

BES를 이용한 연동형 온실의 냉·난방 부하 산정 및 PV 시스템 발전 성능 분석

이민형 · 이인복* · 하태환 · 김락우 · 여욱현 · 이상연 · 박관용 · 김준규
서울대학교 지역시스템공학전공

Estimation on Heating and Cooling Loads for a Multi-Span Greenhouse and Performance Analysis of PV System using Building Energy Simulation

Minhyung Lee, In-Bok Lee*, Tae-Hwan Ha, Rack-Woo Kim, Uk-Hyeon Yeo, Sang-Yeon Lee,
Gwanyong Park, and Jun-Gyu Kim

Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

Abstract. The price competitiveness of photovoltaic system (PV system) has risen recently due to the growth of industries, however, it is rarely applied to the greenhouse compared to other renewable energy. In order to evaluate the application of PV system in the greenhouse, power generation and optimal installation area of PV panels should be analyzed. For this purpose, the prediction of the heating and cooling loads of the greenhouse is necessary at first. Therefore, periodic and maximum energy loads of a multi-span greenhouse were estimated using Building Energy Simulation(BES) and optimal installation area of PV panels was derived in this study. 5 parameter equivalent circuit model was applied to analyzed power generation of PV system under different installation angle and the optimal installation condition of the PV system was derived. As a result of the energy simulation, the average cooling load and heating load of the greenhouse were 627,516MJ and 1,652,050MJ respectively when the ventilation rate was 60AE·hr⁻¹. The highest electric power production of the PV system was generated when the installation angle was set to 30°. Also, adjustable PV system produced about 6% more electric power than the fixed PV system. Optimal installation area of the PV panels was derived with consideration of the estimated energy loads. As a result, optimal installation area of PV panels for fixed PV system and adjustable PV system were 521m² and 494m² respectively.

Additional key words : building energy simulation, energy loads, greenhouse, photovoltaic system

서 론

1990년 이후 연중 고품질의 농산물을 생산할 수 있는 시설 농업이 보급화 되면서 시설 농업의 생산액은 2015년에 약 5조 34억원에 도달하였으며 국내 시설재배 면적은 1990년 23,698ha에서 2015년 52,526ha로 증가하였다(MAFRA, 2016). 한편, 우리나라는 사계절이 뚜렷한 기후 특성을 가지고 있으며 계절에 따라 외기온의 변화가 극심하다. 따라서 시설 내부를 작물 생육에 적합한 환경으로 유지하기 위해서는 냉·난방 시스템을 통한 환경 조절은 필수적이다. 그러나 동절기 난방을 하는 국내 온실 중 약 84%가 유류를 이용한 난방을 하고 있어(MAFRA, 2016), 국제유가 변동에 매우 취약하며 시설

농가의 경영비 중 30~40%가 난방 에너지 비용으로 농가 경영에 큰 부담으로 작용하고 있다(RDA, 2017). 이를 해결하기 위하여 농림축산식품부에 농어업에너지이용 효율화 사업을 통하여 신재생에너지의 농업 시설 보급 및 확대, 에너지 절감 시설 보급 등을 지원하고 있다.

신재생에너지원 중 태양광의 경우 과거 발전단가가 다른 에너지원에 비해 4배 이상 높아 경제성이 떨어지는 문제가 존재하였다. 그러나 태양광 관련 기술의 발전 및 산업의 성장으로 태양광의 발전단가는 2020년에는 1kWh 당 80원으로 다른 에너지원의 발전단가와 유사해질 것으로 예측되며 태양광 시스템의 가격 역시 지속적으로 하락할 것으로 예측되고 있다(MOTIE, 2016). 가격 경쟁력 상승 및 관련 산업, 시장의 성장으로 태양광 발전 시스템이 국내에 다양하게 보급되고 있으나 현재까지는 농업 시설, 특히 온실에 적용된 사례는 다른 건축물에 비해 부족한 상황이다. 향후 지속적으로 성장이 예측

*Corresponding author: iblee@snu.ac.kr

Received September 05, 2017; Revised October 11, 2017;
Accepted October 11, 2017

되는 태양광 발전 시스템을 온실에 적용하기 위해서는 온실의 냉·난방에 소요되는 전력량을 평가하고 이를 보완할 수 있는 태양광 발전시스템의 적정 패널 설치 면적에 대한 기초 연구가 필요하다. 이를 위해서는 우선적으로 온실의 냉·난방 부하 산정이 이루어져야한다.

시설의 냉·난방 부하를 산정하는 방법은 시설 내외의 환경의 변화를 고려하느냐에 따라 정적인 해석 방법과 동적인 해석 방법으로 구분된다. 정적해석법은 시설 내외의 환경조건을 정상상태로 가정하여 냉·난방부하를 산정하는 방법으로 비교적 간편하게 부하를 산정할 수 있다. 그러나 시간에 따라 변화하는 환경 조건들을 고려하지 못하여 일사 및 내부 열원에 의한 열교환을 고려하지 못하며 온실의 경우 시간에 따른 피복재의 축열 효과를 반영하지 못하는 단점이 있다(Song 등 2009). 온실의 경우 얇은 피복으로 인하여 기상조건 변화에 민감하며 정적산정법을 이용할 경우 실제 냉·난방부하보다 과대 및 과소 산정될 가능성이 있다(Lee, 2012). 동적해석 방법의 경우 분석 대상 공간의 에너지방정식에 기반을 두어 시간에 따른 에너지평형을 해석하는 방법으로 시설 내외의 환경조건을 비정상상태로 가정하고 연속적인 냉·난방부하를 산정한다. 또한 동적해석방법은 해석공간의 열용량, 외부 환경조건, 내부 발열 등의 시간에 따라 가변적인 요소들을 반영하여 정적해석방법에 비해 시간에 따른 상세한 에너지흐름을 모의할 수 있다.

