

배지 수분 처리에 따른 토마토 생육과 생리 반응 및 식물 유도 전기적 신호 모니터링

이규원, 최주환, 박근호

한국전자기술연구원

rbdnjs704@keti.re.kr, netside@keti.re.kr, root@keti.re.kr

Monitoring of Tomato Growth, Physiological Responses, and Plant-Induced Electrical Signals as Influenced by Water Content Treatment of Media

Gyuwon Lee, Juhwan Choi, Keunho Park

Korea Electronics Technology Institute

요 약

본 연구는 배지 수분 조건에 따른 토마토의 생육 및 생리 반응을 분석하고, 식물 유도 전기적 신호(plant-induced electrical signal)를 활용한 스트레스 진단 가능성을 평가하고자 수행되었다. 배지 수분 함량을 다르게 설정하였으며, 대조구, 과습 및 건조 처리구를 설정하여 생육, 생리 지표와 식물 유도 전기적 신호를 측정 및 비교·분석하였다. 그 결과, 배지 수분 스트레스 조건에서 생육 및 광합성 관련 생리 지표가 감소하였으며, 식물 유도 전기적 신호 수치 또한 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 식물 유도 전기적 신호는 최대 광합성 속도와 최대 양자 수율과 유의한 상관성을 보였으며, 이를 통해 식물 유도 전기적 신호가 배지 수분 스트레스에 따른 토마토의 생리적 반응을 평가하기 위한 비파괴적 모니터링 지표로 활용 가능성을 확인하였다.

I. 서 론

시설 원예에서 토마토는 대표적인 고부가가치 작물로서, 생육의 안정성과 수량 확보를 위해 작물의 생육을 파악할 수 있는 비파괴적 측정 방법이 요구되고 있다. 배지 수분이 과도하거나 부족할 경우 뿌리의 산소 공급 감소, 양·수분 흡수 불균형 등이 발생하여 생육 저하 및 생리적 스트레스를 유발한다. 기존의 생육 진단 방법은 육안으로 작물의 상태를 확인하거나 초장, 생체중 등 직접 생육 지표를 측정하는 방식을 활용하고 있으며, 해당 방법은 연속적이고 비파괴적인 모니터링에는 한계가 있다. 또한 환경 센서의 데이터만으로는 식물 자체의 생리 반응을 직접 반영하여 작물의 현재 상태를 알기 어렵다. 본 연구에서는 식물의 생체 신호를 기반으로 실시간 모니터링 기술 중 식물의 전기적 반응을 통해 모니터링 기술인 식물 유도 전기적 신호(PIES) 방법을 활용하여 배지 수분 스트레스에 따른 토마토의 생리 반응과 전기적 신호와의 관계를 분석하고, 해당 신호의 스트레스 진단 지표로서의 활용 가능성을 검토하고자 한다.

II. 본 론

본 연구에서는 토마토(*Lycopersicon esculentum* Dufur)를 공시 작물로 하여 비닐온실에서 수행되었다. 실험에 사용된 토마토의 생육 상태를 최대한 균일하게 유지하고, 환경 스트레스에 따른 작물의 반응을 분석하기 위해 온도, 습도, 양액 등의 환경 조건을 최대한 같은 환경을 유지하여 재배하였다. 배지 수분 함량에 따른 스트레스를 유도하기 위해서는 제 2 화방 개화시기에 맞춰 배지 수분 처리를 실시하였다. 처리는 대조구, 과습 처리구, 건조 처리구의 3수준으로 설정하였다. 대조구는 기본 급액 및 배액 조건을 유지하여, 배지 수분 50~60% 수준으로 관리하였으며, 과습 처리구는 급액량을 대조구 대비 2배로 증가시키고 배액량을 제한하여 80%

이상의 배지 수분 함량을 유지하였다. 건조 처리구는 급액량을 대조구 대비 50% 감소 시키고, 배액량을 최대 배출할 수 있게 조절하여 배지 수분 함량을 40% 이하로 설정하였다. 온실 내 환경 요인은 온도, 상대습도, 광량 및 이산화탄소 농도를 측정하였다. 실험 기간 동안 대조구와 처리구 간 환경 조건 차이를 최소화하여 배지 수분 조건에 따른 영향만을 분석할 수 있도록 하였다.

배지 수분 처리에 따른 토마토의 생육 및 생체 정보를 분석하기 위해 생육 지표와 생체 정보를 분석하였다. 생육 지표 평가는 생육 조사 결과를 활용하였고, 정식 후 58일 후 생육조사를 실시하였다. 생육 조사는 초장, 줄기 직경, 개화군 수, 엽수, 엽장, 엽폭, 생체중, 건물중, 건물 함량 및 엽면적을 측정하였다. 생체 정보 평가는 엽록소 함량 지수(SPAD), 최대 양자 수율(Fv/Fm)과 최대 광합성 속도(A_{max})를 측정하여 분석하였다. 측정된 생육 및 생체 정보와 식물 유도 전기적 신호 간의 관계를 분석하기 위해 상관 분석을 실시하였다.

