

과제구분	기관고유	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제명		연구분야	수행기간	연구실	책임자
스마트농업 정밀생산 실용화 기술 개발		채소	'23~'27	원예연구과	정현경
수분스트레스 기반 스마트팜 양액공급기술 개발		채소	'23, '25	원예연구과	정현경
색인용어	수분스트레스, 오이, 스마트팜, 양액 재배				

ABSTRACT

This study aimed to develop and validate a plant-based fertigation control system for greenhouse cucumber using the canopy-air temperature difference (T_c-T_a) as a water stress indicator. Experiments were conducted under semi-forcing (summer) and retarding (autumn) cultivation systems. Irrigation levels were set at 100% (full irrigation) and 33% (restricted irrigation) to analyze T_c-T_a responses. In summer, T_c-T_a ranged from -0.24 to -0.64°C at full irrigation but increased to -0.16 to 0.07°C under restricted irrigation. In autumn, T_c-T_a ranged from -0.37 to -0.72°C at full irrigation and increased to $0.30-0.38^\circ\text{C}$ under water deficit, indicating a distinct canopy temperature rise. Based on the T_c-T_a and vapor pressure deficit (VPD) relationship, season-specific lower baselines were established (summer: $dT_{\text{lower}} = -1.45\text{VPD} - 1$; autumn: $dT_{\text{lower}} = -1.339\text{VPD} - 0.7$), and the Crop Water Stress Index (CWSI) was calculated.

The model was implemented in a smart irrigation system and compared with solar radiation- and timer-based irrigation methods. In spring cultivation, the solar radiation-based treatment showed the highest yield ($7,993.1\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$; $11,222\text{ kg}\cdot 10\text{a}^{-1}$), while the water stress-based treatment achieved higher water use efficiency ($97.3\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$). In summer, yields were similar between water stress-based ($3,875.7\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$) and radiation-based ($3,851.3\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$) treatments, whereas the timer-based treatment resulted in lower yield ($2,765.7\text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$).

These findings indicate that the T_c-T_a -based model effectively reflects plant water status and can improve irrigation efficiency in smart greenhouse systems, although further refinement is needed to enhance control stability under fluctuating environments.

Key words: Canopy temperature, Water stress, CWSI, Irrigation control, Cucumber

1. 연구목표

본 연구는 스마트팜 환경에서 재배되는 오이를 대상으로, 엽온-대기온 차이(Tc-Ta)를 활용한 수분스트레스 기반 양액 공급 기술을 개발하고, 이를 기존의 일사량 기반 및 타이머 방식과 비교, 검증함으로써 현장 적용 가능한 정밀 급액 관리 기술을 개발하고자 수행하였다. 작물의 수분스트레스 측정에 관한 연구는 배추, 복숭아 등 노지에서 재배되는 작물을 대상으로 수행된 사례가 보고된 바 있으며, 이러한 연구는 궁극적으로 작물의 수분 상태를 정량적으로 평가하여 관수 전략 수립에 활용하고자 하였다(이 등, 2019; 김 등, 2019). 한편 시설 온실에서 재배되는 작물의 경우 토마토를 대상으로 엽온 측정을 이용한 수분스트레스 모델 구축 연구가 수행된 바 있다(Asdrubal et al., 2015; Zhang et al., 2019).

스마트온실 재배에서 관수 관리는 작물의 생산성과 품질을 좌우하는 중요한 요소로 알려져 있다. 그러나 현재 시설재배에서 널리 사용되는 누적 일사량 기반 급액 방식은 실제 작물의 수분 상태를 직접 반영하지 못하는 한계가 있으며(Jones et al., 2004), 관련 장비의 도입 비용이 상대적으로 높아 재배 규모가 영세한 경기도 내 오이 재배 농가에서는 적용에 부담이 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 작물체의 생리적 반응을 직접 반영할 수 있는 엽온-대기온 차이를 수분스트레스 지표로 활용하여, 실시간 작물 상태 기반의 급액 제어 알고리즘을 구축하고 상대적으로 저렴한 급액 기기를 개발하고자 하였다. 1차적으로 스마트팜 환경에서 오이의 수분 상태와 엽온 반응 특성을 분석하여 수분스트레스 모델을 설정하고, 2차적으로 해당 모델을 적용한 급액 장치를 제작하여 봄 및 여름 작기에 실증시험을 수행하였다.

