양 EC는 비료의 양, 토양 수분 함량과 토성에 영향을 받는다(Othaman 등, 2020).

2. 비료 처리에 따른 토양 양분 함량 평가

고추와 브로콜리 토양의 양분 함량은 대부분 초기에 증가하다가 수확 시기에 이르러 감소하는 경향을 보였다(Fig. 2, 3). 고추와 브로콜리의 칼슘, 마그네슘과 같이 비료로 처리하지 않은 원소의 함량은 비료 처리구에 따라 유의미한 차이가 없었다. 고추 모종 정식 후 41일, 74일, 137일에 채취한 토양은 비료과잉 처리구에서 비료부족 처리구와 비교해 유의미하게 유효태 칼륨 함량이 낮았다(Fig. 2). 질산태 질소 함량은 정식 후 53일에 비료부족 처리구에서 유의미하게 낮았으며 137일째의 비료과잉 처리구 토양은 유의미하게 높게 나타났다(Fig. 2). 비료부족 처리구의 경우 요소 비료를 적게 처리했기 때문에 질산태 질소 함량이 낮았다. 요소 비료를 처리하면 토양 내에서 암모늄태 질소는 질산화 과정을 통해 질산태 질소로 빠르게 전환되어 다른 유효태 양분과 함께 식물체의 바이오매스를 구성하는 데 소비된다(Subbarao 등, 2006). 비료과잉 처리구의 경우 식물 생체량이 증가하여 칼륨의 흡수가 증가하였기 때문에 토양 내 유효태 칼륨 함량은 감소한 것으로 판단된다.

