

건물 에너지 시뮬레이션을 이용한 반밀폐형 온실의 동적 에너지 부하 예측 및 수소연료전지 3중 열병합 시스템 적정 용량 산정

이승헌¹ · 김락우^{2,3*} · 김찬민⁴ · 석희웅⁴ · 윤성욱⁵

¹국립공주대학교 농공학과 석사과정, ²국립공주대학교 스마트팜공학과 조교수, ³국립공주대학교 산업개발연구소 수석연구원, ⁴국립공주대학교 스마트팜공학과 학사과정, ⁵농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 농업연구사

Optimal Capacity Determination of Hydrogen Fuel Cell Technology Based Trigeneration System And Prediction of Semi-closed Greenhouse Dynamic Energy Loads Using Building Energy Simulation

Seung-Hun Lee¹, Rack-Woo Kim^{2,3*}, Chan-Min Kim⁴, Hee-Woong Seok⁴, and Sungwook Yoon⁵

¹Graduate Student, Department of Agriculture Engineering, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

²Assistant Professor, Department of SmartFarm Engineering, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

³Chief Researcher, Industrial Development Institute, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

⁴Undergraduate Student, Department of SmartFarm Engineering, Kongju National University, Yesan 32439, Korea

⁵Research Officer, Division of Agricultural Engineering, National Institute of Agricultural Sciences, RDA, Jeonju 54875, Korea

Abstract. Hydrogen has gained attention as an environmentally friendly energy source among various renewable options, however, its application in agriculture remains limited. This study aims to apply the hydrogen fuel cell triple heat-combining system, originally not designed for greenhouses, to greenhouses in order to save energy and reduce greenhouse gas emissions. This system can produce heating, cooling, and electricity from hydrogen while recovering waste heat. To implement a hydrogen fuel cell triple heat-combining system in a greenhouse, it is crucial to evaluate the greenhouse's heating and cooling load. Accurate analysis of these loads requires considering factors such as greenhouse configuration, existing heating and cooling systems, and specific crop types being cultivated. Consequently, this study aimed to estimate the cooling and heating load using building energy simulation (BES). This study collected and analyzed meteorological data from 2012 to 2021 for semi-enclosed greenhouses cultivating tomatoes in Jeonju City. The covering material and framework were modeled based on the greenhouse design, and crop energy and soil energy were taken into account. To verify the effectiveness of the building energy simulation, we conducted analyses with and without crops, as well as static and dynamic energy analyses. Furthermore, we calculated the average maximum heating capacity of 449,578 kJ·h⁻¹ and the average cooling capacity of 431,187 kJ·h⁻¹ from the monthly maximum cooling and heating load analyses.

Additional key words: building energy simulation (BES), crop energy, greenhouse, heating and cooling load

서 론

국내 시설재배 면적은 1990년 20,279ha에서 2021년 74,640ha로 약 3.6배 증가하였다(KOSIS, 2022). 또한, 작물 재배기술의 향상으로 단위면적당 생산량은 2012년 약 2.7만 kg/10a에서 2020년 약 8.5만kg/10a로 약 3.2배 증가하였다(MAFRA, 2020). 한편, 한국은 높은 일교차와 뚜렷한 사계절

로 인해 계절에 따라 기온 변화가 크며 이로 인해 작물의 적정 생육 온도를 유지하기 위해 시설 내 냉·난방 시스템은 필수적이다. 시설의 냉·난방 시스템의 가동을 위한 에너지원으로 화석에너지가 약 92% 사용되며 화석에너지의 경우 해외 의존도가 높다. 또한, 국제 유가의 가격 상승으로 인한 농가의 경영비 부담이 커지고 있다.

이에 따라, 시설재배 농가의 경영 안정성을 확보하기 위해 냉·난방 비용을 절감시킬 수 있는 에너지 시스템으로 신재생 에너지가 활용될 수 있다. 1981년 1차 에너지 대비 비중 약 2.4%를 차지했던 신재생에너지에 의한 에너지 생산량이

*Corresponding author: rwkim@kongju.ac.kr

Received April 6, 2023; Revised April 26, 2023;

Accepted June 1, 2023

2020년에는 약 5.8%로 꾸준히 증가하고 있다(KEEI, 2021). 신재생에너지는 활용방식에 따라 태양광, 수력, 풍력, 지열, 연료전지 등으로 나뉘지는데 그중 국내에서는 수소에 화학반응을 일으켜 전기를 생산하는 수소에너지 활용 기술이 활발히 진행 중이다. 정부에서는 다양한 신재생에너지 중 수소를 전략 투자 분야의 하나로 선정하고 그린수소 기반의 친환경 에너지 신산업 육성을 목표로 제시하였다(MOTIE, 2019).

농림축산식품부에서도 농촌환경 개선 및 재생에너지 활용 확대를 위한 “그린수소 기반 농업시설 에너지 공급시스템 개발 및 실증사업”을 추진하여 농업시설에서의 수소연료전지 적용을 하기 위한 활용기술을 개발하고 있다. 수소 연료 전지를 농업시설에 적용하기 위해서는 온실이 요구하는 에너지 부하량과 부하 변동을 정확하게 예측하여 적정 설계 용량을 산정해야 한다. 적정 용량 산정은 에너지 사용량 저감과 에너지 효율을 위해 반드시 필요하며 이를 위해서는 온실의 냉·난방에 필요한 에너지를 산정하고 그에 맞는 수소연료전지의 적정 용량을 산정하여야 한다. 온실의 냉·난방에너지 산정 방법에는 건물 에너지 산정 방법이 대표적이다.