수분스트레스 기반 급액 방식과 일사량 기반 양액기 및 타이머 방식 간의 급액량, 배액율, 생육 특성, 수량성 및 상품과율의 차이를 비교·분석하였다. 또한 처리별 총 급액량 대비 과실 생산량을 산출하여 물이용효율을 평가하고, 물 절감 가능성과 생산성 유지 여부를 검토하였다. 아울러 계절별 환경 조건 변화에 따른 기술의 안정성을 분석하여 현장 적용 시 개선이 필요한 요소를 도출하였다. 이를 통해 작물 생리 반응을 기반으로 한 정밀 급액 제어 기술을 확립하고, 물 이용 효율을 향상시키면서도 안정적인 수량 확보가 가능한 스마트팜 양액 관리 체계를 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 작형별 오이 재배

본 연구는 2023년과 2025년에 경기도 화성에 위치한 경기도농업기술원의 시험포장(연동형 플라스틱온실, 피복재 PO필름)에서 실시하였고 공시작물로 백다다기 오이를 사용하였다. 재배 배지는 코이어 슬라브 (110×25×10cm, HyosungONB, Daejeon, Korea)에 20cm 간격으로 3주 정식하였다. 재식밀도는 m²당 1.64주이며 원줄기 유인 재배하였고 재배 중 엽수는 15~16매를 유지하도록 적엽하며 재배하였다(표 1).

표 1. 오이 재배 작형

2023년	봄작기(반축성)	여름작기(반축성)	가을작기(시설억제)
품 종	스마일 백다다기	청어람 백다다기	스마일 백다다기
정식일	2023-01-11	2023-05-09	2023-09-01
수확기간	2023-03-06 ~ 04-24	2023-06-08 ~ 08-16	2023-10-08 ~ 11-27
2025년	봄작기(반축성)	여름작기(반축성)	
품 종	스마일 백다다기	청어람 백다다기	
정식일	2025-01-16	2025-06-02	
수확기간	2025-03-05 ~ 05-13	2025-07-06 ~ 07-30	

MultifeedTM 20-20-20(Haifa Group, Israel) 복합비료를 이용하여 표 2의 수준의 영양 성분을 포함하도록 조제하였고 누적일사량 급액제어 방식 (Magma 1000, Green Control System Ltd., Gwangju, Korea)으로 공급하며 재배하였다. 정식 후 30일까지는 양액의 pH와 EC를 각각 6.0, 1.2dS·cm⁻¹로 공급하였고 이후 배액 EC 0.8~1.2ds/cm⁻¹ 범위, 배액을 30~40%로 재배 관리하였다.

표 2. 오이 재배 양액 조성표

영양성분	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	SO ₄ -S
mg/L	71	2.7	74	199	35	17	12

나. 오이 수분스트레스 모델 생성을 위한 데이터 수집

수분스트레스 모델 구축을 위해 급액량 수준과 잎 위치에 따른 엽온-대기온 차이 (Tc-Ta)를 조사하였다. 수분스트레스 판정은 엽온-대기온 차이와 수증기압포차(VPD, Vapor Pressure Deficit)의 관계를 이용한 작물 수분스트레스 지수(CWSI, Crop Water Stress Index) 개념(Idso et al., 1982)을 기반으로 하였다. 급액량은 100% 및 33% 두 수준으로 설정하였고, 엽온 측정 잎은 생장점을 기준으로 3cm이상의 완전 전개엽을 1번으로 할 때 하방으로 3번, 4번, 5번째 잎을 대상으로 하였다. 엽온(Tc)은 접촉식, 비접촉식 두가지 방법으로 수집하였는데, 열화상 카메라(Flir systems, SE/FLIR-SC660, USA), 잎클립센서(Implexx, LT-IT, Austrailia)를 활용하였다. 대기온(Ta)은 엽온과 동일 높이의 유인줄에 온습도 로거(HOBO® MX Temp/RH, USA)를 메달아 측정하였다.