브로콜리 토양은 비료부족 처리구와 비교해 정식 후 62일,

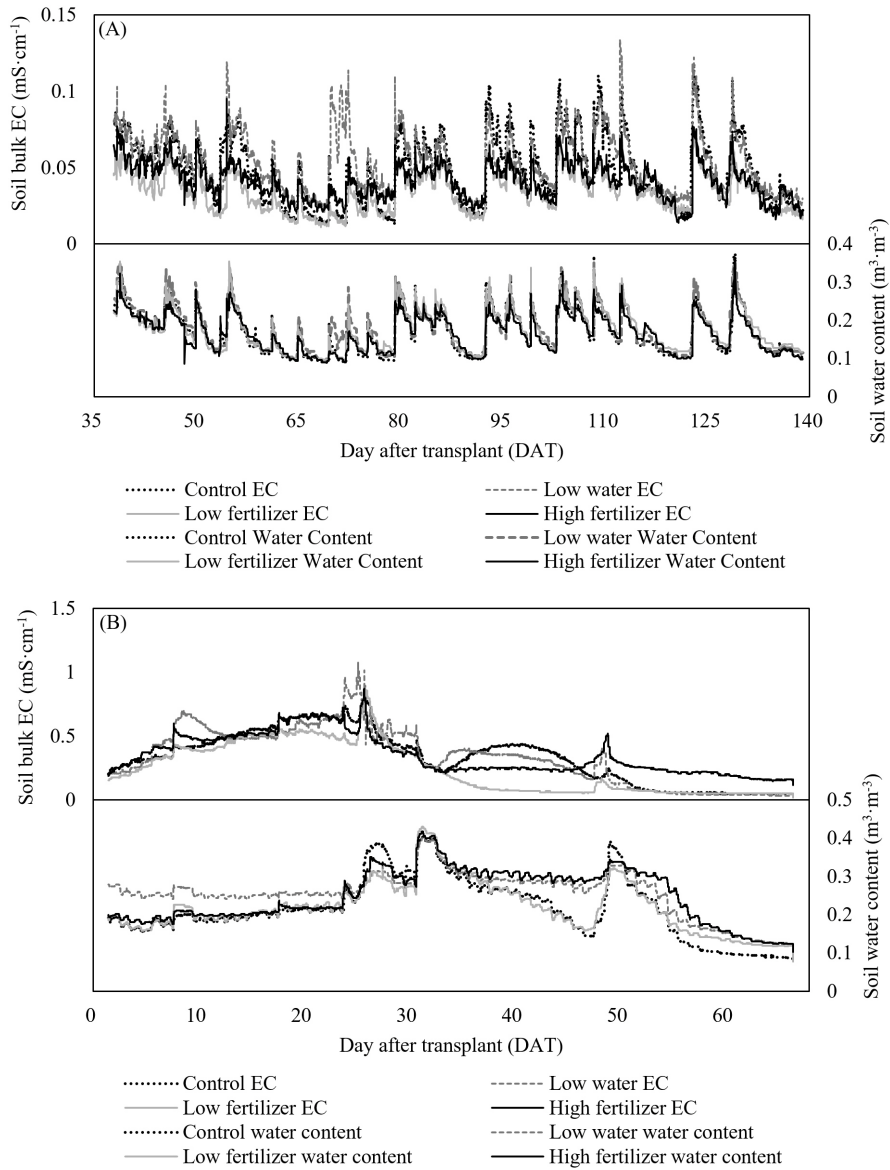


Fig. 1. Soil EC and water content of pepper (A) and broccoli (B) soil monitored by sensor.

72일째 비료과잉 처리구 토양에서 암모늄태 질소와 질산태 질소 함량이 높았으며 비료부족 처리구는 낮아 요소 비료 처리에 따른 효과가 나타났다(Fig. 3). 비료과잉 처리구는 질소의 함량을 과잉으로 처리하였기 때문에 비료부족 처리구보다 유효태 질소 함량이 높았으나 식물 흡수나 용탈에 의해 손실이 발생하였으므로 적정 처리구와 큰 차이가 없었다. 수확 당시 비료과잉 처리구 토양에서 질산태 질소 함량이 증가한 것은 비료로 첨가된 질소가 아닌 토양에 존재하던 질소의 무기화 작용이 일어났기 때문인 것으로 판단된다. Liu 등(2017)은 무기 비료의 처리에 따라 토양에 존재하는 질소의 무기화 작

용과 식물 흡수가 증가했다고 보고했다.

3. 센서 EC와 유효태 토양 양분 함량의 상관관계

토양 EC는 용액 중 전해질 이온의 세기를 나타내기 때문에 토양 용액 중 양분 함량과 상관성이 있으나 토양에 센서를 삽입하여 측정된 EC는 추출액 EC와 차이가 있어 현장에서 적용하기에 어려움이 있다(Kim과 Park, 2021). 따라서 작물 재배 기간에 노지 토양을 주기적으로 채취하여 토양 유효태 양분 함량을 분석하고 센서 EC 값과의 상관성을 평가하기 위해 주 성분 분석을 실시하였다. 센서 EC 값은 토양을 채취한 날의 평

