

| 과제구분                      | 기본                       | 수행시기 |         | 전반기            |     |
|---------------------------|--------------------------|------|---------|----------------|-----|
|                           |                          | 연구분야 | 수행기간    | 연구실            | 책임자 |
| 연구과제 및 세부과제               |                          | 연구분야 | 수행기간    | 연구실            | 책임자 |
| 식물공장 상용화 및 연중 생산기술 개발     |                          | 식물공장 | '19~    | 농업기술원<br>원예연구과 | 정윤경 |
| 식물공장 엽채류 수분 스트레스 측정 기술 개발 |                          | 식물공장 | '20~'21 | 농업기술원<br>원예연구과 | 정현경 |
| 색인용어                      | 식물공장, 엽채류, 수분 스트레스, 모니터링 |      |         |                |     |

### ABSTRACT

Under the insufficient water condition, plants close the stomata and suppress transpiration to minimize water loss. In this project, we developed a device capable of monitoring water stress in order to prevent decrease in production and quality of leafy vegetables grown in plant factories. On the basis of previous study (Idso et al., 1981), water stress was calculated through the difference between leaf temperature ( $T_c$ ) and atmospheric temperature ( $T_a$ ).  $T_c$  and  $T_a$  were measured by using the thermal image sensor AMG 3388 and DHT 22, respectively, which sense the infrared temperature, In a closed plant factory where temperature and humidity are controlled by thermo-hygrostat, the crops were under a water stress condition when  $T_c$  was same as  $T_a$ , and in extreme cases, it was found that the leaf temperature rose by up to  $2^{\circ}\text{C}$ . We set the nutrient solution supply system to operate when the atmospheric and the leaf temperature were the same, that is,  $T_c - T_a = 0$ . After 1 hour after nutrient solution supply was stopped, nutrient solution supply was re-started, and after 6 times supply at 30 minute intervals, the water stress index showed a value of 0.4 or less, confirming the water stress in crops was alleviated.

**Key words** : Plant Factory, Leafy green, Crop Water Stress Index(CWSI), Salad production

## 1. 연구목표

건강에 대한 관심이 높아짐에 따라 샐러드 시장 규모를 가늠할 수 있는 신선편이 과일·채소 시장은 2018년 8,894억 원, 2019년 9,369억 원, 2020년에는 1조 1,369억 원으로 성장하였다(한국농촌경제연구원, 2020). 이에 따라 엽채류 수경재배에 관한 관심과 수요가 증가하고 있으며 기후 변화에 상관없이 365일 농작물을 생산할 수 있는 식물공장의 필요성이 증대되고 있다.

식물공장은 다단의 재배대를 이용하여 재배하므로 단위 면적당 생산량이 1,000포기/㎡에 도달할 정도의 생산 집약적 시설이다. 작물재배시 수분이 부족할 경우 추가적인 수분 손실을 줄이기 위해 기공을 닫아 증산을 저하시키고 이로 인해 엽온이 상승하는데 이를 수분 스트레스라고 하며 극심한 경우 생산물의 품질 저하를 초래하게 된다.

작물 수분 스트레스를 직접적으로 측정하는 방법은 기공 전도도, 엽수분포텐셜, 상대수분 함량 측정법이 있으나 측정에 소요되는 시간 및 노력이 크다는 단점이 있다(Bellvert et al., 2016). 반면 적외선 온도측정 방법을 이용한 간접적 측정법은 측정에 필요한 적외선 센서 가격이 저렴하고 측정이 용이하여 관련 연구들이 많이 이루어지고 있다 (Kim et al., 2015; Calera et al., 2017).