건물 에너지 산정법은 크게 정적 해석방법과 동적 해석방법으로 나눌 수 있다. 정적 해석방법은 기존의 에너지 부하계산 방법으로 건물의 냉·난방 설비 선정에 위해 피복 표면적, 전열 계수 등을 통하여 최대 부하 계산을 이용하는 방법이다 (Abdel-Ghany와 Kozai, 2006; Joudi와 Farhan, 2015; Taki 등, 2016). 그러나 정적 해석방법은 기상변화에 따른 열교환을 고려하지 않고 내·외부 온도차, 습도차 등을 이용하여 해석하기 때문에 태양열 취득이나 내부 발생 열을 반영하지 못하여 실제 에너지 부하보다 과다 혹은 과소 산정하는 문제점이 있다(Reilly와 Kinnane, 2017). 동적 해석방법은 실시간 기상 자료와 시간에 따른 에너지 교환 요소들을 구현하여 에너지 부하를 산정하는 방법이다. 동적 해석방법은 주로 건물 에너지 시뮬레이션(building energy simulation, BES) 기법으로 사용되고 있으며 농업 분야에도 점차 활용되고 있다(Carlini 등, 2012; Vadiee와 Martin, 2013; Lim 등, 2020).

BES를 이용하여 온실을 분석한 사례로 Lee 등(2012)은 TRNSYS(transient system) 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 4가지 타입의 온실(와이드 스펜형, 벤로형, 1-2W형, 광폭 단동형)을 모델링하고 대상 지역(춘천, 수원, 청주, 대구, 전주, 제주)의 냉·난방부하 특성을 산출 비교하여 BES 기법의 온실로의 적용 및 활용 가능성을 검토하였다. Lee 등(2016)은 발전소 온배수를 온실에 적용하기에 위하여 연동 플라스틱 온실을 대상으로 피복재 및 골조, 작물 에너지 교환 및 토양 에너지 교환을 구현하여 동적 에너지 부하를 모의함으로써 적정 냉·난방 설계 용량을 산정하였다. Banakar 등(2021)은 서로 다른

온실의 성능을 평가하기 위해 TRNSYS 소프트웨어를 사용하여 모델을 설계하고 기존 온실에서 측정된 데이터를 사용하여 제안된 모델의 정확성을 확인하였다. Rasheed 등(2022)은 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 다중 경간 온실과 공랭식 열 펌프(AWHP) 시스템의 모델링 기반 에너지 성능 평가 및 검증 수행하였다. 이처럼 BES 시뮬레이션을 사용하여 온실의 냉·난방부하 분석을 수행하는 연구들이 다양하게 수행되었으며 BES 모델값과 실측값과 유사하다는 결과들을 도출하였다. 또한 신재생에너지를 온실에 적용하기 위한 연구들도 수행되어 왔지만 온실에 수소연료전지를 적용한 연구들은 수행되지 않았다.

이에 본 연구에서는 수소연료전지 3중 열병합시스템을 온실에 적용하기 위하여 반밀폐형 온실을 대상으로 동적 에너지 부하 분석을 통해 적정 냉·난방 용량을 산정하고자 하였다. BES를 이용하여 온실의 에너지 교환 및 부하를 동적으로 해석하고자 하였으며 여러 상용 프로그램 중 TRNSYS(Ver. 18, SEL, USA)를 이용하였다. 온실 내 작물 에너지 교환과 토양 에너지 교환을 구현하기 위해 선행 연구들의 식(Lee 등, 2016; Yeo 등, 2022)을 사용하여 동적 에너지 교환 모델을 설계하였다. 선행 연구에서 검증된 BES 모델을 이용하여 전주지역의 10년간 냉·난방 부하 분석을 실시하였고 대상 온실의 적정 냉·난방부하 용량을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 대상 시설 및 지역

대상 온실은 전라북도 전주시 덕진구 중동(35.82°N, 127.06°E)에 위치하며 토마토를 재배하는 2연동 반밀폐형 플라스틱 필름 온실이었다. 온실의 크기는 1연동 온실당 폭 8.0m, 측고 7.3m, 동고 8.55m, 길이 39.0m이며 1연동 온실의 형상 및 제원은 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다. 실험 대상 온실은 수

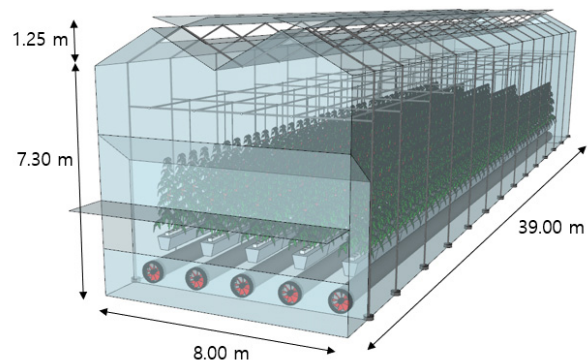


Fig. 1. Schematic diagram of experimental greenhouse.

Table 1. Schematic diagram of the experimental greenhouse.

| Characteristics | Specifications |
|----------------------------|--------------------|
| Number of spans | 2 |
| Floor area | 624 m ² |
| Width | 8 m |
| Ridge height / Eave height | 8.55 / 7.3 m |
| Covering material | PO film (0.15 mm) |
| Crop | Tomato |

수소연료전지 3중 열병합 시스템을 적용한 온실로 히트펌프와 흡착식 냉방기, 축열조를 이용한 냉·난방 시스템으로 구성되어 있으며, 수소저장소 및 수소연료전지를 이용하여 에너지를 사용하였다. 대상 온실의 동적 에너지부하 분석을 위하여 기상자료를 수집하였다. 기상자료는 대상 지역에 위치한 전주 기상청(35.82°N, 127.14°E)에서 제공하는 기온, 습도, 일사량, 풍속, 풍향 데이터를 수집하였으며 2012년 1월 1일부터 2021년 12월 31일의 10년의 기상자료를 이용하였다.

