

교육용 시뮬레이션 설계를 위한 온실 환경 제어 모델의 활용

윤승리^{1*} · 김동필¹ · 황인하² · 김진현³ · 신민주³ · 방지웅³ · 정호정⁴

¹농촌진흥청 국립원예특작과학원 전문연구원, ²서울대학교 농림생물자원학부 원예생명공학전공 대학원생,

³농촌진흥청 국립원예특작과학원 연구사, ⁴농촌진흥청 국립원예특작과학원 연구관

Application of Greenhouse Climate Management Model for Educational Simulation Design

Seungri Yoon^{1*}, Dongpil Kim¹, Inha Hwang², Jin Hyun Kim³, Minju Shin³,
Ji Wong Bang³, and Ho Jeong Jeong⁴

¹RDA Research Associate, Protected Horticulture Researcher Institute, NIHHS, Haman 52054, Korea

²Graduate Student, Department of Agriculture, Forestry and Bioresources (Horticultural Science and Biotechnology), Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³Researcher, Protected Horticulture Researcher Institute, NIHHS, Haman 52054, Korea

⁴Senior Researcher, Protected Horticulture Researcher Institute, NIHHS, Haman 52054, Korea

Abstract. Modern agriculture is being transformed into smart agriculture to maximize production efficiency along with changes in the 4th industrial revolution. However, rural areas in Korea are facing challenges of aging, low fertility, and population outflow, making it difficult to transition to smart agriculture. Among ICT technologies, simulation allows users to observe or experience the results of their choices through imitation or reproduction of reality. The combination of the three-dimension (3D) model and the greenhouse simulator enable a 3D experience by virtual greenhouse for fruits and vegetable cultivation. At the same time, it is possible to visualize the greenhouse under various cultivation or climate conditions. The objective of this study is to apply the greenhouse climate management model for simulation development that can visually see the state of the greenhouse environment under various micrometeorological properties. The numerical solution with the mathematical model provided a dynamic change in the greenhouse environment for a particular greenhouse design. Light intensity, crop transpiration, heating load, ventilation rate, the optimal amount of CO₂ enrichment, and daily light integral were calculated with the simulation. The results of this study are being built so that users can be linked through a web page, and software will be designed to reflect the characteristics of cladding materials and greenhouses, cultivation types, and the condition of environmental control facilities for customized environmental control. In addition, environmental information obtained from external meteorological data, as well as recommended standards and set points for each growth stage based on experiments and research, will be provided as optimal environmental factors. This simulation can help growers, students, and researchers to understand the ICT technologies and the changes in the greenhouse microclimate according to the growing conditions.

Additional key words: 3D modeling, applications, CO₂ enrichment, transpiration, greenhouse simulator, ventilation

서 론

전 세계적으로 현대 농업은 급속도로 전개되는 4차 산업혁명의 변화와 함께 경험적인 생산 방식에서 벗어나 농산물의 품질을 향상시키고 생산 효율을 극대화하는 스마트 농업으로 전환되고 있다. 우리나라 역시 IT 기반 스마트 시설농업이 대

두되고 있으며, 정부는 ‘시설원예분야 ICT 융복합확산사업’을 통한 ICT 융복합 스마트팜 시설 보급에 박차를 가하고 있으며, 2022년까지 국비 4,000억 원을 지원하여 전국 4개 지역에 대규모 스마트팜 혁신밸리를 구축하고 있다(Kang 등, 2020). 그러나 우리나라 농촌은 고령화, 저출산, 인구유출의 위기에 직면해 있어 스마트 농업으로의 전환에 어려움이 있다. 실제로 2020년 기준 농촌 인구는 약 103만 명으로 전체 인구의 5%였고, 경영주의 평균연령은 66세에 달한다(KOSTAT, 2020). 이렇듯 고령화된 농업인들에게 스마트팜 시설 관리를

*Corresponding author: ysl2848@korea.kr

Received September 30, 2022; Revised October 25, 2022;

Accepted October 31, 2022

위한 고도의 융합 기술은 활용도가 떨어질 수 있다. Kim 등 (2018)은 농민 대상의 교육이 기술집약적인 시설인 스마트팜 운영을 목표로 하지만, 대형 시설 및 장비 등을 교육하는 데 경제적, 공간적 한계가 있다는 점을 지적하며 가상현실(virtual reality, VR)을 활용한 농업 교육 방안을 제시하였다.

ICT 기술의 하나인 시뮬레이션이란 현실의 모방이나 재현을 통해 이용자가 선택에 따른 결과를 관찰하거나 경험하도록 하는 것이다. 또한 시뮬레이션은 실제 상황의 모델과 이론적인 체계로 구성되어 있으며 주어진 상황을 여러 방식으로 조작하여 특정 목표에 도달하는 과정으로 이어지게 된다(Filipczyk 등, 1994). 최근 컴퓨터 성능 개선과 시뮬레이션 기법의 발전으로 온실 내·외부 환경을 예측하는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 통한 시뮬레이션 연구가 활발하게 진행되고 있으며(Tadj 등, 2010; Yu 등, 2014; Jeong 등, 2020), 기상조건과 작물 생육 모델을 고려한 온실 환경의 사결정 모델이 활발하게 연구되고 있다(de Zwart, 1996; Navas 등, 1998; Luo 등, 2005; Cunha, 2007; Tignor 등, 2007). 중국에서는 가상의 농지 설계, 농업 토지 정보 시스템 활용 등 다양한 농업분야 IT와 가상현실 기술의 접목을 통한 디지털 농촌 관리 시스템, 농촌 관광 자료 등의 활용이 제안되고 있다(Yang 등, 1999; Zhu, 2004). 그러나 이러한 기술들은 개발자가 시뮬레이션 코드를 공개하지 않고 상용 소프트웨어를 허용하지 않아서 국내 농업용 시뮬레이션에 적용될 수 없기 때문에 국내의 재배 실정에 맞는 새로운 툴의 개발이 필요한 상황이다.

이상적인 교육용 시뮬레이션은 학습자들이 적극적이고 능동적으로 참여할 수 있도록 관찰 및 측정이 어렵고 복잡한 내용들을 단순하고 명확하게 보여주거나 학습자 선택에 따른 환경

제어의 결과 등이 인공의 환경에서 제공하여야 한다(Barton과 Maharg, 2007). 온실 환경 제어 모델은 다양한 환경 조건에서의 온실 내부 환경을 시각적으로 구현할 수 있으며, 3차원 모델링은 시설재배 온실을 가상으로 구축하여 3차원적 체험을 가능케 하기 때문에 교육용 시뮬레이션 적용 기술로 효과적이다.

따라서 본 연구의 목적은 파프리카 재배 온실의 복잡한 구성 요소들을 종합하여 다양한 환경 조건에서 온실 내부 환경을 시각적으로 볼 수 있는 스마트팜 시설 교육용 시뮬레이션을 설계하기 위하여 온실 환경 제어 모델을 활용하는 것이다.

재료 및 방법

1. 실험 대상 온실, 환경 데이터 수집 및 제어 디자인

표준 기상 데이터는 기상청에서 제공하는 2021년 함안군 시설원예연구소 소재 전체 기상자료와 평년값 자료를 토대로 대표성을 갖는 월별 데이터를 가공처리하여 매 시간별 기상자료를 활용하였다. 실험대상 온실은 경상남도 함안에 위치한 국립원예특작과학원 시설원예연구소(35.2°N, 128.4°E)의 벤로형 유리온실(폭 8m, 길이 36m, 높이 5.3m)과 연동형 플라스틱 필름 온실(폭 19m, 길이 40m, 높이 5.4m)로 선정하였다.