본 과제는 적외선을 온도 측정법 기반으로 엽채류의 수분 스트레스를 측정하고 이를 통해 식물공장 재배 엽채류의 생육 상황을 모니터링하는 기기를 개발하고자 수행하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 수분 스트레스 측정을 위한 열화상 카메라 위치설정

작물의 수분 스트레스(Crop Water Stress Index, CWSI)는 작물이 수분에 대하여 느끼는 스트레스 정도를 0에서 1 사이의 값으로 표현하는 지수이다. 작물의 수분 스트레스는 대기 온도, 엽온, 상대습도의 3가지 값을 사용하여 산출하였다.  $dT$ 는 엽온과 대기 온도 간의 차이(°C),  $dT_u$ 는 극심한 수분 스트레스로 증산이 일어나지 않을 때의 엽온과 대기 온도간의 차이(°C),  $dT_l$ 은 충분한 수분 공급 하에서 수분 스트레스가 없을 때의 엽온과 대기 온도간의 차이(°C)이다(Idso, 1981).

$$\text{수분 스트레스 산출식} = \frac{(dT - dT_l)}{(dT_u - dT_l)}$$

고정형 열화상 카메라(SE/FLIR-SC660, FLIR), 휴대용 열화상 카메라(FLIR ONE Pro-iOS, FLIR)를 활용하여 측정하였고 대기 온·습도는 온·습도 센서(1-800-LOGGER MX1101-01 Temp/RH, ONSET)로 측정하였다. 엽채류의 엽온 측정의 정확도를 높이기 위한 촬영 위치를 선정하고자 측면 촬영과 45°상부 촬영 두 가지 조건에서 20~30cm 거리에 적외선 센서와 열화상 카메라를 고정 설치하여 시험하였다.

### 나. 엽채류 작목에 따른 수분 스트레스 모델

시험은 경기도농업기술원 완전 밀폐형 식물공장에서 수행되었다. 시험작물로 청경채, 상

추 ‘생채’, ‘피넬’을 2~3일 최아시키고 종자를 우레탄 스펀지에 파종 후 육묘실에서 10~15일 육묘하였고 재배 베드에서 20~25일간 재배하였다. 재배상의 환경조건은 광주기 16/8hr, 광량 200~300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 광원 Red:Blue = 1:1, 이산화탄소 농도 1,000ppm, 상대습도 60~70%로 유지하였다. 양액은 야마자키 엽채류 양액 (육묘기 0.7, 정식 후 1주일 1.5, 재배기 2.0ds/cm)을 이용하여 NFT 수경 방식으로 재배하였다. 양액 공급 이상 상황 발생을 가정하여 인위적으로 공급을 중단한 후 10분 간격으로 엽온을 측정하며 엽채류 품종별로 수분 스트레스 모델식을 산출하였다.

### 다. 수분 스트레스 모니터링 시스템 개발

대기 온·습도, 엽온을 얻기 위한 메인 제어기로 아두이노 나노를 사용하였다. 대기온·습도 값은 DHT21(Am2301, Aosong Electronics Co. Ltd.) 센서, 엽온 값은 적외선 배열 센서 그리드(AMG 8833, Panasonic)를 활용해서 추출하였고 추출된 값은 TFT-LCD 디스플레이 (ST7735, Sitronix technology corp.)를 이용하여 엽온 값을 확인할 수 있도록 하였다. TFT 디스플레이는 8×8 사이즈의 디스플레이 표시하고 이중 중앙의 2×2의 네 개의 픽셀값의 평균을 식물체의 엽온으로 인식하도록 설계하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 가. 수분 스트레스 측정을 위한 열화상 카메라 위치설정

