KIEAE Journal, Vol. 26, No. 5, Oct. 2026, pp.79-85.

KIEAE Journal

Korea Institute of Ecological Architecture and Environment

141

스마트팜 차광·환기 통합제어에 따른 냉방에너지 및 실내환경 비교 분석

Comparative Analysis of Cooling Energy and Indoor Environment According to Integrated Shading and Ventilation Control in a Smart Farm

서진아* · 최슬건** · 박두용***

Jina Seo* · Sul-Geon Choi** · Doo Yong Park***

* Main author, Graduate Student, Dept. of Building Equipment and Fire Protection Engineering, Chungwoon Univ., South Korea (jinajjang100@naver.com)

** Coauthor, Professor, Department of Architecture Design, Ansan Univ., South Korea (sulgeon@ansan.ac.kr)

*** Corresponding author, Professor, Dept. of Building Equipment and Fire Protection Engineering, Chungwoon Univ., South Korea (pdy0528@chungwoon.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study analyzed the indoor environment and cooling energy performance of a smart greenhouse under different shading and ventilation control strategies during summer. **Method:** An EnergyPlus-based greenhouse model was developed, and six cases were compared: a baseline, fixed shading, fixed ventilation, EMS-based shading control, EMS-based ventilation control, and integrated EMS-based shading and ventilation control. The EMS shading control was based on the light saturation point (LSP) and light compensation point (LCP) of tomato crops, while ventilation was controlled according to indoor and outdoor temperature conditions. **Result:** The results showed that fixed shading reduced the maximum indoor illuminance to 46,536 lux and cooling energy consumption by 25.5% compared with the baseline, although continuous shading could restrict light availability under low solar radiation conditions. Fixed ventilation limited indoor temperature rise but increased cooling energy consumption by 574.3% due to the continuous introduction of hot outdoor air. In contrast, EMS-based ventilation control reduced cooling energy consumption by 18.6%, while integrated EMS-based shading and ventilation control achieved a 21.7% reduction and maintained the maximum indoor temperature at approximately 36.5°C. These results indicate that selective shading and ventilation control considering crop light requirements and indoor and outdoor thermal conditions can contribute to effective management of the indoor environment and cooling energy consumption in smart greenhouses.

KEYWORD

스마트 온실
차광제어
환기제어
에너지관리시스템 (EMS)
냉방에너지

Smart Farm
Shading Control
Ventilation Control
Energy Management System(EMS)
Cooling Energy

ACCEPTANCE INFO

Received Sep. 2, 2026
Final revision received Sep. 10, 2026
Accepted Sep. 16, 2026

ⓒ 2026. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

최근 시설원예 분야에서는 정보통신기술을 활용한 스마트온실의 보급이 확대되고 있으며, 국내 시설원예 스마트팜의 보급면적 또한 지속적으로 증가하고 있다[1]. 그러나 여름철에는 높은 외기온도와 강한 일사로 인해 온실 내부에 열이 축적되어 실내 온도가 크게 상승할 수 있으며[2], 이러한 고온 환경은 작물의 생육에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 토마토는 전 세계적으로 널리 재배되는 대표적인 시설원예 작물로, 스마트온실의 환경제어 및 생육환경 관련 연구에서 주요 대상 작물로 활용되고 있다. 이에 본 연구에서는 스마트온실의 환경제어를 위한 기준 작물로 토마토를 선정하였다. 특히 토마토는 고온 조건에서 광합성 및 생리적 기능이 저하되고, 지속적인 고온 스트레스는 개화, 착과 및 수량에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있으며[3], 광환경 및 온도조건에 따른 생육 특성을 고려한 환경제어가 요구된다. 따라서 여름철 스마트 온실에서는 작물의 적정 생육환경을 유지하면서 냉방에너지 소비를 줄이기 위한 효과적인 환경조절 전략이 필요하다.

pISSN 2288-968X, eISSN 2288-9698
http://dx.doi.org/10.12813/kieae.2026.26.5.079

온실의 고온 환경을 완화하기 위한 대표적인 방법으로 차광과 환기가 활용되고 있다. 차광은 태양복사 유입을 감소시켜 실내 온도 상승과 냉방부하를 완화할 수 있으나, 과도한 차광은 작물 생육에 필요한 광 유입까지 제한할 수 있다[4]. 자연 환기는 온실 내부에 축적된 열을 외부로 배출할 수 있지만, 그 효과는 실내·외 온도차와 외부 풍환경 등의 기상조건에 영향을 받는다[5]. 따라서 차광과 환기를 일정한 조건으로 지속적으로 운전하기보다는 작물의 광환경과 실내·외 온도조건을 고려하여 선택적으로 운전하는 제어방식이 요구된다. 선행연구에서는 온실의 실내 조도, 온도, 상대습도 및 외기온도 등의 환경정보를 기반으로 창호와 차광장치 등의 운전상태를 결정하는 환경·에너지 관리시스템이 제안된 바 있다[6].

한편 EnergyPlus를 활용하여 스마트 온실의 자연 환기 및 차광 등의 냉방기술 적용에 따른 실내환경과 에너지 소비 특성을 분석한 연구가 수행되었다[7]. 그러나 차광과 환기는 각각 실내 광환경과 열환경에 서로 다른 영향을 미치므로, 단순한 적용 여부뿐만 아니라 작물의 광환경 및 실내·외 온도조건을 고려한 제어방식에 따른 실내환경과 냉방에너지 성능을 함께 검토할 필요가 있다. 또한 차광과 환기를 개별적으로 제어하는 경우와 통합적으로 제어하는 경우에 대한 비교를 통해 제어방식에 따른 성능 차이를 분석할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 EnergyPlus를 이용하여 여름철 스마트 온