온실 내 환경 분포를 보기 위해 기온(KSH-7310, Korea Digital, Seoul, Korea), 상대습도(KSH-7310, Korea Digital) 및 광센서(SWSR-7500, Korea Digital) 등을 유리온실 내 4개 지점과 플라스틱 필름 온실 내 9개 지점에 각각 배치하였다. 벤로형 온실에서 온도, 상대습도는 온실 내부를 4등분하여 입구에서 시설을 바라보는 기준으로 우측(전면부, 후면부)와 좌측(전면부, 후면부) 4개 지점을 선정한 후, 지면으로부터 2m 높이에 설치하였고, 광도 센서는 각 4개 지점에서 파프리카 작

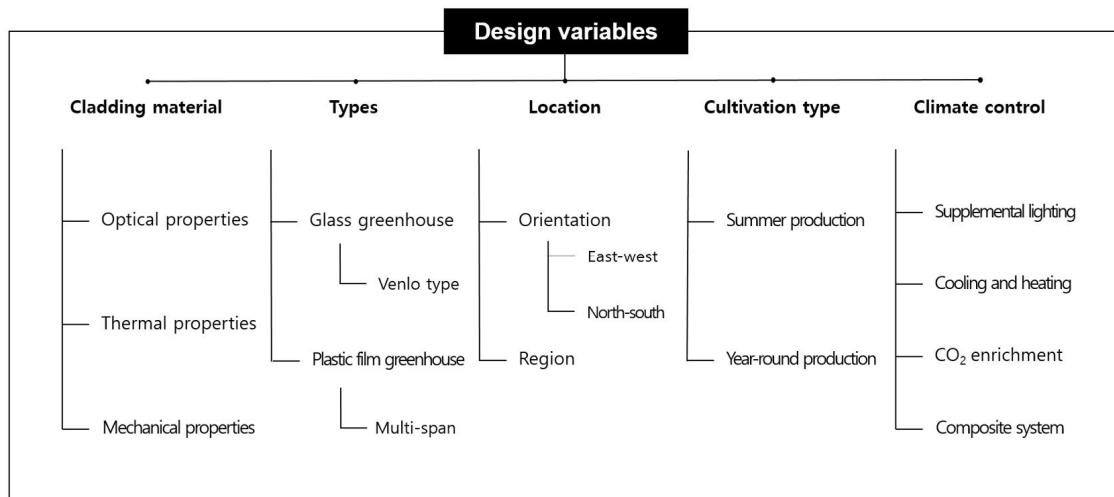


Fig. 1. Greenhouse design components implemented in the greenhouse environment simulator.

물의 상단부 높이에 따라 조절할 수 있도록 설치하였다. 플라스틱 필름 온실의 경우, 시설을 바라보는 기준으로 우측(전면부, 중앙, 후면부), 중앙(전면부, 정중앙부, 후면부), 좌측(전면부, 중앙, 후면부)로 9개 지점을 나누어 설치하고, 광도 센서의 경우 각 9개 지점에서 벤로형 온실과 같은 방식으로 설치하였다.

보광등의 인공 광원에서 조사된 광합성유효광양자속밀도(photosynthetic photon flux densities, PPFs)는 광 스펙트럼 분석기(LI-180, Li-Cor Biosciences, Lincoln, NE, USA)를 이용하여 상부 보광인 고압나트륨등의 경우 바닥으로부터 2m 높이에서, 수관 내 보광인 LED등의 경우 광원으로부터 0.5m 거리에서 측정하였다.

소프트웨어 개발 및 시뮬레이션에 고려되는 온실 제어 디자인 변수는 Fig. 1과 같다. 파프리카 온실의 환경 제어 시스템의 시각적 구현을 위한 요소로는 환기창, 차광 스크린, 유동팬, 보광등, 탄산시비 시스템, 온수난방관 등이 있었다(Fig. 2).

2. 온실 환경 제어 수학적 모델

시뮬레이션 개발을 위한 수학적 모델은 온실 환경 상태를 설명할 수 있는 물질 및 에너지수지 법칙으로부터 나온 3가지의 일차미분방정식 조합을 이용하였고, 시뮬레이션은 MATLAB Simulink(Ver. R2022b, Mathworks, Natick, MA, USA) 프로그램을 이용하여 수행하였다. 상태방정식에는 (1) 기온(°C), (2) 절대습도($g_{water} \cdot kg_{dryair}^{-1}$) 및 (3) 지면 온도(°C)가 포함된다(Fitz-Rodríguez 등, 2010). 이는 온실이라는 해석 공간에서 발생하는 에너지량을 수치 해석적으로 계산하고 예측하는 데 이용되었다. 기간난방부하, 환기율, 적정 탄산시비량 및 적정 보광량 추정을 위한 계산식을 추가하여 원하는 기간의 온실 환경 제어 결과를 예측하였다.

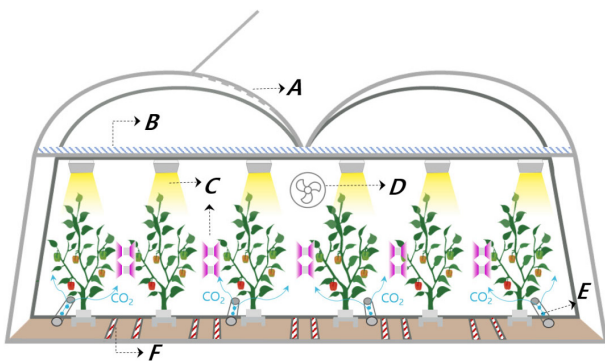


Fig. 2. Control variables (e.g. ventilation window (A), shading screen (B), supplemental lighting (C), air circulation fan (D), CO₂ enrichment (E), hot water heating system (F)) of greenhouse environment control implemented in the greenhouse environment simulator.

2.1 에너지수지 방정식

에너지수지 방정식은 온실 구성요소 각각의 열적 상호교환을 나타내는 정상 상태 조건 하에서 얻어질 수 있다(Fitz-Rodríguez 등, 2010). 온실 표면에 도달한 태양에너지는 피복재에 의한 반사, 흡수 및 투과 등의 과정을 통해 온실 내부로 유입된다(Lee 등, 2016). 온실 환경의 결과는 유입된 태양에너지가 공기, 작물, 바닥과 천장 요소들의 상호 작용에 따른 에너지 균형을 통해 보여질 수 있고, 환기되는 온실의 물질 및 에너지 전달을 묘사할 수 있었다(Fig. 3). 각 식의 기초는 Table S1과 같다. 단순화되고 보완된 형태의 에너지 수지 방정식은 다음과 같다(ASAE, 2003):

$$Q_{GRin} + Q_{Heater} = Q_{IV} + Q_{Cladding} \quad (1)$$

$$Q_{GRin} = \tau \cdot (1 - \rho_g) \cdot Q_{Gout} \quad (2)$$

$$Q_{IV} = L \cdot E + q_v \cdot C_p \cdot \rho \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (3)$$

$$Q_{Cladding} = k \cdot w \cdot (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

$$Q_{Heater} = N_H \left(\frac{H_{cap}}{A_{fl}} \right) \quad (5)$$

2.2 물질 에너지 방정식

온실 내 공기 물질 에너지 방정식 계산을 위해, 피복재 안쪽에 의한 응축, 지면으로부터의 증발이 없으며, 오직 온실 공기에 영향을 주는 수분의 출처는 증발식 냉각시스템 또는 작

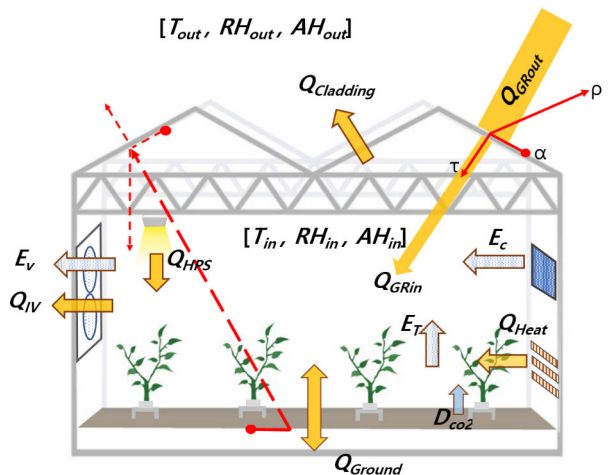


Fig. 3. Energy and mass flux in the greenhouse of sweet pepper plants derived from energy and mass balance equations.