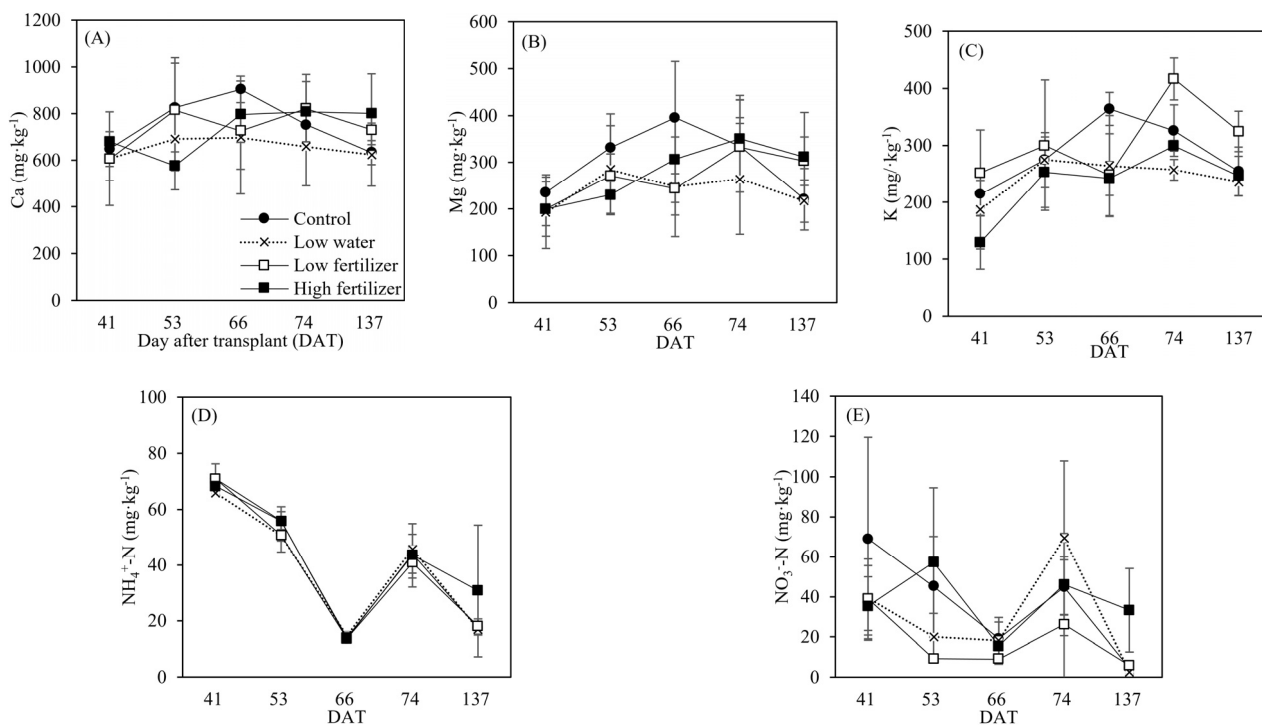


Fig. 2. Exchangeable element contents of soil treated with different amount of urea during pepper cultivation. (A) Ca, (B) Mg, (C) K, (D) NH₄⁺-N, and (E) NO₃⁻-N.

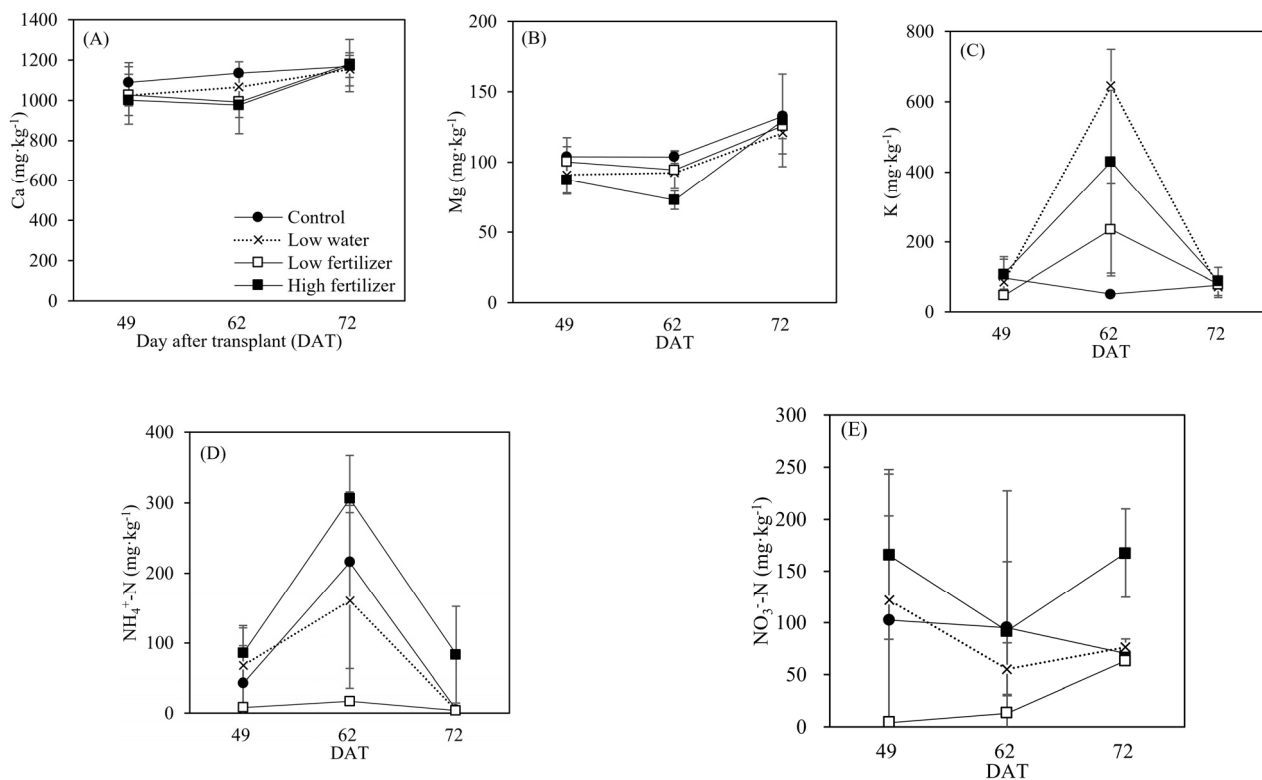


Fig. 3. Exchangeable element contents of soil treated with different amount of urea during broccoli cultivation. (A) Ca, (B) Mg, (C) K, (D) NH₄⁺-N, and (E) NO₃⁻-N.