실의 차광 및 환기 제어방식에 따른 실내환경과 냉방에너지 소비 특성을 분석하였다. 이를 위해 무제어 조건을 기준으로 고정 차광, 고정 환기, EMS 기반 차광제어, EMS 기반 환기 제어 및 차광·환기 통합제어 조건을 구성하였다. EMS 기반 차광제어에는 토마토의 광포화점(Light Saturation Point, LSP)과 광보상점(Light Compensation Point, LCP)을, 환기 제어에는 실내·외 온도조건을 제어 기준으로 적용하였다. 각 제어방식에 따른 실내 조도, 실내 온도 및 냉방에너지 소비량을 비교·분석하여 스마트온실의 실내환경 조절과 냉방에너지 절감을 고려한 차광 및 환기제어 전략의 적용 가능성을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 대상 온실 및 시뮬레이션 설정

본 연구에서는 EnergyPlus(Version 8.9)를 활용하여 대구광역시 연동형 스마트 온실의 하절기 열환경 및 냉방부하를 분석하였다. Version 8.9는 기존에 구축된 스마트온실 모델과 입력조건의 일관성을 유지하기 위해 적용하였다. 대상 온실의 연면적은 1,536m^{2}이며 온실의 형상 및 시뮬레이션 모델은 Fig. 1.과 같다.

분석의 목적은 차광 및 환기 제어 알고리즘 적용에 따른 실내환경 및 냉방에너지 성능의 상대적 차이를 비교·분석하는 데 있다. 이에 동일한 하절기 기상조건에서 각 제어방식의 시간별 작동 및 성능 특성을 집중적으로 비교하기 위해 8월 1일부터 8월 7일까지의 1주일을 분석기간으로 설정하였다. 실내온도 및 조도의 시간변화를 분석하기 위해 시뮬레이션 Timestep은 15분 간격(4 timestep/hr)으로 설정하였다. 온실 외피에는 단판유리(Single Glass)를 적용하였으며, 실내 환경센서의 높이는 지면으로부터 2m로 설정하였다. 대상 온실 및 시뮬레이션의 주요 설정조건은 Table 1.과 같다.

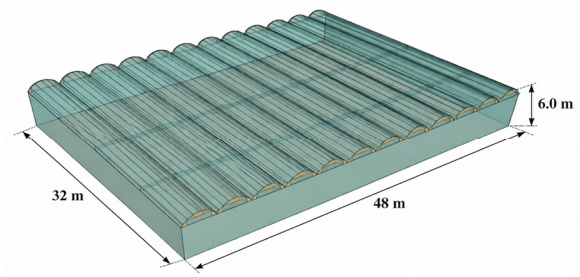


Fig. 1. EnergyPlus simulation model of the smart greenhouse

Table 1. Simulation model and analysis conditions

Category	Contents
Location	Daegu, South Korea (KMA-based TRY EPW, Station No. 471430) (Data source: Climate.OneBuilding.org)
Floor Area	1,536m^2
Side Height	6.0m
Envelope	Single Glass (VT: 0.8, SHGC: 0.82, U-Value: 5.8W/(m^2.K))
Sensor Height	2m
Simulation Period	Aug. 1 – Aug. 7

또한 실내온도 분석에서는 냉방 운전의 영향을 최소화하기 위해 냉방 설정온도를 100℃로 적용하였으며, 냉방에너지 분석에서는 실제 토마토의 적정생육 온도를 고려하여 28℃로 설정하였다. 냉방부하는 EnergyPlus의 ZoneHVAC:IdealLoadsAirSystem을 이용하여 산정하였으며, 특정 냉방설비의 효율 및 분배시스템은 별도로 적용하지 않았다.

2.2. 해석 모델 및 제어 케이스 설정

연구에서는 온실의 자연환기를 모사하기 위해 EnergyPlus의 ZoneVentilation:WindandStackOpenArea 모델을 적용하여 온실 내부의 열환경을 해석하였다. 환기창의 개구면적(Open Area)은 전체 지붕창 면적 1,842.32 m^{2}의 50%에 해당하는 921.16m^{2}로 설정하였다. 자연환기량은 설정된 개구면적을 기준으로 실내·외 온도차 및 외부 풍속 등의 조건에 따라 EnergyPlus에서 계산되도록 하였다. 차광 및 환기 방식에 따른 실내환경과 냉방에너지 성능을 비교하기 위해 총 6개의 제어 케이스(BASE 및 CASE1~CASE5)를 구성하였으며, 제어방식에 따라 기준 조건, 고정제어 조건, EMS 기반 단일제어 조건 및 통합제어 조건으로 구분하였다. 각 케이스의 세부 구성은 Table 2.와 같다.

BASE는 각 제어 방식의 적용에 따른 성능 변화를 비교하기 위한 기준모델로, 별도의 차광 및 EMS 기반 제어를 적용하지 않고 기본 침기조건으로 1.0 ACH를 적용하였다. 이를 기준으로 각 제어 케이스에서 나타나는 실내 광환경과 열환경의 변화 및 냉방에너지 소비 특성을 비교하였다.

CASE1과 CASE2는 차광과 환기를 각각 독립적으로 적용한 고정 제어조건이다. CASE1은 온실 내부로 유입되는 일사를 감소시키기 위해 내부 고정 차광을 적용하였으며, 침기조건은 BASE와 동일하게 1.0 ACH를 유지하였다. 이를 통해 차광 적용에 따른 실내 조도와 온도 및 냉방에너지 소비 특성을 분석하였다. CASE2는 차광을 적용하지 않고 고정 환기(Fixed Ventilation)를 적용하였다. CASE2의 Fixed Ventilation은 유효 개구면적 921.16m^{2}에 대해 개방률(Opening Area Fraction)을 1.0(100%)으로 고정하여, 실내·외 온도조건에 따른 별도의 제어 없이 지속적으로 자연환기가 이루어지도록 설정하였다. 이때 자연환기량은 실내·외 온도차와 외부 풍속 등의 기상조

Table 2. Control strategies for each simulation case

Cases	Shading control	Ventilation control	Control variables
BASE	None	Base Infiltration (ACH=1.0)	-
CASE1	Fixed Shading	Base Infiltration (ACH=1.0)	-
CASE2	None	Fixed Ventilation	-
CASE3	EMS-based Shading	Base Infiltration (ACH=1.0)	Indoor illuminance
CASE4	None	EMS-based staged Ventilation	Indoor & outdoor air temperature
CASE5	EMS-based Shading	EMS-based staged Ventilation	Indoor illuminance, Indoor & outdoor air temperature

건에 따라 계산된다. CASE2는 이러한 외기조건을 고려하지 않는 단순 환기방식을 적용함으로써, 기존 관행적 환기방식과 외기조건을 고려한 EMS 기반 환기제어의 성능 차이를 비교하고 제어방식의 개선 효과를 강조하기 위한 비교 케이스로 구성하였다.