물의 증산작용에 의한 것이라고 가정한다. 수분 역시 오직 환기에 의해서만 손실된다고 특정하며, 물질 수지 방정식은 다음과 같다:

$$E_c + E_T = E_V \quad (6)$$

$$AH_{in} \cdot q_v \cdot \rho = AH_{out} \cdot q_v \cdot \rho \quad (7)$$

작물의 증산량 추정에는 Penman-Monteith의 모델에 기반하고 파프리카에 맞게 변형된 추정식을 사용하였다(Shin과 Son, 2015):

$$E_T = a^* [1 - \exp(-0.84 \cdot LAI)] \cdot Q_{GRin} + b \cdot LAI \cdot VPD_{in} \quad (8)$$

온실 내 온도와 절대습도 변화에 대한 미분방정식은 다음과 같다(Takakura와 Son, 2004):

$$\left(\frac{dT_{in}}{dt}\right) = \frac{1}{C_p \rho \cdot H} (Q_{GRin} + Q_{Heater} - L \cdot E - (T_{in} - T_{out}) \cdot (q_v \cdot C_p \rho + w \cdot k)) \quad (9)$$

$$\left(\frac{dAH_{in}}{dt}\right) = \frac{1}{\rho \cdot H} (E - (AH_{in} - AH_{out}) \cdot q_v \cdot \rho) \quad (10)$$

$$\left(\frac{dT_f}{dt}\right) = \frac{1}{C_s \cdot Z_0} \left(\alpha \cdot \frac{Q_{GRin}}{1000} + \epsilon_f \cdot \sigma (\epsilon_a \cdot a T_{in}^4 - T_{out}^4) + h_s (T_{in} - T_f) + \left(\frac{k_s (T_{bl} - T_f) \cdot 2}{Z_0 + Z_1}\right) \right) \quad (11)$$

2.3 난방 부하 계산식

기간난방부하는 재배 기간 중 난방이 필요한 시기의 난방에 따른 열량이다. 온실에서 발생하는 열 손실은 전체 열손실의 60% 이상을 차지하는 피복재를 통한 관류열량, 틈새를 통해 손실되는 환기전열량, 그리고 토양의 열교환에 의한 지중전열량으로 나뉜다(Nam과 Shin, 2015). 기간난방부하는 피복면적을 기준으로 평균난방부하계수와 일조시간에 따른 조정계수를 곱하여 식(13)과 같이 구한다. 최대난방부하($Q_{HLoadmax}$), 기간난방부하(Q_{HLoad}) 산출식과 연료소비량(F_v)은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Son 등, 2021):

$$Q_{HLoadmax} = A_{fl} \cdot U (T_{in} - T_{out}) \cdot (1 - f_r) \quad (12)$$

$$Q_{HLoad} = A_{fl} \cdot U_{average} (T_{in} - T_{out}) \cdot K_r \quad (13)$$

$$F_v = \left(\frac{Q_{HLoad}}{F_{Heat} \cdot N_{eff}}\right) \quad (14)$$

2.4 환기율 및 적정 탄산시비량 계산식

환기율이란 단위시간당 외부 공기의 유입량을 뜻한다. 환기량은 단위시간당 몇 회분의 공기가 유입되었는가를 나타내는 환기횟수(V_n)와 온실체적(V_{total})으로 구할 수 있다. 환기율(q_v)은 환기량을 온실의 바닥면적(A_{fl})으로 환산한 값이며, 계산식은 다음과 같다(Sabeh와 Giacomelli, 2006):

$$q_v = \left(\frac{V_n \cdot V_{total}}{A_{fl}}\right) \quad (15)$$

적정 수준의 CO_2 농도는 탄산시비량의 결정 기준으로서 작물의 종류, 생육단계 및 광도, 수분 등 환경조건에 따라 다르다. 적정 CO_2 농도를 유지하기 위해 공급해야 하는 단위면적당 시비량은 온실 체적, 환기 횟수, 대기 중의 CO_2 농도, 단위면적당 작물의 순광합성량 등을 고려하여 계산한다. 농도 단위를 $g \cdot m^{-3}$ 대신 ppm으로 변경하기 위해 환산계수를 이용하여 계산하면 다음과 같다(Son 등, 2021):

$$D_{CO_2} = V_{total} \cdot \left(\frac{V_n}{A_{fl}}\right) \cdot (D_{target} - D_{out}) \cdot \left(\delta \cdot \frac{273}{273 + T_{in}}\right) \cdot P_n - S \quad (16)$$

$$D_{total} = A_{fl} \cdot D_{CO_2} \quad (17)$$

2.5 적정 일적산광량 및 필요 보광량 계산식

최적 생육에 부합하는 온실 내 기준 광도는 일적산광량을 기준으로 결정한다. 목표 일적산광량(DLI)은 일조시간(h^{-1})을 나누어 결정하며 광원의 조명광도(PPFD, $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)는 광원의 개수, 광원의 광속을 바닥면적(A_{fl})으로 나눈 값으로 환산한다. 일적산광량에 근거한 필요 보광량 산출은 다음과 같다(Lee 등, 2021).

$$Light\ intensity\ (PPFD) = \frac{PPF(mmol \cdot s^{-1}) \cdot Number\ of\ lamps}{A_{fl}} \quad (18)$$

$$DLI_{total} = Light\ intensity \cdot Hours \quad (19)$$

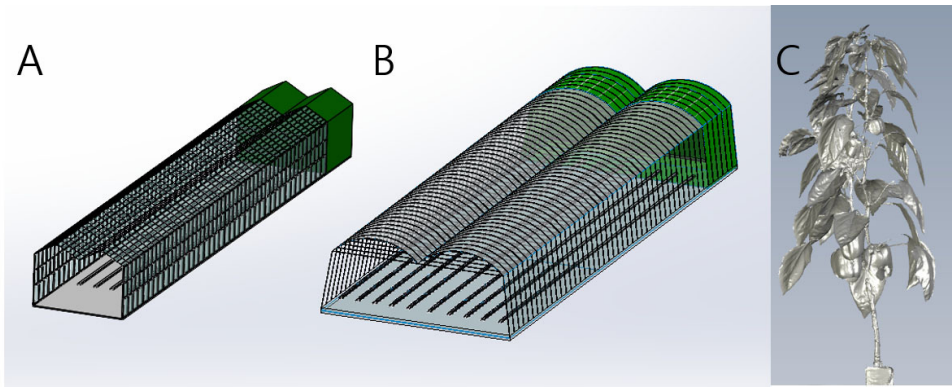


Fig. 4. 3D structural design of multi-span plastic film house (A), Venlo-type glasshouse (B), and 3D scanned sweet pepper plant at 20 weeks after transplanting implemented in the greenhouse educational simulation.

3. 온실 환경 3차원 모델

교육용 시뮬레이터 소프트웨어 개발을 위해 실험 대상 벼로형 유리온실과 연동형 플라스틱 필름 온실을 실측값을 바탕으로 CAD 소프트웨어(SOLIDWORKS, Dassault Systemes, Vélizy-Villacoublay, France)를 사용해 모델링하였고, 거터, 암면 슬라브, 암면 배지 역시 실제와 동일하게 3차원으로 구축하였다(Fig. 4A, 4B). 고해상도의 휴대용 3차원 스캐너(GO!SCAN50TM, CREAFORM, Lévis, Quebec, Canada)를 이용하여 온실 파프리카의 3차원 스캔을 총 7단계의 생육 단계별로 진행하였다(Fig. 4C).

