

시설 수경재배에서 FDR 센서를 활용한 근권 내 농도의 연속적 모니터링 방법

이재성¹ · 신종화^{2*}

¹국립안동대학교 대학원 원예육종학과 대학원생, ²국립안동대학교 생명과학대학 원예육종학과 교수

Development of Continuous Monitoring Method of Root-zone Electrical Conductivity using FDR Sensor in Greenhouse Hydroponics Cultivation

Jae Seong Lee¹ and Jong Hwa Shin^{2*}

¹Graduate Student, Department of Horticulture and Breeding, College of Life Science and Biotechnology, Andong National University, Andong 36729, Korea

²Professor, Department of Horticulture and Breeding, College of Life Science and Biotechnology, Andong National University, Andong 36729, Korea

Abstract. Plant growth and development are also affected by root-zone environment. Therefore, it is important to consider the variables of the root-zone environment when establishing an irrigation strategy. The purpose of this study is to analyze the relationship between the volumetric moisture content (VWC), Bulk EC (ECb), and Pore EC (ECp) used by plant roots using FDR sensors in two types of rockwool media with different water transmission characteristics, using the method above this was used to establish a method for collecting and correcting available root-zone environmental data. For the experiment, two types of rockwool medium (RW1, RW2) with different physical characteristics were used. The moisture content (MC) and ECb were measured using an FDR sensor, ECp was measured after extracting the residual nutrient solution from the medium using a disposable syringe in the center of the medium at a volumetric moisture content (VWC) of 10 – 100%. Then, ECb and ECp are measured by supplying nutrient solution having different concentration (distilled water, 0.5 – 5.0) to two types of media (RW1, RW2) in each volume water content range (0 to 100%). The relationship between ECb and ECp in RW1 and RW2 media is best suited for cubic polynomial. The relationship between ECb and ECp according to volume moisture content (VWC) range showed a large error rate in the low volume moisture content (VWC) range of 10 – 60%. The correlation between the sensor measured value (ECb) and the ECp used by plant roots according to the volumetric water content (VWC) range was the most suitable for the Paraboloid equation in both media (RW1, RW2). The coefficient of determination the calibration equation for RW1 and RW2 media were 0.936, 0.947, respectively.

Additional key words: calibrated equation, FDR sensor, electrical conductivity (EC), moisture content (MC), rockwool, volumetric water content (VWC)

서 론

시설 재배에서 적절한 관수전략의 수립은 작물의 생산량과 품질 향상에 크게 영향을 미친다. 지금까지 관수전략의 수립과 고도화를 위해 광도, 온습도 등 주로 지상부 환경이 관수제어의 주요지표로 활용되어 왔다. 식물의 성장과 발달은 지상부 뿐만 아니라 지하부 환경에도 영향을 받으므로 근권 환경과 관련된 변수들을 관수전략의 수립에 고려하는 것이 매우 중요하다(Shani 등, 2007; Havrda 등, 1989; Nesmith 등, 1992).

하지만 근권 환경의 연속적인 측정과 측정 데이터의 신뢰성

을 담보할 수 없는 한계로 인해 근권 환경이 관수제어에 직접적으로 반영되지 못하였다. 따라서 근권 환경을 연속적으로 측정하면서, 측정 데이터의 신뢰도를 향상시킬 수 있으면 보다 정밀한 관수제어에 활용할 수 있다. 근권 환경 중 토양수분 함량과 배지 이온 농도(EC, electrical conductivity)를 측정하기 위해 FDR(frequency domain reflectometry) 센서가 많이 이용되고 있다(Bayer 등, 2013; Nemali와 van Iersel, 2008). 대부분의 센서는 다양한 범위의 물리량을 전압이나 전류의 전기적인 신호로 표현한다. FDR 센서를 활용하여 배지내의 전기전도도(EC)와 함수율(MC)에 대해 정확한 측정을 하기 위해서는 배지의 종류나 측정 방법에 따른 보정이 필요하다. 토양 또는 배지의 염도는 일반적으로 전기전도도(EC)로 표시된다(Van der Laan 등, 2011). 센서에 의해서 측정되는 전기전