CASE3과 CASE4는 고정제어와 달리 실내·외 환경조건에 따라 제어상태가 변화하는 EMS 기반 단일제어 조건으로 설정하였다. CASE3은 작물의 광환경을 고려하기 위해 실내 조도를 주요 제어변수로 설정하고, 토마토의 광포화점(Light Saturation Point, LSP)과 광보상점(Light Compensation Point, LCP)을 기준으로 내부 차광장치의 상태를 조절하도록 구성하였다. 침기조건은 BASE와 동일하게 1.0 ACH를 적용하였다. 고정 차광을 적용한 CASE1과의 비교를 통해 작물의 광환경을 고려한 선택적 차광제어의 적용 효과를 분석하였다.

CASE4는 설정된 환기창 개구면적을 기준으로 실내·외 온도조건에 따라 환기창의 개방률을 단계적으로 조절하도록 구성하였다. 환기창의 최대 개방면적은 921.16m^{2}이며, EMS 제어에 따라 개방률을 0%, 25%, 50%, 100%로 단계적으로 조절하도록 설정하였다. 이에 따른 유효 개방면적은 각각 0m^2, 230.29m^2, 460.58m^2 및 921.16m^{2}에 해당한다. 외기조건과 관계없이 환기를 적용하는 CASE2와 달리, 자연환기에 의한 냉각 가능 여부를 판단한 후 환기량을 조절하는 방식이다. 따라서 CASE2와 CASE4를 비교하여 고정 환기와 외기조건 기반 단계적 환기제어가 실내 열환경 및 냉방에너지 소비에 미치는 영향을 분석하였다.

마지막으로 CASE5는 CASE3의 조도 기반 차광제어와 CASE4의 실내·외 온도 기반 환기제어를 동시에 적용한 EMS 통합제어 조건이다. CASE5의 차광제어에는 CASE3과 동일한 제어기준을 적용하였으며, 실내 환경센서는 지면으로부터 2m 높이에 설정하였다. EMS 입력변수로 실내 조도(Iin), 실내온도(Tin) 및 외기온도(Tout)를 적용하여 차광 및 환기상태를 결정하도록 구성하였다. 단일 환경요소를 고려하는 CASE3 및 CASE4와 달리 광환경과 열환경을 동시에 고려함으로써, 차광과 환기를 개별적으로 적용한 경우와 두 제어방식을 연계한 경우의 실내환경 및 냉방에너지 성능을 비교하고자 하였다.

이와 같이 BASE를 기준으로 고정제어(CASE1, CASE2), EMS 기반 단일제어(CASE3, CASE4) 및 EMS 기반 통합제어(CASE5)를 단계적으로 구성하였다. 각 제어방식에 따른 실내 조도, 실내온도 및 냉방에너지 소비 특성을 비교·분석하여 환경조건을 고려한 EMS 제어의 적용 효과를 평가하였다.

2.3. EMS 기반 차광 및 환기 제어 알고리즘

앞서 구성한 EMS 기반 제어 케이스의 세부 제어 알고리즘은 Fig. 2.와 같다. EMS의 입력변수로 실내 조도(Iin), 실내온도(Tin) 및 외기온도(Tout)를 적용하였으며, 각 입력조건에 따라 내부 차광장치의 상태와 환기창 개방률이 결정되도록 구성하였다.

차광제어는 실내 조도를 기준으로 내부 차광장치의 개폐상태를 결정하도록 하였다. 제어 기준으로 토마토의 광포화점(Light Saturation Point, LSP)과 광보상점(Light Compensation Point, LCP)을 적용하였으며, 본 연구에서는 각각 70,000 lux [8,9]와 1,000 lux [9,10]

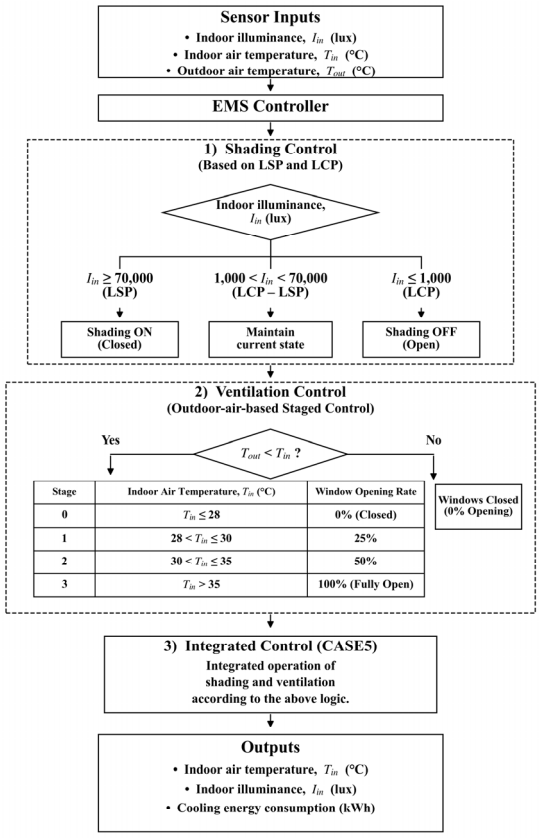


Fig. 2. EMS-based shading and ventilation control logic

로 설정하였다. 실내 조도가 LSP 이상인 경우에는 차광장치를 작동시켜 과도한 일사 유입을 제한하고, LCP 이하인 경우에는 차광을 해제하여 작물에 필요한 광량을 확보하도록 하였다. 또한 실내 조도가 LCP와 LSP 사이에 위치하는 경우에는 기존 차광상태를 유지하도록 하여 임계값 부근에서 차광장치가 반복적으로 개폐되는 것을 방지하였다. 환기제어는 토마토의 생육 적정온도와 고온환경에서의 생육 저하를 고려하여 실내온도와 외기온도를 기반으로 자연환기 여부와 환기창 개방률을 결정하도록 구성하였다.