결과 및 고찰

1. 작물 증산 시나리오(E_T)

작물의 수분 사용량 추정 및 예측은 작물 개체 기준의 관수량과 재배시설의 규모에 따른 전체 관수량을 결정한다는 점에서 매우 중요한 요인이다(Zeng 등, 2009). 일반적으로 작물의 증산 모델은 적산광에 근거하여 광도가 증가할수록 증산량이 많아진다는 가정 하에 Penman-Monteith의 모델에 기반한 예측식이 주로 이용되었다(Jolliet과 Bailey, 1992; Medrano 등, 2005; Ta 등, 2011). 그러나 일정 수준 이상의 조건에서는 증산량이 광도의 증가와 비례하지 않으며, 광도의 편차가 큰 계절에는 추정 오차가 커질 수밖에 없다(Shin과 Son, 2015). Shin 등(2014)은 정밀한 증산량 추정을 위해 광도 보정식을 적용하여 파프리카 재배에 맞게 변형된 증산량 추정식을 사용하였고, 본 연구의 시뮬레이션에서도 해당 식을 적용하였다. 시뮬레이터 식 (8)에서 사용된 계수 a, b는 각각 0.26, 0.09 (kg/day)이며, 엽면적지수(leaf area index, LAI, $m^2 \cdot m^{-2}$)는 생육 초기 단계인 0.3부터 생육 후기의 3을 기준으로, 수증기 압포차(VPD_m)는 Shin 등(2014)을 참고하여 0 - 0.040kPa

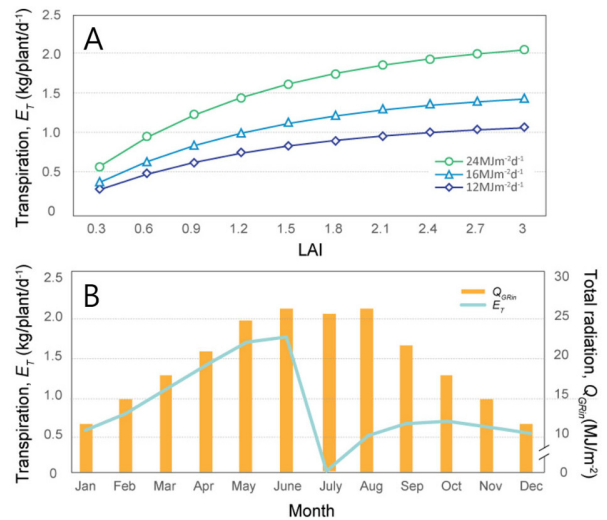


Fig. 5. Simulated greenhouse transpiration and LAI at the different radiation levels (A) and light intensities of inside and outside the plastic film house in September and January 2021 (B).

범위로 적용하였다. 일적산광량은 파프리카 작물의 생육 초기부터 후기까지의 단계를 대변하는 10월, 1월, 4월을 기준으로 각각 16, 12, 24 $MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 로 설정하였다. 재식밀도는 국내 파프리카 재배 농가에서 보편적으로 적용되는 3주/ m^2 (Jeong 등, 2009)로 설정한 뒤, 플라스틱 필름 온실에서의 작물 1주의 증산량을 추정하였다. 작물의 증산량은 Eq. (8)에서와 같이 광도와 비례적인 관계로 증가하였으며, 또한 LAI에 따라 함께 증가하는 경향을 보였으나 LAI 2.7($m^2 \cdot m^{-2}$) 이상 수준에서 증가폭이 감소하였다(Fig. 5A). 이는 Kang 등(2019)이 보고한 바와 같이 생육 단계가 진전됨에 따라 파프리카 작물의 상단부 및 인접 작물에 의해 균락 내수광량이 감소했기 때문에 증산의 증가폭 역시 감소한 것으로 판단된다. 한편, 파프리카 장기 재배의 경우, 7월 간 휴작기를 갖은 뒤, 광량이 충분한

8월에 정식하여 광량 및 일조시간이 적은 겨울철에 생육 증기를 맞이하기 때문에 생육 단계에 따른 파프리카의 증산량은 겨울철까지 거의 증가하지 않다가 광량이 증가하는 봄철부터 급격하게 증가하였다(Fig. 5B). 따라서 파프리카 작물의 증산량 추정에 있어서 환경 변수 이외에 작물의 재배 작형 및 생육 변화에 따른 증산량 변화도 중요하게 고려해야 할 것이다.

2. 기간난방 부하 시나리오(Q_{Hload})

겨울철 난방부하 시뮬레이션에서는 2021년 12월 한달 동안의 외부 기온 데이터를 이용하여, 연동형 플라스틱 필름 온실의 내부 기온과 난방부하 및 연료소비량을 계산하였다. 식에 사용된 평균난방부하계수($U_{average}$)와 피복재의 열절감률은 각각 $2.94(\text{kcal}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$ 와 0.35 였다. 12월 평균 일조시간에 따른 조정계수는 2820였다. 원래 난방부하의 단위인 $\text{kcal}\cdot\text{h}^{-1}$ 는 환산계수 0.001163 을 이용하여 kW로 변환되었다. 연료소비량(F_v)을 추정하기 위한 연료 발열량(F_{Heat})과 난방 장치의 열이용효율(N_{eff}) 값은 등유의 평균발열량인 $8790(\text{kcal}\cdot\text{L}^{-1})$ 과 온수난방의 열이용효율 0.7 을 적용하였다. 난방 시 설정한 목표 온도는 20°C 였다.

2021년 12월 한 달의 평균 외부 기온은 약 0.1°C 였고, 플라스틱 필름 온실 내 평균 온도는 7.4°C 였다. 12월 중 가장 추운 날은 26일이었고 최저 기온은 온실 외부가 -12.1°C , 내부가 1.6°C 였으며 난방 기간 중 가장 추울 때 드는 열량인 최대난방부하는 321MW 였다(Fig. 6). 난방부하 값을 연료의 발열량과 난방장치의 열이용 효율로 나눈 연료소비량은 기간난방부하 그래프와 동일한 양상을 보였는데, 26일의 연료소비량이

17.1L 로 가장 높게 나타났다.

3. 환기 시나리오

3.1 환기율 시나리오(q_v)

고온기의 온실은 천창과 측창 등의 환기 시설을 개방하여도 실내 온도가 40°C 가까이 오를 수 있다. 이는 많은 작물의 생육적온을 초과한 수준이므로 고온장해가 발생할 수 있는 재배 조건이다. 환기율은 온실 내부의 온도와 관련된 에너지수지와 밀접한 관련이 있으므로 활용하기에 유용한 항목이다. 유리 온실과 플라스틱 필름 온실의 경우, 시뮬레이션된 자연 환기율은 큰 차이가 나지 않았다(Table 1). 이는 온실체적(V_{total})과 바닥면적(A_f)의 비가 유사하여 시간당 환기횟수에 따라 환기율이 유사했기 때문으로 사료된다.