다. 엽채류 수분스트레스 모니터링 장치의 개선

수직농장 엽채류 재배에 활용하고자 개발하였던 장치의 스마트팜 오이 재배 현장 적용을 위하여 장치의 센서 보정 및 구동 조건을 개선하였다. 수집된 데이터는 외부 환경 요소에 의한 변동성을 줄이기 위해 1분 단위 측정값의 평균값을 산출하여 제어



에 활용하였다. 장치의 작동 시간은 일중 증산이 활발한 05:00부터 16:00까지로 설정하였으며, 과도한 급액 작동을 방지하기 위하여 최소 1시간 간격으로 구동되도록 제한하였다. 수분스트레스 판정에는 $dT_{lower} = -1.45VPD - 1$ 식을 적용하여 기준선을 설정하였으며, 대기온과 상대습도를 이용해 VPD를 산출한 후 CWSI를 실시간으로 계산하도록 구성하였다. 계산된 CWSI값이 설정된 임계값을 초과할 경우 자동으로 급액이 이루어지도록 제어 알고리즘을 구현하였다.

표 3. 수분스트레스 모니터링 장치 개선

보완 사항	상세 내용
대기온 보정	대기온 = $((f_DHR_T)+6.5374)/1.4437$
습도 보정	습도 = $((f_DHR_H)-0.4235)/0.871$
구동조건	1분 데이터 평균값으로 구동
구동 시간 제한	5~16시, 최소 1시간 마다 구동
	$dT_{lower} = -1.45VPD - 1$
수분스트레스 수식적용	$VPD = (0.61 * EXP(17.269 * (대기온 / (대기온 + 233.3)))) * (1 - 습도 / 100)$ $CWSI = (T_c - T_a - dT_{lower}) / (3.4 - dT_{lower})$

라. 수분스트레스 기반 급액 장치 실증



그림 1. 급액기술 실증 장치

((A)수분스트레스 기반 급액장치 (B) 일사량 기반 양액기 (C) 타이머)

수분스트레스 기반 급액 장치의 실증을 위해 그림 1의 3가지 기기를 이용하여 실증 실험을 추진하였다. 재배 기간은 봄작기 2025년 3월 18일~5월 13일, 여름작기 2025년 6월 23일~8월 4일이었고, 일출 1시간 전~일몰 2시간 까지의 양액을 공급하였다. 급액 개시를 위한 기준은 일사량 기반 양액기 100 J·cm⁻²당 100 ml, 타이머 방식은 1시간 간격이었다. 수분스트레스 기반 급액 장치의 경우 오이 수분스트레스 모델에 따라 수분스트레스 지수가 0.8이상일 경우 급액이 개시되도록 하였다. 월별 최소·최대 대기시간을 설정하여 일사량 기반 급액을 제어하였으며, 수분스트레스 및 타이머 처리구는 월별 1회 관수량 기준에 따라 급액량을 설정하며 재배하였다.

재배 중 일일 및 주간 평균 급액량(ml·plant⁻¹·day⁻¹), 급액 횟수, 배액율(%), 총급액량(L), 총급액량-총배액량(L), 물이용효율(gL⁻¹·plant⁻¹)을 조사하였다. 물이용효율은 식물

체 1주당 생산된 과실의 전체 생체중합을 총 급액량의 합으로 나누어 산출하였고, 통계 분석은 처리 간 평균 비교와 다중 분산 분석을 p=0.05 수준에서 수행하였으며, 작기별 반응 차이를 분석하여 계절 환경 조건에서의 기술 적용 가능성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 오이 수분스트레스 모델 생성을 위한 Tc-Ta 수집

급액량 수준과 작기에 따른 Tc-Ta를 분석한 결과(표 4), 여름작기 100% 급액 조건에서는 Tc-Ta가 -0.24~-0.64℃ 범위로 나타나 엽온이 대기온보다 낮게 나타났다. 이는 충분한 수분 공급에 의해 증산이 원활하게 이루어지면서 엽온이 효과적으로 낮아진 결과로 판단된다. 반면 33% 제한관수 조건에서는 Tc-Ta가 -0.16~0.07℃ 범위로 나타나 Tc-Ta의 값이 감소하거나 일부 구간에서는 양의 값으로 전환되는 경향을 보였다. 이는 수분 공급 감소에 따라 증산량이 저하되고 엽온이 상대적으로 상승하였기 때문으로 해석된다.