*Corresponding author: shinjh@andong.ac.kr

Received September 16, 2022; Revised October 19, 2022;

Accepted October 19, 2022

도도는 Bulk EC(ECb)로 배지의 전기전도도를 모니터링 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 Bulk EC는 배지내의 공극 및 공기 등이 포함된 EC 값을 나타내기 때문에 염류 측정에서 오류를 발생시킬 수 있다(Corwin와 Lesch, 2005; Peter 등, 2011). 또한 Bulk EC(ECb)의 사용은 토양 수분에 크게 영향을 받을 수 있으므로 정확한 염도 측정 데이터로 사용하기에는 한계가 있다(Amente 등, 2000; Mualem와 Friedman, 1991).

따라서 식물이 실제 근권부에서 활용하는 염분 지수인 Pore EC(ECp)를 관수 관리에 많이 사용하고 있으며(Sebastian Bañón 등, 2021), 근권 환경 데이터 수집에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 토양의 수분을 함량을 나타내는 변수인 함수율(MC)과 센서로 측정되는 Bulk EC(ECb) 그리고 Pore EC(ECp)의 변화를 모두 고려한 보정이 필요하다. 또한 암면 배지는 화학적으로 안정적이고 다공성이며, 수분 보유 능력이 높은 특성을 가지고 있어 시설에서 정밀 양수분 관리를 요하는 작물의 재배에 많이 사용되고 있다. 암면은 생산 과정에서 목적에 따라 배지의 높이 및 섬유 방향을 수직 또는 수평으로 배열하여 수분의 보수력 및 배수력, 확산성을 조절할 수 있는 장점이 있지만(Nelson와 Fonteno, 1991), 이러한 직조 방식은 배지의 밀도에 영향을 미칠 수 있으며, 센서의 측정값은 직조 방식에 의해서도 다르게 나타날 수 있다. 본 연구는 수분이동 특성이 다른 2종류의 암면배지에 FDR 센서를 활용하여 체적함수율(VWC)과 Bulk EC(ECb) 그리고 식물의 뿌리가 이용하는 Pore EC(ECp)에 대한 관계를 분석하고, 수분이동 특성이 다른 배지의 물리적 특성에 알맞은 보정 방법을 확립하고자 진행되었다.

재료 및 방법

1. 배지 재료 및 측정기기

실험은 물리적 특성이 다른 2종류의 암면배지(RW1, RW2)

를 사용하여 진행되었다(Fig. 1). 배지의 함수율(MC)과 전기전도도(EC) 측정을 위해 FDR 센서(COCO, Mirae Co., Ltd., Kor)를 사용하였으며, 측정값은 데이터로거(CR1000, Cambell Scientific, Logan, UT, USA)를 이용하여 1초간격으로 수집되었다.

2. 실험 방법

직조 형태가 다른 암면배지 2종류의 물리적 특성을 비교하기 위하여 암면 종류별 각각 2개의 배지 무게(B), 부피(A), 밀도(B/A), 최대포화용수량(C), 공극률($C/A \times 100$), 중력수 배출량(D), 최대함수율($(C-D)/C \times 100$)을 측정하여 평균 비교하였다. 전자 저울(QW-32P, Innotem, Korea)을 사용하여, 배지의 무게(B)를 측정하고, 배지의 규격을 통해 부피(A)를 계산하였다. 부피와 무게를 통해 배지의 밀도(B/A)를 계산하였으며, 체적함수비 기준으로 0-100%까지 배지에 수분 공급 후 최대 포화 시의 무게를 측정하여 최대포화용수량(C)을 계산하였다. 또한 부피와 최대포화용수량을 이용하여 공극률($C/A \times 100$)을 계산하였다. 배지 수분량이 포화된 상태에서 배지 절개를 통해 배출되는 수분량을 중력수 배출량(D)으로 가정하였으며, 최대포화용수량과 배출된 중력수의 무게를 활용하여 최대함수율($(C-D)/C \times 100$)을 계산하였다. 서로 다른 농도(중류수, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0 dS/m)의 배양액을 공급하였을 때 배지내 농도와 FDR 센서의 측정값의 변화를 관찰하기 위하여 RW1, RW2 암면 배지를 동일한 규격으로 4등분(250×150×75mm)하여 준비하였다. 이후 체적함수율(VMC) 범위에 따른 ECb와 ECp의 측정을 위하여 체적함수율 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100% 범위에 맞게 배양액을 262-2660mL를 정량하여 공급하였다. 각 체적함수율 범위에서 FDR 센서의 전압값과 배양액 농도를 보정하여 ECb를 측정하였으며, 함수율 범위에 따른 ECp와 ECb의 값을 활용하여 오차율($(ECp-$