3.2 탄산 시비량 시나리오(D_{total})

탄산가스 시비량 추정을 위해 파프리카 품종별 CO_2 농도에 따른 생산성 비교 연구를 참고하여(Beny와 Leath, 2002), 온실 내 CO_2 농도 수준을 700ppm 으로, 외부 CO_2 농도는 400ppm 으로 설정하였다. 단위면적당 작물의 순광합성량은 $\mu\text{mol}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 단위를 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 으로 변환해 주기 위해 환산계수 0.1584 를 이용하여, $3(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$ 으로 설정하였다(Shin 등, 2022). 각 온실의 전체 탄산가스 시비량(D_{Total})은 단위면적당 탄산가스 시비량(D_{CO_2})에 각 온실의 바닥면적(A_f)을 곱하여 추산하였다. 탄산가스 투입량은 온실 체적(V_{total})과 비례하였으며, 유리 온실에 비해 체적이 큰 플라스틱 필름 온실에서 최대 140% 가까이 늘어났다. 한편, 시간당 환기 횟수가 2회에서 20회로 많아지면 적정 CO_2 시비 농도를 유지하기 위해 탄산가스 투입량은 유리온실 및 플라스틱 필름 온실에서 각각 약 560% , 553% 이

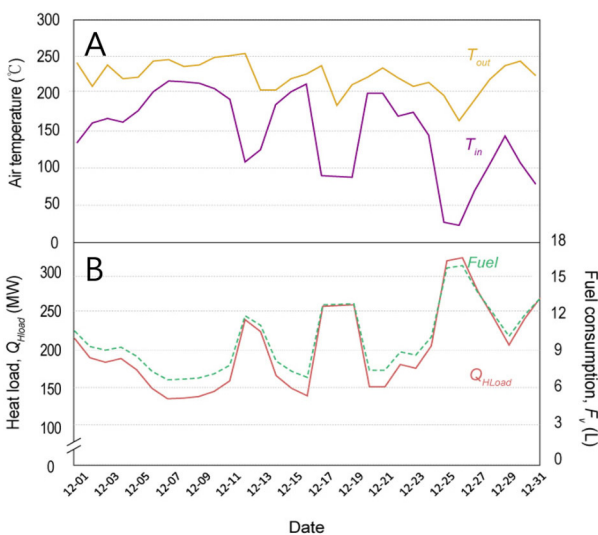


Fig. 6. Simulated air temperature of the greenhouse inside and outside in December 2021 (A) and heat load and fuel consumption (B).

Table 1. Ventilation rate ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and optimal amount of CO_2 enrichment ($\text{kgf}\cdot\text{h}^{-1}$) implemented with the simulation for Venlo-type glasshouse and multi-span plastic film house structure design at summer condition in the morning.

Air exchange per hour (h^{-1})	Ventilation rate ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		Optimal CO_2 enrichment ($\text{kgf}\cdot\text{h}^{-1}$)	
	Glasshouse	Plastic house	Glasshouse	Plastic house
N				
2	0.003	0.003	2.4	5.8
10	0.014	0.013	8.4	20.1
20	0.038	0.026	15.9	37.9
40	0.058	0.052	31.1	73.5
80	0.117	0.105	61.2	144.7
160	0.235	0.210	121.6	287

상 증가하였다(Table 1). 유리온실을 대상으로 한 환기횟수별 탄산가스 투입량을 시뮬레이션한 결과, 자연환기 없이 틸새 환기 수준에 불과한 환기횟수 2회의 경우, 적은 CO₂ 투입량으로도 700에서 1,000ppm 수준까지의 적정 탄산시비 농도를 유지할 수 있었다(Fig. 7A). C3 식물인 파프리카의 경우, 온실 내 CO₂ 농도가 대기 중 CO₂ 농도보다 2-3배 가량 높을 때, 생육 적온이 5-10°C 정도 상승한다는 점에서 오전 중 탄산시비 시 온실 내 온도가 상승하더라도 자연환기를 하지 않는 것이 경제적이고 효과적이라는 것을 알 수 있다(Martzopoulou 등, 2020).

그러나 온도가 급격히 상승하여 한계 온도 35°C(Son 등, 2021)를 초과하는 경우 환기는 필수적이므로 환기창이 열렸을 때 탄산시비를 한다면, 시설 내 CO₂ 농도가 대기 중 CO₂ 농도보다 떨어지지 않게 시비 설정 값을 대기 중 농도 ±50ppm으로 제어하는 것이 합리적일 것이다.

3.3 포그 냉방 시나리오(E_c)

자연환기는 환기 효과가 낮고 외부의 풍압력, 실내외 온도차, 환기창의 위치 등의 요소에 지배받기 때문에 환경 제어 측면에서 효과적이지 않다. 따라서 고온기에는 다양한 냉방 수단을 이용하여 실내 온도를 낮추는 기술이 필요하다. 생육 단

계 및 포그 냉방 시설 유무에 따른 유리온실 내외부 기온차를 보기 위해 작물의 생육 단계를 환기가 많이 필요한 정식 직후(9월), 최대 생산기에 접어드는 생육 후반(5월)으로 설정하였다(Fig. 7B).

Eq. (7)에 따라 작물의 증산(E_T)과 냉방시스템(E_c)의 합인 증발산량(E)은 내부 절대습도(AH_{in})과 외부 절대습도(AH_{out})의 차로 알 수 있다. 현열 에너지는 작물의 증산 또는 냉방 시스템의 발산에 의해 제거되는 것을 고려할 때, 온실 내부의 온도는 환기 횟수, 작물의 증산량, 냉방 시스템의 유무에 따라 크게 달라진다. 본 시뮬레이션에서 온실 내외부의 온도차는 환기를 하지 않은 생육초기(E without fog)의 냉방시설이 없는 온실에서 16.4°C로 가장 높게 나타났다. 냉방 효율은 생육 단계와 상관 없이 환기횟수가 많아짐에 따라 감소하였다. 시뮬레이션에서 적정 온실 기온인 24°C에 도달하기 위해서 필요한 온실 내외부 기온차는 -9.9°C 수준이었다. 이는 환기를 하지 않은 생육 후기의 유리 온실(L with fog)에서 냉방 시스템을 가동하는 조건에 해당한다.

4. 보광 시나리오(DLI_{out})

시설에서 인공 광원을 이용한 재배는 크게 광합성을 촉진하는 보광 재배와 일장조절로 생육상을 전환시키는 전조 재배로 분류된다. 일반적으로 보광의 광도는 광보상점 이상이 되어야 하며, 광포화점에 이르기까지 광도가 높을수록 광합성 효율이 증가한다(Runkle, 2007). 실험 대상 지역의 1년 동안의 온실 외부 평균 일적산광량(DLI)은 19.4 mol·m⁻²·d⁻¹였으며, 가장 높은 날과 낮은 날은 각각 5월의 28.2 mol·m⁻²·d⁻¹와 1월의 10.3 mol·m⁻²·d⁻¹이었다. 토마토와 파프리카의 최적 DLI가 20에서 35 mol·m⁻²·d⁻¹인 것을 고려할 때, 시설과채류 재배 기간 동안 광환경을 개선하기 위해 보광은 필수적이다(Dorais, 2003; Yoon 등, 2021). 이번 시뮬레이션에는 겨울철 부족한 광량을 보충하기 위한 보광 시스템이 적용된 플라스틱 필름 온실을 가정하였으며, 2022년 1월 기준, 하루 DLI가 11.8 mol·m⁻²·d⁻¹인 날을 선정하였다. 작물의 생육 단계는 8월에 정식했다는 전제

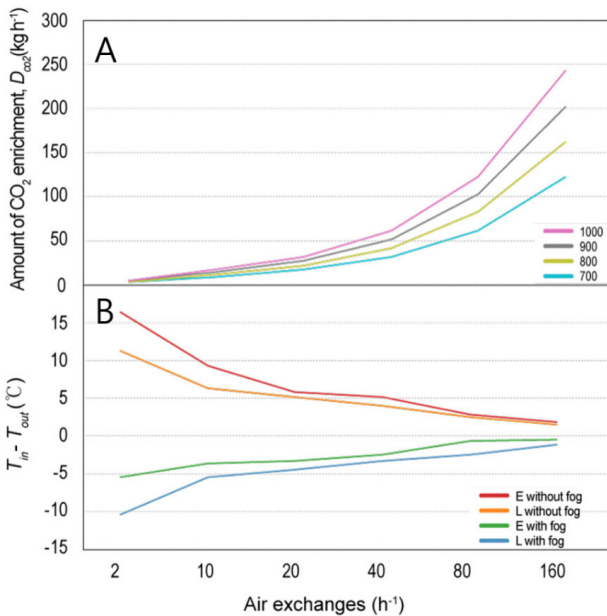


Fig. 7. Simulated greenhouse CO₂ enrichment requirement at the different target CO₂ concentrations (A) and the air temperature differential during the hottest part of the day in May at different air exchanges and different scenarios (B). Simulation scenarios include early stage (E) or late stage (L) in combination with or without fog cooling system.