표 4. 잎순서 및 급액량에 따른 엽온-대기온(Tc-Ta) 차이 (단위: ℃)

잎 순서	여름작기		가을작기	
	100%	33%	100%	33%
3	-0.24±0.947	-0.16±0.878	-0.37±1.098	0.38±1.170
4	-0.64±0.951	-0.02±0.732	-0.72±0.846	0.35±1.183
5	-0.45±1.051	0.07±0.779	-0.56±0.822	0.30±1.036

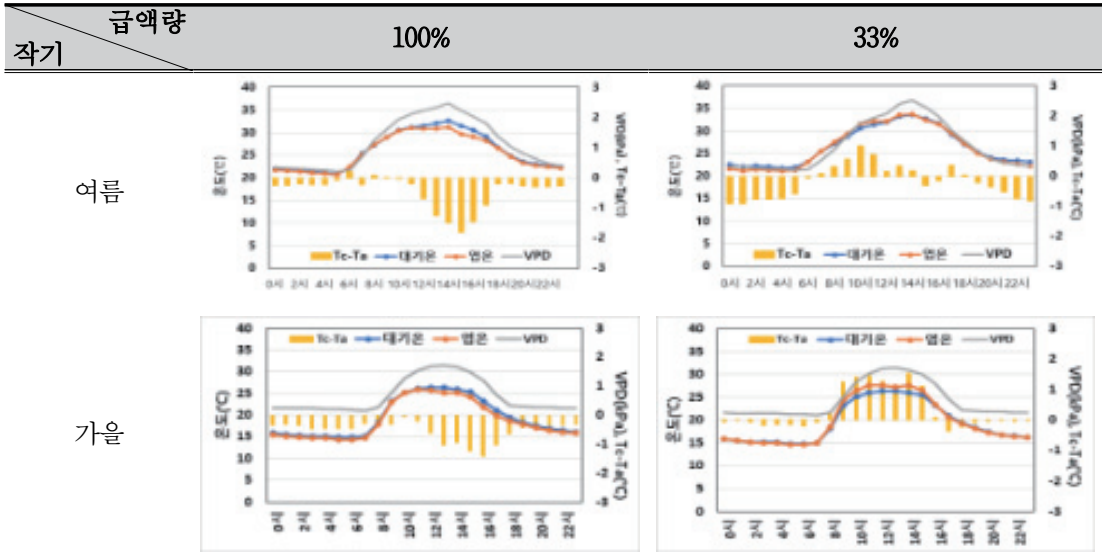
↓ 잎순서 : 생장점 근처 완전 전개 잎 기준

가을작기에서는 100% 급액 조건에서 Tc-Ta가 -0.37~-0.72℃ 범위로 나타났으며, 33% 급액 조건에서는 0.30~0.38℃로 조사되어 제한관수 시 엽온 상승 현상이 더욱 뚜렷하게 나타났다. 특히 가을작기 제한관수 조건에서 Tc-Ta가 지속적으로 양(+)의 값을 보인 것은 수분 부족 상태가 엽온 상승으로 직접적으로 반영된 결과로 판단되었다.



표 5. 시간대별 오이 엽온, 대기온, Tc-Ta 분포

(단위: °C)



시간대에 따른 엽온, 대기온 및 Tc-Ta의 변화를 분석하기 위하여 일중 연속 측정을 실시하였다. 여름작기에서는 오전 시간대 Tc-Ta가 음(-)의 값을 유지하다가 정오 이후 점차 증가하는 경향을 나타냈으며, 특히 제한관수(33%) 처리구에서 양(+)의 값으로 전환되는 빈도가 높았다(표 5). 이는 일사량 증가와 함께 증산 요구가 높아지는 시간대에 수분 부족이 가중되면서 엽온 상승이 뚜렷해진 결과로 해석된다. 일반적으로 작물의 증산은 일사량, 기온 및 수증기압포차(VPD)와 밀접한 관련이 있으며, 이러한 환경요인의 증가에 따라 작물의 수분 요구량이 증가하는 것으로 보고되어 있다(Allen et al., 1998). 가을작기에서도 유사한 경향이 관찰되었으나, 일사량 및 기온 조건의 차이에 따라 Tc-Ta 변동폭이 달라졌다. 특히 일사 강도가 높고 VPD가 증가하는 시간대에 Tc-Ta 값이 크게 증가하는 경향을 보여, 환경 요인이 엽온 반응에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