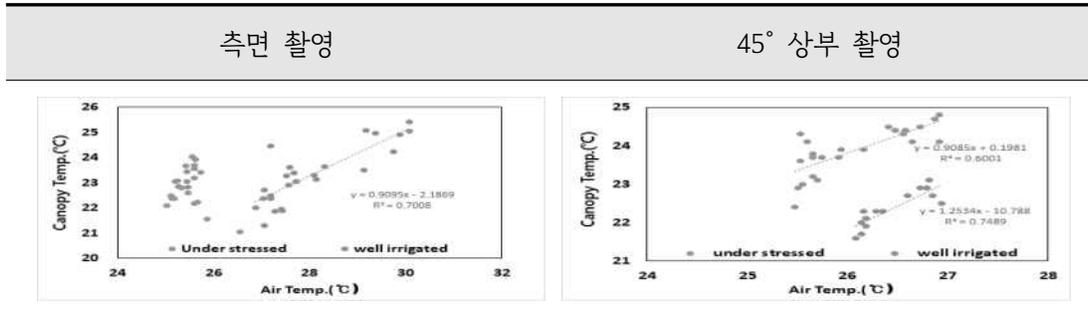


그림 1. 열화상 카메라 촬영 위치에 따른 수분 스트레스 하의 엽온 분포

열화상 카메라의 위치를 측면, 45°상부에 고정하고 양액 정상 공급상황과 수분 스트레스 상황 두 가지 조건에서 대기 온도와 엽온 분포를 측정한 결과, 수분 스트레스에 놓였을 때 측면과 45°상부에서 모두 엽온 상승이 관찰되었고 45°상부 촬영하는 경우가 정상 양액 공급 상황과 수분스트레스 상황의 구별이 더 명확하게 나타났다(그림 1).

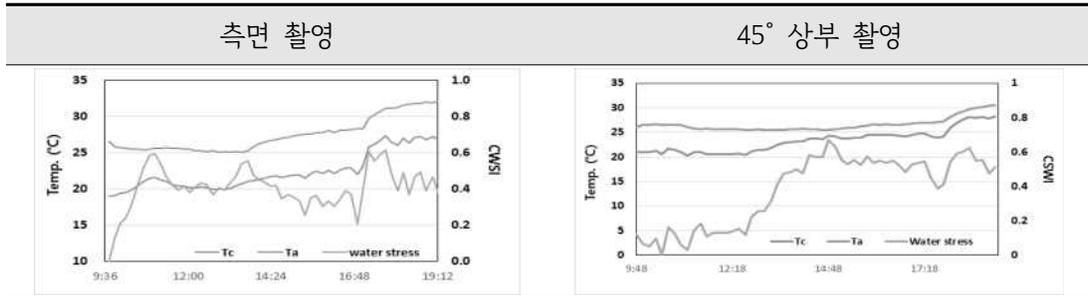


그림 2. 열화상 카메라 촬영 위치에 따른 수분 스트레스 변화

측면 촬영하는 경우, 양액 공급 중단 이후 1시간 이내로 수분 스트레스 지수가 급격하게 증가하였으나 시든 잎이 위조됨에 따라 큰 잎에 가려져 있던 중앙부의 잎 온도가 측정되어 수분 스트레스 값이 오히려 내려가는 것으로 나타났다. 반면 45° 상부 촬영하는 경우 양액 공급 중단 3시간 이후부터 수분 스트레스 수치가 0.6 이상으로 증가하여 일정하게 유지되는 것으로 나타나 수분 스트레스 산출을 위해서는 45° 상부에서 촬영하는 것이 적합하다고 판단하였다(그림 2).