Table 2. Values of supplemental lighting needed for gaining target daily light integral (DLI) implemented with the simulation for multi-span plastic film house structure design on December 24th, 2021.

Date	Target DLI (mol·m ⁻² ·d ⁻¹)	Duration of supplemental lighting (h ⁻¹)	
		Q_{HPS}	$Q_{HPS} + Q_{LED}$
24th	20	10.8	8.1
Dec.	25	17.3	13.0
	30	23.9	18.0

하에 1월 기준으로 초장 2m 수준의 생육 단계를 고려하였다.

시뮬레이션에 이용한 광원은 시설 재배에 주로 사용되는 고압나트륨등(high pressure sodium lamp, HPS lamp)과 수관 내 보광 LED등이다. 광투과율 70%의 플라스틱 필름 온실(Lopez와Runkle, 2017)에서 목표DLI를 20에서 30mol·m⁻²·d⁻¹로 설정하였을 때, 고압나트륨등을 적용했을 경우와 수관 내부를 보광하는 LED등을 함께 적용했을 때의 보광 필요시간을 계산하였다(Table 2). 보광등에서 조사된 PPFd는 고압나트륨등의 경우 2m 높이에서 211μmol·m⁻²·s⁻¹이었으며, 적색, 청색 LED 램프 보광의 경우, 균락 내부 0.5m 거리에서 70μmol·m⁻²·s⁻¹이었다. 이를 한 시간 단위로 환산하면 각각 0.7596, 0.2532mol·m⁻²이었다. 시뮬레이션 결과, 20mol·m⁻²·d⁻¹의 DLI를 목표로 한다면, 하루에 상부 보광으로는 약 10시간 47분, 상부 보광 및 수관 내 보광으로는 약 8시간의 보광등 작동이 필요하다. 목표 일적산광량 30mol·m⁻²·d⁻¹을 채우기 위해서는 약 24시간의 상부보광등 작동, 약 18시간의 상부보광 및 균락 내 보광등 작동이 필요한 것으로 나왔다. 이는 시뮬레이션 해당 일의 DLI가 매우 낮은 수준인데다, 겨울철 플라스틱 필름 온실의 광투과율이 약 70%에 불과하기 때문인 것으로 보인다.

5. 소프트웨어 개발 및 활용

앞서 분석한 결과처럼 시뮬레이션 기술은 시간 및 공간에 구애 받지 않고 재배 및 환경 조건에 따라 다양한 온실 내부환경을 경험할 수 있게 해준다. 정부 차원에서 스마트팜 보급을 위해 많은 시스템을 구축해가고 있지만, 농업 관련 기술 발전 속도에 비하여 보급 속도는 뒤처지고 있는 실정이다. 또한 대부분의 농가에서 병해충의 전염이나 재배 노하우의 유출 우려 등으로 외부인의 방문을 꺼려하므로 현장성 있는 시설 농업 교육을 실시하는데 어려움이 많다(Kim 등, 2018). 실제 재배 시설과 유사하게 구축된 3차원 온실에서 환경 조절 시스템 등의 시설 운영 체험을 해본다면 시설 운영에서 발생하는 문제점과 생산성 제고를 위한 개선 방안을 이해하는데 도움이 될 것이다.

본 시뮬레이션의 온실 환경 제어 방식은 하루 24시간을 최대 6개의 주기로 분할하여 각 주기마다 환기, 난방, 보광 등 제어 시스템의 설정 값을 독립적으로 입력할 수 있으며, 폐루프 제어 시스템(closed loop system)을 통해 출력값과 목표값을 비교하여 편차가 작아지도록 하여 최종적으로 목표 제어값에 도달하도록 하였다(Fig. 8). 모델의 검증은 시설 내 주요한 환경 요인인 기온으로 진행하였다. 실측치와 시뮬레이션에 의한 예측치의 결정계수(R²)와 표준 오차는 각각 0.85, 1.1(°C)로, 기온치와 시뮬레이션에 의한 온도 예측치의 경향성이 유

사함을 확인할 수 있었다(Fig. 9). 모델 검증의 정량적 지표로서 결정계수는 0.8 이상으로 높게 나타난 바, 본 연구의 결과는 교육용 시뮬레이션에서 온실 환경 변화를 충분히 반영할 수 있다고 판단된다.

본 연구의 온실 환경 시뮬레이션은 HTML5 웹 표준으로 개발하여 PC뿐만 아니라 모바일, 태블릿에서 동작 가능하도록 개발할 계획이다. Fig. 10은 설계된 시뮬레이션 시제품 화면

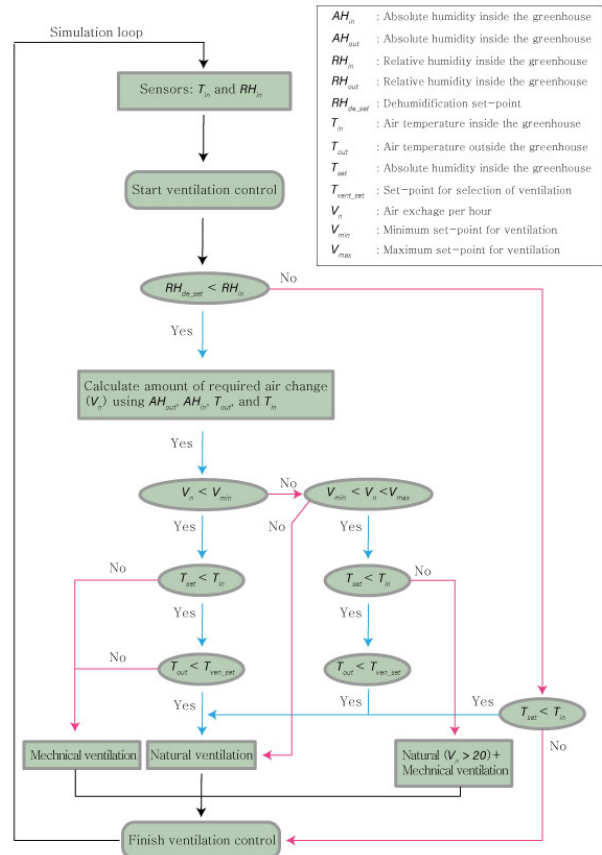


Fig. 8. Schematic illustration of ventilation control process implemented in the greenhouse educational simulation.

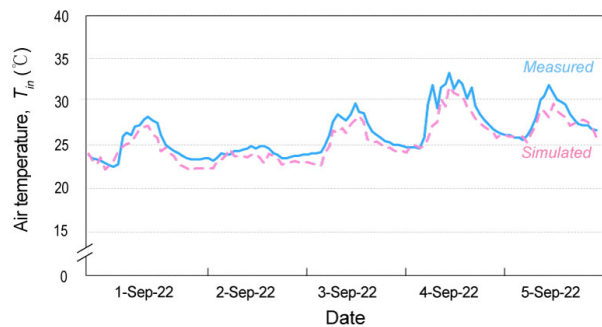


Fig. 9. Time course of measured (—) and simulated (---) air temperature in the greenhouse (T_{in}).

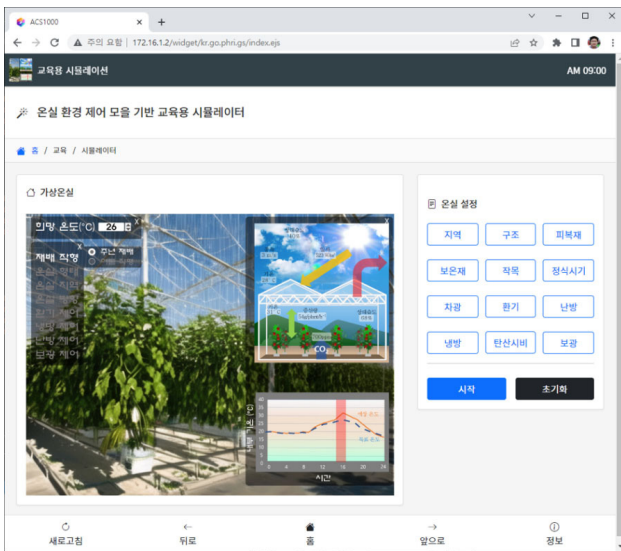


Fig. 10. Screen capture of the prototype greenhouse environment simulator.