토마토는 일정 온도범위 이상에서 고온 스트레스에 의해 생육 및 생리적 기능이 저하될 수 있으므로[11], 본 연구에서는 28℃를 환기제어의 시작 기준온도로 설정하고 실내온도 상승에 따라 환기량을 단계적으로 증가시키도록 하였다.

먼저 외기온도가 실내온도보다 낮은 경우에만 자연환기가 이루어지도록 하였으며, 실내온도가 28℃ 이하인 경우에는 환기창을 폐쇄하였다. 실내온도가 28℃ 초과 30℃ 미만인 경우에는 25%, 30℃ 이상 35℃ 미만에서는 50%, 35℃ 이상에서는 100%로 환기창의 개방률을 단계 적으로 증가시켰다. 특히 고온에 따른 작물의 생육 저하 가능성이 증가하는 35℃ 이상의 조건에서는 환기창을 완전히 개방하도록 설정하였다. 반면 외기온도가 실내온도 이상인 경우에는 고온 외기의 유입으로 인한 추가적인 열 유입을 방지하기 위해 환기창을 폐쇄하도록 하였다.

통합제어에서는 상기의 차광 및 환기 알고리즘이 각각의 환경조

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

건에 따라 동시에 작동하도록 구성하였다. 실내 조도를 기준으로 차광장치의 개폐상태를 결정하는 동시에 실내온도와 외기온도를 비교하여 환기창의 개방률을 조절하도록 하였다. 이에 따라 조도 조건과 실내·외 온도조건의 변화를 하나의 EMS 제어 과정에서 동시에 반영할 수 있도록 하였으며, 결정된 차광상태와 환기 개방률이 각각의 제어장치에 적용되도록 구성하였다.

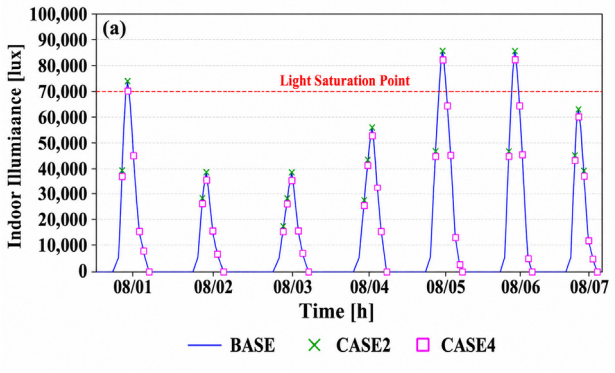
3. 결과 및 고찰

3.1. 실내 조도 특성

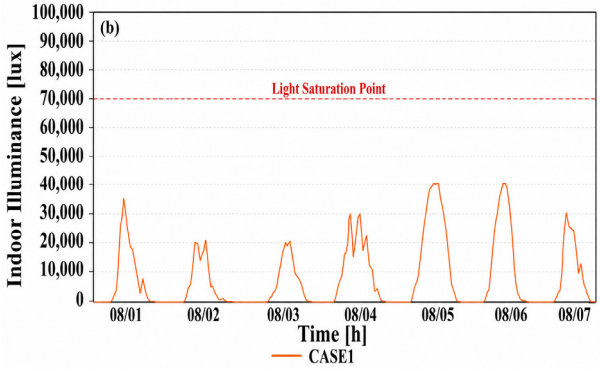
실내 조도는 차광 적용 여부와 제어방식에 따라 서로 다른 변화 특성을 나타냈다. 분석기간 동안 차광을 적용하지 않은 BASE, CASE2 및 CASE4의 실내 조도 변화는 Fig. 3. a), 고정 차광을 적용한 CASE1은 Fig. 3. b), EMS 기반 차광제어를 적용한 CASE3 및 CASE5는 Fig. 3. c)와 같다. 전체적으로 주간에는 외부 일사의 증가에 따라 실내 조도가 상승하고 야간에는 감소하는 일변화가 반복되었으며, 주간 최대 조도는 차광 적용 여부에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 차광을 적용하지 않은 BASE, CASE2 및 CASE4는 분석기간 동안 거의 동일한 조도 변화 경향을 보였다. 세 Case의 최대 실내 조도는 85,738 lux로 나타났으며, 일사량이 상대적으로 높은 8월 5일과 6일에는 토마토의 광포화점(LSP) 기준인 70,000 lux를 초과하였다. CASE2와 CASE4에는 각각 고정 환기와 EMS 기반 환기제어가 적용되었으나 별도의 차광제어가 적용되지 않아 환기방식의 차이가 실내 조도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 BASE, CASE2 및 CASE4에서는 외부 일사조건의 변화가 실내 조도 변화에 직접적으로 반영되었으며, 고일사 조건에서는 LSP 이상의 높은 조도가 형성되는 것으로 나타났다.

