스마트온실의 에너지 분석 모델 개발 및 냉방 패키지 성능 분석

구자빈¹ · 신학중² · 광영훈³ · 허정호^{4†}

¹서울시립대학교 건축공학과, 석사과정

²서울시립대학교 건축공학과, 박사과정

³서울시립대학교 건축학부, 연구교수

⁴서울시립대학교 건축학부, 교수

Development of Smart Greenhouse Energy Analysis Model and Analysis of Cooling Packages Performance

Goo Ja-Bin¹ · Shin Hak-jong² · Kwak Young-Hoon³ · Huh Jung-Ho^{4†}

¹MS Candidate, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

²Ph.D. Candidate, Department of Architectural Engineering, University of Seoul

³Research Professor, Department of Architecture, University of Seoul

⁴Professor, Department of Architecture, University of Seoul

†Corresponding author: huhj0715@uos.ac.kr

Abstract

Through active cooling, smart farms equipped with environmental control systems can overcome the limitations of existing greenhouses that are closed due to heat damage in summer. The control system can extend the crop harvest period by maintaining growth temperature and maintain fixed crop quality throughout the year. Accordingly, there is an increasing need for a cooling performance analysis model for smart farm cooling system applications. Therefore, in this study, a cooling package applicable to greenhouses was proposed, and the energy consumption of the cooling package was analyzed using EnergyPlus. Through consideration and analysis of previous studies, three cooling packages, which included natural ventilation and shading – basic cooling methods – were set up. A greenhouse energy model was developed for a smart farm in Naju. Prior to modeling the cooling packages, the predicted temperature and relative humidity performance of the greenhouse model was verified based on 24-hour measurement data from 9/16 to 9/17 for greenhouses without cooling. The greenhouse model showed performance that satisfied the recommended error value of $MBE = -5.8, -6.3\%$ and $Cv(RMSE) = 8.7, 8.9\%$ at the dry bulb temperature and relative humidity, respectively. On the basis of the verified model, plant evapotranspiration was simulated using the Stanghellini model, and cooling performance was analyzed using the three cooling package models. Package 1 showed an energy consumption of 20 W/m^2 , which is advantageous in terms of energy cost, but cannot maintain an appropriate growth environment. Packages 2 and 3 were found to be disadvantageous in terms of energy cost because of their relatively high energy consumption, but could be advantageous in maintaining growth temperature.

Keywords: 온실(Greenhouse), 스마트팜(Smart farm), 에너지플러스(EnergyPlus), 냉방 설비 패키지(Cooling package), 냉방 에너지(Cooling energy)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.6, pp.1-18, December 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.6.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 10 October 2021

Revised: 20 October 2021

Accepted: 28 October 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 국민 소득 증대에 따라 농산물 소비 패턴이 양적 중심에서 질적 중심으로 변화하면서 작물의 고급화·다양화와 함께 다양한 신선 채소 및 과실의 연중 수요가 증대되었다. 하지만 국내의 농업은 젊은 세대의 이탈과 농촌 인구 감소에 따른 노령화로 인해 정체되고 있으며, 농작물의 생산 면적 감소와 함께 농촌의 지속 가능성이 위협받고 있다. 이에 따라, 농산물의 품질 향상과 농가 문제의 해결책으로 농업 선진화가 요구되면서 스마트팜의 중요성이 점차 증가하고 있다. 스마트팜은 농작물의 환경 및 생육 정보에 대한 정확한 데이터를 기반으로 언제 어디서나 농작물의 생육 환경을 모니터링하고, 자동화 및 복합환경제어시스템을 통해 노동력과 에너지를 절감함과 동시에 농산물의 생산성과 품질 향상이 가능한 농업을 의미한다¹⁾. 이러한 스마트팜의 보급 면적은 2013년 이전 345 ha에서 2018년 4,900 ha로 크게 증가되었고²⁾, 2022년 국내 스마트팜 생산시스템 관련 시장은 5조 9,588 억원으로 지속적으로 증가되어 전체 시장의 약 49.7%를 차지할 것으로 전망되고있다³⁾.

자동화 및 복합환경제어시스템을 갖춘 스마트팜의 도입은 여름철 적극적인 냉방을 통해 폭염에 의한 작물 피해로 휴경하던 기존 온실의 한계를 극복하고, 생육 적온 유지에 따른 작물 수확 기간의 연장과 생산성 향상을 통한 작물 연중 공급 및 품질 유지를 가능하게 한다⁴⁾. 또한 스마트팜의 냉방 설비는 자동 제어 및 에너지 최적 제어에 의한 비용 절감과 같은 전략적 대응이 가능할 것으로 예상된다. 따라서, 스마트팜의 적절한 냉방 시스템 적용을 위한 온실의 냉방 에너지 해석 모델의 필요성이 증대되고 있다. 그러나 국내 연구는 주로 온실의 난방에 초점이 맞춰져 있으며, 그나마 냉방에 관한 연구도 냉방 효과에 대한 실험적 분석과 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 통한 온습도 및 환기 분석이 대부분으로, 에너지 시뮬레이션을 활용한 냉방 부하 및 에너지 소비량에 관한 연구는 미미한 실정이다. 이에 따라, 농가 측면에서 시설 구조의 변화에 따른 스마트팜으로의 전환에 있어 온실의 냉방 설비 도입의 초기 단계에 필요한 정보를 얻는 데 어려움이 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 냉방 설비 도입을 위해 적용 가능한 3가지 냉방 패키지를 제안한다. 그러면서도 스마트팜 에너지 분석 모델을 개발하여 에너지 시뮬레이션을 통해 제안된 3가지 냉방 패키지의 냉방 성능을 검토한다. 제안된 냉방 패키지의 성능 분석 결과는 농가에서 스마트팜으로의 전환을 위한 설계 초기 단계에 냉방 설비 도입을 위한 효과적인 냉방 패키지를 선정하는 데 있어 기초 자료로써 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

