

기상 및 환경 센서 데이터 기반 생육 환경 최적화 연구

전속례^{1,+} · 이진흥¹ · 김성억² · 박정환¹

Optimization of Growth Environments Based on Meteorological and Environmental Sensor Data

Sook Lye Jeon^{1,+}, Jinheung Lee¹, Sung Eok Kim², and Jeonghwan Park¹

Abstract

This study aimed to analyze the environmental factors affecting tomato growth by examining the correlation between weather and growth environment sensor data from P Smart Farm located in Gwangseok-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do. Key environmental variables such as the temperature, humidity, sunlight hours, solar radiation, and daily light integral (DLI) significantly affect tomato growth. The optimal temperature and DLI conditions play crucial roles in enhancing tomato growth and the photosynthetic efficiency. In this study, we developed a model to correct and predict the time-series variations in internal environmental sensor data using external weather sensor data. A linear regression analysis model was employed to estimate the external temperature variations and internal DLI values of P Smart Farm. Then, regression equations were derived based on these data. The analysis verified that the estimated variations in external temperature and internal DLI are explained effectively by the regression models. In this research, we analyzed and monitored smart-farm growth environment data based on weather sensor data. Thereby, we obtained an optimized model for the temperature and light conditions crucial for tomato growth. Additionally, the study emphasizes the importance of sensor-based data analysis in dynamically adjusting the tomato growth environment according to the variations in weather and growth conditions. The observations of this study indicate that analytical solutions using public weather data can provide data-driven operational experiences and productivity improvements for small- and medium-sized facility farms that cannot afford expensive sensors.

Keywords: Weather Sensor data, Growth environment sensor data, Temperature, DLI, Smart-farm, Tomato

1. 서 론

기후변화로 인해 나타나는 기온 상승, 강수량, 강수 패턴의 변화, 가뭄 빈발 및. 국지적 기상 변동 등은 농업 환경에 많은 영향을 미치고 있으며, 특히 이러한 변화는 작물의 수확량과 품질에 부정적 영향을 미치는 경우가 많아지고 있다. 지구 온난화가 진행될수록 지역 평균기온, 강수량 및 토양 수분 변화의 폭이 커지고 있다. 지구 온난화가 0.5°C 증가할 때마다 폭염 및 폭우,

일부 지역의 농업 및 생태적 가뭄 강도와 빈도가 명백히 증가한다고 보고되고 있다[11].

스마트팜 기술의 발전으로 농업 환경은 과거보다 정밀하게 제어할 수 있게 되었으며, 특히 환경 측정 센서, 사물 인터넷 (IoT), 인공지능(AI), 빅데이터 분석 등의 최신 기술을 활용하여 작물 생육과 생산성 향상 등 농업의 효율성을 극대화하고 있다[2,7]. 이러한 기술들은 온도, 습도, 광량, CO₂ 농도 등의 환경 변수를 실시간으로 모니터링하고 제어할 수 있는 지식 및 모델 기반의 복합 환경제어 의사결정시스템을 기반으로 작물의 최적 생육 환경을 조성하는데 기여한다[1,6].

기상 센서 데이터는 스마트팜 운영에 있어 중요한 요소 중 하나이다. 외부 기상 조건을 모니터링함으로써 온실 내부 환경을 효과적으로 조절할 수 있다. 예를 들어, 외부 온도와 일조량 데이터를 기반으로 온실 내 난방 및 냉방 시스템을 자동으로 조절하거나, 필요에 따라 LED등 보광 시스템을 작동시켜 최적의 광 환경을 조성할 수 있다[9].

온도는 작물의 생장에 있어 가장 기본이 되는 생육 조건의 하나이다. 따라서 기후변화가 가져온 가장 큰 환경 변화 요인인

¹ (주)에이비씨랩스 (ABCLABS Inc.)
206, Seongnam Global Convergence Center, 46, Dallaenae-ro, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13449, Korea

² 농업회사법인 팜팜 (주)(Agricultural Corporation ParmFarm Co., Ltd)
24, Jangmaru-ro, Gwangseok-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do, Korea

⁺Corresponding author: sljeon@abclabs.co.kr

(Received: Jul. 8, 2024, Revised: Jul. 15, 2024, Accepted: Jul. 22, 2024)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기온의 변화는 작물 성장에도 영향을 주게 된다. 또한 DLI (Daily Light Integral: 단위면적(m^2)에 전달되는 일주적 광합성유효광량 자속밀도 (PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density))는 하루 동안 작물이 받는 광합성에 필요한 총 광량을 나타내며, 작물의 광합성 효율과 직결된다.