2. 건물 에너지 시뮬레이션

온실의 에너지 부하를 동적으로 산정하기 위하여 실시간으로 변화하는 환경조건을 고려하여 온실의 에너지 교환을 모의하여야 한다. 온실 내부 에너지 부하 산정 및 냉·난방 시설의 선정은 온실 운영의 초기 유지 비용뿐만 아니라 지속적인 에너지 절약을 위한 매우 중요한 선행 요소이다(Lee 등, 2012). 이에 본 연구에서는 건물의 에너지 교환을 수치해석적으로 계산하고 예측하는 건물 에너지 시뮬레이션(building energy simulation, BES) 기법을 활용하였다. BES는 일반 건축 분야에서 높은 정확도와 활용성으로 건축계획 초기 단계부터 각종 설계 대안에 대한 종합적 성능을 평가하는 데 널리 사용되고 있다(Coakley, 2014). 이용 분야로는 건축물의 냉·난방 공조 시스템 설계, 태양열 시스템을 포함한 다양한 신재생에너지 시스템의 효율성 분석 등에 활용할 수 있다. 다양한 분야에서 원활하게 활용되기 위해 여러 상용 프로그램(BLAST, DOE-2, EnergyPlus, ESP-r, eQuest, TRNSYS)이 개발되어 왔다. 이 중 TRNSYS는 모듈 구조를 갖는 비정상 시스템 해석 프로그램으로 메인 프로그램과 컴포넌트라고 불리는 많은 서브루틴으로 구성되어 광범위한 소스 코드와 다양한 라이브러리를 제공하여 시뮬레이션 모델의 적용성 및 호환성에 용이하다는 장점을 갖는다(Decano-Valentin 등, 2021).

TRNSYS는 실시간 기상 데이터와 같은 시간에 따른 입력 자료를 활용하여 연산을 수행한다. 시뮬레이션에 의한 결과값은 실시간으로 도시 및 저장되기 때문에 특정 기간을 대상으로 누적 결과값을 산출할 수 있을 뿐만 아니라 단위시간당

최대 혹은 최소값을 산출할 수 있다. 이와 같이 TRNSYS는 시간 변화에 따른 비정상 상태(unsteady-state) 시뮬레이션을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 시간 변화와 무관한 정상 상태(steady-state) 시뮬레이션 또한 연산이 가능하다. TRNSYS에서 에너지 부하 산정 대상 건물은 다수의 ZONE으로 구성된다. ZONE이란 열평형 방정식을 풀이하는 하나의 DOMAIN으로 공간을 이루는 벽체의 열용량, 밀도, 열전도도 등의 물성치를 통해 건물 표면으로부터의 전도, 일사량, 환기 및 침기, 내부 발열량 등을 고려하여 에너지 교환을 해석한다.

온실은 온실의 구조, 피복재 및 골조를 통한 열교환, 작물로 인한 에너지 교환(현열, 잠열), 토양 에너지 교환 등의 다양한 인자들을 고려해야 한다. TRNSYS에서는 다음과 같은 에너지 교환 등을 구현하기 위하여 일반적인 전도, 복사 등의 에너지 교환부터 추가적인 에너지 교환들을 구현할 수 있으므로 본 연구에서는 반밀폐형 온실의 냉·난방방부하 분석을 위해 TRNSYS를 사용하였다.

3. 작물 및 토양에너지 교환 모델

온실에 동적 에너지 부하 예측 모델을 설계하기 위해서는 온실 피복 및 구조물에서의 반사, 흡수 투과 등의 과정을 거치는 에너지 교환을 고려해야 한다. 또한, 온실 내부로 유입되는 태양 에너지에 대해 작물 및 토양 에너지에 대한 모델링이 필요하다. 온실 내부 주변 공기와 작물 및 토양의 현열 및 잠열 교환은 광흡수율, 엽면적지수, 잎 특성 길이 등의 다양한 인자가 고려되어 몇 개의 상수로 표현하기에 어려운 매우 복잡한 기작이다. 본 연구에서는 온실 내부에서 토마토의 열에너지 교환 및 토양에너지 교환을 구현하기 위하여 관련된 선행연구를 조사하여 적용하였다. 하지만 본 연구에서는 인자들에 대해 현상 측정을 하지 못했기 때문에 온실에서의 작물 및 토양에너지 교환을 검증한 Lee 등(2016)과 Yeo 등(2022)의 연구에서 사용된 일괄된 값을 사용하여 입력자료로 활용하였다. 본 연구에서는 작물의 온실 내부에 광이 도달하게 될 때 작물에서의 물의 증산을 위한 잠열, 옆면의 온도와 주변 기온차에 의한 현열, 토양열에 대한 에너지 교환을 구현한 식(1)과 같으며 Penman-Monteith 식을 온실의 환경조건을 모의하여 연구한 Stanghellini(1987)의 작물의 현열 및 잠열은 식(2), (3)과 같다.

$$R_n = H + LE + G \tag{1}$$

* R_n : 온실 내 투과된 광량($W \cdot m^{-2}$), LE : 작물의 잠열($W \cdot m^{-2}$), G : 토양열($W \cdot m^{-2}$)

$$H = \frac{2LAI\rho_a c_p}{r_e} (T_L - T_a) \quad (2)$$

$$LE = \frac{\delta}{\delta + r^*} (R_n - G_0) + \frac{\delta}{\delta + r^*} 2LAI\rho_a \lambda (e_a - e_e) \div r_e \quad (3)$$

$$\left(r^* = r \left(1 + \frac{r_s}{r_e} \right) \right)$$

* E : 증발률(kg·s⁻¹·m⁻²), L : 물의 증발잠열(J·kg⁻¹), G₀ : 작물 하부에서의 토양열(W·m⁻²), δ : 포화수증기압-온도 곡선 기울기(P_a·°C⁻¹), γ : 증기압-온도 계수(P_a·°C⁻¹), P_a : 포화수증기압 및 수증기압, T_a, T_L : 기온 및 엽온(°C), RH : 상대습도(%), c_p : 공기 비열(J·kg⁻¹·°C⁻¹), p_a : 공기 밀도(kg·m⁻³), r_e : 열전도 저항(s·m⁻¹), r_s : 기공 저항(s·m⁻¹), LAI : 엽면적지수