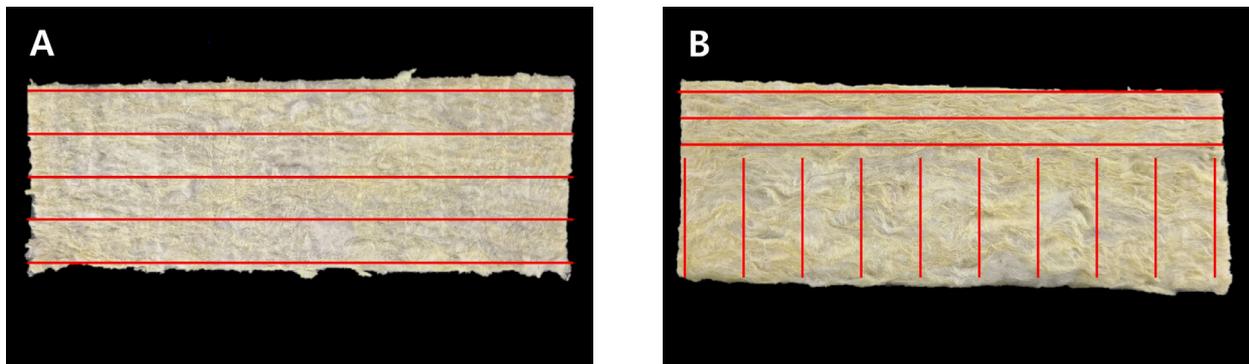


Fig. 1. Compare of vertical sections of the two media used in the experiment. RW1(A), RW2(B) mean rockwool 1, rockwool 2, respectively.

ECb)/ECpx100]을 계산하였다. Balendonck 등(2005)은 압착이나 주사기를 사용하여 토양이나 배지에서 ECp를 추출할 수 있다고 하였다. 위 방식에 따라 각 체적함수율(10 - 100%) 구간에서 배지 중앙부위에 일회용 주사기(KOVAX-Syringe, Korea Vaccine Co., Ltd., Incheon, Seoul)를 이용하여 배지 잔류 배양액 10mL를 추출한 후 ECp를 측정하였다. 체적함수율(VWC)은 젖은 배지의 무게에서 건조된 배지의 무게를 뺀 후 용기의 부피로 나누어 체적함수율을 계산하였다(Eq. 1). 이후 배지 중앙부에 설치된 FDR 센서에서 측정되는 ECb 값과 배지에서 추출하여 측정된 ECp 값의 상관관계 분석을 실시하였다.

$$\text{Volumetric water content (VWC)} = \frac{\text{Wet substrate weight (g)} - \text{Dry substrate weight (g)}}{\text{Container volume (mL)}} \quad (\text{Eq. 1})$$

3. 데이터 분석

ECb와 ECp 및 체적함수율(VWC) 범위에 따른 ECb와 ECp의 분석은 다양한 모델을 사용하여 결정계수(R^2)가 가장 높으면서 평균 제곱근 편차(RMSE)가 가장 낮은 모델을 선정하였으며, 결과는 SigmaPlot(Sigma Plot 12.5, Systat Software Inc, USA) 프로그램을 이용하여 나타내었다.