1.2 연구의 내용 및 방법

본 연구는 2장에서 선행연구 고찰을 통해 냉방 설비 기술들을 분석하고, 이를 바탕으로 온실에 적용 가능한 3가지 냉방 패키지를 제안하였다. 3장에서는 스마트팜의 에너지 분석을 목적으로 OpenStudio와 EnergyPlus를 활용하여 온실 구조(Geometry)와 외피, 모델 검증, 식물의 증발산, 냉방 패키지를 모델링하였다. 4장에서는 에너지 분석 모델을 기반으로 제안된 3가지 냉방 패키지의 냉방 성능을 분석하였다. 성능 분석은 8/4 ~ 8/7의 4일을 대상으로 광주 기상데이터를 활용하여 수행하였으며, 본 연구의 수행 프로세스는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1 Research Process

2. 선행연구 고찰

2.1 온실의 가용 냉방 설비

여름철 고온다습한 외기조건과 일사의 영향으로, 온실 내부 온도는 생육 적온 이상으로 상승하여 재배 작물에 고온 피해를 야기한다. 따라서, 여름철 온실은 작물의 적정 생육 환경 유지를 목적으로 (1) 시설요소와 (2) 설비요소를 통한 냉방이 필요하다. (1) 시설요소는 소극적 냉방 방식으로, 환기창과 차광막과 같은 온실 시설을 최대한으로 이용하는 방식이다. 시설요소는 초기투자비가 적고 에너지를 거의 사용하지 않는 경제적인 방법이지만, 생육 적온을 유지시키는 데에는 한계가 있다.

Park et al. (2020a)⁵⁾는 CFD 분석을 통해 국내 연동온실의 환기창 형태에 따른 자연 환기 효과를 분석하였다. 연구는 측면 권취식과 랙피니언 방을 비롯한 4가지의 천창 개폐 방식을 대상으로 하였으며, 평균적으로 1.2 m의 작물 재배 조건에서 32℃의 외기온과 유사한 실내 온도 분포를 나타냈다. Nam et al. (2017)⁶⁾은 간척지 연동 온실의 환경 계측 실험을 통해 자연 환기 성능 및 실내 온도 상승 특성을 분석하였다. 연구 결과, 자연 환기 성능은 여름철 권장 환기율을 거의 만족시키며, 외기온 대비 실내 온도 상승도 작물 재배 환경을 크게 벗어나지 않는 것으로 나타났다. 이에 따라, 간척지 연동 온실은 자연 환기만으로도 온실 내 여름철 작물 재배가 가능함

을 제시하였다. Kim et al. (2020)⁷⁾은 현장 측정을 통해 여름철 수시차광이 온실 작물 재배 환경과 오이의 생리적 반응에 미치는 영향을 검토하였다. 연구 결과, 수시 차광 온실의 내부 온도는 무 차광 온실의 41°C에 비해 28.2°C로 낮은 온도 분포를 나타내어 수시 차광이 여름철 오이 재배에 있어 고온 스트레스를 적게 받는 생육 환경을 조성할 수 있음을 제시하였다.

시설요소와 달리, (2) 설비요소는 적극적 냉방 방식으로 강제 환기 팬, 공기 순환 팬, 증발냉각, 히트펌프와 같은 설비를 가동하여 여름철 온실 내부 온도를 생육 적온으로 유지시키는 방식이다. 온실 내부에 물을 분무하여 물의 기화열을 이용하는 증발냉각은 적은 물량으로 높은 냉각 효과를 얻을 수 있다는 연구 결과와 함께 실제 장치가 설치되는 사례가 늘고 있다. 증발냉각은 주로 패드-팬 방식, 미스트-팬 방식, 포그 시스템 등이 사용된다. 패드-팬 방식의 경우, 온실의 폭이 길게 되면 내부를 공기가 통과하면서 온도가 상승하여 기온이 불균일하므로 대형 연동 온실에는 적합하지 않다. 포그 시스템은 직경 0.05 mm 이하의 포그를 온실 내로 분무하여 가습 냉각하는 방식으로 분무되는 물입자가 공기와 접촉하는 표면적이 넓기 때문에 증발효율이 비교적 높다⁸⁾.

Lee et al. (2017)⁹⁾은 방울토마토 재배 단동온실에 공기순환팬을 설치하여 환기 팬이 온실 내 온습도 분포와 에너지 소비량에 미치는 영향을 분석하였다. 연구 결과, 온실 내 공기 순환 팬의 사용은 공기를 지속적으로 교반시켜줌으로써 온실 전체의 온습도 분포를 균일하게 만들고, 공기 온도가 빠르게 변하지 않도록 하여 설비의 가동 시간과 에너지 소비량을 줄일 수 있는 것으로 나타났다. Park et al. (2020)¹⁰⁾은 여름철 고온기에 작물이 정상적으로 재배될 수 있도록 포그시스템, 유동팬, 차광막을 단동 오이 온실에 설치하여 냉방 효과를 분석하였다. 연구 결과, 포그시스템의 냉방 성능은 온실 외기온보다 내부 온도를 6°C 낮출 수 있는 것으로 나타났으며, 내부 습도는 40 ~ 80%로 포그시스템을 가동하지 않은 온실보다 약 20% 높게 형성되어 오이의 생육에 기여하는 것으로 나타났다. Nam et al. (2014)¹¹⁾는 포그시스템 및 공기 유동장치를 설치한 토마토 재배온실에서의 내부 온열 환경과 토마토 엽온의 변화를 측정하였다. 연구결과, 포그분사 조건에서 실내 온도가 외기온보다 낮거나 약간 높은 정도를 유지하는 것으로 나타났다. 또한 엽기온차를 줄이고 광합성 속도를 증가시켜 작물 생장에 유리한 환경을 조성할 수 있으며 고온 스트레스를 경감시키는데 효과적일 수 있음을 제시하였다.

Ryou (1999)¹²⁾는 호접란 재배 온실에서 히트펌프의 현장 적응성 시험을 통해 온실 냉난방 시스템의 성능을 평가하였다. 히트펌프는 주간 설정 온도 25°C, 야간 설정 온도 15°C로 가동하였다. 평가 결과, 주간 외기온이 30 ~ 35°C인 경우에 히트펌프를 통해 주간의 온실 내부 온도를 25 ~ 28°C로 유지함으로써 안정된 화아분화를 유도할 수 있는 최적 온도조건을 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 히트펌프의 도입으로 난방비를 7% 절감할 수 있고 냉방을 통해 여름철 고온기의 저온 재배가 가능함으로써 기계 이용효율을 높이고 농가의 소득증대에 크게 기여할 수 있음을 제시하였다.