고정 차광을 적용한 CASE1은 다른 Case에 비해 전반적으로 낮은 실내 조도를 나타냈다. CASE1의 최대 실내 조도는 46,536 lux로 나타나 분석기간 동안 LSP 기준인 70,000 lux 이하로 유지되었다. 이는 내부 차광이 지속적으로 적용되면서 온실 내부로 유입되는 일사가 감소하였기 때문으로 판단된다. 특히 BASE의 최대 조도와 비교하면 약 45.7% 낮은 수준으로, 고정 차광에 의한 실내 조도 저감 효과가 뚜렷하게 나타났다. 그러나 고정 차광은 실제 실내 조도조건과 관계없이 동일한 차광상태가 지속되기 때문에 고일사 조건에서는 과도한 광 유입을 효과적으로 감소시킬 수 있으나, 상대적으로 일사량이 낮은 시간대에도 광 유입이 지속적으로 제한되는 특성이 나타났다. EMS 기반 차광제어를 적용한 CASE3과 CASE5는 거의 동일한 조도 변화 특성을 나타냈다. 두 Case의 최대 실내 조도는 78,143 lux로 나타나 BASE에 비해 약 8.9% 감소하였으나, 일부 시간대에서는 LSP 기준인 70,000 lux를 초과하였다.

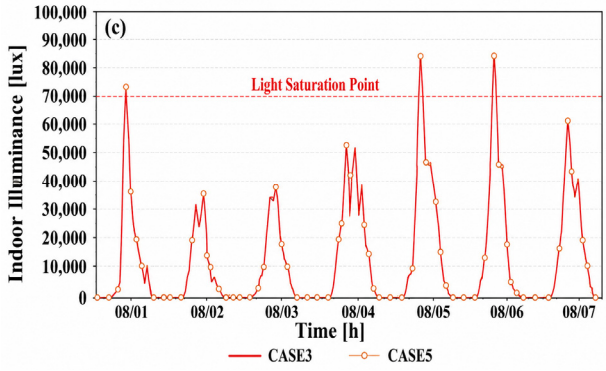
이는 본 연구에서 LSP가 실내 조도를 70,000 lux 이하로 일정하게 유지하기 위한 설정값이 아니라, 차광장치의 작동 여부를 결정하기 위한 제어 기준으로 적용되었기 때문이다. 즉, 실내 조도가 LSP를 초과하는 경우 차광장치가 작동하여 온실 내부로 유입되는 일사를 감소시키도록 제어하였으며, 이에 따라 비차광 Case와 비교하여 고조도 구간의 실내 조도가 감소하는 경향을 보였다. 또한 광보상점



a) No shading (BASE, CASE2, and CASE4)



b) Fixed shading (CASE1)



c) EMS-based shading control (CASE3 and CASE5)

Fig. 3. Indoor illuminance variations according to shading control strategy

(LCP) 이하에서는 차광장치를 개방하도록 설정하여 일사조건에 따라 차광장치가 선택적으로 작동하도록 하였다. CASE3과 CASE5의 조도 변화가 거의 동일하게 나타난 것은 두 Case에 동일한 LSP 및 LCP 기반 차광제어가 적용되었기 때문이다. CASE5에는 추가적으로 EMS 기반 환기제어가 적용되었으나, 환기제어는 실내 조도의 변화에 직접적인 영향을 미치지 않아 CASE3과 유사한 조도 변화가 나타난 것으로 판단된다.

이러한 결과를 종합하면, 차광 적용 방식에 따라 실내 조도의 변화 특성이 뚜렷하게 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 단순히 실내 조도를 지속적으로 낮추는 방식보다는 작물의 광환경 기준을 고려하여 필요한 조건에서 차광장치를 작동시키는 제어방식이 실내 광환경 조절 측면에서 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 실내 온도 특성

실내 온도는 환기 적용 여부와 제어방식에 따라 뚜렷한 차이를 나타냈다. Fig. 4.는 분석기간 동안 각 Case의 실내 온도 변화를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 차광 및 환기 적용에 따른 실내 온도 변화 특성을 비교하기 위해 냉방 설정온도를 100℃로 높게 설정하여 일반적인 운전범위에서 냉방에 의한 온도 저감 영향을 최소화하였다.

별도의 자연환기 제어를 적용하지 않고 기본 침기조건(1.0 ACH)만 적용한 BASE, CASE1 및 CASE3은 주간에 실내 온도가 크게 상승하는 경향을 보였다. BASE와 CASE3은 전반적으로 유사한 온도 변화를 나타냈으며, 분석기간 중 실내 온도는 설정한 냉방 상한온도인 100℃에 도달하였다. 고정 차광을 적용한 CASE1에서도 최대 실내 온도는 100℃로 나타났으나, 주간 온도 상승 구간에서는 BASE 및 CASE3보다 상대적으로 낮은 온도를 보였다. 실제로 동일한 시간대에 BASE가 86.35℃까지 상승했을 때 CASE1은 71.47℃로 나타나 차광에 따른 온도 차이가 확인되었다. 이는 고정 차광으로 인해 실내로 유입되는 일사가 감소하면서 온도 상승이 일부 완화된 것으로 판단된다. 다만 세 Case 모두 기본 침기조건 이외의 별도 자연환기 제어가 적용되지 않아 주간에 축적된 열이 충분히 배출되지 못하면서 실내 온도가 지속적으로 상승하는 특성을 나타냈다.

반면 자연환기가 적용된 CASE2, CASE4 및 CASE5에서는 온도 상승이 크게 억제되었다. 최대 실내 온도는 CASE2 36.44℃, CASE4 36.45℃, CASE5 36.54℃로 나타나 세 Case 모두 약 36℃ 수준을 보였다. 특히 BASE와 CASE3의 실내 온도가 80℃ 이상까지 상승하는 고온 시간대에도 자연환기가 적용된 Case는 약 30℃~32℃ 수준을 나타내어 뚜렷한 차이를 보였다. 이는 환기를 통해 온실 내부의 축적열이 외부로 배출되면서 주간의 급격한 온도 상승이 억제된 결과로 판단된다.