결과 및 토론

1. 배지의 물리적 특성

2종류의 암면 배지의 물리적 특성 비교에서 RW1이 RW2에 비해 무게(B), 밀도(B/A), 최대포화용수량(C), 공극률(C/A×100), 중력수 배출량 모두 높게 나타났다(Table 1). RW1의 밀도는 동일 부피 대비 RW2 보다 11% 더 높았으며, 중력수 배출량 또한 20% 이상 차이가 났다. RW1, RW2 암면배지의 밀도 차이를 비교하기 위해 각 배지의 상, 중, 하부분을 현미경(AM

Table 1. Compare of physical characteristics of media used in the experiment.

Substrate	Size (LWH mm)	Volume (L) (A)	Weight (kg) (B)	Density (mL/g) (B/A)	Max. water holding capacity (L) (C)	Porosity (%) (C/A100)	Initial gravity drainage (L) (D)	Max. water content (%) [(C-D)/C × 100]
RW1 ^z	1000 × 150 × 75	11.25	0.7263	64.5	9.7967	87.0817	0.9184	90.6254
RW2 ^y	1000 × 150 × 75	11.25	0.6495	57.7	9.5872	85.2195	1.2081	87.3988

^zRW1 mean rockwool 1.

^yRW2 mean rockwool 2.

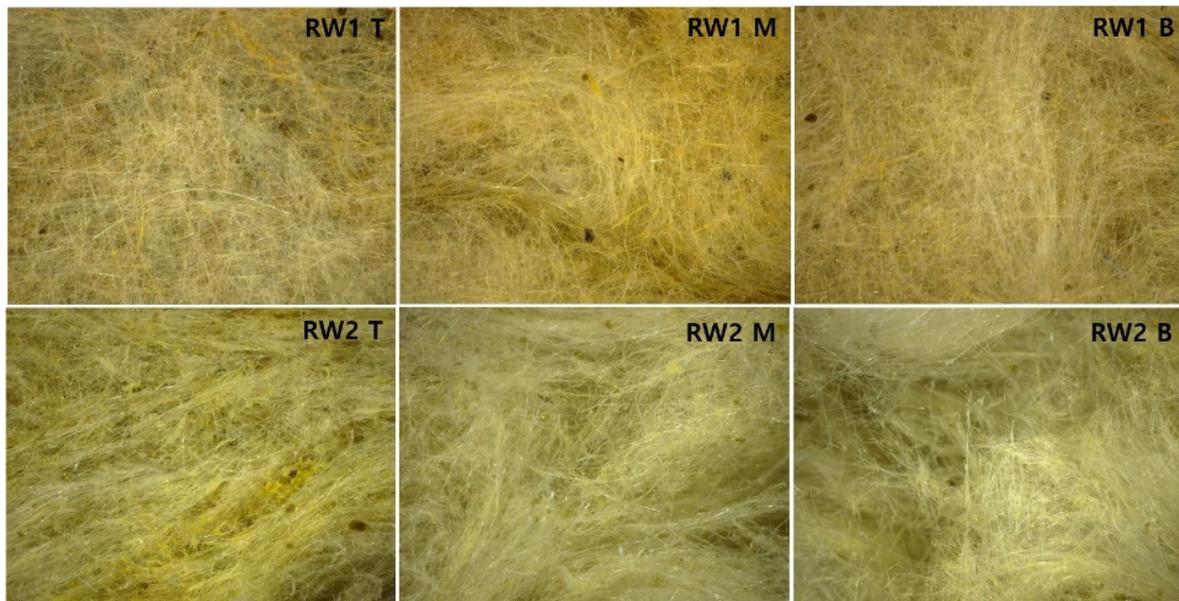


Fig. 2. Difference in internal density in weaving method of two rockwool media (RW1, RW2). T, M, B mean top, middle, and bottom, respectively (The rockwool slab was divided into three sections according to the height).