컴퓨터의 발전과 함께 건축분야에서 건물 에너지 분석을 위하여 사용되는 다양한 건물 에너지 시뮬레이션(Building energy simulation; BES) 프로그램들이 개발되었으며 최근에는 태양광 발전을 포함한 신재생에너지 관련 연구들에 활용되고 있다. BES를 활용한 태양광발전 시스템 연구는 주로 전력 생산량을 높일 수 있는 최적 설치 조건과 관련된 연구들이 수행되어 왔다. Park과 Seo(2012)는 태양광 발전 시스템의 최적 배치안을 분석하기 위하여 6개 지역에 대해 설치 각도별 일평균 일사량을 BES를 활용하여 산정하였다. Quesada 등(2011)은 7.2kWp 태양광 발전 시스템의 발전량 실측치를 태양광 발전 시스템을 구현한 BES 모델의 연산 값과 비교 검증하고 모듈의 온도가 BES 모델에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 Kang 등(2012)는 건물에 설치된 태양광 발전 시스템의 발전 성능을 개선하기 위하여 태양광 발전 시스템의 BES 모델을 구성하고 설치 조건에 따른 발전량을 산정하여 최적의 개선안을 제시하고자 하였다.

최근에는 농업 분야에서도 BES를 이용한 농업 시설물의 동적 에너지 해석 연구들이 수행되고 있으며 온실을 대상으로 BES를 활용한 연구도 일부 수행되고 있다. Lee 등(2012)는 BES를 활용하여 국내의 대표적인 다연동 온실들에 대한 지역별 냉·난방 부하를 분석하였으며,

Ha 등(2015)는 지열 발전 시스템을 적용한 온실의 유형별 작물별 지역별 냉·난방 부하를 BES를 활용하여 분석하였다. 또한 Lee 등(2016)은 작물의 에너지 교환 모델을 개발하고 이를 BES 모델에 적용하여 대상 온실의 냉·난방 부하를 예측하고자 하였다. 한편, BES를 활용한 연구들은 주로 온실의 냉·난방 부하를 분석에 관한 연구들이 많았으며 온실에 신재생에너지를 적용하여 분석한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 신재생에너지원 중 가격 경쟁력이 상승하고 향후 지속적으로 성장이 예측되는 태양광 발전시스템을 온실에 적용하기 위하여 BES를 이용하여 환기량 조건에 따른 온실의 기간 및 최대 냉·난방부하와 설치 각도 및 외부 환경조건에 따른 태양광 발전시스템의 전력 생산량을 산정하였다. 특히, 대형 온실의 경우 적정 작물 생육환경 조성에 많은 에너지가 필요하여 이로 인한 막대한 에너지 비용이 농가 경제에 부담이 된다. 또한 국가적인 관점에서 2035년 기준 1차 에너지의 11%를 신재생에너지로 보급한다는 계획을 충족시키기 위하여 우선적으로 농업 시설 중 에너지 소비가 큰 대형 온실에 대하여 신재생에너지를 적용할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 연동형 온실을 대상 시설로 선정하였다. 온실의 냉·난방부하 및 태양광 발전시스템의 전력 생산량을 산정하기 위하여 BES 상용 프로그램 중 하나인 TRNSYS(Ver. 17, SEL, USA)를 이용하여 태양광 발전시스템이 적용된 온실의 에너지 모델을 설계하였다. 대상 작물은 파프리카로 하였으며, 태양광 발전시스템의 설치 각도에 따른 전력 생산량을 분석하여 최적 설치 조건을 도출하고자 하였다. 2012년부터 2016년까지 총 5년 동안 환기량 조건에 따른 온실의 냉·난방 부하 및 설치 각도에 따른 전력 생산량을 산정하였으며 이를 바탕으로 태양광 발전시스템을 온실에 적용하기 위하여 필요한 PV 패널 면적을 제시하였다.

재료 및 방법

1. 대상 지역 및 온실

본 연구에서는 국내 지역 중 일사량이 높아 태양광 발전 시스템(Photovoltaic system; PV system) 설치에 적합한 광주를 대상 지역으로 선정하였다. 온실의 냉·난방 부하 및 태양광 발전 시스템의 동적 에너지 시뮬레이션 입력 자료 구축을 위하여 광주 기상대에서 2012년부터 2016년까지 총 5년간의 기온, 습도, 일사, 풍향, 풍속, 지면 온도 등의 기상 데이터를 수집하였다. 각 기상 요소는 기상대에서 수집한 자료들의 한 시간단위 평균값을 적용하였으며 이를 바탕으로 동적 에너지 시뮬레이션의 기상 입력 자료를 구축하였다. 4연동 벤로형 유리 온

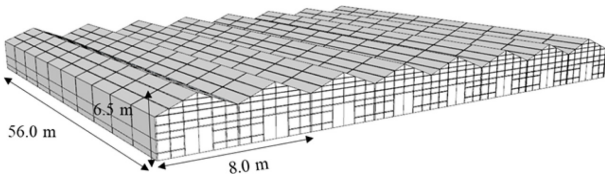


Fig. 1. Schematic diagram of targeted venlo-type greenhouse.