CASE4와 CASE5는 분석기간 동안 거의 동일한 온도 변화 경향을 나타냈다. 두 Case 모두 EMS 기반 환기제어가 적용되었으며, CASE5에는 추가적으로 조도조건에 따른 차광제어가 적용되었다. 그러나 두 Case의 최대 실내 온도 차이는 약 0.09℃로 매우 작게 나타났다. 따라서 본 분석조건에서는 CASE5에 추가된 차광제어보다 두 Case에 공통적으로 적용된 환기제어가 실내 온도 변화에 더 크게 반영된 것으로 판단된다.

이러한 결과를 종합하면, 차광은 일사 유입을 감소시켜 주간의 온도 상승을 일부 완화하였으나 기본 침기조건만 적용된 경우에는 실내 온도의 지속적인 상승을 억제하는 데 한계가 있었다. 반면 자연환기가 적용된 Case에서는 실내 온도가 상대적으로 낮게 유지되어, 여름철 온실의 과도한 온도 상승을 억제하기 위해서는 내부에 축적된 열을 외부로 배출하는 환기제어가 중요한 것으로 나타났다.

3.3. 냉방에너지 소비 특성

Fig. 5.는 제어방식에 따른 Case별 총 냉방에너지 소비량을 나타낸 것이다. 냉방 설정온도는 28℃로 설정하였으며, 분석기간 동안의 총 냉방에너지를 비교하였다. BASE의 총 냉방에너지 소비량은 27,475.6kWh로 나타났으며, 이를 기준으로 각 제어방식에 따른 냉방에너지 소비량과 증감률을 분석하였다.

대상 온실의 연면적 1,536m^{2}를 기준으로 단위면적당 냉방에너지 소비량을 산정한 결과, BASE는 17.9kWh/m^{2}로 나타났으며, CASE1, CASE2, CASE3, CASE4 및 CASE5는 각각 13.3kWh/m^2, 120.6kWh/m^2, 17.3kWh/m^2, 14.6kWh/m^2 및 14.0kWh/m^{2}로 나타났다. 이를 통해 총 냉방에너지 소비량뿐만 아니라 단위면적 기준에서도 각 제어방식에 따른 냉방에너지 소비 특성을 비교하였다.

고정 차광을 적용한 CASE1의 총 냉방에너지 소비량은 20,477.3kWh로, BASE 대비 25.5% 감소하여 분석 Case 중 가장 낮은 값을 나타냈다. 이는 차광이 지속적으로 적용됨에 따라 온실 내부로 유입되는 일사량이 감소하고, 이에 따른 일사열 취득이 억제되면서 냉방부하가 감소한 결과로 판단된다. 앞서 실내 조도 분석에서도 CASE1은 최대 실내 조도가 46,536 lux로 가장 낮게 나타났으며, 이러한 지속적인 차광에 따른 일사 유입 감소가 냉방에너지 절감에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

반면 고정 환기를 적용한 CASE2의 총 냉방에너지 소비량은 185,277.4kWh로 나타나 BASE 대비 574.3% 증가하였으며, 전체 Case 중 가장 높은 값을 보였다. 분석기간 동안 환기제어 Case의 평균 자연환기 횟수를 비교한 결과, CASE2는 83.08 ACH로 나타났으며, EMS 기반 단계적 환기제어를 적용한 CASE4와 CASE5는 각각 26.25 ACH와 25.71 ACH로 나타났다. CASE2는 환기창의 개방률을 100%로 고정함에 따라 CASE4 및 CASE5보다 높은 평균 자연환기 횟수를 나타냈다. CASE2는 외기조건을 고려하지 않고 일정한 환기상태를 유지하도록 설정되어 있어, 외기온도가 높은 주간에도 환

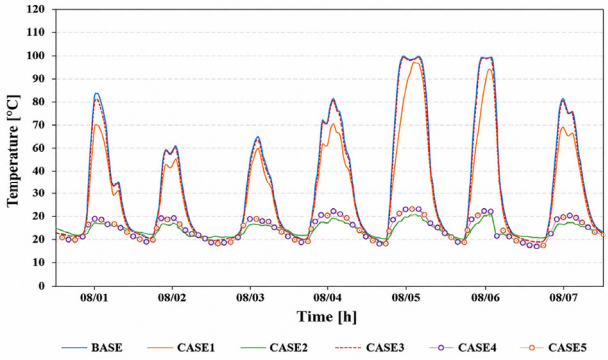


Fig. 4. Indoor air temperature variations according to control cases

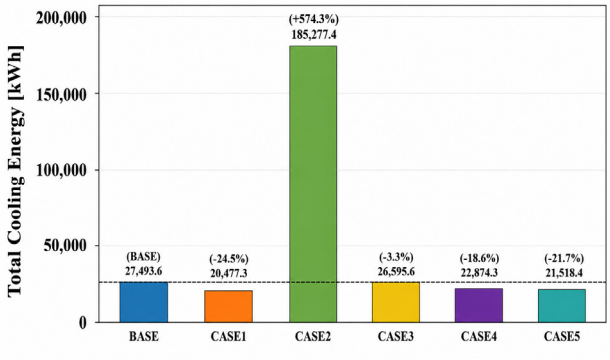


Fig. 5. Total cooling energy consumption according to control cases

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.

Table 3. Summary of simulation results for each control case

Case	Control strategy	Max. illuminance [lux]	Max. temperature [℃]	Cooling energy [kWh]	Cooling energy change [%]
BASE	None	85,738	100	27,475	-
CASE1	Fixed shading	46,536	100	20,477	-25.5
CASE2	Fixed Ventilation	85,738	36.44	185,277	+574.3
CASE3	EMS shading	78,143	100	26,569	-3.3
CASE4	EMS ventilation	85,738	36.45	22,374	-18.6
CASE5	Integrated EMS control	78,143	36.54	21,518	-21.7

기가 지속되면서 고온의 외기가 온실 내부로 유입된 것이 냉방에너지 증가의 주요 원인으로 판단된다. 특히 실내 온도를 냉방 설정온도인 28℃로 유지하기 위해 유입된 외기에 의한 열부하를 지속적으로 제거해야 하므로 냉방시스템의 운전 요구량이 크게 증가한 것으로 판단된다. 따라서 여름철 온실에서는 단순히 환기량을 확보하는 것보다 외기조건을 고려하여 환기 여부를 결정하는 것이 냉방에너지 측면에서 중요한 것으로 나타났다.