이 밖에도 지열 히트펌프나 발전소 온배수 활용 히트펌프를 사용한 온실에서의 냉난방과 효과와 같은 신재생 에너지를 이용한 실험적 연구들도 진행되고 있다¹³⁻¹⁵⁾.

2.2 냉방 패키지 제안

앞선 선행연구 고찰을 통한 온실에서 적용 가능한 냉방 설비를 바탕으로, 시설요소와 설비요소의 조합을 통해 Fig. 2와 같이 3가지 냉방 패키지를 제안한다. 패키지 1은 시설요소로써 측면 및 상부 환기창을 통한 자연 환기와 상부 차광막을 사용하며, 설비요소로써 포그 시스템과 내부 공기 유동으로 포그와 공기의 접촉 면적을 넓혀 증발효율을 높이기 위한 수단으로 내부 공기 유동 팬을 사용하는 방식이다. 이는 앞선 선행연구들과 같이 일반적인 온실에서 냉방을 목적으로 주로 사용하는 방식이다. 패키지 2는 패키지 1에 공기열 히트펌프와 축열조, 팬코일유닛(Fan Coil Unit, FCU)을 추가로 활용하는 방식이다. 히트펌프는 축열조와 통합하여 가동되며, 이는 일반적인 유리온실의 냉난방 시스템으로 사용된다¹⁶⁾. 또한 외기 도입이 이루어지지 않으므로 패키지 1과 동일한 방식으로 자연 환기가 동시에 진행된다. 패키지 3은 패키지 2와 유사하지만 FCU를 공기조화기(Air Handling Unit, AHU)로 대체하여 냉방된 온실 내부 공기를 재사용하고, 동시에 외기를 도입하여 사용하는 방식이다. 따라서, 추가적인 자연 환기는 가동하지 않고 뜨거운 공기가 온실 상부에 고이지 않도록 천창만 개폐하여 사용하는 냉방 방식을 적용하였다.

Fig. 2 Proposal of Cooling Packages

3. 스마트온실 에너지 분석 모델 개발

3.1 온실 구조 및 외피 모델

제안된 3가지 냉방 패키지에 따른 냉방 성능 및 에너지 사용량 예측을 목적으로, 본 연구에서는 동적 해석에너지 시뮬레이션 툴인 EnergyPlus를 활용하였다. 대상 온실은 전라남도 나주시에 위치한 스마트팜 체험형 교육

온실로, 8연동 벤로형 온실이다. 대상 온실은 Fig. 3과 같이 한 스펠당 폭 8.0 m, 길이 31.6 m, 측고(온실의 측면 높이) 6.0 m, 동고(온실의 지붕높이) 7.0 m로 온실과 관리실로 구성된다. 대상 온실의 상부 외피는 4 mm 두께의 저철분 산광 강화유리, 측면 및 전·후면 외피는 16 mm 두께의 PMMA(Polymethyl methacrylate, 아크릴판)로 설계되었다. PMMA는 유리 대비 충격강도가 훨씬 높고 우수한 광투과성으로 작물 성장에 적합한 경질판 피복재이다⁸⁾.

Fig. 3 Targeted greenhouse

본 연구의 에너지 시뮬레이션에서 활용된 재료 특성은 Table 1과 같다. 온실 외피는 EnergyPlus에서 벽에 부착되는 창으로 “WindowMaterial:Glazing”과 “WindowMaterial:SimpleGlazingSystem” class를 활용하여 구현할 수 있다. 본 연구에서는 피복재의 특성을 모사하기 위해 단순히 SHGC (Solar Heat Gain Coefficient, 태양 열 취득 계수)값이 아닌 광학적 특성에 대한 입력을 필요로 하는 “WindowMaterial:Glazing” class와 피복재 측 정값¹⁷⁾을 활용하여 모델링하였다. 모델링은 OpenStudio를 활용하였으며, 형성된 모델은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4 Schematic diagram of targeted greenhouse

Table 1 Properties of materials¹⁷⁾

Category	Thickness (mm)	Thermal conductivity (W/m·K)	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kg·K)
Floor	200	1.7	2300	880
Frame	75	0.1	0.1	1400

Category	Thickness (mm)	Thermal conductivity (W/m·K)	Solar Transmittance (%)	Solar Reflectance (%)	Visible Transmittance (%)
Glass	4	0.76	0.83	0.07	0.90
PMMA	16	0.17	0.71	0.23	0.73
Shade	1	0.1	0.1	0.8	0.1

대상 온실과 같은 베로형 온실은 높은 측고로 인해 한 공간 내에서 온도 성층이 발생함에 따라, 상하부 온도 분포가 상이하다. 대부분의 온실은 하부에서 작물을 재배하므로, 온실 하부의 온열 환경을 시뮬레이션 상에서 구현하는 것이 중요하다. 단일 zone으로 모델링 하는 경우, EnergyPlus는 해당 zone을 잘 섞여 있는(well-mixed) 하나의 공간으로 인식하므로 zone의 정중앙 지점에 대한 시뮬레이션 결과 값만 산출된다. 이러한 EnergyPlus의 특성을 보완하고자, 본 연구에서는 EnergyPlus의 열 저항이 없고 적외선 교환이 가능한 가상 벽체인 IRT (Infrared Transparent)와 Airflow Network를 함께 활용하여 온실의 Zone 구획 모델링을 진행하였다. Airflow Network는 급배기를 포함한 공기 분배 시스템의 성능을 시뮬레이션하고, HVAC 작동 상태에서의 기계 환기나 실외 바람에 의한 multizone 기류 해석 기능을 제공하는 EnergyPlus에 내장된 프로그램이다¹⁸⁾.

본 연구에서는 수직으로 구획된 두 개의 zone 간의 공기 유동이 가능하도록, 중심축에 의해 수평으로 회전하여 개폐되는 Airflow Network 객체 중 하나인 “Componet:HorizontalOpening”을 사용하여 모델링하였다. 이를 통해 복사 유입의 방해 없이 강제 기류와 부력 기류가 결합되어 양방향 기류가 발생하는 경우를 시뮬레이션할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이를 활용하여 상부 zone (Fig. 4의 Up)의 바닥에 IRT 가상 벽체로 구성된 바닥면적과 동일한 크기의 문이 있는 것으로 모델링하였다. 이 문을 상시 개방되어있는 것으로 지정하여 상부와 하부 zone (Fig. 4의 Crop) 간 개방된 공간을 모사함으로써, 공기 유동이 가능한 2개의 zone으로 구획하였다.