적정 DLI는 작물의 광합성 활동과 생육을 촉진하는 중요한 요인으로 작용한다. 최적의 DLI는 작물의 성장 속도를 증가시키고, 생산성을 향상시키는 데 기여한다. 박 등은 인삼 재배에 있어서 농업 기상 데이터 기반 DLI의 시계열 변화와 광 환경 조절에 대한 연구를 한 사례가 있다[3].

토마토는 세계적으로 중요한 경제성 작물 중 하나로, 최적의 생육 조건을 조성하는 것은 생산성과 품질 향상에 매우 중요하다[5]. 스마트팜 시설 재배의 대표적인 작물인 토마토에 대한 최적 온도와 광량의 확보는 토마토 생육과 생산성에 큰 영향을 미치는 주요 변수이다[10]. Körner와 Challa[8]는 토마토에 대한 온실에서의 온도 시뮬레이션 관리를 통한 건중량 증가 및 에너지 절약에 대한 연구를 실시한 바 있다.

온실에서의 온도와 광 환경을 연구함으로써 작물의 생육과 생산성과의 관계를 연구한 바 있다[13]. Fan 등[12]은 LED 광량 조절을 통해 높은 DLI를 유지함으로써 토마토의 라이코펜과 같은 유용 성분의 증가와 과실의 상품성이 증가함을 보고하였고, Niu 등[14]은 시설재배에서의 지속 가능한 생산을 위한 에너지 절약형 광 조절 최적화 방법을 제안하였다.

본 연구는 기상 센서 데이터와 토마토 재배 스마트팜 내부 환경 센서 데이터의 상관관계 연구를 통하여 토마토 생육에 미치는 환경 영향을 분석하는 것을 목적으로 하였다. 특히, 온도와 DLI의 변화를 중심으로 이러한 변수들이 토마토 생육에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 이를 통해 스마트팜 운영에 있어 환경 제어의 중요성을 확인하고, 기상 센서 및 스마트팜 환경 센서 측정 데이터 기반의 효율적인 토마토 생육환경 관리 전략을 수립하는 데 기여하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 기상 센서 및 스마트팜 환경 센서 데이터 수집

본 연구는 충남 논산시 광석면에 설치된 기상 센서 측정 데이터와 충남 논산시 광석면 소재 P 스마트팜에 설치된 토마토 재배 환경 측정 센서 데이터를 대상으로 분석하였다. 기상 센서 데이터는 공공 데이터 포털을 통해 농촌진흥청 국립농업과학원에서 Open API형식으로 제공하는 농업기상 기본 관측데이터를 요청하여 수집, 가공 후 분석에 활용하였다[4]. 기상관측 지점은 충청남도 논산시 광석면에 설치된 AWS (Automatic Weather System)(설치 지점: 충남 논산시 광석면 이사리 389-1)의 2021년 센서 측정 데이터를 활용하였다.

현장 환경 측정 데이터로는 P 스마트팜(소재지: 충청남도 논산시 광석면 광리 243-10)의 2021년 환경 센서 측정 데이터를 활용하였고 연간 계절적 변화가 포함되도록 하여 분석하였다.

수집된 기상 센서 데이터 가운데 기온(Temp., °C), 습도(Humidity, %), 강수량(Rain, mm), 결로 시간(condense_Time, hrs), 일조 시간(sun_Time, hrs), 일사량(sun_Qy, $MJ \cdot m^{-2}$) 데이터를 분석에 사용하였으며, 스마트팜 현장 환경 센서 측정 데이터로는 스마트팜 시설 내부의 기온, 습도, CO₂ 및 시설 외부에 설치된 AWS의 온도, 습도, 강수량, 일사량 센서의 측정 값을 활용하여 분석하였다.

광 환경과 관련된 DLI ($mol \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) 분석을 위해서는 일사량 데이터를 활용하여 환산하였다.

2.2 기상 센서 및 스마트팜 환경 센서 데이터 처리, 분석 및 시각화

기상데이터는 Python프로그램(Ver. 3.12.4)을 사용하여 데이터 분석에 필요한 목표 데이터를 추출하였으며, 보정된 일 주적 일사량 데이터를 이용하여 DLI 값을 계산하였다.

수집된 기상 및 환경 센서 측정 데이터는 전처리 과정을 통해 결측값(missing value) 및 이상값(outlier) 처리를 실시하였다.

데이터 분석은 통계 분석 기법을 사용하여 진행되었다. 각 변수의 평균, 중간값, 표준편차 등을 계산하여 기술 통계량을 산출하였고, 이를 통해 데이터의 기본 특성을 파악하였다.

피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient)를 계산하여, 기상 센서와 스마트팜 외부 환경 센서 데이터 중 기온 데이터의 상관관계를 분석하였고, 기상 센서와 스마트팜 내부 환경 센서 데이터 중 일사량에서 환산한 DLI데이터의 상관관계를 분석하였다. 각 변수간의 인과관계를 알아보기 위하여 선형회귀분석을 실시하였으며, 선형회귀모델을 사용하여 데이터 간 상관관계를 분석하였고, 회귀식과 추세선을 구하고 R²값을 계산하여 활용하였다.