토양의 에너지 교환은 주변 공기를 통해 에너지를 교환하며 에너지 균형에서 큰 영향을 미친다(Liebenthal 등, 2005). 이를 구현하기 위한 여러 연구가 수행됐으며 대표적으로 토양 상부의 순복사량(R_n)과 토양열(G)와의 비례식을 이용하여 수식화된 바 있다(Clothier 등, 1986; Choudhury 등, 1987). 본 연구에서는 작물 하부 토양의 에너지 교환은 제시한 식에서 전체 작물 잠열량 중 15%(Fynn 등, 1993)를 차지하도록 설계하였으며 온실 내 작물이 차지하지 않는 약 50%의 나지에 대하여 지중전열(G)과 순복사량(R_n)의 비율(α)을 이용하여 토양 에너지 교환을 구현하였으며 이용된 식은 식 (4), (5)와 같다.

$$G = \alpha R_n \quad (4)$$

$$\alpha = \alpha \frac{G}{R_n} = A \cos \left[\frac{2\pi(t + 10,800)}{B} \right] \quad (5)$$

(A = 0.0074(T_s) + 0.088)
(B = 1,729(T_s) + 65,013)

* A : 순복사량-지중전열 비율 변화의 진폭, B : 순복사량-지중전열 비율 변화의 지속시간(s·rad⁻¹), t : 정오 대비 상대 시간(s), ΔT_s : 토양 표면 온도(°C)이다.

4. 수소연료전지 3중 열병합 시스템

수소연료전지 3중 열병합 시스템이란 하나의 에너지원인 수소연료전지로부터 전력과 냉·난방열을 동시에 발생시키는 종합 에너지 시스템으로, 자체 발전시설을 이용해 일차적으로 전력을 생산한 후 배출되는 열을 회수해 이용함으로써 기존 방식보다 에너지 절약 및 온실가스 배출 저감 효과를 거둘 수 있는 고효율 에너지이용 기술이다. 수소연료전지 3중 열

병합 시스템은 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)로부터 발생하는 배열을 활용하여 흡착식 냉방시스템으로부터 1차적으로 에너지를 생성하고 전기 히트펌프를 이용하여 온실 냉·난방 부하에 적합한 에너지를 공급한다. 본 연구에서는 반밀폐형 온실의 수소연료전지 3중 열병합 시스템을 적용하기 위한 기초 연구 단계로 동적 에너지 분석을 통해 적정 용량을 산정하고자 하였다. 향후 연구로 흡착식 냉방기, 연료전지를 통한 히트펌프 등에 대한 매개변수를 입력하고 연계하여 모델을 설계할 예정이다.

5. 냉·난방 부하 분석 방법

본 연구에서는 전주의 반밀폐형 온실의 수소연료전지 3중 열병합 시스템 적용을 위한 냉·난방 부하 분석의 방법으로 BES를 활용하였다. 냉난방 부하의 분석 방법으로 BES에 적용하기 위한 기상 데이터를 분석 및 가공하였다. BES 모델링을 위해 설계 도면을 바탕으로 온실의 형상 및 피복재를 구현하였다. 완성된 모델을 통하여 온실의 냉·난방 부하를 산정할 때 작물 에너지 교환이 미치는 영향을 분석하기 위해 작물 에너지 교환 고려 여부에 따른 냉·난방 부하 분석을 수행하였다. 정적 에너지 산정방법과 동적 에너지 산정방법의 비교를 위해 정적 에너지 분석과 동적 에너지 분석을 수행하였다. 또한, 대상지역의 10년간 최대 평균 냉난방부하를 산정하여 평균값을 수소연료전지 3중 열병합 시스템의 적정 설계 용량으로 제시하였다.

결과 및 고찰

1. 기상 데이터 분석

반밀폐형 온실의 냉·난방부하 분석을 위한 기상자료는 전주 기상청으로부터 2012년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지 총 10년의 데이터를 사용하였다. 대상 지역의 10년의 데이터를 분석한 결과, 동일한 날이라도 최대 약 15°C 이상 차이를 보였다. 이처럼 동일한 지역이라도 국내 기상은 사계절이 뚜렷하고 다양한 기후변화로 인해 차이가 존재한다. 따라서 냉·난방부하 분석을 위해 기상청으로부터 확보한 2012년부터 2021년의 데이터인 일사량, 온도, 습도, 지중온도 등을 시간별 데이터로 분석 및 가공하여 TRNSYS 기상 데이터 형식에 맞추어 각 연도별 1월 1일 01:00 - 12월 31일 24:00까지 총 8,760시간의 데이터로 변환 적용하였다. 또한, 시뮬레이션 상에서의 냉·난방 부하를 산정하기 위하여 토마토의 생육 적정 온도를 고려하였고 이에 따라, 09:00 - 18:00까지는 냉방온도 설정 25°C, 18:00 - 09:00까지는 난방온도 설정 17°C를 적용하였다.

2. BES 모델 설계

대상 온실의 설계도면을 참고하여 온실의 형상, 피복재를 모델의 적용하여 설계하였다. 벽체별 방위 및 면적 설정을 하기 위해 TRNSYS의 TRNSYS 3D 플러그인을 이용하여 Google Sketch Up(ver. 8, Google, USA)으로 형상을 모델링 하였다. 온실은 피복이 매우 얇으며 높은 투과율을 가지고 있으며 피복을 통과하여 온실로 유입된 태양 에너지는 작물 및

토양에 흡수되어 온도를 상승시키는데 이때 복사열에 차단으로 온실 내부 공기가 상승하는 온실효과가 나타났다. 이에 따라, 피복재 특성은 온실 내부 에너지 계산에 큰 영향을 미칠 것으로 판단되었다. TRNSYS에서 제공하는 표준 라이브러리에는 온실의 피복을 대체할 수 있는 제원이 제공되지 않기 때문에 본 연구에서는 Lee 등(2012)의 연구에서 사용된 창호 설계 프로그램인 WINDOW(6.3, LBNL, USA)로 대상 온실의