Airflow Network를 활용하여 구현된 상부와 하부 zone 간의 “Componet:HorizontalOpening” 통한 양방향 기류 발생에 따른 9월 16일 ~ 9월 17일의 24시간 동안의 질량 유량은 Table 2와 같다. 9시 ~ 17시 동안은 지면 온도의 상승과 일사 투과율에 의해 하부 zone의 내부 온도가 상승됨에 따라, 하부에서 상부 zone으로의 공기 유동이 발생하였다. 이와 반반대로, 일몰에 의해 일사의 영향이 감소되기 시작되는 18시 ~ 8시 동안은 상부에서 하부 zone으로의 공기 유동이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 활용된 Airflow Network의 “Componet:Horzionatl Opening”는 수직으로 구획된 두 zone 간의 양방향 기류 발생에 따른 공기 유동을 모사할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 2 Mass flow rate through horizontal opening

Mass flow rate (kg/s)	16 h	17 h	18 h	19 h	20 h	21 h	22 h	23 h	0 h	1 h	2 h	3 h
Up → Crop	0	0	0.004	0.007	0.008	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.01
Crop → Up	0.01	0.007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Mass flow rate (kg/s)	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h
Up → Crop	0.01	0.009	0.008	0.008	0.006	0.002	0	0	0	0	0	0
Crop → Up	0	0	0	0	0	0.01	0.006	0.011	0.014	0.019	0.024	0.026

3.2 모델 검증

에너지 시뮬레이션을 통한 형성된 온실 모델의 내부 온열 환경 예측 성능을 파악하기 위해 측정 결과를 바탕으로 모델 검증을 수행하였다. 측정은 9월 16일부터 17일의 24시간 동안 4대의 HOBO® 온습도 데이터 로거(UX 100-300)를 활용하여 진행하였으며, 측정 지점 및 설치 방법은 Fig. 5와 같다. 대상 온실은 16 m 길이의 아열대 재배부와 8 m 길이의 멜론 및 딸기 재배부로 구획되어 있다. 아열대 재배부의 경우 면적이 넓어 2개의 온습도 센서를 설치하였고, 멜론 및 딸기 재배부는 1개의 온습도 센서를 삼각대를 활용하여 지면으로부터 1.32 m에 설치하여 측정하였다. 대상 온실은 작물이 재배되고 있지 않은 온실이므로 모든 측정 지점의 높이를 동일하게 진행하였다. 측정은 5분 간격으로 진행되었으며, 측정 당시 온실은 냉방 및 환기가 가동되지 않은 상태였다. 검증은 차광 커튼이 가동되어 있던 딸기 재배부(Point 4)를 제외한 아열대 및 멜론 재배부(Point 1 ~ 3)의 시간별 측정 평균 온도를 기준으로 진행하였다.

Fig. 5 Measurement location and sensor installation

검증을 위한 시뮬레이션의 기상데이터는 나주시 농업기술센터가 운영하는 이동형 기상 스테이션을 통해 측정된 외기 온습도 데이터를 활용하였다. 일사 데이터는 측정되고 있지 않아, 기상청의 광주 기상데이터를 활용

하였다.

기상청의 일사량은 전일사량만 측정되므로 Watanabe 모델을 활용하여 직산 분리를 진행하였다¹⁹⁾. EnergyPlus는 법선면 직달일사와 수평면 산란일사를 기반으로 시뮬레이션이 진행되므로, 직산분리된 수평면 직달일사를 법선면 직달일사로 변환하여 사용하였다. 지면 온도의 경우, 기상청의 광주 기상데이터를 통해 25°C로 적용하였다. 시뮬레이션 결과의 검증은 온실 모델의 하부(crop) zone의 온습도를 대상으로 하였다. 외기 온습도와 시뮬레이션 내부 온습도 측정 및 예측값은 Figs. 6 ~ 7과 같다.

Fig. 6 Simulation and measurement of the indoor temperature

Fig. 7 Simulation and measurement of the indoor relative humidity

냉방 및 환기가 가동되지 않는 온실의 내부 온도 측정값은 외기온에 비해 야간에는 지중온도의 영향으로 약 3°C 높은 분포를 나타내었다. 주간 내부 온도는 일사의 유입으로 인해 최대 68°C로, 외기온에 비해 약 39°C 높게 나타났다. 내부 상대습도는 상승된 내부 온도의 영향으로 전반적으로 외기 상대 습도에 비해 낮은 분포를 나타내었다. 시뮬레이션의 최고 기온은 동일한 시간의 실제 측정값보다 8°C 낮은 60°C를 나타내었다. 시뮬레이션 결과는 온습도 모두 측정값보다 전반적으로 낮은 경향을 나타내었다. 이는 실제 나주 지역의 일사량과 광주 기상 데이터의 일사량 간의 차이와 지중 온도의 차이 때문인 것으로 사료된다.

온실 모델의 시뮬레이션 성능 검증은 ASHRAE Guideline 14 (2002)²⁰⁾를 참고하여 MBE (Mean Bias Error)와 Cv(RMSE) (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error) 통계 지표를 활용하였으며, 각각 식

(1) ~ (3)로 산출하였다.

$$MBE[\%] = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$Cv(RMSE) = \frac{RMSE}{\overline{M}} \quad (3)$$

여기서 M_i 는 실제 측정값, S_i 는 시뮬레이션 예측값, n 은 데이터의 수, $\overline{M}$ 은 M_i 의 평균을 의미한다. 본 연구에서는 시간 간격에 따른 시뮬레이션을 수행하였으므로 hourly의 M&V 권장 오차율인 $MBE = \pm 10\%$, $Cv(RMSE) = 30\%$ 를 기준으로 평가하였다. 평가 결과, 건구온도는 $MBE = -5.8\%$ 와 $Cv(RMSE) = 8.7\%$, 상대습도는 $MBE = -6.3\%$ 와 $Cv(RMSE) = 8.9\%$ 로 권장 오차 값을 만족하는 예측 성능을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 개발된 온실 구조 및 외피 모델은 시뮬레이션 결과에 있어 신뢰성을 나타낼 수 있음을 파악하였다.