시계열 분석을 통해서 시간대에 따른 기온과 DLI 변수의 변화를 시각화하여 일별, 월별 변화를 분석하였으며, 변수 간의 관계를 모델링하여, 스마트팜 내·외부 환경 변화 요인에 대해 종합적으로 분석하였다. 기상 센서 및 스마트팜 환경 센서 데이터의 각 변수는 7일 이동 평균 그래프화하여 시계열 분석을 실시하였고, 히스토그램 분석을 활용하여 데이터의 분포 패턴을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 센서 데이터 분석 결과

본 연구는 2021년 충남 논산시 광석면의 기상 센서 데이터와

스마트팜 토마토 재배 시설에 설치된 측정된 환경 센서 데이터를 대상으로 진행하였다. 기상 데이터의 기온, 습도, 일조시간, 결로 시간, 강수량, 일사량 데이터 및 DLI의 일평균 데이터를 계산하고, 각 측정 항목별로 7일 이동평균값을 구해 시계열 변화를 시각화 하였다(Fig. 1 (a)).

기상 센서 데이터의 일평균 기온 범위는 최소 -9.7°C에서 최대 28.6°C, 습도는 최소 50.2%에서 최대 94.5%로 기온과 습도는 7, 8월에 가장 높았으며, 강수량은 최소 0 mm에서 최대 27.5 mm였으며, 장마 시기가 포함된 7월에 가장 많았다.

결로 시간은 최소 0.03시간에서 최대 10.1시간, 평균 2.2시간이었다. 월 누적 결로 시간은 11월에 193.1 시간으로 가장 길었

고, 계절별로는 낮과 밤의 기온 차가 큰 가을에 결로 시간이 가장 긴 것으로 분석되어, 환기 및 가온 등을 통한 시설 내 습도 조절을 통해 스마트팜 내 재배 토마토의 결로 피해를 최소화할 필요성을 시사하고 있다.

일평균 일조 시간은 최소 1.6시간에서 최대 12.0시간, 평균 6.8 시간이었으며, 여름철의 누적 일조시간이 평균 680.4 시간으로 가장 길었다. 일사량은 최소 7.0 MJ·m⁻²에서 최대 21.8 MJ·m⁻²이었으며, DLI는 최소 14.3 mol·m⁻²·d⁻¹에서 최대 44.5 mol·m⁻²·d⁻¹ 범위로 분석되었다. 월별 변동성을 분석한 결과 일사량과 DLI는 6, 7월에 가장 높았고, 1, 12월에 가장 낮았다(Fig. 1 (b)).

3.2 스마트팜 환경 센서 데이터 분석

스마트팜 환경 센서 데이터의 7일 이동평균값을 분석한 결과, 시설 외부 온도는 최소 -11.6°C에서 최대 26.7°C를 나타내었다. 스마트팜 시설 내부 온도는 최소 13.1°C에서 최대 22.6°C의 분포를 나타내어 토마토 재배 적온인 낮 20~25°C, 밤 13~18°C 범위에 적합한 환경을 유지하고 있었다.

내부 습도는 최소 80%에서 최대 95%로 토마토 재배 적정 습도인 65~80% 범위보다 전반적으로 높은 값을 보였다. 이는 식물재배 시설 내 증산작용에 의한 것으로 적절한 환기와 공기순환 팬 가동을 통해 시설 내 병해가 발생되지 않도록 주의할 필요성을 시사하였다(Fig. 2 (a)).

외부 일사량은 1월에 평균 7.2 MJ/m²로 가장 낮고, 여름철인 7월에 평균 17.5 MJ/m²로 가장 높아 계절적 경향을 반영하였다. 외부 DLI는 최저 11.6 mol·m⁻²·d⁻¹에서 최고 54.2 mol·m⁻²·d⁻¹, 평균 29.2 mol·m⁻²·d⁻¹로 1월에 가장 낮고, 7월에 가장 높았다(Fig. 2 (a)).

내부 DLI는 시설 광 투과율을 반영 시 외부 DLI의 92% 수준으로 최소 10.7 mol·m⁻²·d⁻¹에서 최대 49.9 mol·m⁻²·d⁻¹, 평균 26.9 mol·m⁻²·d⁻¹로 분석되었다. 토마토 생육 적정 DLI는 20~30 mol·m⁻²·d⁻¹ 인 점을 고려할 때 겨울철에는 보광, 여름철에는 차광이 필요한 것으로 분석되었다(Fig. 2 (b)).