Table 2. The physical properties of wall (framework of greenhouse) used in this study.

| Wall | Materials | Density (kg·m ⁻³) | Specific heat (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹) | Thermal conductivity (kJ·h ⁻¹ ·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | Thickness (m) |
|---------|-----------|-------------------------------|---|--|---------------|
| Surface | Carbon | 7,840 | 0.502 | 154.80 | 0.10 |
| Floor | Concrete | 2,240 | 0.920 | 6.23 | 0.35 |
| | Sand | 2,240 | 0.920 | 6.29 | 0.30 |

Table 3. The physical properties of window (covering material of greenhouse) used in this study.

| Physical property | PO film (1.5 mm) |
|---|------------------|
| Solar transmittance | 0.797 |
| Solar reflectance (exterior and interior facing side) | 0.106 |
| Visible transmittance | 0.935 |
| Visible reflectance (exterior and interior facing side) | 0.106 |
| Thermal infrared transmittance | 0 |
| Infrared emittance (exterior and interior facing side) | 0.840 |
| Conductivity (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹) | 0.571 |
| U factor (W·m ⁻² ·K ⁻¹) | 6.014 |

Table 4. TRNSYS common modules for energy load calculation of greenhouse.

| Images | Modules | Specification |
|---|---|---|
|  | TYPE 9 (data reader) | Used to read a weather file in combination with other components |
|  | User-defined function | Used to calculate heat exchange of plant and soil |
|  | TYPE 16 (radiation processor) | To interpolate radiation data, calculates several quantities related to the position of the sun, and estimates insolation on a number of surfaces of either fixed or variable orientation |
|  | TYPE 33 (psychrometrics) | To calculate moist air taking as input the dry bulb temperature and relative humidity |
|  | TYPE 69 (sky temperature calculator) | To determine an effective sky temperature, which is used to calculate the long-wave radiation exchange between an arbitrary external surface and the atmosphere |
|  | TYPE 65 (online plotter) | Used to display selected system variables while the simulation is in-progress |
|  | TYPE 56 (greenhouse) | To model the thermal behaviour inside a greenhouse |

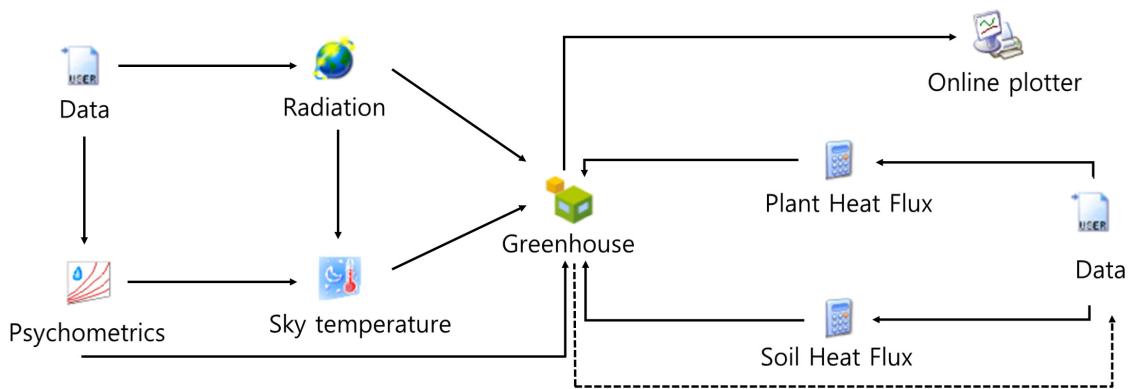


Fig. 2. Energy model of reference greenhouse using building energy simulation (BES).

피복재인 1.5mm의 PO 필름을 모델링 하였다.

본 연구에서 사용된 벽체 및 피복재의 물리적 특성은 Table 2와3에 나타나 있다. 벽체 및 지붕면의 기울기에 따른 일사 영향을 고려하기 위해 각각 벽체 및 지붕의 경사각도를 고려하였다. 선행연구를 토대로 작물 에너지 및 토양 에너지 교환 모델링을 광흡수율, 엽면적지수, 잎 특성 길이 등 대상 작물인 토마토의 특성값과 온실 내부의 입력자료를 고려하여 구현하였다. 또한, 대상 온실의 작물 및 토양에 의한 에너지 교환, 온실 골조 및 피복재 등을 구현하기 위해 사용한 모듈은 Table 4와 같으며 최종적으로 개발한 동적 에너지 부하 예측 모듈은 Fig. 2와 같다.

3. 작물 에너지 교환 고려 여부에 따른 냉·난방 부하 분석

온실의 냉·난방 부하를 산정할 때 작물 에너지 교환이 미치는 영향을 분석하기 위해 10년간의 냉·난방 부하를 이용하여 작물 에너지 교환 여부에 따라 냉·난방 부하를 분석하였다 (Table 5, Figs. 3 and 4). 10년 평균의 냉·난방 부하를 분석한 결과 냉방부하는 작물을 고려하였을 때 431,489kJ·h⁻¹, 작물을 고려하지 않았을 때 492,672kJ·h⁻¹로 14.1%의 차이를 나타냈다. 난방부하의 경우 작물을 고려하였을 때 545,427kJ·h⁻¹, 고려하지 않았을 때 481,367kJ·h⁻¹로 -11.7%의 차이가 나타났다. 냉방부하와 난방부하에서 모두 평균 약 10%에서 20%의 차이를 보이며 이는 작물 에너지 교환을 구현하였을 때 보통 잠열의 형태로 주변 공기에서 에너지를 흡수하여 온실 내부 총 에너지량이 감소하는 것으로 판단된다. 이에 따라, 작물을 미구현할 경우 냉방부하는 증가하고 난방부하는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 온실의 냉·난방 부하를 산정할 때 작물 에너지 교환을 고려하여야 온실의 적정 냉·난방 용량을 산정하여 에너지 효율을 높이고 설계 용량을 제시할 때 과대 설계 혹은 과소 설계를 하지 않을 수 있다고 판단된다.