3.3 식물 증발산

검증된 온실 모델을 기반으로, 식물이 온실 내부 온열 환경에 미치는 영향을 모사하고자 Stanghellini 증발산 모델을 활용하여 식물의 증발산 효과를 구현하였다. Stanghellini 증발산 모델은 온실 내부 식물의 증발산을 구현하기 위한 모델로써, 온실 환경에 있어 가장 잘 적응한다는 특징이 있다²¹⁻²³. Stanghellini 증발산 모델은 식 (4) ~ (8)로 계산이 가능하다^{24,25}.

$$Q_{trans} = \frac{2\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot LAI}{\Delta H \cdot \gamma \cdot (r_b + r_s)} (VPD) \cdot S_g \cdot L_{water} \quad (4)$$

식물의 증발산 및 호흡에 의해 온실 내부 공기와 식물 간에 교환된 에너지 Q_{trans} 는 식(4)로 나타낼 수 있다. 여기서 LAI는 입면적 지수, ΔH 는 물의 증발잠열 상수(J/kg), γ 는 습공기 상수, r_s 와 r_b 는 기공저항과 잎의 경계층 저항(s/m), L_{water} 는 잎 표면의 증발잠열(J/kg), S_g 는 온실의 바닥면적(m^2)을 의미한다. LAI는 작물의 여러 잎으로부터의 에너지 교환을 모사하기 위한 땅 면적 대비 식물의 표면 입면적의 비율로, 작물의 생육 시기에 따라 달

라진다. 본 연구에서는 온실 내부 작물의 생육이 왕성한 상태(LAI = 3)를 가정하였다.

Fig. 8 CO₂ concentration by crop

$$r_s = r_{smin} \cdot \frac{R_{can} + 4.3}{R_{can} + 0.6} (1 + X_{co2}(\rho_{co2} - 200)^2) \cdot (1 + X_p(VPD)^2) \quad (5)$$

잎의 기공저항 r_s 는 식(5)로 나타낼 수 있다. r_s 는 작물의 엽온, 온실 내부 온도, CO₂ 농도, 온실 피복재를 통해 작물로 유입되는 일사의 영향을 받는다. 여기서 r_{smin} 은 잎의 최소 기공저항(s/m), X_{co2} 는 기공 개폐각에서의 CO₂영향계수, X_p 는 포화수증기압 영향계수, ρ_{co2} 는 CO₂농도(ppm), R_{can} 은 작물 잎의 일사량(W/m²), VPD는 식물 포화 수증기압과 대기 수증기압 간의 차이를 의미한다. CO₂농도는 농촌진흥청에서 제공하는 스마트팜 최적환경설정 안내서비스의 복합환경제어프로그램을 통한 재배작물별 잔존 CO₂ 모니터링 데이터를 기반으로 Fig. 8과 같은 스케줄을 적용하였다²⁶⁾. X_{co2} 와 X_p 는 오전과 오후로 구분하여, 각각 오전에는 6.1×10^{-7} 과 4.3×10^{-6} , 오후에는 1.1×10^{-11} 과 5.2×10^{-6} 의 값으로 스케줄을 구성하여 적용하였다²⁴⁾.

$$VPD = VP_{air} \cdot (1 - H_{air}/100) \quad (6)$$

식물 포화 수증기압과 대기의 수증기압 간의 차이인 VPD (Vapor Pressure Deficit)는 식(6)으로 나타낼 수 있다. 여기서 H_{air} 는 온실 내부의 상대습도를 의미한다.

$$VP_{air} = 610.7 \times 10^{\frac{7.5 T_{air}}{237.3 + T_{air}}} \quad (7)$$

온실 내부 포화수증기압 VP_{air} 는 식 (7)로 나타낼 수 있다. 여기서 T_{air} 는 온실의 실내 건구온도를 의미한다.

$$Q_{crop} = 2S_{gw} \cdot LAI \cdot \frac{\rho_{air} \cdot c_{air} \cdot \Delta T}{r_b} \quad (8)$$

작물의 엽온과 온실 내부의 온도 차에 의한 열전달 Q_{crop} 은 식(8)로 나타낼 수 있다. 여기서 ΔT 는 엽온과 온실 내부의 온도차를 의미하지만 EnergyPlus에서는 엽온을 시뮬레이션 할 수 없다는 한계점이 있다. 따라서 본 연구에서는 딸기의 엽온이 적정 환경에서 정상적으로 성장하면 작물 주변 기온보다 $2 \sim 3^\circ\text{C}$ 낮게 나타난다²⁷⁾는 연구를 기반으로 ΔT 를 2K로 가정하였다.

Stanghellini 증발산 모델의 계산은 EnergyPlus에 내장된 EMS (Energy Management System) 기능을 활용하였다. EMS를 통해 식 (4) ~ (8)의 상수값을 제외한 입력변수들을 EMS의 Sensor를 통해 시뮬레이션 결과 혹은 스케줄 값으로 입력함으로써 Q_{trans} 와 Q_{crop} 를 계산할 수 있다. 작물의 증발산은 온실의 내부 잠열에 영향을 미치므로, 계산된 값을 Actuator를 통해 “InternalGain:OtherEquipment”의 Design Level에 1의 잠열 비로 설정하여 하부(crop) zone에 적용하였다. 증산 작용은 주로 일사에 의해 잎 표면 온도의 증가로 엽육세포의 수증기압이 상승하여 증기압 차이가 커지는 낮에 왕성하고 일몰 이후에는 감소하므로, 06 ~ 20시의 스케줄을 적용하였다. Table 3은 Stanghellini 증발산 모델에 필요한 입력변수 및 EMS 항목을 나타낸다.