CO₂ 농도는 토마토 수확량에 영향을 미친다. 스마트팜 시설 내부 CO₂ 농도는 최소 498.7 ppm에서 최대 629.5 ppm, 평균 557.7 ppm으로 대기 중 CO₂ 농도인 약 419 ppm 보다는 높은 농도를 유지하여 토마토 생산에 도움을 주고 있었다(Fig. 2 (b)).

3.3 기온 데이터 변화 분석

기상 센서를 통해 얻어진 외부 기온 데이터를 독립변수 (x)로 하고, P스마트팜 외부 환경 센서의 기온 데이터를 종속변수(y)수로 하는 선형회귀분석을 실시하고, 회귀 모델을 작성하여 외부 기온 변화에 따른 P 스마트 팜 현장의 외부 기온을 예측하였다.

그 결과 다음의 회귀식(1)이 도출되었으며, R²값이 0.9606으로 선형회귀모델이 효과적임을 알 수 있었다(Fig. 3 (a)).

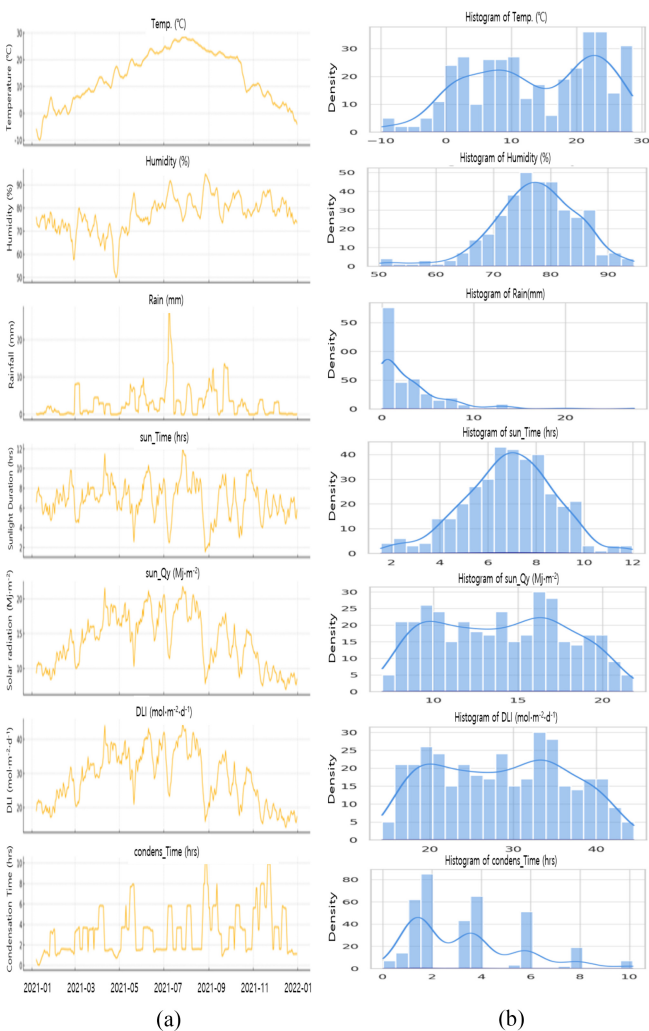


Fig. 1. Annual changes in agricultural meteorological measurement sensor data in Gwangseok-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do, 2021; (a) the time-series visualization of various environmental parameters based on 7-day moving average data, (b) their respective histograms. Parameters include Temperature (°C), Humidity (%), Rainfall (mm), Sunlight Duration (hrs), Solar Radiation (MJ/m²), DLI (mol/m²/day), and Condensation Time (hrs).