을 나타내며, 외부기상 정보는 사용자 설정한 주소를 기반으로 기상청 날씨 정보를 연계하여 사용한다. 또한, 온실 형태 (비닐, 유리) 및 구조, 피복재, 보온재를 설정하면 최대 냉난방 부하 및 기간난방부하를 자동으로 계산하여 시뮬레이션 시 반영할 수 있으며, 농가의 정식 시기, 재배 작형(여름, 겨울) 정보와 차광 스크린, 천/측창, 보광 및 탄산시비 등 설비의 유무를 입력할 수 있도록 설계하였다. 그리고 생육 단계별 권장 기준 및 설정 기준은 실험 및 연구에 근거하여 얻은 최적의 환경 요소 설정 값을 포함하여 재배 상황에 맞게 유연한 적용 및 업데이트가 가능하도록 반영할 것이다.

적 요

국내외로 첨단 ICT 융합기술이 농업 분야에 적용되기 시작하면서, 시설원에 설비들이 고도화되고, 스마트팜 구축 기술 및 인력이 축적되기 시작하였다. 그러나 우리나라 농촌의 경우, 농업생산 연령의 고령화, 국내 농촌 인구의 지속적인 유출, 저출산 등으로 인하여 스마트팜 확대 및 적용에 어려움이 많은 실정이다. 따라서 공간 및 시간에 구속을 받지 않는 간편한 농업인 교육 프로그램이 필요하며, 최근 부상하고 있는 시뮬레이션 기술을 활용한다면 농업 교육용 시뮬레이션 툴 개발도 가능할 것으로 판단된다. 온실 환경 제어 모델을 이용한 시뮬레이션은 다양한 지역과 기상 조건 하에서 대상 온실의 열과 물질에너지의 상호작용을 합리적으로 예측할 수 있게 해준다. 본 연구에서는 온실 환경 제어 모델을 활용하여 외부 기상 데이터를 통해 온실의 환경 변화를 예측하고 가상의 환경 제어

시스템을 통해 환경 제어 시 필요한 에너지값들을 시뮬레이션할 수 있었다. 이러한 결과를 통해 사용자가 직접 맞춤형 환경 제어를 할 수 있도록 편의성을 고려한 사용자 인터페이스를 구축할 것이며, 실제 파프리카 재배 온실의 제어 요소들을 반영할 수 있도록 설계될 것이다. 농업용 교육 시뮬레이션 툴을 최근 활발하게 연구가 이루어지고 있는 작물 생육 모델링 기술 및 전산유체역학 기술과 융합하면 더욱 타당한 결과를 보일 것이다.

추가주제어: 3차원 모델링, 어플리케이션, 온실 시뮬레이터, 증산량, 탄산시비, 환기

사 사

이 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: 421001-03)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- ASAE 2003, Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses. ANSI/ASAE Standard EP406.4:741-749.
- Barton K., and P. Maharg 2007, E-Simulations in the wild: interdisciplinary research, design, and implementation. Games and simulations in online learning: Research and development frameworks. Information Science Publishing, PA, USA, pp 115-148.
- Beny A., and K. Leah 2002, Effects of CO₂ enrichment on yield, carbohydrate accumulation and changes in the activity of antioxidative enzymes in bell pepper (*Capsicum annum* L.). J Horticulture Biotechnol 77:534-540. doi:10.1080/14620316.2002.11511534
- Cunha J.B. 2007, SIMGreen: A simulation tool for the greenhouse climate. Eur Fed Inf Technol Agric.
- De Zwart H.F. 1996, Analyzing energy-saving options in greenhouse cultivation using simulation model. PhD Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, the Netherlands, p 236.
- Dorais M. 2003, The use of supplemental lighting for vegetable crop production: Light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. In Proc Can Greenhouse Conf Oct 9, 2003.
- Filipcak B., J. Gordon, M. Hequet, C. Lee, and M. Picard 1994, Can computer simulation stoke competitive fires? Training 31:12-13.
- Fitz-Rodriguez E., C. Kubota, G.A. Giacomelli, M.E. Tignor, S.B. Wilson, and M. McMahon 2010, Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. Comput Electron Agric

- 70:105-116. doi:10.1016/j.compag.2009.09.010
- Jeong I.S., C.G. Lee, L.H. Cho, S.Y. Park, M.J. Kim, S.J. Kim, and D.H. Kim 2020, Development and validation of inner environment prediction model for glass greenhouse using CFD. *Protected Hort Plant Fac* 29:285-292. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2020.29.3.285
- Jeong W.J., D.J. Myoung, and J.H. Lee 2009, Comparison of climate conditions of sweet pepper's greenhouse between Korea and the Netherlands. *J Bio-Env Con* 18:244-252. (in Korean)
- Joliet O., and B.J. Bailey 1992, The effect of climate on tomato transpiration in greenhouses-measurements and models comparison. *Agric For Meteorol* 58:43-62. doi:10.1016/0168-1923(92)90110-P
- Kang D.B., B.G. Chung, and C.M. Heo 2020, Factors affecting acceptance of smart farm technology: Focusing on mediating effect of trust and moderating effect of IT level. *Korean J Org Agric* 28:315-334. (in Korean) doi:10.11625/KJOA.2020.28.3.315
- Kang W.H., I. Hwang, D.H. Jeong, D. Kim, J. Kim, J.H. Kim, K.S. Park, and J.E. Son 2019, Time change in spatial distributions of light interception and photosynthetic rate of paprika estimated by ray-tracing simulation. *Protected Hort Plant Fac* 28:279-285. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2019.28.4.279
- Kim J.G., I.B. Lee, K.S. Yoon, T.H. Ha, R.W. Kim, U.H. Yeo, and S.Y. Lee 2018, A study on the trends of virtual reality application technology for agricultural education. *Protected Hort Plant Fac* 27:147-157. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2018.27.2.147
- Lee C.G., and J.S. Lee, H.J. Jeong, J.H. Lee, J.H. Kim, J.E. Son, I. Hwang, J.H. Shin, K.S. Park, and J.W. Lee 2021, Greenhouse Supplemental Lighting Technology. National Institute of Horticultural & Herbal Science, RDA, Wanju, Korea, p 82. (in Korean)
- Lee S.N., S.J. Park, I.B. Lee, T.H. Ha, K.S. Kwon, R.W. Kim, U.H. Yeo, and S.Y. Lee 2016, Design of energy model of greenhouse including plant and estimation of heating and cooling loads for a multi-span plastic-film greenhouse by building energy simulation. *Protected Hort Plant Fac* 25:123-132. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2016.25.2.123
- Lopez R., and E.S. Runkle (Eds.) 2017, *Light Management in Controlled Environments*. Meister Media Worldwide, OH, USA.
- Luo W., C. Stanghellini, J. Dai, X. Wang, H.F. de Zwart, and C. Bu 2005, Simulation of greenhouse management in the subtropics, Part II: Scenario study for the summer season. *Biosyst Eng* 90:433-441. doi: 10.1016/j.biosystemseng.2004.12.002
- Martopoulou A., D. Vafiadis, and V.P. Fragos 2020, Energy gain in passive solar greenhouses due to CO₂ enrichment. *Energies* 13:1242. doi:10.3390/en13051242
- Medrano E., P. Lorenzo, M.C. Sanchez-Guerrero, and J.I. Montero 2005, Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions. *Sci Hortic* 105:163-175. doi:10.1016/j.scienta.2005.01.024
- Nam S.W., and H.H. Shin 2015, Development of a method to estimate the seasonal heating load for plastic greenhouses. *J Korean Soc Agric Eng* 57:37-42. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.037
- Navas L.M., S. Plaza, J.L. García, L. Luna, R. Benavente, J.M. Durán, and N. Retamal 1998, Formulation and sensitivity analysis of a dynamic model of the greenhouse climate validation for a mild Mediterranean climate. *Acta Hortic* 456:305-312. doi:10.17660/ActaHortic.1998.456.36
- Runkle E.S. 2007, Maximizing supplemental lighting. *Greenhouse Product News*, November 2007, p 66.
- Sabeh N.C., G.A. Giacomelli, and C. Kubota 2006, Water use for pad and fan evaporative cooling of a greenhouse in a semi-arid climate. *Acta Hortic* 719:409-416. doi:10.17660/ActaHortic.2006.719.46
- Shin J., I. Hwang, D. Kim, J.Kim, J.H. Kim, and J.E. Son 2022, Waning advantages of CO₂ enrichment on photosynthesis and productivity due to accelerated phase transition and source-sink imbalance in sweet pepper. *Sci Hortic* 301:111130. doi:10.1016/j.scienta.2022.111130
- Shin J.H., and J.E. Son 2015, Irrigation criteria based on estimated transpiration and seasonal light environmental condition for greenhouse cultivation of paprika. *Protected Hort Plant Fac* 24:1-7. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2015.24.1.001
- Shin J.H., J.S. Park, and J.E. Son 2014, Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants. *Agric Water Manag* 135:9-18. doi:10.1016/j.agwat.2013.12.009
- Son J.E., I.S. Kim, J.M. Choi, and J.H. Bae 2021, *Greenhouse Horticulture*. Hyangmunsa, Seoul, Korea. (in Korean)
- Statistics Korea (KOSTAT) 2020, *Census of Agriculture, Forestry and Fisheries in 2020*. KOSTAT, Daejeon, Korea. (in Korean)
- Ta T.H., J.H. Shin, T.I. Ahn, and J.E. Son 2011, Modeling of transpiration of paprika (*Capsicum annuum* L.) plants based on radiation and leaf area index in soilless culture. *Hortic Environ Biotechnol* 52:265-269. doi:10.1007/s13580-011-0216-3
- Tadj N., T.D. Bartzanas, Fidaros, B. Draoui, and C. Kittas 2010, Influence of heating system on greenhouse microclimate distribution. *Transact ASABE* 53:225-238. doi:10.13031/2013.29498
- Takakura T., and J.E. Son 2004, *Simulation of Biological and Environmental Processes*. Kyushu University Press, Kyushu, Japan, p 139.