나. 작기별 수분스트레스 모델 구축

작기별 수분스트레스 모델 구축을 위하여 엽온(Tc), 대기온(Ta), 상대습도(RH) 자료를 이용하여 수증기압포차(VPD)를 산출하고, 이를 기반으로 작기별 기준선(dTlower)을 설정하였다. 수증기압포차(VPD)는 다음 식에 따라 계산하였다.

$$VPD = 0.61 \times \exp\left(17.269 \times \frac{Ta}{Ta + 233.3}\right) \times \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$



표 6. 작기에 따른 수분스트레스 모델 생성

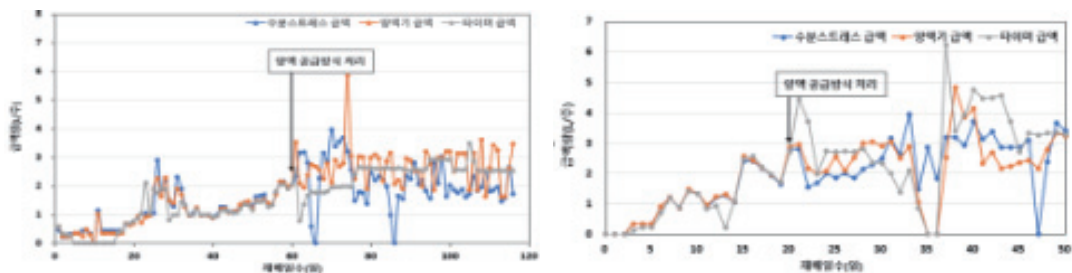
(단위: °C)

구분	여름작기(반축성)	가을작기(시설억제)
VPD Tc-Ta		
dTlower	-1.45VPD-1	-1.339VPD-0.7
CWSI	$\frac{(Tc - Ta) - dTlower}{3.4 - dTlower}$	$\frac{(Tc - Ta) - dTlower}{5.62 - dTlower}$

여름작기의 경우 Tc-Ta와 VPD 간 회귀분석을 통해 하한 기준선(dTlower)을 다음과 같이 도출하였다. $dTlower = -1.45 VPD - 1$ 가을작기(시설억제)에서는 환경 조건 차이를 반영하여 다음과 같은 기준선을 설정하였다. $dTlower = -1.339 VPD - 0.7$ 이후 Tc-Ta 값이 해당 기준선에서 얼마나 이탈하는지를 산출하여 CWSI를 계산하였다(표 6). 본 모델은 스마트팜 환경에서 실시간 수분상태 진단 및 급액 제어가 가능하도록 재료 및 방법 다 향에서 제시한 기존 급액 장치에 적용하였다.

다. 급액 방식별 현장 실증

봄작기에서 처리별 일일 평균 급액량은 전반적으로 일사량 기반 처리구 > 타이머 처리구 ≥ 수분스트레스 처리구의 경향을 보였다. 주간 평균 급액량은 일사량 기반 처리구에서 최대 3,221 ml·plant⁻¹·day⁻¹까지 높게 나타났으며, 수분스트레스 처리구는 1,660~2,815 ml 범위로 상대적으로 낮은 수준을 유지하였다(그림 2).