실을 대상 온실로 선정하였으며 Fig. 1과 같이 한 스펠 당 폭 8.0m, 길이 56.0m, 측고 5.5m, 동고 6.5m로 설정하였다. 온실 내부는 크게 시설내부의 기계적 시스템 제어 목적으로 한 전실과 작물 재배를 위한 공간인 생육실로 구분하였고, 온실 내부에는 대상 작물로 파프리카를 재배하는 것으로 가정하였다. 온실의 피복은 5mm 유리로 천정, 측면, 전후면 모두 단일 피복되어 있으며, 바닥은 두께 200mm의 콘크리트로 설정하였다. 온실 천정에는 환기를 위한 천창이 설치되어 전체 천정 면적의 25%에 해당하는 면적이 개폐가 가능하며 별도의 측창은 없는 것으로 설정하였다. 생육실 내부 측벽에는 보온커튼이 설치되어 있으며 동일한 보온커튼이 지면으로부터 5.2m 높이에도 설치되는 것으로 설정하였다.

2. Building Energy Simulation (BES)

대상 온실의 에너지 부하 및 PV 시스템의 발전량을 산정하기 위하여 Building Energy Simulation(BES)을 사용하였다. BES는 건축물의 열 및 에너지 흐름과 냉난방 부하를 수치적으로 해석하고 예측하는 기법으로 높은 정확도와 활용성으로 건축물의 냉난방 공조 설계 및 에너지 부하 분석에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 BES 상용프로그램 중 TRNSYS(Ver. 17, SEL, USA)을 사용하였다. TRNSYS는 모듈 구조를 갖는 비정상 시스템 해석 프로그램으로 메인 프로그램과 컴포넌트로 구성되어 있으며 필요에 따라 사용자 정의의 컴포넌트를 생성 및 적용 할 수 있어 시뮬레이션 모델의 적용성 및 호환성이 용이하다는 장점이 있다. TRNSYS는 전달 함수법을 적용한 동적 시뮬레이션을 통하여 해석 대상 건물의 에너지 부하를 산정하며 대상 건물은 단일 해석 단위인 Zone으로 구분되어 다수의 Zone으로 구성된다. 각각의 Zone에 공간을 이루는 벽체의 물성치를 입력하고 기상 데이터, 환기, 침기, 냉난방 등의 컴포넌트들과 연계시키면 대상 건물에서 발생하는 모든 복잡한 열전달 과정을 고려한 식 (1)을 바탕으로 동적 열에너지 해석을 수행한다.

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{\infty,i} + \dot{Q}_{vent,u} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solair,i} + \dot{Q}_{ISHCLI,i} \quad (1)$$

식 (1)에서 $\dot{Q}_{surf,i}$ 는 건물 표면으로부터 얻는 대류에 의한 열량(kJ), $\dot{Q}_{\infty,i}$ 는 건물 내부의 발열체에 의한 열손실 혹은 열 획득량(kJ), $\dot{Q}_{vent,i}$ 는 환기 및 침기에 의한 열손실 혹은 열 획득량(kJ), $\dot{Q}_{cplg,i}$ 는 인접한 공기나 경계에 의한 열손실 및 획득량(kJ), $\dot{Q}_{solair,i}$ 은 외부 창문에 의하여 흡수되어 내부 공간의 대류열로 전환되는 열량(kJ), $\dot{Q}_{ISHCLI,i}$ 은 태양의 일사에 의하여 건물 내부 공간의 그늘진 공간에 대하여 전환된 대류열(kJ)을 의미한다.

3. PV 시스템

PV 시스템의 발전량 분석을 위하여 일반적으로 Equivalent electrical circuit을 이용하여 PV 시스템을 설계하며 방정식에 사용되는 매개변수의 수에 따라 Four-parameter equivalent electrical-circuit model과 Five-parameter equivalent circuit model로 구분된다(Celik과 Acikgoz, 2007). 본 연구에서는 Five-parameter equivalent circuit model을 이용하여 PV 시스템을 발전량을 분석하고자 하였다. Five-parameter equivalent circuit model의 경우 식 (2)와 식 (3)의 전류-전압 방정식을 통하여 외부 환경조건에 따른 PV 모듈의 전류와 전압 그리고 생산되는 전력량을 산정한다(Duffie 와 Beckamm, 1991).

$$I = I_L - I_0 \left[e^{\frac{V + IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

$$a = \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (3)$$

식 (2) 와 (3)에서 I 는 전류(amp), I_L 은 모듈의 광전류(amp), I_0 는 다이오드 역 포화전류(amp), V 는 전압(V), R_s 는 모듈 직렬저항(Ω), R_{sh} 는 모듈 병렬저항(Ω), N_s 는 모듈에 직렬로 연결된 각 셀의 수, n_i 는 이상계수, k 는 Boltzmann 상수($J \cdot K^{-1}$), T_c 는 모듈 온도(K), q 는 전자전하 상수이다.

PV 시스템의 정확한 발전량 산출을 위하여 제조사로부터 제공되는 PV 모듈의 특성과 함께 5가지 매개변수의 값이 반드시 필요하다. 5개의 매개변수로는 모듈의 광전류(I_L), 다이오드 역 포화전류(I_0), 모듈 직렬저항(R_s), 모듈 병렬저항(R_{sh}), 그리고 식 (3)으로부터 계산이 되는 수정 이상 계수(modified ideality factor, a)가 해당한다. 5가지의 매개변수를 계산하기 위해서는 각 PV 모듈의 단락전류, 개방전압, MPP 전류, MPP 전압 등의 특성치 값들이 필요하며 특성치 값을 바탕으로 De Soto 등 (2005)에서 제시한 관계식들을 이용하여 5가지 매개변수의 값을 직접 산정할 수 있다. 본 연구에서는 De Soto

Table 1. Frame, floor and thermal curtain properties of targeted greenhouse.