### 나. 엽채류 작목에 따른 수분 스트레스 모델

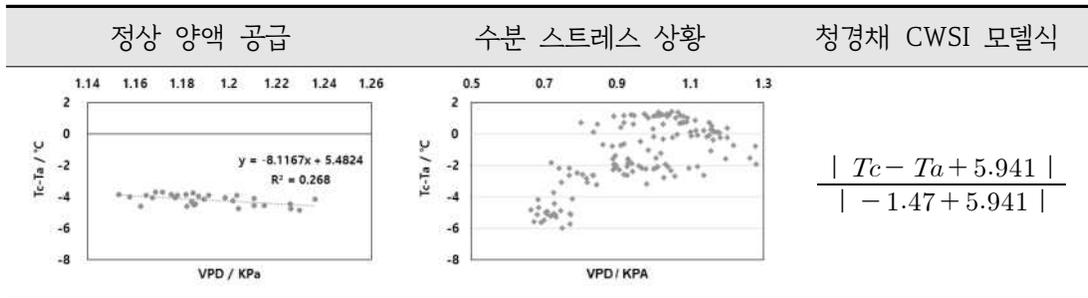


그림 3. 청경채 수분 스트레스 모델

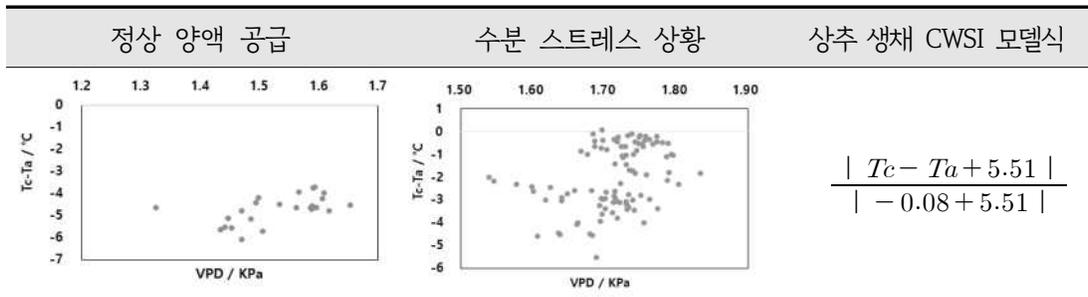


그림 4. 상추 '생채' 수분 스트레스 모델

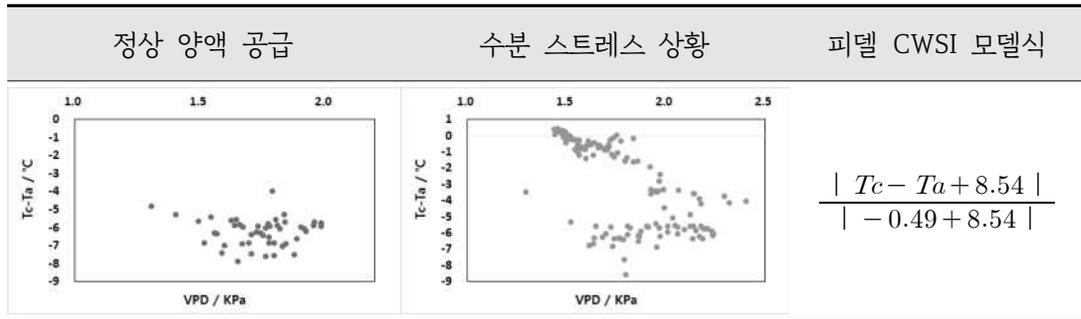


그림 5. 상추‘피델’ 수분 스트레스 모델

밀폐형 식물공장의 수분 스트레스 모델을 개발하고자 정상 양액 공급할 때와 수분 스트레스 상황에서의 엽온(Tc)-대기온(Ta) 값의 차이를 조사하였다. 노지 재배의 경우 작물의 증산 작용이 최대가 되면 엽온이 대기 온도보다 1~4도 정도 낮게 나타나며, 이때의 CWSI는 0이고 작물이 증산 활동을 하지 않아 엽온이 대기 온도보다 4~6℃ 정도 높을 때는 CWSI가 1이 된다고 보고되었다(Jones, 2004; O’Shaughnessy et al., 2012). 그러나 밀폐형 식물공장 환경 내에서는 습도가 높고 바람이 불지 않기 때문에 정상 양액 공급상황에서 Tc-Ta 값의 차이가 -4~-8℃ 였고, 수분 스트레스 상황의 경우 Tc-Ta 값의 차이가 최대 1℃로 나타났다(그림 3, 4, 5). 이런 결과를 바탕으로 식물공장에서는 대기 온도나 엽온의 온도가 같은 경우 수분 스트레스 상황에 있다고 판단하여 수분 스트레스 모니터링 시스템 개발에 적용하였다.