※양액 공급방식 처리기간: 2025-03-18 ~ 2025-05-13, 2025-06-23 ~ 2025-08-04

그림 2. 양액 공급 방식에 따른 일일 급액량 (좌) 봄작기, (우) 여름작기

배액율은 수분스트레스 처리구에서 29~81%로 변동폭이 가장 크게 나타났으며, 일사량 기반 처리구는 12~39% 범위로 비교적 안정적이었다(표 7). 여름작기에서는 고온·고증산 조건으로 인해 전체 급액량이 증가하였다. 특히 타이머 처리구에서 일부 기간 6,000 ml·plant⁻¹·day⁻¹ 이상으로 급액량이 급증하는 현상이 나타났다(표 8). 이는 시간 기반 제어가 실제 작물 증산 요구를 반영하지 못하여 과잉 급액으로 이어질 수 있음을 시사한다. 반면 수분스트레스 및 일사량 기반 처리구는 비교적 안정적인 범위에서 급액이 이루어졌다. 이와 같은 결과는 기존 연구에서 보고된 경향과 유사하였다. 일사량 기반 급액 방식은 환경 조건 변화에 따라 급액량이 증가하는 특성을 보이며, 센서를 활용한 관수 제어 방식은 작물의 수분 상태를 반영하여 배액량 감소에 효과적인 것으로 보고된 바 있다(Choi et al., 2015). 본 연구에서도 수분스트레스 기반 급액 처리구에서 상대적으로 낮은 급액량과 배액량이 나타나 기존 연구 결과와 유사한 경향을 확인할 수 있었다.

표 7. 양액 공급방식에 따른 주간 평균 급액량, 배액율, 급액횟수(봄작기)

일자	급액처리	평균 급액량 (ml/plant/day)			배액율 (%)			급액횟수 (회)		
		수분스 트레스	일사량	타이머	수분스 트레스	일사량	타이머	수분스 트레스	일사량	타이머
03/21 - 03/27		2,240	2,509	1,798	48	36	27	12	23	15
03/28 - 04/03		2,815	3,221	2,135	41	39	32	17	25	15
04/04 - 04/10		2,054	2,715	2,627	69	31	30	17	25	15
04/11 - 04/17		1,660	2,534	2,588	58	33	30	14	23	16
04/18 - 04/24		2,231	2,616	2,773	64	21	34	18	24	16
04/25 - 05/01		1,795	2,889	2,800	29	12	20	14	26	16
05/02 - 05/08		2,043	2,797	2,584	63	23	18	17	26	18
05/09 - 05/13		1,868	2,333	2,520	81	30	28	15	22	16

표 8. 양액 공급방식에 따른 주간 평균 급액량, 배액율, 급액횟수(여름작기)

일자	급액처리	평균 급액량 (ml/plant/day)			배액율 (%)			급액횟수 (회)		
		수분스 트레스	일사량	타이머	수분스 트레스	일사량	타이머	수분스 트레스	일사량	타이머
06/23 - 06/29		1,959	2,336	5,009	30	40	30	12	18	18
06/30 - 07/06		2,589	2,628	3,296	18	23	11	12	17	15
07/07 - 07/13		2,972	3,532	6,329	12	11	25	12	10	14
07/14 - 07/20		2,486	2,404	6,044	55	53	55	9	18	17
07/21 - 07/27		3,242	3,729	3,366	35	23	94	12	14	8

봄, 여름 작기 모두에서 초장, 최종마디수, 엽수 등 주요 생육 지표는 처리 간 유의적인 차이가 보이지 않았다. 봄작기 총엽면적은 타이머 처리구(12,934 cm²)가 가장 높았으며, 일사량 처리구(12,205 cm²), 수분스트레스 처리구(10,631 cm²) 순이었다. 여름작기에서도 타이머 처리구(15,395 cm²)가 가장 높았으나 통계적 유의성은 인정되지 않았다. 이는 급액량 차이가 일정 수준 이상 확보될 경우 생육량에는 큰 차이를 유발하지 않음을 의미한다(표 9, 10).

표 9. 양액공급 방식에 따른 오이 생육 특성

작기	양액공급 방식	초장 (cm)	최종마디 (개)	최상위화방 (개)	엽수 (개)	총엽면적 (cm ²)
봄작기	수분스트레스	529 ^{NS}	47 ^{NS}	39	21 ^{NS}	10,631 ^{NS}
	일사량	527	48	41	25	12,205
	타이머	519	46	38	25	12,934
여름작기*	수분스트레스	303 ^{NS}	36 ^{NS}	40	20 ^{NS}	13,599 ^{NS}
	일사량	313	36	34	27	14,144
	타이머	324	36	32	28	15,395