	Materials	Density (kg·m ⁻³)	Specific heat (kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	Heat conductivity (kJ·hr ⁻¹ ·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	Thickness (m)
Frame	Galvanized pipes	7865	0.47	11.94	0.10
Floor	Gravel	1400	1.00	4.07	0.20
Thermal curtain	Multi layer	29	2.30	0.15	0.05

등(2005)에서 제시된 식들을 바탕으로 Five-parameter equivalent circuit model의 매개변수를 산정하는 EES program(Ver. 10.155)을 이용하여 매개변수를 산정하였다. 산정한 매개변수와 외부 환경 조건, PV 모듈 설치 각도에 따른 일사량 등의 환경 변수들을 입력 및 연계하여 PV 시스템의 발전량을 분석하는 BES 모델을 설계하였다.

4. 연구 방법

4.1 BES 모델 설계

대상 온실의 설계를 바탕으로 Google SketchUp (ver.8, Google, USA)을 이용하여 대상 온실의 형상을 모델링하였으며 Trnsys3D 플러그인을 이용하여 TRNSYS에 연계하였다. 온실의 외장재는 일반적인 건축물과는 다르게 유리 혹은 폴리에틸렌필름과 같이 매우 얇은 재질로 구성되어 있으나 TRNSYS에서는 온실의 외장재에 대한 재원이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 Lee 등(2012)의 연구에서 적용한 온실 피복 모델링 방법에 착안하여 WINDOW(ver.7.4, LBNL, USA) 프로그램을 이용하여 대상 온실에 사용된 두께 5mm 맑은 유리 외장재를 모델링하였다. 모델링된 두께 5mm 맑은 유리는 일사투과율 0.816, 일사반사율 0.071, 가시광선투과율 0.894, 가시광선반사율 0.080, 적외선방사율 0.837, 열전도율 1W·m⁻¹·K⁻¹, 열관류율 5.834W·m⁻¹·K⁻¹의 물리적 특성을 가진다. 보온커튼은 Cho 등(2015)의 연구에서 사용한 물성치를 참고하여 설계하였으며 온실 설계에 적용된 골조와 바닥의 물리적 특성은 Table 1과 같다. PV 시스템의 발전량 분석을 위하여 Five-parameter equivalent circuit model을 기반으로 한 Type 194 모듈을 이용하였으며 60셀 다결정 PV 모듈을 대상으로 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션에 사용된 PV 모듈의 상세 제원은 아래 Table 2와 같다.

대상 온실의 동적 에너지 시뮬레이션을 수행하기 위한 BES 모델을 설계하기 위하여 다양한 컴포넌트들을 이용하여 모델링을 진행하였다. 온실 형상 모델과 외장재는 TRNSYS의 multi-zone 컴포넌트 설정 프로그램인 TRNBuild로 연동하여 온실 피복에서 발생하는 열에너지 교환을 모의하였다. 기상 데이터 모듈은 광주 기상대에

Table 2. Specification of PV module.

Parameter	Specification
Rated Power in STC	275 W
Short-circuit current	9.31 A
Open-circuit voltage	38.7 V
Current at max power point	8.79 A
Voltage at max power point	31.3 V
Number of cells wired in series	60
Dimensions	1670 × 1000 × 32 mm

획득한 데이터와 기상 분석 결과를 입력하였다. 온실 내부 설비의 경우 스위치 컴포넌트를 이용하여 모델에 반영하였다. 보온커튼의 경우 외부 일사가 0에 근접할 경우 가동신호를 생성하여 시간에 따른 개폐조건을 구현하였다. 환기창은 내부 기온이 냉방 가동설정온도보다 3°C 낮고 외부 기온이 내부 기온보다 낮을 경우 가동되도록 하였다. 최종적으로 설계한 온실 및 PV 시스템의 동적 에너지 시뮬레이션 모델은 Fig. 2와 같다.

4.2 온실 냉·난방 부하 산정 방법

본 연구에서는 2012년부터 2016년까지 총 5년 동안의 기상 자료를 바탕으로 대상 온실의 기간 및 최대 냉·난방 부하를 산정하고자 하였다. 대상 작물인 파프리카의 적정 생육온도는 전라남도 농업기술원 원예연구소에서 제공하는 자료를 참고하여 18°C~25°C로 설정하였다. 적정생육 온도를 고려하여 대상 온실의 냉방 가동 온도는 25°C, 난방 가동 온도는 18°C로 설정하였으며 환기는 22°C에서 가동된다고 설정하였다. 또한 대상 온실의 적정 생육 환경 조성 및 냉방 부하 절감을 위한 기계식 강제 환기팬이 설치되어 있다고 가정하였다. 환기팬의 환기량을 단위 시간당 시설의 공기 교환 횟수(AE·hr⁻¹)로 나타냈으며 총 3가지 조건(0AE·hr⁻¹, 30AE·hr⁻¹, 60AE·hr⁻¹)으로 구분하여 분석을 실시하였다. 또한 환기팬의 환기량 조건별로 냉방 및 난방 부하를 연도별로 분석하여 환기량이 온실의 냉·난방 부하에 미치는 영향을 분석하였다. 연도별 냉·난방 부하는 1월 1일부터 12월 31일까지로 구분하여 산정하였으며 이와 더불어 연도별로 최대 냉·난방부하량과 발생하