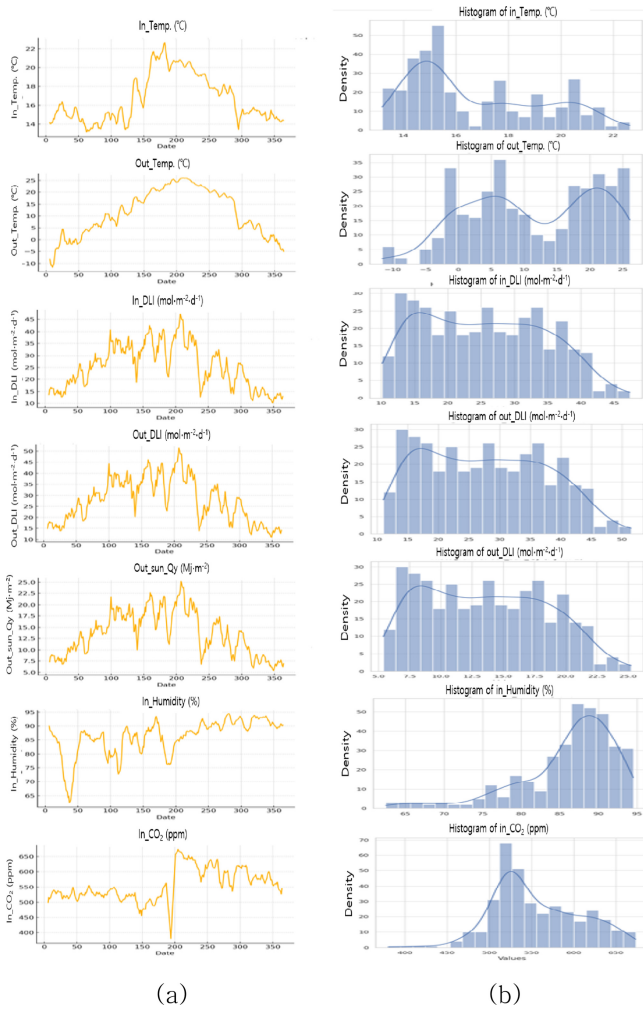


Fig. 2. Annual changes in indoor and outdoor environmental measurement sensor data at P smart farm, 2021; (a) the time-series data for indoor and outdoor temperature (°C), DLI (mol·m⁻²·d⁻¹) both indoor and outdoor, outdoor solar radiation (MJ/m²), indoor humidity (%), and indoor CO₂ concentration (ppm) based on 7-day moving average data, (b) histograms illustrating the distribution of these environmental parameters.

$$y = -2.11x + 1.00 \quad (R^2: 0.9606) \quad (1)$$

7일 이동 평균 기온 데이터를 비교하여 보았을 때, P 스마트 팜 현장 외부 센서 데이터(녹색 실선)은 기상 센서 데이터(파란색 실선)에 비해 전체적으로 낮은 경향을 나타내었다. 변화 추이는 유사하였으며, 선형회귀모델로 산출된 시계열 데이터의 경우(빨간색 점선) P 스마트팜 현장 외부 기온 변화 추이를 잘 설명해 주고 있는 것을 알 수 있었다(Fig. 3 (b)). 이는 기상 센서 데이터를 기준으로 스마트팜 환경 센서 데이터를 선형 회귀식으로 보정, 환경 센서의 정확성을 향상시키는데 활용할 수 있으며, 스마트팜 외부 환경 측정 센서에 이상이 생기더라도 이러한 기상 센서 데이터 기반 예측 모델을 활용하여 비상 시에도 안정적인 토마토 생육 환경 관리가 가능할 수 있다.

토마토의 재배 한계 온도는 최소10.5°C 이상, 최대 30°C 이하의 범위(연두색 범위)이고, 생육 최적온도는 19°C(녹색 점선)이며, 토마토 재배 최적온도 범위는 낮 20~25°C, 밤 13~18°C이다. 외부 기온(파란색 실선)에 비해 P스마트팜 시설 내부 온도는 13.1~22.6°C(빨간색 실선)로 적절한 가온과 환기를 통해 토마토 재배 최적온도 범위를 잘 유지하고 있었다 (Fig. 3 (c)).

스마트팜 외부 환경 센서 데이터 중 기온의 7일 이동 평균 데이터를 기준으로 살펴본 결과, 토마토의 재배 한계 온도 범위 내에 분포하는 6월부터 9월까지의 가온이 필요 없었으며, 1~3월과 11~12월에는 가온이 필요한 날이 28일 이상으로 나타났다 (Fig. 3 (d)).

3.4 DLI 데이터 변화 분석

기상 센서를 통해 얻어진 일사량 데이터에서 환산한 DLI값을 독립변수(x)로 하고, 스마트팜 시설 피복재의 투과율을 고려하여 P스마트팜 외부 환경 측정 센서의 일사량 데이터에서 환산한 내부 DLI값을 종속변수(y)로 하는 선형회귀분석을 실시하고, 기상 센서 데이터의 일사량 환산 DLI 값의 변화에 따른 P 스마트 팜 현장의 내부 DLI 값을 예측하였다. 선형회귀분석을 통해 회귀모델을 산출 하였으며, 다음의 회귀식(2)을 구하였다.

$$y = 1.15x - 7.37 \quad (2)$$

산출된 회귀식이 전체 데이터를 설명해 주는 정도를 의미하는 결정 계수인 R² 값은 0.981로 스마트팜 시설 내부 DLI값의 추정 변화량을 잘 설명함을 알 수 있었으며 (Fig. 4 (a)), 회귀모델을 사용하여 보정된 내부 DLI의 7일 이동 평균 데이터의 변화 추이를 잘 반영하고 있었다(Fig. 4 (b)).