4111 Dino-Lite premier, AnMo Electronics Co., Taiwan)을 이용하여 50배율로 확인한 결과 RW1은 배지내 위치에 따라 밀도와 공극이 큰 차이를 보이지 않았지만, RW2는 배지 상부에서 하부로 갈수록 배지의 공극이 커짐을 알 수 있었다(Fig. 2). RW2는 RW1에 비해 배지 하단 부분에서 수분 보유 시간이 짧아 중력에 의해서 배출되는 중력수 배출량이 많았으며, 배지 수분 보유 능력도 RW2가 RW1에 비해 낮았을 것으로 판단된다. 또한 배지 내 구조에 따른 배지 상단과 하단의 밀도 차이에 의해 수분의 분포에서 차이가 생길 수 있으며, 센서가 감지하는 부분에 영향을 주었던 것으로 판단된다. Malicki와 Walczak(1991)은 FDR 센서의 측정값이 배지내 수분에 큰 영향을 받으므로 사용 시 중요하게 고려하여야 하는 사항이며, Nelson와 Fonteno(1991)은 암면배지의 상이한 구조가 배지내의 수분과 공기 이동에 영향을 줄 수 있다고 보고하였다.

2. 배지 근권 환경변수 BulkEC(ECb), PoreEC(ECp), Volumetric water content(VWC)간의 관계

RW1, RW2 배지에서 ECb와 ECp의 관계는 3차 다항식에 가장 적합하였다(Table 2). FDR 센서에 의해 측정된 ECb가 배지에서 추출된 ECp보다 높은 경향을 보였다. Corwin와 Lesch(2005); Peter 등(2011)은 FDR센서를 활용한 측정이 센서가 설치된 부분에 공극이 포함된 EC값을 측정함으로 센

서의 측정값이 높게 나타날 수 있다고 보고하였으며, Amente 등(2000); Mualem와Friedman(1991)은 배지의 ECb와 ECp의 관계가 배지 수분에 크게 의존함으로 함수율 범위에 따라서 측정 값이 달라질 수 있다고 보고하였다.

체적함수율 범위에 따른 ECb와 ECp의 관계는 Fig. 3과 같았다. 체적함수율(VWC) 10-60% 구간에서 체적함수율이 증가함에 따라 ECb와 ECp의 관계가 변화함을 확인할 수 있었다(Fig. 4). 또한 체적함수율 범위 따른 ECb와 ECp의 오차

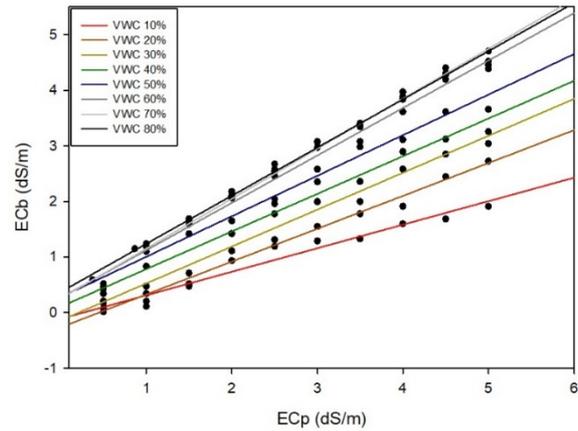


Fig. 3. The relationship between ECb and ECp according to various volumetric water content (10-80%) range.

Table 2. The Coefficients and regression constants for the relationship between ECb and ECp in the two media used in the experiment.

Function	Regression equation	R ²	RMSE
Polynomial (RW1)	$ECp = -0.0706 + (1.0679 * ECb) + (-0.0845 * ECb^2) + (0.0119 + ECb^3)$	0.997	0.089
Polynomial (RW2)	$ECp = -0.5363 + (1.4702 * ECb) + (-0.1624 * ECb^2) + (0.0142 + ECb^3)$	0.998	0.077
Sigmoid (RW1)	$ECp = -13.9555 + 33.6578 / (1 + \exp(-\frac{ECb - 33.6578}{133.6868}))$	0.997	0.091
Sigmoid (RW2)	$ECp = -129.982 + 146.3097 / (1 + \exp(-\frac{ECb + 27.0061}{13.1423}))$	0.998	0.077
Exponential Rise to Maximum (RW1)	$ECp = -0.0466 + 402.5212 * (1 - \exp(-0.0023 * ECb))$	0.995	0.107
Exponential Rise to Maximum (RW2)	$ECp = -0.2913 + 18.0801 * (1 - \exp(-0.0623 * ECb))$	0.998	0.083
Exponential Growth (RW1)	$ECp = -19.5156 + 19.5943 * \exp(0.0418 * ECb)$	0.996	0.488
Exponential Growth (RW2)	$ECp = -400.252 + 400.191 * \exp(0.0023 * ECb)$	0.996	0.089
Power (RW1)	$ECp = 0.129 + 0.7779 * ECb^{1.0905}$	0.996	0.098
Power (RW2)	$ECp = -0.5929 + 1.3852 * ECb^{0.8141}$	0.998	0.109