EMS 기반 차광제어를 적용한 CASE3의 총 냉방에너지 소비량은 26,569.6kWh로 BASE 대비 3.3% 감소하였다. CASE3은 LSP와 LCP를 기준으로 필요한 조건에서만 차광장치가 작동하기 때문에 고정 차광을 적용한 CASE1에 비해 차광이 적용되는 시간이 제한적이었다. 이에 따라 CASE1보다 냉방에너지 감소폭은 작았으나, 고일사 조건에서 선택적으로 일사 유입을 제한함으로써 BASE보다 냉방에너지 소비량이 감소한 것으로 나타났다.

외기조건을 고려한 EMS 기반 환기제어를 적용한 CASE4의 총 냉방에너지 소비량은 22,374.3kWh로 BASE 대비 18.6% 감소하였다. CASE2와 달리 CASE4는 실내외 온도조건을 비교하여 환기가 가능한 조건에서 개방률을 조절하도록 구성하였기 때문에, 고온 외기의 불필요한 유입을 제한하면서 환기를 활용할 수 있었다. 이에 따라 고정 환기에서 나타난 냉방에너지의 급격한 증가가 발생하지 않았으며, BASE보다 낮은 냉방에너지 소비량을 나타냈다.

차광과 환기를 함께 제어한 CASE5의 총 냉방에너지 소비량은 21,518.4kWh로 BASE 대비 21.7% 감소하였다. CASE5는 실내 조도조건에 따라 차광장치를 제어하는 동시에 실내외 온도조건을 고려하여 환기 개방률을 조절하도록 구성하였다. 이에 따라 고일사 조건에서는 차광을 통해 일사 유입을 조절하고, 환기가 유리한 조건에서는 외기를 이용하여 내부의 축적열을 배출함으로써 냉방에너지 소비량이 감소한 것으로 판단된다. CASE5는 CASE4보다도 낮은 냉방에너지 소비량을 나타내어, 환기제어와 함께 조도조건을 고려한 차광제어를 적용함으로써 추가적인 냉방에너지 감소가 나타났다.

이러한 결과를 종합하면, 고정 환기는 외기조건을 고려하지 않은 지속적인 외기 유입으로 인해 냉방에너지가 크게 증가한 반면, 외기조건을 고려한 EMS 기반 환기제어에서는 냉방에너지 소비가 감소하는 뚜렷한 차이가 나타났다. 또한 차광은 일사에 의한 열 취득을 감소시켜 냉방에너지 절감에 기여하였으며, CASE5에서는 차광과 환기를 각각의 실내외 환경조건에 따라 제어함으로써 BASE 대비 21.7%의 냉방에너지 절감 효과를 나타냈다.

3.4. 제어방식별 종합 분석

앞서 분석한 실내 조도, 실내 온도 및 냉방에너지 소비 결과를 바탕으로 각 제어방식의 특성을 종합하여 Table 3.에 나타내었다. 제어방식에 따라 실내 환경과 냉방에너지 소비 특성에는 뚜렷한 차이가 나타났으며, 단일 제어방식의 적용 여부뿐만 아니라 제어조건에 따라서도 결과가 크게 달라지는 것으로 나타났다.

고정 차광을 적용한 CASE1은 냉방에너지 소비량이 BASE 대비 25.5% 감소하여 가장 높은 절감률을 나타냈으나, 차광이 지속적으로 적용됨에 따라 실내 조도가 다른 Case보다 낮게 유지되는 특성을 보였다. 반면 고정 환기를 적용한 CASE2는 실내 온도 상승을 억제하였으나, 고온 외기의 지속적인 유입으로 냉방에너지 소비량이 BASE 대비 574.3% 증가하였다. CASE5는 조도조건에 따른 차광제어와 실내외 온도조건에 따른 환기제어를 함께 적용하여 최대 실내 조도 78,143 lux, 최대 실내 온도 36.54℃를 나타냈으며, 냉방에너지 소비량은 BASE 대비 21.7% 감소하였다. 이러한 결과는 각 제어방식이 실내 환경과 냉방에너지에 서로 다른 영향을 미치므로, 단일 성능지표보다는 실내 환경조건과 에너지 소비를 함께 고려한 평가가 필요함을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 여름철 스마트온실을 대상으로 차광·환기제어 방식에 따른 실내환경과 냉방에너지 소비 특성을 분석하고, 작물의 광환경과 실내·외 온도조건을 고려한 EMS 기반 제어방식의 적용 가능성을 검토하였다. 이를 위해 무제어 조건을 기준으로 고정 차광, 고정 환기, EMS 기반 차광제어, EMS 기반 환기제어와 이를 결합한 통합제어 조건을 구성하고, EnergyPlus 시뮬레이션을 통해 실내 조도, 실내온도 및 냉방에너지 소비량을 비교·분석하였다. 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 실내 조도 분석 결과, 차광을 적용하지 않은 BASE, CASE2 및 CASE4는 동일한 조도 변화 경향을 보였으며, 최대 실내 조도는 85,738 lux로 나타나 고일사 시간대에 토마토의 광포화점(Light Saturation Point, LSP) 기준인 70,000 lux를 초과하였다. 고정 차광을 적용한 CASE1은 최대 46,536 lux로 가장 낮은 조도를 나타냈으나, 일사조건과 관계없이 차광상태가 지속됨에 따라 고일사 조건에서는 과도한 광 유입을 억제하는 반면, 일사량이 낮은 시간대에는 작물 생육에 필요한 광 유입까지 제한될 가능성이 있는 것으로 나타났

다. 이에 비해 EMS 기반 차광제어가 적용된 CASE3과 CASE5는 최대 78,143 lux를 나타냈으며, LSP와 광보상점(Light Compensation Point, LCP)을 기준으로 실내 조도조건에 따라 차광장치를 선택적으로 작동시킴으로써 고정 차광에 따른 지속적인 광 유입 제한을 보완할 수 있는 가능성을 나타냈다.