*여름작기 생육조사 일자 2025-07-08

표 10. 양액공급 방식에 따른 오이 지상부 생체중

작기	양액공급방식	줄기 (g/plant)	엽 (g/plant)	엽병 (g/plant)
봄작기	수분스트레스	375 ^{NS}	323 ^{NS}	125 ^{NS}
	일사량	394	394	145
	타이머	356	416	158
여름작기	수분스트레스	201 ^{NS}	350 ^{NS}	167 ^{NS}
	일사량	222	378	194
	타이머	212	358	179

봄작기에서 총과중은 일사량 기반 처리구(7,993.1 g·plant⁻¹)가 가장 높았으며, 수분스트레스 처리구(7,363.4 g·plant⁻¹), 타이머 처리구(6,817.2 g·plant⁻¹) 순으로 나타났다(표 11). 예상 단수 또한 일사량 처리구가 11,222 kg·10a⁻¹로 가장 높았다. 수분스트레스 처리구는 비상품과 수가 상대적으로 많아 상품과수량이 감소하는 경향을 보였다. 이는 급액 제어의 불안정성 또는 순간적 수분 부족이 과형 안정성에 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 여름작기에서는 수분스트레스(3,875.7 g)와 일사량 처리구(3,851.3 g) 간 총과중 차이가 거의 없었으며, 타이머 처리구는 2,765.7 g으로 낮게 나타났다. 고온 조건에서 시간 기반 급액은 작물의 생리적 요구를 충분히 반영하지 못해 수량 감소로 이어진 것으로 판단된다.



표 11. 양액공급 방식에 따른 예상 수확량

작기	처리	총 과중 (g/plant)	수확수 (개)	상품과* (개)	비상품과 (개)	상품과수량 (g/plant)	예상단수** (kg/10a)
봄	수분스트레스	7363.4b	32 ^{NS}	22 ^{NS}	10a	4,924b	8,322
	일사량	7993.1a	33	27	6b	6,640a	11,222
	타이머	6817.2c	30	24	5b	5,616b	9,491
여름	수분스트레스	3875.7a	22 ^{NS}	9 ^{NS}	13 ^{NS}	2,210 ^{NS}	3,734
	일사량	3851.3a	26	9	17	1,806	3,052
	타이머	2765.7b	22	10	12	1,811	3,060

*과형지수(곡선길이/직선길이): 1.15미만, 100g 이상 **재식주수: 1.69주/m²

물이용효율은 처리 간 뚜렷한 차이를 보였다(표 12). 봄작기에서는 수분스트레스 처리구가 97.3 gL⁻¹·plant⁻¹로 가장 높았으며, 타이머(82.5), 일사량(65.2) 순이었다. 이는 상대적으로 적은 급액량으로도 일정 수준의 수량을 확보하였음을 의미한다. 여름작기에서는 타이머 처리구가 110.6 gL⁻¹·plant⁻¹로 가장 높게 나타났으나, 이는 배액량이 매우 적어 순급액량이 낮게 계산된 결과로 해석된다. 수분스트레스 및 일사량 처리구는 각각 58.7, 56.6으로 유사하였다. 전반적으로 수분스트레스 기반 방식은 물 절감 측면에서 유리한 경향을 보였으나, 수량성과 상품과율을 동시에 확보하기 위해서는 제어 안정성 개선이 요구된다.

표 12. 양액공급 방식에 따른 급액량 및 물이용효율

작기	양액공급방식	총급액량 (L)	총급액량-총 배액량(L)	배액율 (%)	물이용효율* (g/L/plant)
봄작기	수분스트레스	120	53	56	97.3
	일사량	152	109	29	65.2
	타이머	136	67	51	82.5
여름작기	수분스트레스	96	66	29	58.7
	일사량	95	68	29	56.6
	타이머	97	25	74	110.6

※ 양액 공급방식 처리기간: 2025-03-18 ~ 2025-05-13, 2025-06-23 ~ 2025-08-04

*물이용효율(g/L/plant): 식물체 1주당 과실 생체중 / (총급액량-총배액량)

4. 적요

본 연구는 엽온-대기온 차이(ΔT)를 활용한 수분스트레스 기반 양액 자동공급 기술을 개발하고, 이를 일사량 기반 및 타이머 급액 방식과 비교하여 오이 스마트팜 재배에서의 적용 가능성을 검토하였다.