율은 체적함수율 10% 구간에서 66%로 가장 컸으며, 함수율 60% 구간 이상에서는 오차율이 4%미만으로 작았다. 위 결과를 통해 배지 내에 일정 수분이 공급되어 있지 않거나, 수분 분포가 균일하지 않을 경우 센서 측정값과 실측값의 오차율이 커짐을 확인할 수 있었다. Mualem와 Friedman(1991), Van Loon 등(1991) 및 Risler 등(1996)은 배지의 함수율과 공극, 굴곡률 변화에 따라 전기전도도는 영향을 받을 수 있다고 보고하였다. 따라서 배지 내 근권환경의 정확한 측정을 위해서는 낮은 함수율 범위에서 발생하는 ECb와 ECp의 오차율에

대한 보정이 필요하다.

체적함수율이 증가함에 따라 ECp는 선형적으로 증가하는 경향을 보였지만 ECb는 선형적으로 증가하지 않았다(Fig. 4). 위의 관계를 통해 수분 이동 특성이 다른 2종류 배지(RW1, RW2)에서 체적함수율 변화에 따른 센서 측정값 ECb와 식물 뿌리가 이용하는 ECp의 관계는 Paraboloid 식에서 결정계수 (R^2)가 RW1, RW2 각각 0.936, 0.947로 가장 높았으며, 평균 제곱근편차(RMSE)가 가장 낮았다(Table 3).

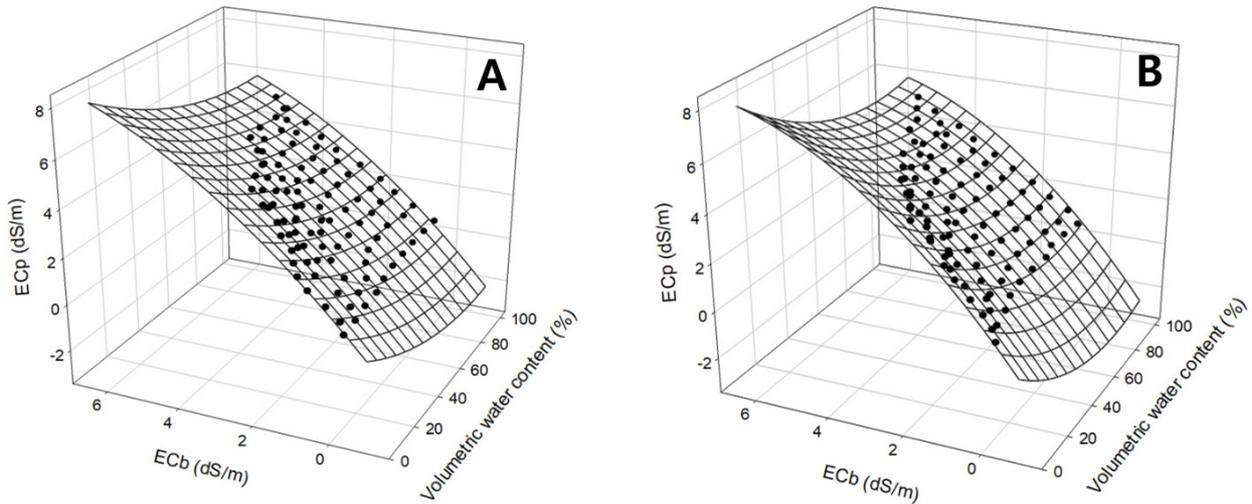


Fig. 4. The relationship among the rootzone environmental factors (VWC, ECb, ECp) in the two types of media (RW1, RW2) used in the experiment. (A: RW1, B: RW2).

Table 3. The coefficient and regression constant for the relationship among volumetric water content, ECb, and ECp.