둘째, 실내온도 분석에서는 환기제어 적용 여부에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다. 냉방에 의한 온도 저감 영향을 최소화한 조건에서 별도의 자연환기 제어를 적용하지 않고 기본 침기조건(1.0 ACH)만 적용한 BASE, CASE1 및 CASE3은 고일사 시간대에 실내온도가 크게 상승하였으며, 실내온도는 설정한 냉방 상한온도인 100℃에 도달하였다. 반면 고정 환기 또는 EMS 기반 환기제어가 적용된 CASE2, CASE4 및 CASE5의 최대 실내온도는 약 36.4℃~36.5℃ 수준으로 나타났다. 이를 통해 여름철 온실의 과도한 온도 상승을 억제하기 위해서는 일사 유입의 조절뿐만 아니라 온실 내부에 축적된 열을 외부로 배출하는 환기제어가 중요한 요소임을 확인하였다.

셋째, 냉방에너지 분석 결과, 제어방식에 따라 상반된 특성이 나타났다. 고정 차광을 적용한 CASE1은 냉방에너지 소비량이 BASE 대비 25.5% 감소하여 가장 높은 절감률을 나타냈다. 반면 고정 환기를 적용한 CASE2는 고온 외기조건에서도 지속적인 외기 유입이 이루어짐에 따라 냉방에너지 소비량이 BASE 대비 574.3% 증가하였다. 외기조건을 고려한 EMS 기반 환기제어가 적용된 CASE4에서는 BASE 대비 18.6% 감소하였으며, 차광과 환기를 함께 제어한 CASE5에서는 21.7% 감소하여 고정 환기와 뚜렷한 차이를 보였다.

이상의 결과를 통해 단일 제어방식의 적용만으로는 실내 광환경, 온열환경 및 냉방에너지 성능을 동시에 고려하는 데 한계가 있으며, 각 환경조건을 고려한 제어전략의 적용이 중요함을 확인하였다. 특히 CASE5는 냉방에너지 절감률 자체는 고정 차광을 적용한 CASE1보다 낮았으나, 실내 조도조건에 따른 차광과 실내·외 온도조건에 따른 환기를 함께 제어함으로써 고정제어 방식에서 나타나는 한계를 보완할 수 있는 가능성을 나타냈다. 따라서 스마트온실의 환경제어에서는 특정 장치를 지속적으로 운전하는 방식보다 작물의 광환경과 실내·외 열환경을 고려하여 차광과 환기를 선택적으로 운전하는 제어방식이 실내환경 조절과 냉방에너지 절감 측면에서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

다만 본 연구는 EnergyPlus 기반의 시뮬레이션 결과를 중심으로 분석하였으며, 작물의 생육 및 증산에 따른 실내환경 변화와 실제 온실에서의 제어응답 특성을 충분히 반영하는 데 한계가 있다. 향후 연구에서는 실제 온실의 측정자료를 활용한 모델 검증과 함께 작물 생육 특성을 고려한 제어조건을 적용하여, 실내환경 유지와 냉방에너지 절감을 동시에 고려한 통합제어전략의 성능을 추가적으로 검토할 필요가 있다.

Acknowledgement

본 연구는 정 (과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2025-24533343).

References

[1] 농림축산식품부, 빅데이터·인공지능 기반 스마트농업 확산 종합대책(안), 2021. // (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Comprehensive plan for the expansion of smart agriculture based on big data and artificial intelligence, 2021.)

[2] K.S. Kumar, K.N. Tiwari, M.K. Jha, Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review, Energy and Buildings, 41(12), 2009, pp.1269-1275.

[3] M. Alsamir et al., An overview of heat stress in tomato (Solanum lycopersicum L.), Saudi Journal of Biological Sciences, 28(3), 2021, pp.1654-1663.

[4] H.A. Ahemd, A.A. Al-Faraj, A.M. Abdel-Ghany, Shading greenhouses to improve the microclimate, energy and water saving in hot regions: A review, Scientia Horticulturae, 201, 2016, pp.36-45.

[5] A.M. Abdel-Ghany, I.M. Al-Helal, Covering materials incorporating radiation-preventing techniques to meet greenhouse cooling challenges in arid regions: A review, The Scientific World Journal, 2012, 906360, 2012.

[6] D. Kolokotsa et al., Development of an intelligent indoor environment and energy management system for greenhouses, Energy Conversion and Management, 51(1), 2010, pp.155-168.

[7] 구자빈 외 3인, 스마트온실의 에너지 분석 모델 개발 및 냉방 패키지 성능 분석, 한국태양에너지학회 논문집, 제41권 제6호, 2021, pp.1-18. // (J.B. Koo et al., Development of energy analysis model and performance analysis of cooling packages for smart greenhouse, Journal of the Korean Solar Energy Society, 41(6), 2021, pp.1-18.)

[8] S.L. Fang et al., Plant-response-based control strategy for irrigation and environmental controls for greenhouse tomato seedling cultivation, Agriculture, 12(5), 2022, 633.

[9] R.W. Thimijan, R.D. Heins, Photometric, radiometric, and quantum light units of measure: A review of procedures for interconversion, HortScience, 18(6), 1983, pp.818-822.

[10] C. Kim, C. Kubota, Contribution of far-red photons to light compensation point of leaf photosynthesis in tomato, HortTechnology, 35(2), 2025, pp.186-190.

[11] 농촌진흥청, 스마트 온실환경관리 가이드라인, 한국: 농촌진흥청, 2018. // (Rural Development Administration, Smart greenhouse environmental management guidelines, Korea: Rural Development Administration, 2018.)

ⓒ 2026. Korea Institute of Ecological Architecture and Environment all rights reserved.