Table 3 Stanghellini model parameters and EMS object

Parameters	Unit	Physical Meaning	Value	EMS Object	Simulation Variable
V_{Pair}	-	Zone air saturated vapor pressure	-	Sensor	Calculation
T_{air}	$^\circ\text{C}$	Air temperature	-	Sensor	Zone Air Temperature
H_{air}	%	Relative humidity	-	Sensor	Zone Relative Humidity
r_s	s/m	Stomatic resistance of leaves	-	Sensor	Calculation
r_{smin}	s/m	Minimum stomatal resistance of leaves	82	Constant	-
R_{can}	W/m^2	Solar radiation of the canopy	-	Sensor	Zone Window Total Transmitted Solar Radiation Rate
X_{CO_2}	-	Influence coefficient of CO_2 on the stomatal opening degree	-	Sensor	Schedule Value
ρ_{CO_2}	ppm	CO_2 concentration	-	Sensor	Schedule Value
X_ρ	-	Influence coefficient of saturated vapor pressure	-	Sensor	Schedule Value
Q_{trans}, Q_{crop}	W		-	Actuator	-
ρ_{air}	kg/m^3	Air density	1.2	Constant	-
c_{air}	J/kg·K	Specific heat capacity of air	1008	Constant	-
LAI	-	Leaf Area Index	3	Constant	-
ΔH	J/kg	Water evaporation latent heat constant	$2.45 \cdot 10^6$	Constant	-
γ	-	Psychrometric constant	65.8	Constant	-
S_g	m^2	Greenhouse ground area	1010.4	Constant	-
r_b	s/m	Aerodynamic of leaves	275	Constant	-
L_{water}	J/kg	Latent heat of evaporation for the leaf surface	$2.45 \cdot 10^6$	Constant	-

Table 3의 EMS object 항목에서 Sensor는 계산을 위해 EnergyPlus가 시뮬레이션 과정에서 time step에 따른 결과 값으로 산출되는 변수를, Constant는 상수를, Actuator는 최종적으로 계산되어 제어의 대상이자 제어값으로 활용되는 변수를 의미한다. Variable은 Sensor를 통해 수집될 시뮬레이션 결과 항목을 의미하며, Schedule value는 EnergyPlus 상에서 스케줄로 입력된 값을 의미한다. 시뮬레이션 결과 항목은 하부(crop) zone의 시뮬레이션 값을 변수로 수집하여 사용하였다.

3.4 냉방 패키지 모델링

작물의 증발산이 모사된 최종 온실 모델을 바탕으로 2.2장에서 제안된 냉방 패키지를 모델링 하였다. 자연 환기는 3.1장에서 사용한 Airflow Network를 활용하였다. 본 연구에서는 측창 및 천창 동시 개폐를 통한 자연 환기 방식을 적용하였다. 개폐 가능한 천창의 위치는 대상 온실의 도면을 참고하였으며, Fig. 4의 노란색으로 표시된 부분이다. 중심축에 의해 수평으로 회전되어 개폐되는 방식을 사용하는 대상 온실과 유사하게 모델링 하기 위해, 천창은 “Horizontally Pivoted” 형태의 창으로 모사하였다. “Horizontally Pivoted” 창의 개폐 정도인 “Opening Factor”는 개폐 비율이 아닌 창이 열리는 각도를 의미한다. Opening Factor가 1이면 90°로 개방되는 것을 의미하며, 0이면 0°로 닫힌 상태를 의미한다. 대상 온실의 천창은 45° 각도로 개폐되므로 0.5의 Opening Factor를 적용하였다. 측창은 대상 온실에 설계되어 있지 않아, 천창과 동일한 각도로 개폐되는 측면과 동일한 가로 길이를 가진 2 m 높이의 개폐 가능한 창을 양 측면에 모델링 하였다.

차광막은 도면을 기반으로 개폐되는 천창을 제외한 나머지 천창에 부착되어있는 것으로 모델링 하였다. 차광막은 작물의 광합성을 방해하지 않도록 12 ~ 15시의 일시 차광을 적용하였으며, 재료 특성은 Table 1 (Shade)에 나타내었다.

포그 시스템은 온실 내부에 포그를 분무하여 증발에 인한 냉방 및 가습 효과를 이용하는 방식이다. EnergyPlus는 포그 시스템 모델링을 위한 class의 부재에 따른 한계점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 싱크대나 샤워기와 같은 일반적인 수도 장비에서 물의 사용에 따른 내부 zone과의 현열 및 잠열 교환을 모사하는데 사용되는 EnergyPlus 객체인 “WaterUse:Equipment”를 활용하여 포그 시스템을 모사하였다. “WaterUse:Equipment”는 수도에서 나오는 수량 및 수온과 zone 내부의 수증기압과 포화수증기압의 차이에 의한 물의 증발을 통해 zone과의 잠열 교환 모사가 가능하다²⁸⁾. 따라서 포그를 대상 온실의 전체 포그 분무 수량인 0.0007 m³/s의 유량을 가지는 10°C의 물이 수도에서 배출되는 것으로 모델링함으로써, 포그를 통해 나오는 전체 수량에 대한 증발 효과로 모사하였다. 패키지 1번은 포그 시스템만 가동되므로 09시-19시의 가동 스케줄을 적용하였고, 패키지 2번과 3번은 FCU와 AHU가 가동되므로 일사의 영향이 가장 클 것으로 예상되는 14시-16시 동안의 간헐적인 가동 스케줄을 적용하였다.

내부 유동 팬은 온도 분포의 균일성 및 포그의 증발효율 향상을 목적으로 상시 가동 스케줄을 적용하였고, 패키지 2와 3은 2대의 히트펌프가 축열조에 연결되어 있는 것으로 모델링 하였다. FCU와 AHU의 설정온도는 온실 내부에 재배될 작물의 생육 조건에 따라 상이하게 적용하였으며, 07 ~ 19시의 가동 스케줄을 적용하였다.

내부 유동 팬을 비롯한 히트펌프와 축열조, FCU, AHU의 용량은 패키지에 따른 다양한 조건에서의 적용성 및 냉방 성능 평가를 목적으로, 각기 다른 생육 조건에서 설정 온도를 맞출 수 있도록 “Auto Sizing”을 적용하였다.

4. 냉방 패키지 성능 분석 결과

제안된 냉방 패키지에 따른 냉방 성능을 비교 및 분석하고자, 파프리카가 재배되는 조건에서의 에너지 시뮬레이션을 진행하였다. 파프리카의 생육 적온은 $22 \sim 25^{\circ}\text{C}$ 이므로¹⁷⁾, FCU와 AHU의 설정 온도는 24°C 로 설정하였다. 시뮬레이션은 8월 4일부터 8월 7일의 4일을 대상으로 수행하였으며, 시뮬레이션 기간 동안의 냉방 패키지에 따른 온실 내부 온습도 분포는 Figs. 9 ~ 10과 같다. Figs. 9 ~ 10에서 녹색으로 표시된 범위는 각각 파프리카의 생육 적온 및 생육 적습 범위를 나타낸다.