Table 5. 10-year average cooling and heating load change rate according to crop implementation.

| Average heating and cooling load | Crop Implemented | Crop Not implemented | Change rate (%) | |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------|-----------------|-------------------------------|
| | | | | Maximum (kJ·h ⁻¹) |
| Heating load | Maximum (kJ·h ⁻¹) | 545,427 | 481,367 | -11.7 |

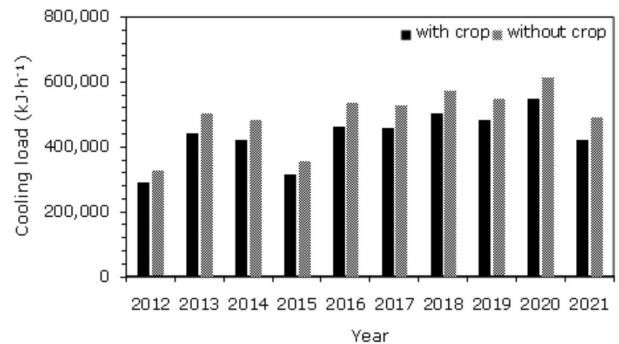


Fig. 3. Maximum cooling load according to crop implementation by year.

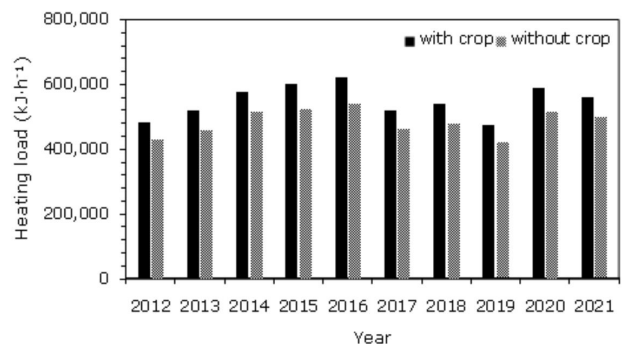


Fig. 4. Maximum heating load according to crop implementation by year.

4. 정적 에너지 분석과 동적 에너지 분석 비교

본 연구에서 동적 에너지 분석을 통해 선정된 결과 값과 선행 연구를 토대로 선정된 정적 에너지 분석 결과 값의 대한 비교분석을 실시하였다. 정적 에너지 분석은 농촌진흥청에서 발행된 열손실 진단사례집(NIAS, 2009)을 참고하여 관류열 부하의 1.2배로 계산하였다. 정적 에너지 분석에서 입력된 정보는 시계열 정보를 제외한 대상 온실의 폭, 길이, 측고, 연동수, 피복재의 종류, 피복재의 두께, 형태, 냉난방 온도가 입력되었다. 정적 에너지 분석과 동적 에너지 분석은 Fig. 5와 같다. 정적 에너지 분석을 통해 선정된 최대 난방 부하는 590,945kJ·h⁻¹로 본 연구 결과의 최대 난방 부하보다 10-20%의 높은 부하가 나타났다. 이는 동적 에너지 분석에서 작물 및 토양 에너지 교환을 고려하였기 때문에 주변 공기에서의 에너지 흡수를 통한 온실 내부 기온 감소 효과로 판단된다. 실제로 작물 및 토양 에너지를 구현하지 않았을 때의 동적 에너지 분석값은 최대 난방 부하 값은 539,651kJ·h⁻¹로 유사하

게 나타났다. Sethi 등(2013)에 따르면 정적해석 방법에 대한 정확도는 25%의 오차범위가 나타날 수 있다고 하며 본 연구에서도 유사한 경향성을 띄고 있다. 또한, 10년의 결과 값이 동일한 정적 에너지 분석에 비해 동적 에너지 분석 결과 값은 각 연도별 필요 냉·난방 용량이 다르게 나타났다. 이는 실시간 데이터 및 작물 및 토양 에너지 교환을 구현한 동적 에너지 분석 모델이 냉·난방부하를 선정할 때 에너지 효율을 높이고 온실에 필요한 적정 냉·난방용량을 선정하는 데에 적합하다고 판단하였다.

5. 수소연료전지 3중 열병합 시스템 적정 용량 선정

최대 냉방부하의 경우 실제 최고 기온이 발생한 시간과는 다르게 TRNSYS 시뮬레이션에서는 다른 일부 시간에서 최대 냉방부하가 발생하였다. 이는 Jo 등(2018)의 연구에서 알려진 바와 같이 동적 프로그램의 특성에 따른 온실 내 축열 등이 기인한 것으로 판단된다.

분석한 기간 동안의 연도별 최대 냉·난방부하 및 발생 시기는 Table 6과 같으며 외부 기상 조건 차이에 의하여 차이가 나타난다. 주로 주간의 외부 기온 및 일사량이 낮은 겨울철에 최대 냉방부하가 발생하며 야간의 외부 기온 및 일사량이 높은 여름철에 최대 냉방부하가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 난방부하의 경우 2012년, 2014년, 2020년도에 높은 부하량이 나타나는데 이는 실시간 입력자료 중 외부 평균기온, 일사량 등이 낮게 나타난 것에서 기인한 것으로 판단된다. 냉방부하에서는 2018년 폭염으로 인해 높은 부하량이 선정되었고 2015년에는 외부 기온이 낮게 나타난 것을 통해 낮은 냉방부하량이 선정되었다.