P 스마트팜 내부 DLI 분석 결과를 바탕으로 보광 및 차광 요구량을 분석하였다. 토마토 생육에 필요한 적정 DLI 범위인 20~30 mol·m⁻²·d⁻¹를 기준으로 하였을 때, 기준 이하의 DLI 값으로 보광이 필요한 일수는 121일이었으며 12월에 보광이 가장 많이 필요하였다(Fig. 4 (c)). 보광을 위한 일평균 DLI 요구량 범위는 최소0.1 mol·m⁻²·d⁻¹에서 최대9.9 mol·m⁻²·d⁻¹, 평균4.7 mol·m⁻²·d⁻¹이었다(Fig. 4 (d)).

보광이 필요한 일평균 DLI 요구량 평균값인 4.7 mol·m⁻²·d⁻¹을 기상 센서 데이터에서 얻어진 일평균 일조시간 6.8시간을 기준으로 PPFD (광합성유효광량자속밀도)로 환산하여 계산할 경우, 192 μmol·m⁻²·s⁻¹이므로 이 값 이상으로 보광 시 스마트팜 내 토마토 생산력을 현재보다 향상시킬 수 있을 것으로 추정되었다.

차광이 필요한 일수는 123일로 보광이 필요한 일수와 유사하였으며, 6~8월에 가장 많이 차광이 필요하였다. 이 시기에는 스마트팜 시설 내의 2층 차광막을 이용하여 DLI 값이 토마토의 광포화점을 넘지 않도록 하고, 토마토 생육에 필요한 적정 DLI 범위를 유지하는 것이 필요하였다.

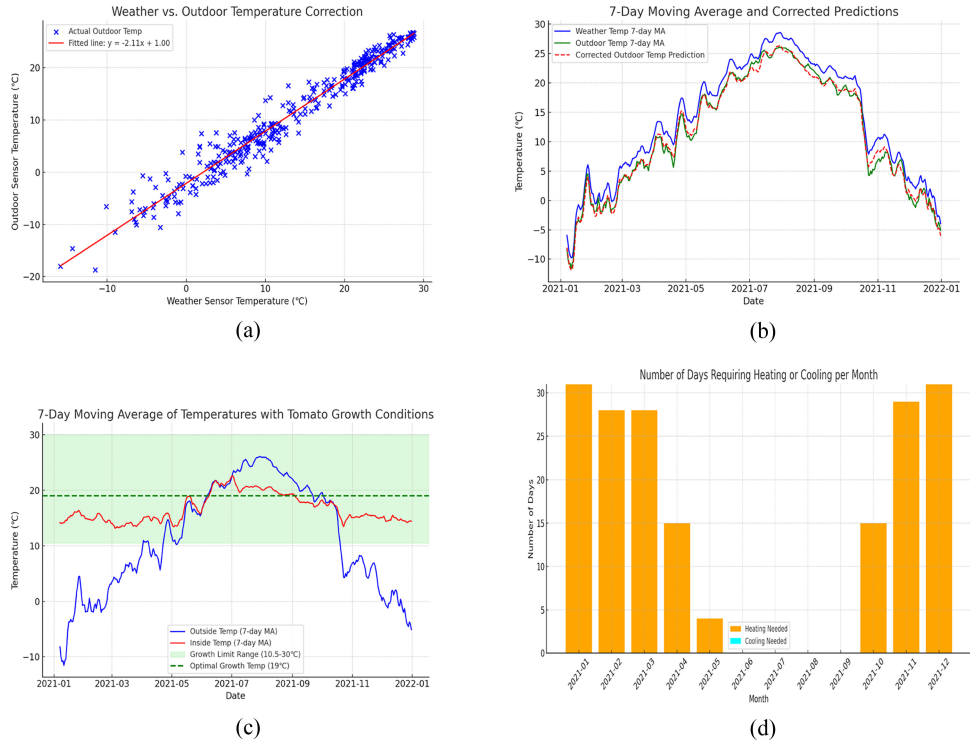


Fig. 3. Need for supplemental heating or cooling based on outdoor and indoor temperature in P smart farm environmental measurement sensor data and weather sensor data for temperature in Gwangseok-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do, 2021; (a) Weather vs outdoor temperature correction, (b) 7-day moving average and corrected predictions (c) 7-day moving average of temperatures with tomato growth conditions, (d) Number of days requiring heating or cooling per month.