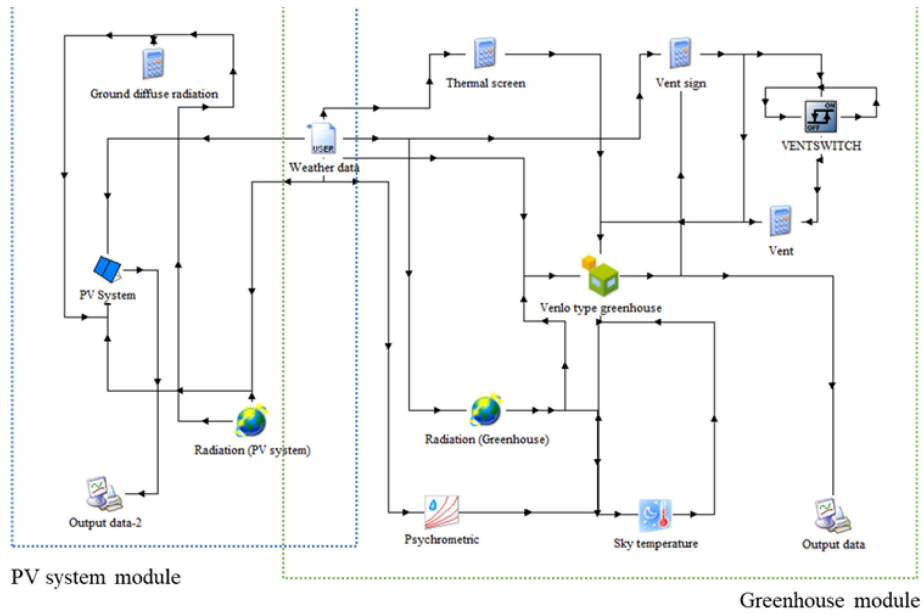


Fig. 2. Energy model of greenhouse and PV system using BES.

는 시점의 환경 조건을 분석하여 외부 환경 조건과 환기 팬의 환기량이 최대 냉·난방 부하에 미치는 영향을 함께 분석하였다. 추가적으로 연도별로 산출된 기간 냉·난방부하를 이용하여 예상되는 전력소비량을 분석하였다.

4.3 PV 시스템 최적 설계 및 적정 설치 면적 도출 방법

대상 온실 시설의 냉·난방 부하를 고려하였을 때 적합한 PV 시스템의 설치 면적을 도출하기 위하여 PV 시스템의 발전 효율을 늘릴 수 있는 최적 설계 방안을 도출하고자 하였다. PV 시스템의 최적 설계 방안 도출을 위하여 첫 번째로 PV 모듈의 설치 각도에 따른 전력 생산량을 비교 분석하였다. PV 시스템과 지표면의 각도를 0°에서 90° 범위 내에 5°씩 간격을 두어 총 18개의 각도의 조건으로 구분하였으며, 시뮬레이션을 통하여 2012년부터 2016년까지 총 5년간 전력 생산량을 산정하였다. 전력 생산량 결과를 분석하여 가장 많은 전력을 생산할 수 있는 최적 설치 각도를 도출하고자 하였다. 이는 PV 시스템을 고정형 시스템으로 간주하고 초기에 설정한 각도로 시스템을 운영하는 조건 하에서의 최적 설치 각도이다. 한편 사용자가 임의로 PV 모듈과 지표면과의 각도를 조절 가능한 가변형 PV 시스템의 경우에는 월별 혹은 분기별로 최적의 각도로 시스템은 운영하여 더 많은 전력을 생산할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구에서는 2012년부터 2016년 동안 각 년마다 월별로 가장 높은 발전량을 나타내는 PV 모듈의 각도를 분석하고, 각 월별로 최적각도로 PV 시스템을 운영한다고 가정하였을 때의 전력 생산량을 산정하였다. 그리고 이 결과를

앞서 PV 모듈의 각도를 고정한 조건에서의 산정한 전력 생산량과 비교하였다. 총 60개의 PV 모듈을 설치하여 PV 시스템을 운영하는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 실시하였으며 PV 모듈의 방위각은 선행 논문을 참고하여 대상 지역에서 가장 많은 일사량을 받을 수 있는 정남방향 0°로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다(Choi, 2009; Park과 Seo, 2012; Kim 등, 2014). PV 모듈은 설치 각도에 따라 PV 모듈의 면적에 도달하는 일사량을 모두 받는 것으로 가정하였으며 인버터의 변환 효율은 고려하지 않았다.

한편, 온실의 전체 냉·난방 부하에 대응하는 PV 시스템 설계 용량 설정은 과도하므로 공공기관의 2017년 신재생에너지 공급의무비율(MOTIE, 2017)을 참고하여 PV 시스템 설계 용량을 설정하였다. 앞서 냉·난방 부하 분석을 통하여 산정된 온실의 예상에너지사용량을 바탕으로 2017년 기준 공급의무비율 21%를 적용한 결과를 PV 시스템의 적정 설계 용량으로 설정하였다. 적정 설계 용량에 해당하는 전력을 생산할 수 있는 PV 시스템의 패널 면적을 도출하여 이를 대상 온실에 적합한 패널 설치 면적으로 제시하고자 하였다.

결과 및 고찰

1. 온실의 냉·난방부하 및 전력소비량 산정

2012년부터 2016년까지 광주 기상대의 기상자료를 활용하여 대상 온실의 기간 냉·난방 부하를 분석하였으며 이를 전력 소모량으로 환산한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. Electric power for cooling and heating loads by ventilation rate.

Ventilation rate (AE·hr ⁻¹)	Year	Electric power for cooling (kWh)	Electric power for heating (kWh)	Total electric power (kWh)
0	2012	234,855	490,232	725,087
	2013	259,777	456,848	716,625
	2014	206,091	416,441	622,532
	2015	166,992	478,724	645,716
	2016	273,013	428,732	701,744
	Average		228,146	454,195
30	2012	188,353	491,550	679,903
	2013	216,250	458,553	674,802
	2014	150,956	418,074	569,029
	2015	113,830	480,013	593,843
	2016	226,064	430,052	656,116
	Average		179,090	455,648
60	2012	183,780	494,918	678,699
	2013	213,079	463,287	676,366
	2014	146,013	421,268	567,281
	2015	107,778	482,473	590,251
	2016	220,899	432,569	653,468
	Average		174,310	458,903