배지 수분 처리에 따른 토마토의 생리 반응을 전기적 신호로 모니터링하기 위해 Junsmeter II(Prumbio, Suwon, Korea)를 이용하여 식물 유도 전기적 신호를 측정하였다. 측정 장치는 태양광 전지판, 채널 박스, 데이터 송수신기 및 스테인리스 핀으로 구성되었으며, 토마토 줄기 하단부에 스테인리스 핀을 삽입하여 휘트스톤 브리지 방식으로 유관속 전기 저항을 측정하였다. 측정된 저항값은 10분 간격으로 수집되어 줄기 직경(D, mm), 바늘 길이(L, mm), 바늘의 지름(d, mm) 및 상수(k)를 이용하여 수식 1과 같이 식물 유도 전기적 신호 값을 산출하였다. 각 처리구별로 5개체를 대상으로 측정하였다.

$$PIES = k \times \frac{1}{R} \times \frac{D-L}{L \times d} \dots\dots\dots (1)$$

생육 및 생체 정보와 식물 유도 전기적 신호 간의 관계는 상관 분석을, 처리 간 차이는 일원배치 분산분석(ANOVA)과 LSD 사후 검정으로 검정하였다.

실험 기간 동안 온실 내 온도, 상대습도는 그림 1, 2와 같이 대조구와 각 배지 수분 처리구 간에 유의한 차이를 보이지 않았다.

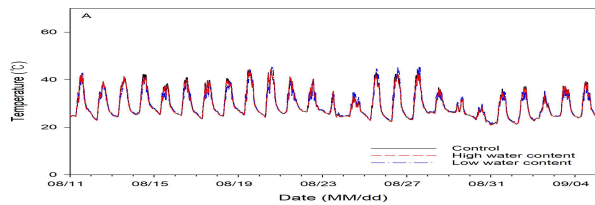


그림 1. 온실 내 온도 그래프

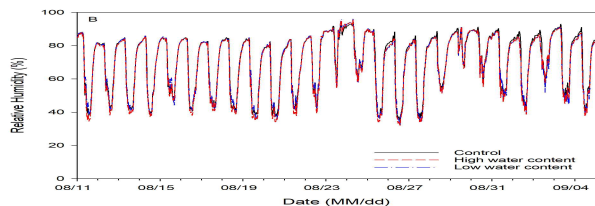


그림 2. 온실 내 상대 습도 그래프

배지 수분 처리 결과, 대조구는 50~60%의 배지 수분 함량을 유지하였다. 그림 3과 같이 과습 처리구는 80% 이상, 건조 처리구는 40% 이하의 배지 수분 상태를 나타냈으며, 배지 수분 처리에 의한 스트레스가 나타났을 것으로 판단된다.

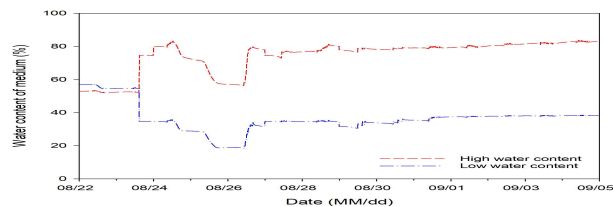


그림 3. 배지수분 함량 그래프

생육 조사 결과, 표 1과 같이 과습 및 건조 처리구에서 대조구에 비해 초장, 엽면적, 생체중 및 건물중이 낮게 나타나는 경향을 보였다. 생체 정보 지표 분석 결과, 표 2와 같이 최대 양자 수율과 최대 광합성 속도 과습 및 건조 처리구에서는 유의적으로 낮게 나타났다.

표 1. 배지 수분 처리에 따른 토마토 생육 지표

Treatment	Plant height (cm)	Stem Diameter (mm)	Flowering group	No. leaves	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)
Control	154±0.4 ^a	8.3±0.4 ^a	2.8±0.2 ^a	13.8±0.4 ^a	35.4±0.7 ^a	30.9±1.5 ^a
High W.C.	144.1±2.1 ^b	6.1±0.1 ^b	2.7±0.1 ^a	13.3±0.2 ^a	30.5±1.4 ^a	24.7±0.9 ^a
Low W.C.	125.3±3.2 ^c	8.0±0.4 ^a	2.1±0.1 ^b	10.3±0.6 ^b	31.9±2.5 ^a	30.7±3.1 ^a

Means separation within columns by Least Square Difference(LSD) at P = 0.05.