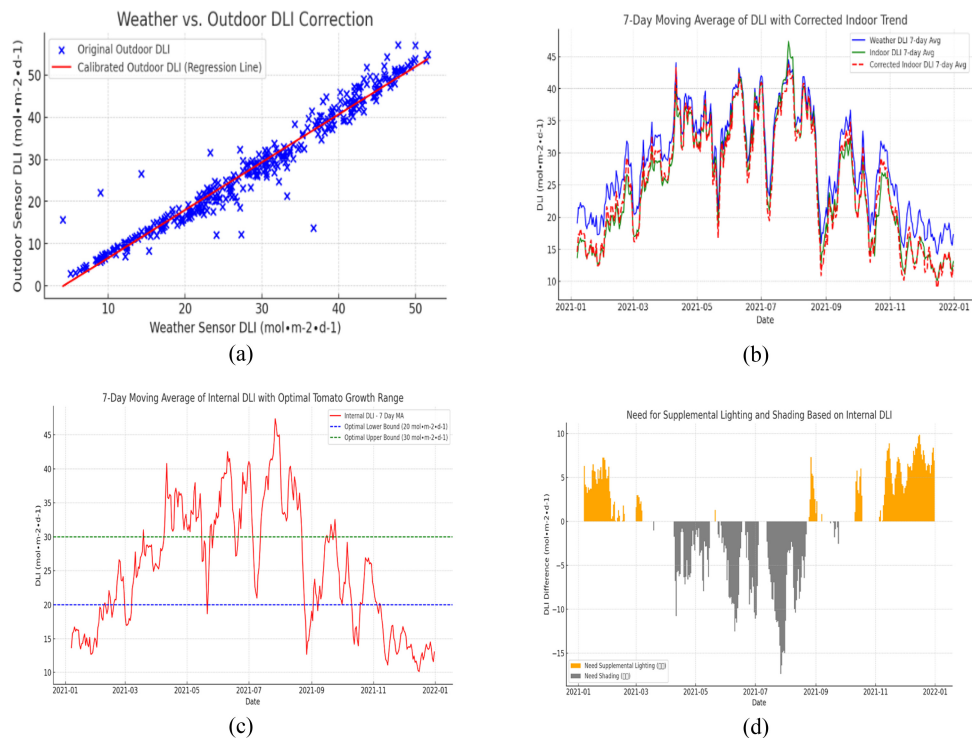


Fig. 4. Need for supplemental lighting and shading based on outdoor and internal DLI for tomato growth of P Smart Farm, Gwangseok-myeon, Nonsan-si, Chungcheongnam-do in 2021; (a) Weather vs outdoor temperature correction, (b) 7-day moving average of DLI with corrected indoor trend, (c) 7-day moving average of internal DLI with optional tomato growth range, (d) Need for supplemental lighting and shading based on internal DLI.

4. 결 론

본 연구에서는 충청남도 논산시 광석면 소재 기상 센서의 측정 데이터와 동일 지역 소재의 토마토 재배 P 스마트팜 생육 환경 센서 데이터와의 상관관계 연구를 통하여 토마토 생육에 미치는 환경 요인을 분석하였다.

기상 센서 데이터의 측정 항목 및 DLI의 7일 이동 평균의 일평균 최소~최대값 범위의 분석결과, 기온은 $-9.7\sim 28.6^{\circ}\text{C}$, 습도는 $50.2\sim 94.5\%$, 일조 시간은 $1.6\sim 12.0$ 시간, 결로 시간은 $0.03\sim 10.1$ 시간, 강수량은 $0\sim 27.5$ mm, 일사량은 $7.0\sim 21.8$ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, DLI는 $14.3\sim 44.5$ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 범위로 나타났으며, 계절적 변화를 잘 반영하고 있었다.

P 스마트팜 환경 센서 데이터의 7일 이동 평균의 일평균 최소~최대값의 범위를 분석한 결과, 외부 온도는 $-11.6\sim 26.7^{\circ}\text{C}$, 외부 일사량은 $7.2\sim 17.5$ MJ/m^2 , 외부 DLI는 $11.6\sim 54.2$ $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 로 기상 센서 측정 데이터의 일평균 최소~최대값의 범위와 연간 변화 추세가 유사하게 나타났다. P스마트팜 내부 온도는 $13.1\sim 22.6^{\circ}\text{C}$ 로 토마토 생육 적정 온도를 유지하였다. 내부 습도는 $80\sim 95\%$ 의 범위로 토마토 재배 적정 습도인 $65\sim 80\%$ 범위보다 전반적으로 높은 값을 보이고 있어 환기 또는 공기순환팬을 활용한 적절한 습도 관리가 필요함을 시사하였다.

기온, 습도, 일조시간, 일사량 및 DLI 등의 환경 변수는 작물 생육에 매우 중요한 영향을 미치는 요인이다. 이 가운데 온도와 DLI값은 작물의 생장과 광합성 효율과 직결되어, 토마토의 생육과 생산성 향상에 매우 중요한 역할을 한다.