Table 2. Factor loadings and total variance explained by the rotated principal components.

	PC1	PC2	PC3	PC4
Sensor EC	0.762	-0.259	-0.217	-0.279
Ca	0.663	-0.222	0.458	-0.313
Mg	-0.320	0.453	0.691	-0.023
P	-0.513	0.244	-0.312	0.004
K	-0.158	0.875	-0.075	0.041
S	0.776	0.109	0.301	0.079
NH ₄ ⁺ -N	0.570	0.281	-0.537	0.219
NO ₃ ⁻ -N	0.714	-0.273	-0.358	0.028
sum	0.805	0.303	0.293	-0.133
pH	0.145	0.575	-0.269	-0.503
EC	0.456	0.790	-0.056	0.090
CEC	0.451	0.035	0.147	0.785
Eigenvalue	3.928	2.360	1.527	1.128
Variability (%)	32.732	19.671	12.725	9.398
Cumulative (%)	32.732	52.403	65.128	74.526

The bold value indicates loadings greater than 0.5.

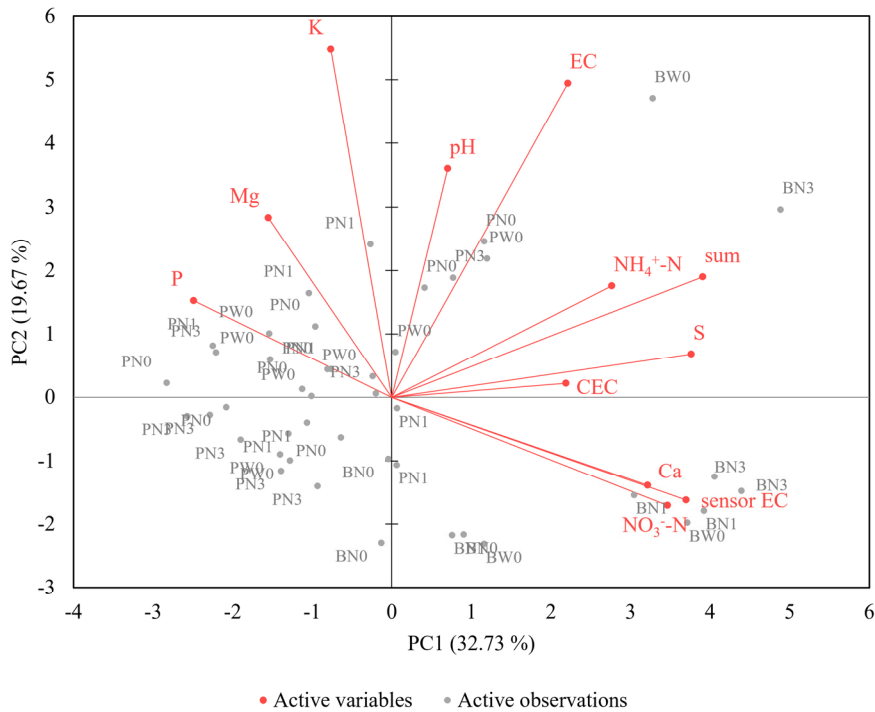


Fig. 4. Biplot of PC1 and PC2 for sensor EC, soil exchangeable nutrients and soil pH and EC under different amount of urea applications (pepper: P, broccoli: B, control: N1, low water: W0, low fertilizer: N0, high fertilizer: N3).