연도별 기간 냉방 부하에 의한 전력 소모량의 경우 환기량과 상관없이 2016년에서 가장 높은 전력량이 산정되었으며, 연도별 기간 난방 부하에 의한 전력 소모량의 경우 환기량과 상관없이 2012년에 가장 높은 전력량이 산정되었다. 환기팬의 환기량에 따른 전력 소모량을 분석한 결과, 환기량이 높을수록 온실의 냉방 부하로 인한 전력 소모량은 절감되었으며 난방 부하로 인한 전력 소모량은 늘어났으나 그 차이는 냉방 전력량 절감량에 비해 적게 나타났다. 5년 동안 산정된 전력 소모량의 평균값으로 비교하였을 때 환기팬을 가동하지 않는 조건에서 총 682,341kWh의 전력량이 산정되었으며, 환기량 60AE·hr⁻¹ 조건에서는 총 633,213kWh의 전력량이 산정되었다. 환기량이 60AE·hr⁻¹ 조건에서 난방 부하로 인한 평균 전력 소모량이 환기팬 미가동 조건에 비해 4,708kWh 정도 높게 산정되지만 냉방 부하 절감 효과로 인해 총 전력량은 49,128kWh만큼 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 온실의 환기를 통하여 내부의 에너지 부하를 크게 절감할 수 있는 것으로 판단되었다. 한편, 본 연구에서 도출한 전력 소비량은 냉·난방장치의 전력 이용 효율을 고려하지 않았기 때문에 실제 사용 시에는 성능계수(Coefficient of performance), 에너지 효율비(Energy efficiency ratio) 등을 고려할 필요가 있다.

연도별 최대 냉·난방부하 및 발생하는 시점을 분석한 결과, 환기팬의 환기량에 따라 최대 난방부하는 차이가 없으나 최대 냉방부하는 미세한 부하 차이가 발생하였다 (Table 4, Table 5). 겨울철 야간에는 온실 내부 온도가 환기 설정 온도를 넘지 않아 환기팬이 가동하지 않기 때문에 환기량에 따른 최대 난방부하의 차이가 발생하지 않는 것으로 판단된다. 여름철에는 환기팬이 가동된다고 하더라도 최대 냉방부하는 순간적으로 발생하는 부하이기 때문에 환기량이 미치는 영향이 미미한 것으로 판단된다. 또한, 2012, 2013, 2016년에는 환기팬의 환기량에 따라 최대 냉방부하의 차이가 발생하지 않는데 이는 연산과정에서 외부기온이 온실 내부 기온보다 높을 때는 환기팬이 가동되지 않는다고 설정하였기 때문이다. 즉, 2012, 2013, 2016년에는 외부 기온이 온실 내부 기온보다 높기 때문에 환기팬이 가동되지 않아 환기량에 따른 최대 냉방부하의 차이가 발생하지 않았다.

최대 난방부하는 2016년에 1,103,508kJ·hr⁻¹로 가장 높으며 2014년에 917,183kJ·hr⁻¹로 가장 낮게 산정되었다. 최대 난방부하는 동이 틀 무렵인 6~7시에 주로 발생하여 일사의 영향을 받지 않고 외부 기온에만 영향을 받는 것으로 나타났다. 최대 냉방부하의 경우 외부기온과 일사가 높은 12~14시에 주로 발생하였다. 2012년의 경우 환기팬

Table 4. Maximum heating loads and occurrence by ventilation rate.

Ventilation rate (AE·hr ⁻¹)	Year	Maximum heating loads			
		Loads (kJ·hr ⁻¹)	Occurrence	Air temperature (°C)	Solar radiation (kJ·hr ⁻¹)
0, 30, 60	2012	990,272	01.24. 07:00	-7.4	0
	2013	1,002,587	02.09. 06:00	-7.9	0
	2014	917,183	01.10. 07:00	-6.5	0
	2015	967,141	02.09. 06:00	-8.8	0
	2016	1,103,508	01.24. 07:00	-9.7	0
Average		996,138		-	

Table 5. Maximum cooling loads and occurrence by ventilation rate.

Ventilation rate (AE·hr ⁻¹)	Year	Maximum cooling loads			
		Loads (kJ·hr ⁻¹)	Occurrence	Air temperature (°C)	Solar radiation (kJ·hr ⁻¹)
0	2012	1,304,379	07.28. 14:00	33.9	2,950
	2013	1,203,322	08.16. 14:00	34.5	2,970
	2014	1,077,444	05.30. 14:00	32.1	3,190
	2015	858,286	08.07. 12:00	32.7	1,900
	2016	1,261,035	07.31. 13:00	33.9	3,420
Average		1,140,893		-	
30	2012	1,304,379	07.28. 14:00	33.9	2,950
	2013	1,203,322	08.16. 14:00	34.5	2,970
	2014	1,076,720	05.30. 14:00	32.1	3,190
	2015	858,065	08.07. 12:00	32.7	1,900
	2016	1,261,035	07.31. 13:00	33.9	3,420
Average		1,140,704		-	
60	2012	1,304,379	07.28. 14:00	33.9	2,950
	2013	1,203,322	08.16. 14:00	34.5	2,970
	2014	1,076,594	05.30. 14:00	32.1	3,190
	2015	858,037	08.07. 12:00	32.7	1,900
	2016	1,261,035	07.31. 13:00	33.9	3,420
Average		1,140,673		-	

의 환기량에 관계없이 최대 냉방부하가 1,304,379 kJ·hr⁻¹로 가장 높게 산정되었으며, 2015년에는 환기량이 60AE·hr⁻¹ 조건일 때 최대 냉방부하가 858,037kJ·hr⁻¹로 가장 낮게 산정되었다. 2012년과 2015년의 외부 기온은 각각 33.9°C 와 32.7°C 이었으며 일사량은 2,950kJ·hr⁻¹, 1900kJ·hr⁻¹으로 상대적으로 외부 기온 및 일사량이 높을 때 최대 냉방부하가 높게 산정되었다.