본 연구에서는 외부 기상 센서 데이터를 활용하여, 내부 환경 센서 데이터의 보정 및 시계열 변화 예측 모델을 확인하고, 그 활용성을 검토하였다. 기상 센서 데이터 기반으로 P스마트팜 외부 기온과 내부 DLI에 대한 선형회귀분석 모델을 산출하였다. P 스마트팜 외부 기온 변화에 대해 산출된 회귀식은 $y=2.11x + 1.00$ 이었으며, R^2 값은 0.9606 으로 회귀 모델이 잘 설명되었다. 또한 외부 DLI 값을 기반으로 한 스마트팜 내부 DLI 값 추정을 위해 선형 회귀분석을 이용한 회귀 모델을 구하였다. 산출된 회귀식은 $y=1.15x-7.37$ 이었고, R^2 값은 0.981 로 P스마트팜 내부 DLI의 추정 변화량을 잘 설명하였다.

본 연구를 통해 기상 센서 데이터 기반으로 스마트팜 생육 환경 데이터를 분석하고 모니터링함으로써, 온도, 광 환경에 대한 최적화 모델을 확보하여 토마토의 생육 조건을 최적화 할 수 있는 조건을 확보할 수 있었다. 또한 기상 및 생육 환경의 변화에 따라 토마토 생육 환경을 동적으로 조절할 수 있는 센서 기반 데이터분석의 중요성을 확인할 수 있었다.

나아가 본 연구 결과를 바탕으로 스마트팜 외부 및 내부 환경 센서 빅데이터 기반의 광 환경 조절에 따른 토마토의 생산량과 생육 변화에 대한 연구를 제안할 수 있다.

본 연구 결과와 같이 공공 기상 데이터를 활용한 분석 솔루션

의 제공은 향후 고가의 센서를 구비하기 어려운 중소 시설 농가에도 데이터 기반 운영 경험과 생산성 향상 경험을 제공할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업 연구인력지원사업 고경력 연구인력채용지원사업(2021~2024년, 과제 번호 S3099934)의 지원으로 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] G. van Straten, G. van Willigenburg, E. van Henten, and R. van Ooteghem, *Optimal Control of Greenhouse Cultivation*, Boca Raton, CRC Press, FL, pp. 1-87, 2011.
- [2] J. H. Min, "The optimal control technology on complex environment in horticulture based on artificial intelligence", *Proc. of 2017 KIICE Conf.*, pp. 756-759, Cheonan, Korea, 2017.
- [3] J. Park, S. Song, S. Y. Seo, and S. L. Jeon, "Controlling photo-environment of Ginseng cultivation using agricultural weather Sensor Data", *J. Sens. Sci. Technol.*, Vol. 31, No. 3, pp.180-186. 2022.
- [4] <https://www.data.go.kr/data/15078057/openapi.do?recommendDataYn=Y> (retrieved on Mar. 24, 2022).
- [5] Rural Development Administration (RDA), *Smart greenhouse environment guidelines* (2018), RDA, Korea, 2018.
- [6] M. S. Farooq, S. Riaz, A. Abid, T. Umer, and Y. B. Zikria, "Role of IoT technology in agriculture: A systematic literature review", *Electronics*, Vol. 9, No. 319, pp. 319(1)-319(41), 2020.
- [7] M. S. Kabir, S. Islam, M. Ali, M. Chowdhury, S.-O. Chung, and D. H. Noh, "Environmental sensing and remote communication for smart farming: a review", *Precis. Agric. Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 2, pp. 81-96, 2022.
- [8] O. Körner and H. Challa, "Design for an improved greenhouse climate control system in semi-arid regions", *Comput. Electron. Agric.*, Vol. 84, No. 1, pp. 91-106. 2003.
- [9] S. Ko and Y. Son, "A study on system design for tracking the optimal light compensation point of plants", *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, Vol. 36, No. 2, pp.1-7, 2022.
- [10] T. Higashide, "Review of dry matter production and growth modelling to improve the yield of greenhouse tomatoes", *Hort. J.*, Vol. 91. No. 3, pp. 247-266, 2022.
- [11] Working Group I, *Climate change 2021: The physical science basis. Summary for policymakers, 6th Assessment Report*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Switzerland, 2021.
- [12] X. Fan, N. Lu, W. Xu, Y. Zhuang, J. Jin, X. Mao, and N. Ren, "Response of Flavor Substances in Tomato Fruit to Light Spectrum and Daily Light Integral", *Plants*, Vol. 12, No. 15, pp. 2832(1)-2832(16), 2023.
- [13] Y.-H. Kim, H.-C. Yang, S.-H. Yang, D. H. Kim, and D.-C.

Jang, "Comparison of Growth and fruiting characteristics between cultivars for the selection of appropriate domestic cultivars when cultivating paprika in high-temperature periods", *Hortic. Sci. Technol.*, Vol. 41, No. 6, pp. 674-685, 2023.

[14] Y. Niu, Y. Li, Y. Han, M. Zhang, and H. Li, "Decision method for greenhouse tomato light regulation based on the concavity of photosynthesis response", *Comput. Electron. Agric.*, Vol. 222, p.109088, 2024.