Funtion	Regression equation	R^2	RMSE
Plane (RW1)	$EC_p = 1.534 - 0.0225 \times VWC + (1.1839 \times EC_b)$	0.912	0.426
Plane (RW2)	$EC_p = 1.4058 - 0.0249 \times VWC + 1.7026 \times EC_b + (0.0004 \times VWC)^2 + (-0.0975 \times EC_b)^2$	0.912	0.433
Paraboloid (RW1)	$EC_p = 1.8080 - 0.0564 \times VWC + 1.5671 \times EC_b + 0.0003 \times VWC^2 - 0.0771 \times EC_b^2$	0.936	0.374
Paraboloid (RW2)	$EC_p = 1.7223 - 0.0649 \times VWC + 1.7026 \times EC_b + 1.7026 \times VWC^2 - 0.0975 \times EC_b^2$	0.947	0.378
Gaussian (RW1)	$EC_p = 45404.1276 \times \exp(-0.5 \times ((\frac{VWC + 1497.1767}{374.6296})^2 + (\frac{EC_b - 6.9878}{3.1208})^2))$	0.923	0.399
Gaussian (RW2)	$EC_p = 49091.3663 \times \exp(-0.5 \times ((\frac{VWC + 1490.5823}{375.1872})^2 + (\frac{EC_b - 7.8708}{3.3955})^2))$	0.918	0.411
Lorentzia (RW1)	$EC_p = 1442.9840 / (1 + (\frac{VWC + 117.8323}{11.5673})^2) \times (1 + (\frac{EC_b + 117.8323}{2.0243})^2)$	0.900	0.454
Lorentzia (RW2)	$EC_p = 1796.4687 / (1 + (\frac{VWC + 113.7384}{10.5201})^2) \times (1 + (\frac{EC_b - 5.0742}{2.0042})^2)$	0.902	0.449

결 론

구해진 보정식을 활용하여 직조 방향이 다른 배지의 FDR 센서 측정 시 낮은 함수율 범위에서 발생할 수 있는 오류를 줄일 수 있으며, 이 방식을 이용하여 근권 내의 환경관리 및 식물 생장과 근권 환경 변수와의 관계 분석에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 배지의 종류에 따라서 밀도와 공극률이 변화하며 배지내 수분 분포가 달라 질 수 있다. 따라서 향후 다양한 종류의 배지와 수분공급방식을 고려한 보정방법에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

적 요

식물의 생장과 발달은 지하부 환경에도 영향을 받으므로 근권 환경의 변수들을 관수전략의 수립에 고려하는 것이 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 수분이동 특성이 다른 2종류의 암면배지에서 FDR 센서를 활용하여 체적함수율(VWC)과 Bulk EC(ECb) 그리고 식물의 뿌리가 이용하는 Pore EC(ECp)에 대한 관계를 분석하고, 이를 활용하여 이용가능한 근권 환경 데이터 수집과 보정 방법을 확립하고자 진행되었다. 실험은 물리적 특성이 다른 2종류의 암면배지(RW1, RW2)를 사용하였다. FDR 센서를 활용하여 함수율(MC)과 ECb를 측정하였으며, ECp는 체적함수율(VWC) 10-100%에서 배지 중앙부위에 일회용 주사기를 이용하여 배지 간류 양액을 추출 후 측정하였다. 이후 2종류 배지(RW1, RW2)에 서로 다른 농도(증류수, 0.5-5.0)의 배양액을 각 체적함수율 범위(0-100%)로 공급하여 ECb와 ECp를 측정하였다. RW1, RW2 배지에서 ECb와 ECp의 관계는 3차 다항식에 가장 적합하였다. 체적함수율(VWC) 범위 3차 다항식에 따른 ECb와 ECp의 관계는 낮은 체적함수율(VWC) 10-60% 구간에서 큰 오차를 보였다. 체적함수율(VWC)범위에 따른 센서 측정값(ECb) 및 식물 뿌리가 이용하는(ECp)의 상관관계는 2종류 배지(RW1, RW2) 모두 Paraboloid 식에서 결정계수(R^2) 값이 각각 0.936, 0.947로 가장 높았다.