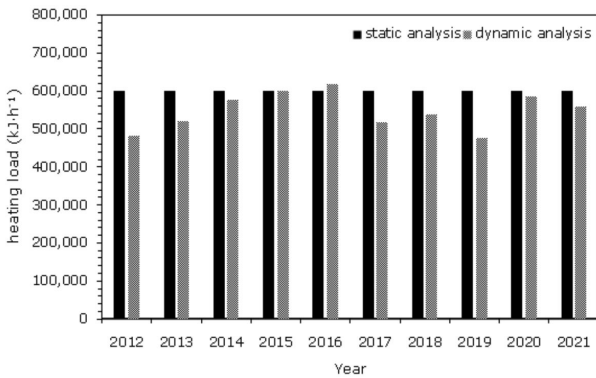


Fig. 5. Static energy and dynamic energy analysis.

Table 6. The maximum heating/cooling loads and occurrence (2012-2021).

| Year | Maximum cooling loads | | Maximum heating loads | |
|---------|-----------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| | Loads (kJ·h ⁻¹) | Occurrence | Loads (kJ·h ⁻¹) | Occurrence |
| 2012 | 285,854 | 2012.05.05 | 479,242 | 2012.02.02 |
| 2013 | 438,156 | 2013.07.22 | 517,772 | 2013.01.04 |
| 2014 | 418,678 | 2014.07.30 | 575,790 | 2014.12.18 |
| 2015 | 310,811 | 2015.07.25 | 598,957 | 2015.02.08 |
| 2016 | 459,938 | 2016.08.12 | 617,095 | 2016.01.24 |
| 2017 | 455,679 | 2017.08.05 | 515,362 | 2017.12.12 |
| 2018 | 500,045 | 2018.08.01 | 536,664 | 2018.01.11 |
| 2019 | 481,146 | 2019.07.06 | 473,388 | 2019.12.31 |
| 2020 | 544,801 | 2020.07.27 | 584,072 | 2020.12.31 |
| 2021 | 419,756 | 2021.07.05 | 555,927 | 2021.01.07 |
| Average | 431,187 | - | 449,578 | - |

일반적으로 농업시설에서 냉난방기의 적정 용량 산정은 5년간의 최대 에너지 부하값의 80% 수준으로 설계한다(Lee 등, 2016). 본 연구에서는 10년간의 평균 냉난방 부하를 분석하였다. 이에 따라, 산정된 평균 최대 냉·난방부하를 대상 온실의 적정 냉·난방 용량으로 제시할 수 있을 것이라 판단된다. 수소연료전지 3중 열병합 시스템은 흡착식 냉방기와 전기 히트펌프, 배열을 이용하여 냉·난방을 하기 때문에 난방용량 449,578kJ·h⁻¹, 냉방용량 431,187kJ·h⁻¹의 냉·난방용량이 필요할 것으로 요구된다.

결론

본 연구에서는 BES를 활용하여 반밀폐형 온실을 대상으로 2012년부터 2021년까지 10년 동안의 냉·난방 부하를 분석하고 수소연료전지 3중 열병합 시스템의 적정 용량을 제시하고자 하였다. 우선 대상 온실의 설계도를 토대로 BES 모델링을 진행하여 실시간 에너지 교환 모델을 개발하였다. 선행 연구를 토대로 작물에 및 토양에너지 교환 모델링을 광흡수율, 엽면적지수, 잎 특성 길이 등 대상작물인 토마토의 특성값과 온실 내부의 입력자료를 고려하여 구현하였다. 분석된 값을 선행 연구 결과들을 토대로 유의성을 판단하고자 하였다. 대상작물의 적정 생육온도에 따른 대상 온실의 연도별 냉·난방 부하를 산정하였다. 최근 10년의 기상자료를 이용하여 대상 온실에 수소연료전지 3중 열병합시스템을 적용시키기 위한 적정 설계 용량을 제시하고자 하였으며 평균 최대 난방용량 449,578kJ·h⁻¹, 냉방용량 431,187kJ·h⁻¹가 산정되었다.

본 연구에서는 선행연구를 통한 실제 검증된 모델을 활용하여 연구를 수행하였다. 향후 연구에서는 현장 실험을 통한 작물의 생장을 고려하거나 대상 지역에 수소연료전지 설치를 통한 실증에 관한 연구를 수행할 수 있을 것이다. 또한, 동적 해석 방법을 통하여 재배작물, 생육단계, 지역, 온실의 크기 등의 다양한 형태의 분석 및 연구가 진행되어야 할 것이라 판단된다.

적요

수소는 다양한 신재생에너지 중 환경친화적인 에너지로 각광받고 있지만 농업에 적용된 사례는 드물다. 본 연구는 수소연료전지 삼중 열병합 시스템을 온실에 적용하여 에너지를 절약하고 온실가스를 줄이고자 한다. 이 시스템은 배출된 열을 회수하면서 수소로부터 난방, 냉각 및 전기를 생산할 수 있다. 수소 연료 전지 삼중 열 병합 시스템을 온실에 적용하기 위해서는 온실의 냉난방 부하 분석이 필요하다. 이를 위해서는 온실의 형태, 냉난방 시스템, 작물 등을 고려해야 한다. 따라서

본 연구에서는 건물 에너지 시뮬레이션(BES)을 활용하여 냉난방 부하를 추정하고자 한다. 전주시역의 토마토를 재배하는 반밀폐형 온실을 대상으로 2012년부터 2021년까지의 기상데이터를 수집하여 분석했다. 온실 설계도를 참고하여 피복재와 골조를 모델화하여 작물 에너지와 토양 에너지 교환을 실시했다. 건물 에너지 시뮬레이션의 유효성을 검증하기 위해 작물의 유무에 의한 분석, 정적 에너지 및 동적 에너지를 실시했다. 또한 월별 최대 냉난방 부하 분석에 의해 평균 최대 난방 용량 449,578kJ·h⁻¹, 냉방 용량 431,187kJ·h⁻¹이 산정되었다.

