

분광 영상 분석을 통한 딸기 배지 함수율 예측 방법

정수호, 윤가윤, 이규원*, 최주환*, 박근호*

전라남도농업기술원, *한국전자기술연구원

aosi274@korea.kr, *root@keti.re.kr

Predicting Moisture Content of the Substrate in Hydroponic Strawberry (*Fragaria × ananassa*) Cultivation Using Spectral Imaging

Soo Ho Jung, Ga Yun Yun, Gyu Won Lee*, Ju Hwan Choi*, Keun Ho Park*

Jeollanamdo Agricultural Research and Extension Services(JARES)

*Korea Electronics Technology Institute(KETI)

요약

본 연구는 단파적외선(SWIR) 및 근적외선(NIR) 대역의 분광 정보를 활용하여 수분 스트레스 식생지수(MSI)를 계산하고, 이를 기반으로 딸기 잎의 분광 영상으로 배지의 함수율을 간접적으로 예측하는 방법을 제안한다. 실험은 전라남도농업기술원의 시험온실에서 다양한 관수 조건을 설정한 실험군을 대상으로 수행되었으며, 분광 카메라 및 토양 수분 센서를 통해 총 512개의 유효 데이터를 수집하였다. 수집된 영상은 마커 기반의 위상 정렬과 전용 소프트웨어를 통한 전처리 과정을 거쳐 정제되었고, MSI와 실제 함수율 간의 관계를 선형 회귀 분석을 통해 모델링한 결과 예측 모델의 정확도(100-MAPE)는 86.16%로 나타났다. 이는 기존 토양 수분 센서 기반의 측정 방식과 유사한 수준의 정밀도를 확보하면서도, 넓은 재배면적에 대해 실시간·비파괴적으로 수분 상태를 평가할 수 있는 가능성을 보여준다. 향후 잎의 함수량을 직접 측정하여 본 예측 모델과의 상관성을 검증하고, 다양한 작물에 확대 적용함으로써 농업 전반의 수분 관리 자동화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서론

작물의 생육과 생산성은 수분 공급에 크게 영향을 받으며, 수분 스트레스는 생리적 변화와 품질 저하를 초래하는 주요 요인이다[1]. 기존의 토양 수분 센서 기반 측정 방식은 국지적인 한계와 유지보수 문제로 인해 실시간 모니터링에 어려움이 있다. 이에 따라, 비접촉 방식으로 작물의 수분 스트레스를 측정하는 기술 개발이 필요하다.

식물의 수분 스트레스를 정량적으로 평가하기 위해 다양한 식생지수가 활용되고 있다. 대표적으로 정규식생지수는 작물의 생육 상태를 평가하는데 사용되지만, 수분 스트레스에 대한 민감도는 상대적으로 낮다. 반면, 수분 스트레스 식생지수[2]는 단파적외선(SWIR)과 근적외선(NIR) 반사율의 비율을 활용하여 수분 함량을 정량적으로 분석할 수 있는 지표로 주목받고 있다. 기존 연구에서는 수분 스트레스 식생지수를 이용하여 작물의 수분 스트레스 정도를 평가한 사례가 있으나, 이를 실시간으로 적용하거나 함수율 예측에 직접 활용한 연구는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 수분 스트레스 식생지수를 기반으로 딸기의 수분 스트레스를 분석하고, 이를 함수율과 매칭하는 선형회귀 모델을 구축하는 연구를 수행하였다.

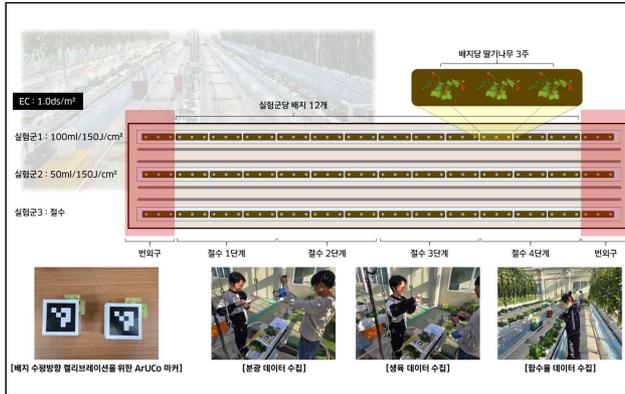
II. 본론

본 논문에서는 분광 센서를 이용하여 작물의 수분 스트레스 식생지수를 산출하고 이를 함수율과 매칭하는 선형회귀 모델을 구축하는 연구를 수행하였다. 작물의 수분 스트레스는 생육 상태를 결정하는 중요한 요인으로, 식물체의 수분 함량 변화는 특정 파장의 빛 반사율에 영향을 미친다. 특히, 1,450nm 대역의 단파적외선은 식물의 수분 흡수와 높은 상관관계를 가지며, 이를 이용하면 수분 스트레스를 정량적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 수분 스트레스 식생지수(MSI, Moisture Stress Index)를 이

용하여 작물의 함수율을 비접촉 방식으로 예측하는 방법을 개발하였다. 수분 스트레스 식생지수는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$MSI = \frac{SWIR(1,450nm)}{NIR(850nm)} \quad (1)$$

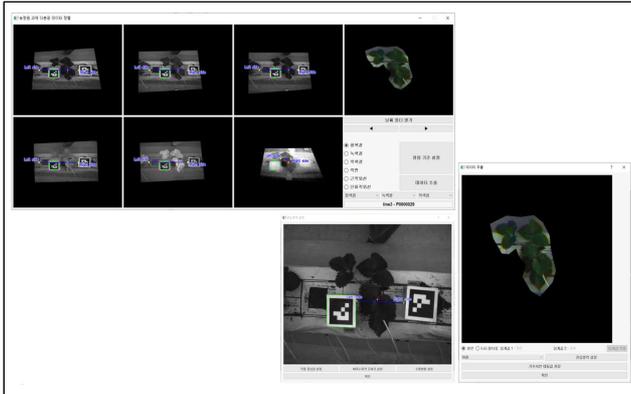
MSI 값이 높을수록 식물의 수분 스트레스가 심한 상태를 의미하며, 이를 기반으로 함수율을 예측하는 모델을 구축하였다. 본 논문에서는 시설 내 환경에서 딸기의 함수율을 측정하기 위해 전라남도농업기술원의 스마트 팜 연구 온실에서 [그림 1]과 같이 실험군을 설정하고, 다양한 관수 조건에서 데이터를 수집하였다. 데이터 수집은 2024년 10월 31일부터 12월 23일까지 약 2개월간 진행되었다.