- Tignor M.E., S.B. Wilson, G.A. Giacomelli, C. Kubota, E. Fitz-Rodriguez, T.A. Irani, E.B. Rhoades, and M.J. McMahon 2007, Multi-institutional cooperation to develop digital media for interactive greenhouse education. HortTechnology 17: 397-399. doi:10.21273/HORTTECH.17.3.397
- Yang Y.X., D.H. Zhu, and T.L. Tan 1999, The development of IT and the application trend of which in agriculture. Comput Agric 4:1-6.
- Yoon S., J.H. Kim, I. Hwang, D. Kim, J. Shin, and J.E. Son 2021, Effect of stem number on growth, fruit quality, and yield of sweet peppers grown in greenhouses under supplemental lighting with high pressure sodium lamps in winter. J Bio-Env Con 30:237-243. (in Korean) doi:10.12791/KSBEC.2021.30.3.237
- Yu I.H., N.K. Yun, M.W. Cho, H.R. Ryu, and D.G. Moon 2014, Development of CFD model for analyzing the air flow and temperature distribution in greenhouse with air-circulation fans. CNU J Agric Sci 41:461-472. (in Korean) doi:10.7744/cnujas.2014.41.4.461
- Zeng C.Z., Z.L. Bie, and B.Z. Yuan 2009, Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse. Agric Water Manag 96:595-602. doi:10.1016/j.agwat.2008.09.019
- Zhu Y. 2004, Effects of information technology in agriculture modernization. Agric Mod 5:43-44.

Table S1. Nomenclature for the educational greenhouse simulation.

Symbol	Value	Units	Description
A_{fl}	288	m ²	Area of the glass greenhouse floor surface
	760		Area of the plastic greenhouse floor surface
aT_f		K	Absolute temperature of the ground inside the greenhouse
aT_{in}			Absolute temperature inside the greenhouse
C_p	1010	J kg ⁻¹ K ⁻¹	Specific heat of moist air
E	2000	kJ m ⁻³ °C ⁻¹	Evapotranspiration rate inside the greenhouse
H	5.3	m	Average glass greenhouse height
	5.5		Average plastic greenhouse height
H_{cap}		kcal m ⁻² h ⁻¹	Heater capacity
K_{glass}		J m ⁻² °C ⁻¹ s ⁻¹	Heat transmission coefficient of cladding materials-glass
$K_{plastic}$			Heat transmission coefficient of cladding materials-film
f_r			Heat saving rate of cladding materials
$Q_{HLoadmax}$		kcal h ⁻¹	Maximum heating load
Q_{HLoad}			Heating load
$Q_{Cladding}$			Heat loss through cladding materials
Q_{GRin}		W m ⁻²	Global radiation absorbed inside the greenhouse
Q_{ground}			Heat flux from ground surface
Q_{GRout}			Global radiation outside the greenhouse
Q_{HEAT}			Heat flux from heating system
Q_{IV}			Heat loss by infiltration and ventilation
q_v		m ³ m ⁻² s ⁻¹	Ventilation rate
RH_{in}		%	Relative humidity inside the greenhouse
RH_{out}			Relative humidity outside the greenhouse
L		J kg ⁻¹	Latent heat of vaporization of water
w			Ratio of cladding material surface to floor surface
N_H			Number of heaters
τ_c	0.90		Solar Radiation Transmittance of glass
	0.70–0.80		Solar Radiation Transmittance of film
ρ_g	0.5		Reflectance of the solar radiation on the ground
T_{in}		°C	Air temperature inside the greenhouse
T_{out}			Air temperature outside the greenhouse
T_{out24}			Daily average air temperature
T_f			Ground surface temperature inside the greenhouse
LAI	0.3–3	m ² m ⁻²	Leaf area index
P_n		g m ⁻² h ⁻¹	net assimilation rate
S			Soil respiration
V_{gtotal}		m ³	Volume of glass greenhouse
V_{ftotal}			Volume of plastic greenhouse
VPD_{in}		kPa	Vapor pressure deficit inside the greenhouse
VPD_{out}			Vapor pressure deficit outside the greenhouse
AH_{in}		g _{water} kg ⁻¹ dry air	Absolute humidity inside the greenhouse
AH_{out}			Absolute humidity outside the greenhouse
α		%	Soil surface absorptivity
ρ	1.225	kg _{dry air} m ⁻³	Specific mass of air
σ	5.67E-08	W m ⁻² K ⁻⁴	Stefan-Boltzmann Constant
E_T		kg plant ⁻¹ d ⁻¹	Transpiration from the plants
E_v		L m ⁻² d ⁻¹	Water loss by infiltration and ventilation
E_c			Fog cooling system
F_v		L	Fuel usage
F_{Heat}	8790	kcal L ⁻¹	Calorific value of fuels
U	5.3	kcal m ⁻² h ⁻¹ °C ⁻¹	Coefficient of heat load
$U_{average}$	2.94		Coefficient of average heat load
K_r	2820		Adjustment factor according to sunlight time
N_{eff}	0.7		heat utilization efficiency of hot water heating
V_n			Air exchanges per hour
D_{total}		kgf h ⁻¹	Total amount of CO ₂ enrichment
D_{co2}		g m ⁻² h ⁻¹	Amount of CO ₂ enrichment per unit area
DL_{total}		mol ⁻¹ m ⁻² d ⁻¹	Amount of light requirement