#### 다. 수분 스트레스 모니터링 시스템 개발

식물공장 내 수분 스트레스 모니터링 시스템은 그림 6과 같이 작물 수분 스트레스를 검출할 수 있도록 대기온-습도 센서, 열화상 센서, 디스플레이로 구성되어 있으며 아두이노 나노 보드를 마이크로 컨트롤 유닛(MCU)으로 사용하였다. 아두이노는 컴파일된 펌웨어를 USB를 통해 업로드를 쉽게 할 수 있어 MCU를 다뤄보지 않은 초보자들도 쉽게 접근하여 개발할 수 있는 장점이 있다(Kim, J.H., 2014). 식물공장 내 다수의 베드의 생육상황을 모니터링하기 위해 3개의 모니터링 장치를 개발하고 온도, 습도, 엽온, 수분 스트레스 값을 확인할 수 있도록 프로그램을 구현하였다(그림 6). 모니터링 프로그램에서 품종별로 산출된 수분 스트레스 값이 0.8 이상일 경우 수분 스트레스 표시 값이 적색 음영으로 나타나 작업자에게 알림을 줄 수 있도록 하였고(그림 6) 양액 공급 모터와 연결된 릴레이에 작동 신호를 줌으로써 양액을 공급하도록 설계하였다(그림 7).



| 경기도농업기술원 | 온도 (°C) | 습도 (RH %) | 엽온 (°C) | 수분 스트레스 |
|----------|---------|-----------|---------|---------|
| TRAY1    | 29.0    | 49.0      | 25.9    | 0.5     |
| TRAY2    | 29.4    | 48.9      | 28.2    | 0.8     |
| TRAY3    | 28.6    | 49.5      | 27.6    | 0.8     |

LAST UPDATE: 2021/09/14 01:43:59

그림 6. 수분 스트레스 검출 기기(좌) 및 모니터링 프로그램(우)

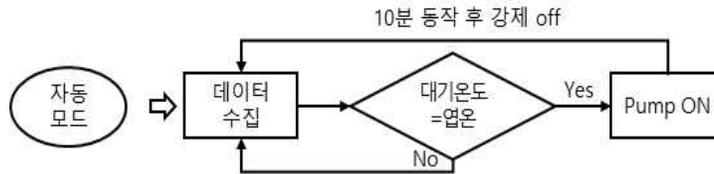


그림 7. 수분 스트레스 모니터링 시스템 작업 회로도

### 라. 수분 스트레스 기반 양액 공급 시스템

수분 스트레스 모니터링 시스템을 엽채류 재배 중인 식물공장 내에 설치하여 활용한 결과, 급액 중단이 발생 후 수분 스트레스 값이 증가하는 것이 관찰되었다. 급액 중단 1시간 후 수분 스트레스 값이 0.8 이상으로 증가하여 모니터링 시스템에서 작동시킨 양액 모터에 의해 급액이 시작되었으며 급액 중단 후 4시간까지 7회 급액된 후 수분 스트레스가 해소되었다(그림 8).

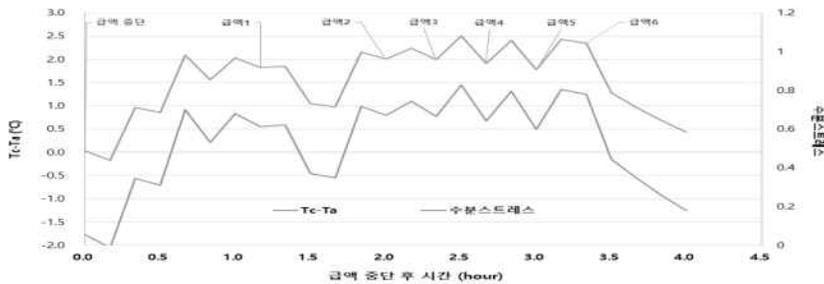


그림 8. 급액 중단에 따른 엽채류 엽온 및 수분 스트레스 변화

#### 4. 적 요

식물공장의 양액 이상 공급을 조기에 모니터링 할 수 있는 장치를 개발하고자 2021년까지 시험한 결과는 다음과 같다.