Treatment	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		Dry matter ^c (%)		Leaf area (cm ²)
	Leaf	Stem	Leaf	Stem	Leaf	Stem	
Control	151.6±4.7 ^a	141.1±9.6 ^a	15.9±0.4 ^a	12.7±0.7 ^a	10.5±0.2 ^b	9±0.2 ^a	3036.7±152.5 ^a
High WC	129.6±3.5 ^b	111.3±5.4 ^b	14.3±0.5 ^b	10.6±0.5 ^b	11.1±0.3 ^{ab}	9.5±0.1 ^{ab}	2570.8±34.8 ^b
Low WC	115.6±3.1 ^c	100.3±3.2 ^b	13.3±0.4 ^b	10±0.2 ^b	11.5±0.1 ^a	10±0.2 ^b	2406.4±111.9 ^b

^cDry matter is the values of the dry weight divided by the fresh weight.
Means separation within columns by Least Square Difference(LSD) at P = 0.05.

표 2. 배지 수분 처리에 따른 토마토 생체 정보 지표

Treatment	SPAD value	Fv/Fm	Amax (μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
Control	54.3±0.8 ^a	0.83±0.001 ^a	15.03 ^a
High W.C.	53.5±0.6 ^a	0.792±0.009 ^b	13.84 ^b
Low W.C.	52.2±0.1 ^a	0.801±0.003 ^b	13.32 ^b

Means separation within columns by Least Square Difference(LSD) at P = 0.05.

식물 유도 전기적 신호값과 생육 및 생리 지표 간의 상관 분석 결과, 표 3과 같이 식물 유도 전기적 신호와 최대 양자 수율값, 광합성 속도는 각각 0.59, 0.65로 양의 상관 관계를 보였으며, 엽록소 함량 지수와의 상관성은 낮게 나타났다. 이는 표 2와 같이 엽록소 함량지수가 배지 수분 처리에 따른 변화를 나타내지 않았기 때문으로 사료된다.

표 3. 배지 수분 처리에 따른 토마토 PIES와 SPAD, Fv/Fm 및 Amax 간의 상관 계수

	PIES	SPAD	Fv/Fm	Amax
PIES	1			
SPAD	-0.06	1		
Fv/Fm	0.59	0.50	1	
Amax	0.65	-0.63	0.21	1

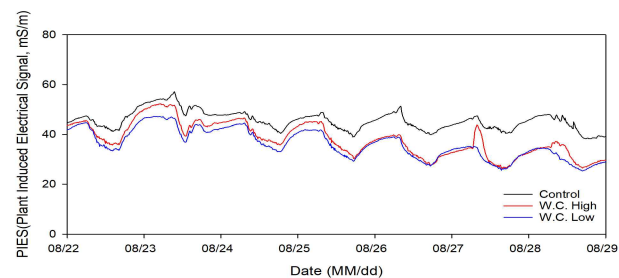


그림 4. 배지 수분 처리에 따른 토마토 식물 유도 전기적 신호 모니터링

III. 결 론

본 연구에서는 배지 수분 처리에 따른 토마토의 생육과 생리 반응을 분석하고 식물 유도 전기적 신호와의 연관성을 통해 생육 지표로서 사용 가능성을 검증하였다. 배지 수분 처리에 따른 스트레스에 대한 영향력을 보기 위해 토마토의 생육과 생리 지표를 측정한 결과, 대조구에 비해 과습과 건조 처리구에서 전반적으로 생육이 낮게 나타났으며 이를 통해 배지 수분 함량에 따른 스트레스가 생육 차이에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다. 식물 유도 전기적 신호와 생리 지표와의 상관분석을 통해 연관성을 확인한 결과, 엽록소 함량 지수를 제외한 지표에서 각각 0.59, 0.65의 높은 양의 상관계수를 보여, 식물 유도 전기적 신호가 토마토의 생리적 스트레스를 평가하기 위한 지표로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 립 식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜 연구개발사업단의 스마트팜다부처 패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음 (RS - 2025-02315577)

참 고 문 헌

- [1] Adams, S. R., Cockshull, K. E., & Cave, C., "Effect of temperature on the growth and development of tomato fruits," *Annals of Botany*, vol. 88, no. 5, pp. 869 - 877, 2001.
- [2] An, C., & Shin, J., "Comparison of growth and productivity of tomatoes according to the media in indoor hydroponics: rockwool, reused rockwool, and coir," *Journal of Bio-Environment Control (Formerly Protected Horticulture and Plant Factory)*, vol. 30, no. 3, pp. 175 - 182, 2021.
- [3] Murchie, E. H., & Lawson, T., "Chlorophyll fluorescence analysis: A guide to good practice and understanding some new applications," *Journal of Experimental Botany*, vol. 64, no. 13, pp. 3983 - 3998, 2013.
- [4] Kim, H. N., Seok, Y. J., Park, G. M., Vyavahare, G., & Park, J. H., "Monitoring of plant-induced electrical signal of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) according to urea fertilizer application," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, 291, 2023.