패키지 1은 자연환기와 포그 시스템만으로 냉방이 진행되므로, Fig. 9과 같이 패키지 2번 및 3번에 비해 최대 35°C 로 주간에 일정한 온도를 유지할 수 없는 것으로 나타났다. 패키지 1번의 일간 온실 내부 온도 분포는 외기 온도와 유사하게 나타내어, 외기 조건에 주된 영향을 받는 것으로 나타났다. 패키지 2번과 3번의 경우에는 FCU와 AHU를 통해 직접적인 공조 및 냉방이 진행됨에 따라, 07 ~ 19시의 가동 스케줄 동안 설정온도 24°C 에 근접한 온도로 실내 온도 유지가 가능한 것으로 나타났다.

패키지 2번은 측창 및 천창을 통한 자연환기가 가동되어 냉방 설비 가동이 중지된 이후 급격한 온도 상승을 보이는 반면, 패키지 3번은 천창만 개폐된 상태에서 AHU를 통해 냉방된 온실 내부 공기를 재사용하고, 동시에 외기를 도입하여 사용하므로 비교적 온도 편차가 적은 내부 온도 분포를 나타내어 작물에 보다 유리한 생육 적온을 유지하고 작물에 미치는 스트레스를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

상대습도의 경우, 패키지 2번과 3번은 냉방 설비가 가동되는 동안 포그 및 식물의 증발산에 의한 절대습도의 증가와 냉방에 의한 건구온도의 감소가 동시에 일어남에 따라 Fig. 10과 같이 패키지 1번에 비해 비교적 높은 상대습도 분포를 나타내었다. 또한, 패키지 3번의 경우에는 AHU를 통해 야간에도 생육 적온을 유지함에 따라 온실 내부가 쉽게 포화 상태에 도달하여 생육 적습에 불리한 조건을 나타내었다. 따라서, 패키지 3번을 적용하는데 있어 야간의 과습 조건을 방지하기 위한 일시 제습과 같은 추가 설비 방안이 필요할 것으로 판단된다.

냉방 에너지 사용량의 경우, 패키지 1번은 내부 유동팬과 포그 시스템에 따른 에너지만 사용되어 일 평균 20 W/m^2 의 비교적 낮은 에너지 사용량을 나타내었다. 패키지 2번은 자연환기에 의해 지속적으로 외기가 유입되어 일 평균 $1,046 \text{ W/m}^2$ 의 가장 높은 에너지 사용량을 나타내었다. 패키지 3번은 AHU를 활용함에 따라 패키지 2번에 비해 51% 감소한 534 W/m^2 의 에너지 사용량을 나타내었다.

결과적으로, 패키지 1번은 가장 적은 에너지 사용량을 나타내어 에너지 비용 측면에서는 유리하지만 외기 조건에 주된 영향을 받음에 따라 적정 생육 환경을 유지하는데 있어 불리할 수 있을 것으로 판단된다. 반면에 패키지 2번과 3번은 높은 에너지 사용량에 의해 에너지 비용 측면에서 불리하지만, 생육 적온을 유지하는데 있어 유리할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 9 Outdoor and indoor temperature distribution by cooling packages

Fig. 10 Outdoor and indoor relative humidity distribution by cooling packages

5. 결론 및 향후 연구

농산물의 품질 향상과 농가 문제의 해결책으로 대두되고 있는 스마트팜의 도입을 통한 여름철 적극적인 냉방은 폭염에 의한 작물 피해로 휴경하던 기존 온실의 한계를 극복하고, 생육 적온 유지에 따른 작물 수확 기간의 연장과 생산성 향상을 통한 작물 연중 공급 및 품질 유지를 가능하게 한다. 따라서, 농가 측면에서 스마트팜으로의 전환을 위한 설계 초기 단계에 냉방 설비 도입을 위한 효과적인 냉방 패키지를 선정하는 데 있어 의사 결정 수단으로 활용될 수 있도록 온실에 적용 가능한 냉방 패키지를 제안하고, 개발된 에너지 분석 모델을 기반으로 냉방 성능을 평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과와 시사점은 다음과 같다.

- (1) 온실에 적용 가능한 3가지 냉방 패키지는 선행연구들을 기반으로 선정하였고 각 패키지는 공통적으로 자연 환기와 차광막, 내부 유동팬, 포그 시스템으로 구성되며 2번 및 3번 패키지는 이에 히트펌프와 축열조와 함께 각각 FCU, AHU를 추가적으로 포함하고 있다.
- (2) 냉방 패키지 모델링에 앞서, 온실 구조 및 외피 모델을 형성하였으며 측정값과의 온습도 예측 성능 비교검증 결과 온도는 $MBE = -5.8\%$ 와 $Cv(RMSE) = 8.7\%$, 습도는 $MBE = -6.3\%$ 와 $Cv(RMSE) = 8.9\%$ 의 권

장 오차 값을 만족하는 예측 성능을 나타내었다.

- (3) 검증된 모델을 바탕으로 Stanghellini 증발산 모델을 통해식물의 증발산을 모사하였고, 냉방 패키지 모델을 통한 냉방 성능을 분석하였다. 분석 결과, 패키지 1번은 20 W/m^2 의 에너지 사용량을 나타내어 에너지 비용 측면에서는 유리하지만 적정 생육 환경을 유지할 수 없으며, 패키지 2번과 3번은 각각 $1,046 \text{ W/m}^2$ 와 534 W/m^2 의 비교적 높은 에너지 사용량에 의해 에너지 비용 측면에서 불리하지만 생육 적온을 유지하는데 있어 유리할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서 개발된 에너지 분석 모델은 냉방이 가동되지 않은 냉방 무처리 온실을 대상으로만 검증이 진행되었다는 한계점이 있다. 따라서, 향후 연구에서 냉방 설비 가동에 따른 시뮬레이션 결과의 추가 검증을 통해 개발된 에너지 분석 모델의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 개발된 모델과 냉방 패키지는 다양한 조건에서의 시뮬레이션 데이터를 기반으로 농가에서 냉방 설비 도입을 위한 평가 도구와 같은 의사 결정 수단 형성에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기획평가원의 1세대 스마트팜 산업화기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(IPET-320087011HD040).