[그림 1] 비접촉식 함수율 측정을 위한 데이터 수집 조건 설정

실험을 위한 딸기 데이터는 배지 단위로 분광 카메라와 토양 수분 센서를 이용하여 수집하였다. 연구에 사용된 분광센서는 다안렌즈 방식이므로 위상정렬을 위해 ArUCo 마커[3]를 활용한 공간 정렬 및 보정을 수행하였다. 수집된 분광 영상의 위상정렬을 위해 [그림 2]와 같은 전용 캘리브레

이선 소프트웨어를 개발하여 전처리 과정을 수행하였다. 전용 소프트웨어는 청색광, 녹색광, 적색광, 적외선, 근적외선, 단파적외선 데이터의 대표값을 산출하며, ROI(region of interest) 설정을 통해 작물의 특정 부위만을 대상으로 분석을 수행한다.

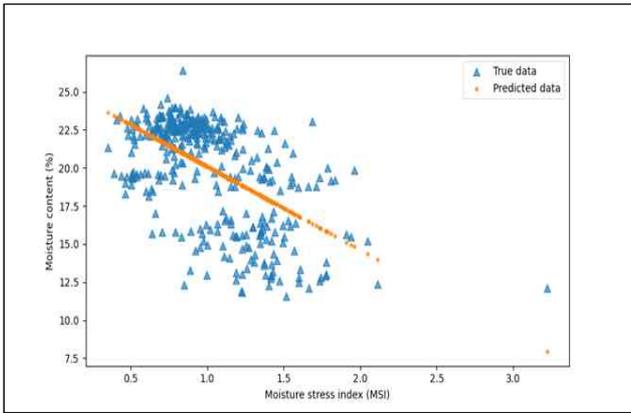


[그림 2] 분광 밴드별 영상정렬을 위해 제작한 전용 캘리브레이션 소프트웨어

함수율 예측을 위한 회귀 모델 구축을 위해 총 512개의 유효 데이터를 선별하여 분석 진행하였고, 수분 스트레스 식생지수와 실제 함수율 간의 관계를 규명하기 위해 선형회귀 모델을 적용하였다.

$$y = ax + b \quad (2)$$

여기서, y 는 측정된 함수율, x 는 분광센서로 측정된 수분 스트레스 식생지수, a 는 기울기, b 는 절편을 의미한다. 선형회귀 모델을 통해 토양 수분 센서로 측정된 함수율과 수분 스트레스 식생지수 값을 매칭한 결과는 [그림 3]과 같으며, 모델 정확도(100-MAPE)는 86.16%로 나타났다.



[그림 3] 수분 스트레스 식생지수와 함수율 간 선형회귀 그래프

III. 결론

본 연구에서는 단파적외선과 근적외선 대역을 활용한 수분 스트레스 식생지수를 이용하여 작물의 함수율을 비접촉 방식으로 측정하는 방법을 제안하였다. 수분 스트레스 식생지수와 함수율 간의 관계를 규명하기 위해 실험군을 나누어 데이터를 수집하고, 위상 정렬과 같은 데이터 전처리 과정을 거쳐 선형 회귀 모델을 구축하였다. 연구 결과 제안된 모델의 정확도는 86.16%로 나타났다. 이는 수분 스트레스 식생지수를 활용한 비접촉 방식의 함수율 예측이 기존 토양 수분 센서 기반 측정 방식과 유사한 수준의 정확도를 가질 수 있음을 시사한다. 또한, 본 방법은 넓은 면적을 실시간으로 분석할 수 있어, 스마트팜 및 정밀농업 환경에서 높은 활용 가능성을 갖는다. 특히, 비파괴적인 방식으로 작물의 수분 스트레스를 모니터링할 수 있어, 생육 최적화 및 생산성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 국가유산청 및 국립문화유산연구원의 2025년도 ‘문화유산 스마트 보존·활용 기술 개발’ 사업으로 수행되었음

(과제명: 이상기후 대응 식물유산 생육상태 모니터링 및 변화 예측 시스템 개발 및 실증, 과제번호: RS-2024-00397083, 기여율: 100%)

참고 문헌

- [1] 양명균, 최금실, 박성민, 손대식, 김정선, 조성인, “초분광 영상 시스템을 활용한 딸기의 수분 스트레스 분석,” 한국농업기계학회 학술발표논문집, 제24권 제1호, pp. 520-520, 1월. 2019년.
- [2] 김성재, 최경숙, 장은미, 홍성욱, “MSI/ MidIR/ II 식생지수를 이용한 봄 가뭄탐지 활용 가능성 분석,” 한국공간정보학회지, pp. 37-46, 8월. 2011년.
- [3] https://docs.opencv.org/3.1.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.htm
- [4] X. Su, X. Yan, and C.-L. Tsai, “Linear regression,” Wiley Interdiscipl. Rev., Comput. Statist., vol. 4, no. 3, pp. 275 - 294, Feb. 2012.