균 EC 값을 사용하여 수분 함량 20%일 때의 값으로 보정하였으며 토양 양분은 토양 무게당 원소의 전하당량으로 계산하고 원소들을 합산하여 합계값(sum)을 구했다. 주성분 분석에 의해 얻은 4개의 주성분은 전체 분산의 74.5%를 설명하였다. 주

성분 1(PC1)과 주성분 2(PC2)는 전체 분산을 각각 32.7%, 19.7% 설명하였다(Table 2). 주성분과 변수의 상관성을 분석하면 주성분의 의미를 파악할 수 있고 적재값이 큰 변수는 해당 주성분에서 중요한 변수로 작용한다. 센서 EC, 칼슘, 황, 암

모늄태 및 질산태 질소, 합계값은 주성분 1에 대하여 높은 양의 적재값(>0.5)을 보였으며 칼륨, 토양 추출액의 pH와 EC는 주성분 2에 대하여 적재값이 높았다.

센서 EC는 질산태 질소와 유효태 칼슘과 강한 양의 상관관계를 보였으며 유효태 마그네슘, 인, 칼륨과는 음의 상관관계가 나타났다. 토양에서 비교적 이동성이 높은 질산태 질소와 칼슘은 센서 EC와 상관관계가 높아 센서 EC 값은 이러한 원소들의 수준을 잘 반영하지만 유효도가 낮은 인과 칼륨의 상태는 잘 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 인과 칼륨은 비료로 처리하지 않으면 대부분 유효도가 낮은 상태로 토양에 존재하기 때문에 이러한 원소들은 EC의 변화에 미치는 영향이 미미하며 EC는 토양에서 함량이 쉽게 변화하는 질산태 질소의 영향을 가장 많이 받았다. 질소는 식물의 생육에 가장 중요한 성분 중의 하나이며 요구량이 많다. 칼슘은 다른 원소에 비해 상대적으로 요구량이 적지만 세포와 분열 조직의 성장에 중요한 원소로 식물 생육에 있어 토양의 칼슘 함량이 영향을 미친다(Fitter와 Hay, 2012).

비료과잉 처리구의 브로콜리 토양은 주성분 1에 대하여 고추 토양보다 기여도가 크게 나타났으며 다른 시료들과 구분될 수 있었다(Fig. 4). 이러한 결과는 과잉의 요소 비료를 처리했을 때 토양의 질산태 질소 함량이 증가하여 센서 EC에 유의미한 영향을 미쳤기 때문으로 판단된다. 토양 EC와 유효태 질소 함량 사이에 강한 상관관계는 EC 센서를 활용하여 실시간으로 토양의 양분 수준을 모니터링할 수 있으며 효율적으로 질소 함량을 예측할 수 있음을 의미한다(Mirzakhani et al., 2017). 따라서 센서 EC 값을 통해 양분 함량을 예측하여 센서를 활용한 노지 토양의 양분 제어가 가능할 것이라 판단된다.

적 요

적절한 양분 관리와 식물 생육 증진을 위해 토양의 양분 수준을 반영하는 토양 센서가 요구된다. 토양의 양분을 모니터링할 수 있는 센서가 없으므로 전기전도도(EC) 센서를 토양의 양분 수준을 평가하는데 사용할 수 있다. 센서 EC 값과 토양 온도, 수분 함량과 양분 함량과의 관계를 파악하면 EC 센서를 활용한 토양 양분 관리가 가능할 것이다. 그러나 센서 EC 값과 식물이 이용할 수 있는 양분의 관계는 구명되지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 고추와 브로콜리의 생육 기간동안 요소 비료 처리가 토양 센서 EC 값에 미치는 영향을 평가하고 토양에 존재하는 식물 유효태 양분 함량을 예측하는 것이다. 재배기간동안 주기적으로 토양을 채취하여 pH, EC를 측정하고 유효태 양분 함량을 분석하였다. 센서 EC 값은 수분 함량이 높아질수록 증가하였고 비료부족 처리구의 EC 값이 가장 낮

게 나타났다. 센서 EC와 실제 토양 양분 함량과의 상관관계를 파악하기 위해 주성분 분석을 실시하였다. 센서 EC는 질산태 질소와 유효태 칼슘과 강한 양의 상관관계를 보였다. 또한, 칼슘, 마그네슘, 칼륨, 인, 황, 질소와 같은 유효태 양분을 합한 값은 센서 EC 값과 관련이 있었다. 따라서 노지에서 EC 센서를 이용하여 양분 함량을 예측함으로써 적절한 양분 관리를 할 수 있을 것이다.