2. PV 시스템 전력 생산량 평가

2.1 설치 각도에 따른 전력 생산량 분석

설치 각도에 따른 PV 시스템의 발전량을 비교하기 위

하여 설치각도를 0~90° 범위에서 5°씩 나누어 총 18개의 설치 각도에 대한 PV 시스템의 연간 발전량을 산정하였다. 설치 각도에 따른 PV 모듈의 연간 발전량 변화는 Fig. 3과 같다.

설치 각도에 따라 PV 시스템의 전력 생산량의 차이가 확연하게 나타났으며 설치 각도가 0°에서 30°로 증가할 때 전력 생산량 또한 증가하였으며 30° 이후부터는 점점 감소하여 90°에서 가장 낮은 전력을 생산하였다. 설치 각도에 따른 전력 생산량 변화 경향은 연도에 상관없이 동일하게 나타났다. 연도별 전력 생산량의 경우 연도별

BES를 이용한 연동형 온실의 냉·난방 부하 산정 및 PV 시스템 발전 성능 분석

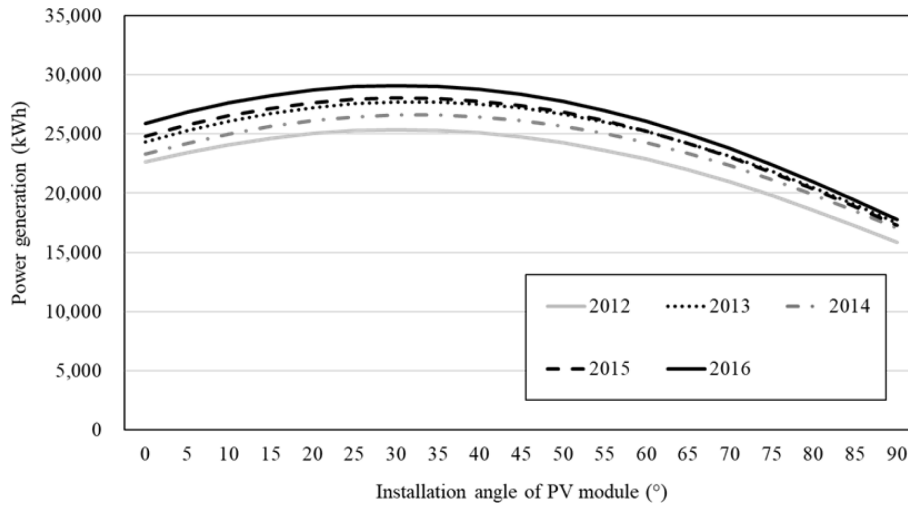


Fig. 3. Annual power generation by installation angle of PV system.

Table 6. Optimal installation angle of PV system.

Month	Optimal installation angle (°)				
	2012	2013	2014	2015	2016
1	60	60	60	60	60
2	50	50	50	50	50
3	35	40	35	40	35
4	20	20	20	20	20
5	10	10	10	10	10
6	5	0	0	0	0
7	5	5	5	5	5
8	15	15	10	10	15
9	30	30	30	30	30
10	45	45	45	45	45
11	55	55	55	55	55
12	65	60	60	60	60

일사량이 가장 높은 2016년이 가장 많은 전력 생산량을 나타냈고 일사량이 가장 낮은 2012년에 가장 낮은 전력을 생산하는 것으로 산정되었다. 2016년 연간 일사량의 합이 약 5,271MJ·m⁻²로 가장 높아 발전량이 높게 나타났으며 2012년의 경우 약 4,736MJ·m⁻²로 연간 일사량이 합이 가장 낮아 PV 시스템의 발전량 역시 낮게 나타났다.

설치 각도별로 총 5년 동안 전력 생산량을 분석한 결과, 30°로 설치하였을 때 136,835kWh로 가장 많은 전력을 생산하였으며 90°로 설치하였을 때 85,423kWh로 가장 적은 전력을 생산하였다. 90°로 설치한 경우 30°로 설치한 조건의 약 62%에 해당하는 발전 성능을 나타내며 설치각도에 따라 최대 51,412kWh의 전력 생산량 차

이가 발생하였다. 따라서 고정형 PV 시스템과 같이 PV 모듈의 각도가 조절이 불가능한 조건에서는 PV 시스템을 지면과 30° 각도로 설치하여 운영하는 것이 가장 최적의 설치각도로 도출되었다.

2.2 월별 최적 각도 적용 시 PV 시스템 전력 생산량 분석
시뮬레이션 결과를 바탕으로 2012년부터 2016년 동안 가장 많은 발전량을 나타내는 PV 시스템의 최적 각도를 월별로 도출한 결과는 Table 6과 같다. 전반적으로 계절에 따라 최적 각도가 연도별로 동일하게 변화하는 경향이 나타났다. 2012년부터 2016년 동안 최적 각도는 일부 월에서는 연도별로 차이가 있었으나 5° 정도로 나타

Table 7. Power generation of PV system by type of PV system.