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(2021R1A2C1012304).

REFERENCES

1. Korea Institute for Science and Technology Job Promotion, Smart Farm Technology and Market Trends Reports, S&T Market Report, Vol. 69, 2019.
2. National Assembly Research Service, Status and Policy Tasks For Korean Smart-Farm Based on ICT Convergence, NARS Current Issues and Analysis, Vol. 95, 2019.
3. Ministry of SMEs and Startups, Smart farm 2019-2021, Technology Roadmap for SME, 2018.
4. Kim, T. W., ICT-based Smart Farm Greenhouse Status and Prospects, Journal of The Korean Institute of Communication Sciences, Vol. 36, No. 3, pp. 3-8, 2019.
5. Park, M. J., Choi, D. K., Son, J. K., Yoon, S. W., Kim, H. T., Lee, S. K., and Kang, D. H., Field Survey and Analysis of Natural Ventilation Characteristics of Multi-span Greenhouse with Different Roof Vent, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 29, No. 1, pp. 36-42, 2020.
6. Nam, S. W. and Shin, H. H., Analysis on the Characteristics of Ventilation and Cooling for Greenhouses Constructed in Reclaimed Lands, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 26, No. 3, pp. 181-187, 2017.
7. Kim, D. E., Kwon, J. K., Hong, S. J., Lee, J. W., and Woo, Y. H., The Effect of Greenhouse Climate Change by Temporary Shading at Summer on Photo Respiration, Leaf Temperature and Growth of Cucumber, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 29, No. 3, pp. 306-312, 2020.
8. Rural Development Administration, Energy Saving Technology for Controlled Horticulture, Agricultural

Technology Guide 114, 2014.

9. Lee, T. S., Kang, G. C., Kim, H. K., Moon, J. P., Oh, S. S., and Kwon, J. K., Analysis of Air Temperature and Humidity Distributions and Energy Consumptions according to Use of Air Circulation Fans in a Single-span Greenhouse, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 26, No. 4, pp. 276-282, 2017.
10. Park, S. H., Moon, J. P., Kim, J. K., and Kim, S. H., Development of Fog Cooling Control System and Cooling Effect in Greenhouse, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 29, No. 3, pp. 265-276, 2020.
11. Nam, S. W., Kim, Y. S., and Seo, D. U., Change in the Plant Temperature of Tomato by Fogging and Airflow in Plastic Greenhouse, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 23, No. 1, pp. 11-18, 2014.
12. Ryou, Y. S., Performance Test of Greenhouse Air Conditioning System Using Heat Pump, Protected Horticulture and Plant Factory, Vol. 12, No. 2, pp. 20-35, 1999.
13. Lee, J. H., Lee, Y. B., Kwon, J. K., Kang, N. J., Kim, H. J., Choi, Y. H., Park, J. M., and Rhee, H. C., Effect of Greenhouse Cooling and Transplant Quality Using Geothermal Heat Pump System, Journal of Bio-Environment Control, Vol. 15, No. 3, pp. 211-216, 2006.
14. Park, Y. J. and Kim, K. H., A Study on the Horizontal Ground Source Heat Pump Greenhouse Heating System with Thermal Storage Tank, Journal of Energy Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 194-201, 2006.
15. Lee, Y. G., Heo, J. H., Lee, D. W. and Hyun, M. T., Construction of the Heat Pump System Using Thermal Effluents for Greenhouse Facilities in Jeju and Evaluation of Cooling Performance, Journal of Energy Engineering, Vol. 27, No. 4, 2018.
16. Choi, C. Y., Design of Automatic Control Damper System for Heating and Cooling Energy Savings in Closed Glass Greenhouse, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol. 18, No. 3, pp. 397-404, 2016.
17. Park, D. Y., Lee, H. J., Jeong, Y. D., and Ryu, S. W., Evaluation and Simulation of Daylight Environment through Test of Single Covering Materials Applied to Smart Farm, Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, Vol. 21, No. 4, pp. 111-116, 2021.
18. United State of America Department Of Energy, EnergyPlus Input/Output reference 9.3, 2020.
19. Mun, S. H., Kang, J. A., Kwak, Y. H., Jeong, Y. S., Lee, S. M, and Huh, J. H., Limitation of EnergyPlus in Analyzing Energy Performance of Semi-Transparent Photovoltaic Modules, Case Studies in Thermal Engineering, Vol. 22, No. 100765, 2020.
20. ASHRAE, Measurement of Energy and Demand Savings (Guideline 14), American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, GA, 2002.
21. Prenger, J., Fynn, R., and Hansen, R., A Comparison of Four Evapotranspiration Models In a Greenhouse Environment, Transactions of the ASAE, Vol. 45, No. 6, pp.1779-1788, 2002.
22. Lopez-Cruz, I., Olivera-Cruz, M., and Herrera-Ruiz, G., Simulation of Greenhouse Tomato Crop Transpiration by Two Theoretical Models, Acta Horti, Vol. 797, pp. 145-150, 2008.
23. Villarreal-Guerrero, F., Kacira, M., Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G., Linker, R., and Arbel, A., Comparison of Three Evapotranspiration Models for a Greenhouse Cooling Strategy with Natural Ventilation and Variable High Pressure Fogging, Scientia Horticulture, Vol. 134, pp. 210-221, 2012.
24. Stanghellini, C., Transpiration of Greenhouse Crops: An Aid to Climate Management, Ph.D. Dissertation, Wageningen Agricultural University, The Netherlands, 1987.
25. Shen, W., Wei, R., and Xu, L., Energy Consumption Prediction of a Greenhouse and Optimization of Daily Average Temperature, Energies, Vol. 11, No. 1, pp. 65, 2018.
26. Rural Development Administration, Smart Farm Optimal Environment Information Service, <https://smartfarm>.

rda.go.kr/mntr/inC/srco2chstb.do. last accessed on the June 2020.

27. Lee, J. G., Jeong, Y. K., and Yoon, Y. C., Characteristics of Leaf Temperature in Greenhouse Strawberry based on Light Intensity and Relative Humidity, Journal of Agriculture & Life Science, Vol. 54, No. 1, pp. 91-98, 2020.
28. United State of America Department Of Energy, EnergyPlus Engineering Reference 9.3, 2020.