추가주제어: FDR 센서, 보정식, 암면, 전기전도도(EC), 체적함수율(VWC), 함수율(MC)

사 사

본 연구는 한국스마트팜 R&D재단(과제번호: 421001-03)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Amente G., J.M. Baker, and C.F. Reece 2000, Estimation of soil solution electrical conductivity from bulk soil electrical conductivity in sandy soils. *Soil Sci Soc Am J* 64:1931-1939. doi:10.2136/sssaj2000.6461931x
- Balendonck J., M.A. Bruins, M.R. Wattimena, W. Voogt, and A. Huys 2005, WET-sensor pore water EC calibration for three horticultural soils. *Acta Hort* 691:789-795. doi:10.17660/ActaHortic.2005.691.97
- Bañón S., S. Álvarez, D. Bañón, M.F. Ortuño, and M.J. Sánchez-Blanco 2021, Assessment of soil salinity indexes using electrical conductivity sensors. *Sci Hort* 285:110171. doi:10.1016/j.scienta.2021.110171
- Bayer A., I. Mahbub, M. Chappell, J. Ruter, and M.W. van Iersel 2013, Water use and growth of *Hibiscus acetosella* 'Panama Red' grown with a soil moisture sensor-controlled irrigation system. *HortScience* 48:980-987. doi:10.21273/HORTSCI.48.8.980
- Corwin D.L., and S.M. Lesch 2005, Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comput Electron Agric* 46:11-43. doi:10.1016/j.compag.2004.10.005
- Havrdá J., E. Gregorova, and F. Oujiri 1989, Electric-conductivity of water-saturated porcelain mixture.1. Method for determining electric-conductivity and its dependence on moisture-content. *Silikaty* 33:367-373.
- Malicki M.A., and R.T. Walczak 1999, Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. *Eur J Soil Sci* 50:505-514. doi:10.1046/j.1365-2389.1999.00245.x
- Mualem Y., and S.P. Friedman 1991, Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Water Resour Res* 27:2771-2777. doi:10.1029/91WR01095
- Nelson P.V., and W.C. Fonteno 1991, Physical analysis of rockwool slabs and effects of fiber orientation, irrigation frequency and propagation technique on chrysanthemum production. *J Plant Nutr* 14:853-866. doi:10.1080/01904169109364247
- Nemali K.S., and M.W. van Iersel 2008, Physiological responses to different substrate water contents: screening for high water-use efficiency in bedding plants. *J Am Soc Hort Sci* 133:333-340. doi:10.21273/JASHS.133.3.333
- Nesmith D.S., D.C. Bridges, and J.C. Barbour 1992, Bell pepper responses to root restriction. *J Plant Nutr* 15:2763-2776. doi:10.1080/01904169209364507
- Peter A., R. Ferrarezi, P. Thomas, and M. van Iersel 2011, In situ measurements of the electrical conductivity (EC) of substrates: The relationship between bulk EC, pore water EC and substrate water content. *HortScience* 46(suppl):198-199.
- Risler P.D., J.M. Wraith, and H.M. Gabor 1996, Solute transport under transient flow conditions estimated using time dominant reflectometry. *Soil Sci Soc Am J* 60:1297-1305. doi:10.2136/

sssaj1996.03615995006000050003x

- Shani U., A. Ben-Gal, E. Tripler, and L.M. Dudley 2007, Plant response to the soil environment: an analytical model integrating yield, water, soil type, and salinity. *Water Resour Res* 43:W08418. doi:10.1029/2006WR005313
- Van der Laan M., R.J. Stirzaker, J.G. Annandale, K.L. Bristow, and C.C. Du Preez 2011, Interpretation of electrical conductivity measurements from ceramic suction cups, wetting front detectors and ECH2O-TE sensors. *S Afr J Plant Soil* 28:244-247.
- Van Loon W.K.P., E. Perfect, P.H. Groenevelt, and B.D. Kay 1991, Application of dispersion theory to time domain reflectometry in soils. *Transp Porous Media* 6:391-406. doi:10.1007/BF00136348