추가주제어: 스마트 팜, 전기전도도 센서, 정밀 농업, 질산태 질소

사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ0150500 12021)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Boyer J.S. 1982, Plant productivity and environment. *Science* 218:443-448. doi:10.1126/science.218.4571.443
- Doane T.A., and W.R. Horwath 2003, Spectrophotometric determination of nitrate with a single reagent. *Anal Lett* 36:2713-2722. doi:10.1081/AL-120024647
- Fitter A.H., and R.K. Hay 2012, *Environmental physiology of plants*. Academic Press.
- Gee G.W., and J.W. Bauder 1979, Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measurement parameters. *Soil Sci Soc Am J* 43:1004-1007. doi:10.2136/sssaj1979.03615995004300050038x
- 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* 42:1447-1461. doi:10.1080/00103624.2011.577862
- Heiniger R.W., R.G. McBride, and D.E. Clay 2003, Using soil electrical conductivity to improve nutrient management. *Agron J* 95:508-519. doi:10.2134/agronj2003.5080
- 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 Fertilizer* 54:366-382. doi:10.7745/KJSSF.2021.54.3.366
- Korean Soil Information System 2023, Prescription of standard doses of fertilizer by crop. Available via <http://soil.rda.go.kr/soil/sibi/cropSibiPrescript.jsp> Accessed 1 October 2023
- Liu X.J.A., K.J. van Groenigen, P. Dijkstra, and B.A. Hungate 2017, Increased plant uptake of native soil nitrogen following fertilizer addition—not a priming effect?. *Appl Soil*

- Ecol 114:105-110. doi:10.1016/j.apsoil.2017.03.011
- Mirzakhani H., I.M. Mishra, and A.M. Nafchi 2017, Study on soil nitrogen and electrical conductivity relationship for site-specific nitrogen application. In 2017 ASABE Annual International Meeting (p. 1). Am Soc Agric Biol Eng. doi:10.13031/aim.201700892
- Novamsky I., R. van Eck, C.H. van Schouwenburg, and I. Walinga 1974, Total nitrogen determination in plant material by means of the indophenol-blue method. Neth J Agr Sci 22:3-5. doi:10.18174/njas.v22i1.17230
- Othaman N.N., M.N. Isa, R.C. Ismail, M.I. Ahmad, and C.K. Hui 2020 Factors that affect soil electrical conductivity (EC) based system for smart farming application. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2203, No. 1). AIP Publishing. doi:10.1063/1.5142147
- Park J.H., and J. Sung 2021, Comparison of various EC sensors for monitoring soil temperature, water content, and EC, and its relation to ion contents in agricultural soils. J Soil Groundw Environ 26:157-164.
- Peralta N.R., J.L. Costa, M. Balzarini, and H. Angelini 2013, Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. Can J Soil Sci 93:205-218. doi:10.4141/cjss2012-022
- Schollenberger C.J., and R.H. Simon 1945, Determination of exchange capacity and exchangeable bases in soil—ammonium acetate method. Soil Sci 59:13-24. doi:10.1097/00010694-194501000-00004
- Subbarao G.V., O. Ito, K.L. Sahrawat, W.L. Berry, K. Nakahara, T. Ishikawa, T. Watanabe, K. Suenaga, M. Rondon, and I.M. Rao 2006, Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems—challenges and opportunities. Crit Rev Plant Sci 25:303-335. doi:10.1080/07352680600794232
- Vyavahare G., Y. Lee, Y.J. Seok, H. Kim, J. Sung, and J.H. Park 2023, Monitoring of soil nutrient levels by an EC sensor during spring onion (*Allium fistulosum*) cultivation under different fertilizer treatment. Agronomy 13:1-12. doi:10.21203/rs.3.rs-2661677/v1
- Walkley A., and I.A. Black 1934, An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci 37:29-38. doi:10.1097/00010694-193401000-00003
- Walter A., R. Finger, R. Huber, and N. Buchmann 2017, Smart farming is key to developing sustainable agriculture. Proc Natl Acad Sci 114:6148-6150. doi:10.1073/pnas.1707462114
- Zhang N., M. Wang, and N. Wang 2002, Precision agriculture—a worldwide overview. Comput Electron Agric 36: 113-132. doi:10.1016/S0168-1699(02)00096-0