- 가. 수분 스트레스 모니터링을 위한 기기 개발을 위해서 식물체의 엽온( $T_c$ ) 추출은 적외선 배열 센서 그리드(AMG3388)를 활용하였고 TFT-LCD 디스플레이를 이용하여 엽온 값을 시각화하고 대기온도( $T_a$ )는 DHT21 센서로 측정하도록 기기를 설계하였다.
- 나. 식물공장 내 재배 엽채류의 수분 스트레스 산출을 위해 양액 공급 이상시 온도 상한 값과 정상 양액 공급 시 대기온도와 엽온 차이값을 조사하였다. 항온항습기로 온·습도가 조절되는 밀폐형 식물공장의 경우는 엽온( $T_c$ )이 대기온도( $T_a$ )와 같을 때부터 수분 스트레스 상황에 놓여있는 것으로 나타났으며 극심한 경우 엽온이 최대 2°C 가량 높게 나타나 대기온도와 엽온이 같을 때 ( $T_c - T_a = 0$ ) 급액이 개시되도록 설정하였다.
- 다. 설계한 기기를 엽채류 재배 중인 식물공장 내에 설치하여 적용한 결과, 급액 중단 발생 1시간후부터 엽온 상승으로 인한 수분 스트레스를 감지하여 급액 공급이 시작되었으며 급액 중단 후 4시간까지 6회 급액되어 스트레스 지수가 정상적으로 회복되었다. 이와 같은 결과로 식물공장 내에서 엽온에 기반한 수분 스트레스 모니터링이 가능하였고 이를 통한 급액 관리가 가능한 것으로 판단되었다.

#### 5. 인용문헌

- Bellvert, J., J. Marsal, J. Birona, V. Gonzalez-Dugo, E. Fereres, S. L. Ustin, and P. J. Zarco-Tejada, 2016. Airborne thermal imagery to detect the seasonal evolution of crop water status in peach, nectarine and saturn peach orchards. *Remote Sensing* 8(1). pp. 39-56.
- Calera, A., I. Campos, A. Osann, G. D'Urso, and M. Menenti, 2017. Remote sensing for crop water management: From ET modeling to services for the end users. *Sensors* 17(5) pp. 1104-1129.
- Jones, H. G., 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research* 41. pp. 107-163.
- 김상호, 이계임, 허성윤, 이욱직. 2020. 신선편이 과일채소 시장 변화와 대응과제. 한국농촌경제연구원.
- Kim, M., S. Kim, Y. Kim, Y. Choi, and M. Seo, 2015. Infrared estimation of canopy temperature as crop water stress indicator. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 48(5). pp. 499-504.
- Kim, J.H., Kim, H.w., Song E.H. 2014. An Efficient Privacy Scheme Based on Smart Multimedia Devices, *Future Information Technology*, vol 309. pp. 920.

이지웅. 2019. 아두이노를 이용한 저가형 스마트팜 제어시스템 구현. 전남대학교.

S. B. Idso, R. J. Reginato, R. D. Jackson & P. J. Pinter Jr. 1981. Measuring yield-reducing plant water potential depressions in wheat by infrared thermometry. Irrigation Science. vol. 2, pp. 205-212.

## 6. 연구결과 활용제목

- 실내 다단계배 양액 이상 공급 확인을 위한 모니터링 장치(특허출원)

## 7. 연구원 편성

| 세부과제                            | 구분    | 소속    | 직급    | 성명  | 수행업무       | 참여년도 |     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-----|------------|------|-----|
|                                 |       |       |       |     |            | '20  | '21 |
| 식물공장 엽채류<br>수분 스트레스 측정<br>기술 개발 | 책임자   | 원예연구과 | 농업연구사 | 정현경 | 세부과제<br>총괄 | ○    | ○   |
|                                 | 공동연구자 | 농업기술원 | 농업연구관 | 정윤경 | 연구자문       | ○    | ○   |
|                                 |       | "     | 농업연구사 | 이영석 | 자료조사       | ○    | ○   |
|                                 |       | "     | "     | 박남원 | 통계분석       | -    | ○   |
|                                 |       | "     | 농업연구관 | 전명희 | 통계분석       | ○    | -   |
|                                 |       | "     | "     | 원선이 | 방향설정       | ○    | ○   |
| "                               | "     | 조창휘   | 방향설정  | ○   | -          |      |     |