추가주제어 : TRNSYS, 냉난방용량, 동적 에너지, 토마토, 토양에너지

사사

본 연구는 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ0162572023)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Abdel-Ghany A.M., and T. Kozai 2006, Dynamic modeling of the environment in a naturally ventilated, fog-cooled greenhouse. *Renew Energy* 31:1521-1539. doi:10.1016/j.renene.2005.07.013
- Banakar A., M. Montazeri, B. Ghobadian, H. Pasharshahi, and F. Kamrani 2021, Energy analysis and assessing heating and cooling demands of closed greenhouse in Iran. *Therm Sci Eng Prog* 25:101042. doi:10.1016/j.tsep.2021.101042
- Carlini M., T. Honorati, and S. Castellucci 2012, Photovoltaic greenhouses: Comparison of optical and thermal behaviour for energy savings. *Math Probl Eng* 2012:743764. doi:10.1155/2012/743764
- Choudhury B.J., S.B. Idso, and R.J. Reginato 1987, Analysis of an empirical model for soil heat flux under a growing wheat crop for estimating evaporation by an infrared-temperature based energy balance equation. *Agric For Meteorol* 39:283-297. doi:10.1016/0168-1923(87)90021-9
- Clothier B.E., K.L. Clawson, P.J. Pinter Jr., M.S. Moran, R.J. Reginato, and R.D. Jackson 1986, Estimation of soil heat flux net radiation during the growth of alfalfa. *Agric For Meteorol* 37:319-329.
- Coakley D., P. Raftery, and M. Keane 2014, A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renew Sustain Energy Rev* 37:123-141. doi:10.1016/j.rser.2014.05.007
- Decano-Valentin C., I.B. Lee, U.H. Yeo, S.Y. Lee, J.G. Kim, S.J.

- Park, Y.B. Choi, J.H. Cho, and H.H. Jeong 2021, Integrated building energy simulation-life cycle assessment (BES-LCA) approach for environmental assessment of agricultural building: A review and application to greenhouse heating systems. *Agronomy* 11:1230. doi:10.3390/agronomy11061230
- Fynn R.P., A. Al-shooshan, T.H. Short, and R.W. McMahon 1993, Evapotranspiration measurement and modeling for a potted chrysanthemum crop. *Am Soc Agric Eng* 36:1907-1913. doi:10.13031/2013.28541
- Jo J.H., S.S. Yu, S.M. Lee, and S.G. Kang 2018, Modeling and effectiveness verification of greenhouse dynamic systems including model of plant growth. *Proc Korean Soc Mech Eng Spring and Autumn Conf*, pp 871-875. (in Korean)
- Joudi K.A., and A.A. Farhan 2015, A dynamic model and an experimental study for the internal air and soil temperatures in an innovative greenhouse. *Energy Convers Manag* 91:76-82. doi:10.1016/j.enconman.2014.11.052
- Korea Energy Economics Institute (KEEI) 2021, International renewable energy policy changes and market analysis. KEEI, Ulsan, Korea. (in Korean)
- KOSIS 2022, Agriculture area survey. Available via https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1EB001&conn_path=I3. Accessed 20 Nov 2022. (in Korean)
- Lee S.B., I.B. Lee, S.W. Hong, I.H. Seo, B.P. Jessie, K.S. Kwon, T.H. Ha, and C.P. Han 2012, Prediction of greenhouse energy loads using building energy simulation (BES). *J Korean Soc Agric Eng* 54:113-124. (in Korean) doi:10.5389/KSAE.2012.54.3.113
- 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
- Liebenthal C., B. Huwe, and T. Foken 2005, Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches. *Agric Meteorol* 132:253-262. doi:10.1016/j.agrformet.2005.08.001
- Lim T., Y.K. Baik, and D.D. Kim 2020, Heating performance analysis of an air-to-water heat pump using underground air for greenhouse farming. *Energies* 13:3863. doi:10.3390/en13153863
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2020, Greenhouse status of facility vegetable and production performance. MAFRA, Sejong, Korea. (in Korean)
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) 2019, Roadmap to revitalize the hydrogen economy. MOTIE, Sejong, Korea. (in Korean)
- National Institute of Agricultural Sciences (NIAS) 2009, Case collection of heat loss diagnosis in agricultural facilities. NIAS, Suwon, Korea. (in Korean)
- Rasheed A., H.T. Kim, and H.W. Lee 2022, Modeling-based energy performance assessment and validation of air-to-water heat pump system integrated with multi-span greenhouse on cooling mode. *Agronomy* 12:1374. doi:10.3390/agronomy12061374
- Reilly A., and O. Kinnane 2017, The impact of thermal mass on building energy consumption. *Appl Energy* 198:108-121. doi:10.1016/j.apenergy.2017.04.024
- Sethi V.P., K. Sumathy, C. Lee, and D.S. Pal 2013, Thermal modeling aspects of solar greenhouse microclimate control: A review on heating technologies. *Sol Energy* 96:56-82. doi:10.1016/j.solener.2013.06.034
- Stanghellini C. 1987, Transpiration of greenhouse crops: An aid to climate management. PhD Dissertation, Wageningen Univ., The Netherlands.
- Taki M., Y. Ajabshirchi, S.F. Ranjbar, A. Rohani, and M. Matloobi 2016, Heat transfer and MLP neural network models to predict inside environment variables and energy lost in a semi-solar greenhouse. *Energy Build* 110:314-329. doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.010
- Vadiee A., and V. Martin 2013, Energy analysis and thermoeconomic assessment of the closed greenhouse - The largest commercial solar building. *Appl Energy* 102:1256-1266. doi:10.1016/j.apenergy.2012.06.051
- Yeo U.H., S.Y. Lee, S.J. Park, J.G. Kim, Y.B. Choi, R.W. Kim, J.H. Shin, and I.B. Lee 2022, Rooftop greenhouse: (1) Design and validation of a BES model for a plastic-covered greenhouse considering the tomato crop model and natural ventilation characteristics. *Agriculture* 12:903. doi:10.3390/agriculture12070903