- 가. 100%와 33% 급액 조건의 $T_c - T_a$ 를 비교한 결과, 제한관수(33%)에서 엽온 상승이 뚜렷하게 나타났다. 이를 바탕으로 여름작기 $dT_{lower} = -1.45VPD - 1$, 가을작기 $dT_{lower} = -1.339VPD - 0.7$ 의 기준선을 설정하여 CWSI를 산출하고 작기별 수분스트레스 모델을 구축하였다.
- 나. 급액 기술 실증 결과, 봄작기 총과중은 일사량 기반 처리구 $7,993.1 \text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$ (예상단수 $11,222 \text{ kg}\cdot 10a^{-1}$)로 가장 높았고, 수분스트레스 처리구는 $7,363.4 \text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$, 타이머 처리구는 $6,817.2 \text{ g}\cdot\text{plant}^{-1}$ 이었다. 여름작기 총과중은 수분스트레스 $3,875.7 \text{ g}$, 일사량 $3,851.3 \text{ g}$ 으로 유사하였으며, 타이머 처리구는 $2,765.7 \text{ g}$ 으로 가장 낮았다.
- 다. 물이용효율은 봄작기에서 수분스트레스 처리구가 $97.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$ 로 가장 높았으며, 일사량 65.2 , 타이머 $82.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$ 순이었다. 여름작기에서는 각각 58.7 , 56.6 , $110.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{plant}^{-1}$ 로 나타났다.
- 라. 이상의 결과, 엽온-대기온 차이 기반 수분스트레스 모델은 작기별 환경 특성을 반영하여 수분 상태를 민감하게 진단할 수 있었으며, 물 절감 효과 측면에서 활용 가능성이 확인되었다. 다만 수량 안정성 확보를 위해서는 센서 보정 및 제어 알고리즘의 추가 개선이 필요한 것으로 판단된다.

5. 인용문헌

- 김민영, 등. 2019. 관개수준별 사과나무의 엽온 및 수분 스트레스 지수 변화 분석. 61(5):23~31.
- 이희수, 등. 2019. 정밀 관수 제어를 위한 배추의 수분스트레스 지수 개발. Horticultural Science and Technology. 37(4):490-498.
- 최은영, 등. 2016. 토마토 코이어 수경재배에서 FDR센서, 적산일사량센서 및 타이머 급액방식에 따른 급배액량, 생육 및 과실수량 비교. 25(1):63-70.
- Allen, R.G. et al. 1998. Crop evapotranspiration - FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO.
- Asdrubal Jesus Farias Ramirez, et al. 2015. Determination of crop water stress index for tomato cherry (*Lycopersicon Solanum* var. cerasiforme.) using a thermal camera. Rev. Bras. Agric. Irr. 9(4):218-224.



- Idso, S.B. 1982. Non-water-stressed baselines: A key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27: 59-70.
- Jones, H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany* 55: 2427-2436.
- Zhang, Y. et al. 2019. Thermal imaging for plant water stress detection. *Agricultural Water Management* 213: 350-360.

6. 연구결과 활용제목

- 실내 재배 엽채류 식물에 대한 양액 공급 이상 검출 방법 및 장치(기술이전, 2025년)
: 특허 제10-2782314호

7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도	
						23	25
수분스트레스 기반 스마트팜 양액공급기술 개발	책임자	원예연구과	농업연구사	정현경	세부과제 총괄	○	○
	공동연구자	원예연구과	농업연구사	이영석	자료 조사	○	-
	〃	〃	〃	박남원	경제성 분석	○	-
	〃	〃	〃	김혜형	경제성 분석	-	○
	〃	〃	〃	이슬기	실증실험 추진	-	○
	〃	〃	〃	안주연	데이터 분석	-	○
	〃	〃	농업연구관	이지영	사업화추진	○	○
	〃	〃	〃	심상연	사업화추진	-	○
	〃	〃	〃	이수연	방향제시	○	-
〃	〃	〃	김진영	방향제시	-	○	