PV system	Power Generation (kWh)					
	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Fixed PV system	25,362	27,720	26,598	28,045	29,109	136,835
Adjustable PV system	26,727	29,283	28,215	29,624	30,829	144,679

나 월별로 거의 동일하게 형성이 되는 것을 알 수 있었다. Table 6에서 도출한 월별 최적 각도를 적용하여 전력 생산량을 산정한 결과는 Table 7과 같다. 월별로 최적 각도를 적용하여 PV 시스템을 운영하는 조건(가변형 PV 시스템)일 때 5년 간 총 전력 생산량은 144,679kWh로 앞서 도출한 최적 설치 각도로 고정하여 PV 시스템을 운영하는 조건(고정형 PV 시스템)의 전력 생산량보다 7,844kWh 더 많은 전력을 생산하는 것으로 산정되었다. 가변형 PV 시스템이 고정형 PV 시스템에 비해 초기 설치비용이 높으나 5년 간 총 전력 생산량을 비교하였을 때 고정형 PV 시스템보다 약 5.7% 많은 전력을 생산 가능하므로 장기적으로 시스템을 운영하는 조건에서는 가변형 PV 시스템이 적합할 수 있다.

3. 온실의 냉·난방 부하를 고려한 PV 시스템의 적정 설치 면적 도출

대상 온실에 적합한 PV 시스템의 설치 면적을 도출하기 위하여 환기팬 환기량을 60AE·hr⁻¹로 적용한 조건에서의 산정한 5년 평균 냉·난방 전력량을 이용하였다. 60AE·hr⁻¹ 조건에서 5년 평균 총 633,213kWh의 전력이 온실의 냉·난방에 필요하며 이를 예상 에너지 사용량으로 설정하였다. 2017년 공급 의무 비율인 21%를 적용한 결과, 약 132,974kWh를 PV 시스템을 통하여 생산해야 하는 것으로 산정되었다.

도출한 최적 설치 각도 및 월별 최적 각도를 적용하여 신재생에너지 의무 공급 전력량을 공급할 수 있는 PV 패널 면적을 산출하였다. 2012년부터 2016년까지 총 5년 동안의 평균 기상 자료를 사용하여 패널 면적을 도출하였다. 산출 결과, 고정형 PV 시스템의 경우 약 521m²의 PV 패널 면적이 요구되며, 가변형 PV 시스템의 경우 약 494m²의 PV 패널 면적이 요구되어 가변형 PV 시스템이 약 27m² 더 적게 필요한 것으로 나타났다. 가변형 PV 시스템의 경우 고정형 PV 시스템보다 설치 비용이 상대적으로 비싸고 유지 보수비용이 발생하지만, 필요한 패널 면적이 고정형 PV 시스템에 비해 상대적으로 적게 요구되며 장기적으로도 더 많은 전력 생산이 가능하다. 따라서 온실에 PV 시스템 적용 시 이를 충분히 고려해야 할 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 4연동 벤로형 유리온실의 냉·난방 부하를 고려한 PV 시스템의 적정 패널 설치 면적을 도출하기 위하여 BES 기법을 이용하여 온실 및 PV 시스템의 에너지 모델을 설계하였으며 동적 에너지 시뮬레이션을 수행하였다. 대상 작물은 파프리카로 선정하였으며 작물의 적정생육온도를 고려하여 냉·난방장치 및 환기장치의 가동조건을 설정하였다. 2012년부터 2016년까지 총 5년 동안의 기간별 냉·난방부하 및 최대 냉·난방 부하를 환기팬의 환기량 조건 별로 분석을 실시하였다. 온실의 냉·난방 부하 산정과 함께 PV 시스템의 설치 각도에 따른 전력 생산량을 분석하였으며 신재생에너지 공급의무비율을 적용하여 최적 PV 시스템 설계 방안을 도출하였다. 환기팬의 환기량 60AE·hr⁻¹ 조건에서 대상 온실의 기간 평균 냉방 부하로 인한 전력 소모량은 174,310kWh, 기간 평균 난방 부하로 인한 전력 소모량은 458,903kWh로 총 633,213kWh의 전력 소모량이 산정되었다. PV 시스템은 설치 각도를 30°로 설정하는 조건에서 가장 높은 전력 생산량이 나타났으며 월별 최적 각도를 적용하는 조건에서는 고정형 PV 시스템보다 약 5.7% 많은 전력을 생산하는 것으로 산정 되었다. 최종적으로 대상 온실에 적합한 PV 시스템 패널 면적을 도출한 결과, 고정형 PV 시스템은 521m²의 패널이 필요한 것으로 산정되었고, 가변형 PV 시스템의 경우 494m²의 패널이 필요한 것으로 산정되었다.

본 연구를 통하여 4연동 벤로형 유리온실의 냉·난방 부하를 고려한 PV 시스템의 필요 패널 설치 면적을 도출할 수 있었으며 PV 시스템의 온실 적용 가능성 및 경제성 평가의 기초 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다. 한편, 본 연구에서는 작물 특성 데이터를 확보하지 못하여 작물의 에너지 교환을 고려하지 않았다. 보다 정확한 결과를 도출하기 위해서는 현장 실험 데이터에 기반을 둔 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업 (과제번호:PJ012038012017) 의 지원에 의하여 이루어진 것임.

Literature Cited

Celik, A.N. and N. Acikgoz. 2007. Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models. *Applied Energy* 84:1-15.

- Cho, K.J. 2015. Survey of ICT Apply to Plastic Greenhouse, Rack-Pinion Adaption to Single Span and CFD Analysis. Protected Horticulture and Plant Factory 24(4):308-316 (in Korean).
- Choi, D.J. 2009. Comparison Researches for Installation of the Module Angles and Array Spacing on Photovoltaic Power System. Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 23(1):162-168 (in Korean).
- De Soto, W., S.A. Klein and W.A. Beckman. 2006. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance. Solar Energy 80:78-88.
- Duffie, J.A. and W.A. Beckman. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, second ed. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Ha, T.H., I.B. Lee, K.S. Kwon and S.W. Hong. 2015. Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using building energy simulation model. International Journal of Agricultural and Biological Engineering 8(6):116-127.
- Kang, S.H., Y.H. Lee, J.H. Hwang and Y.H. Cho. 2012. The analysis of the renewable energy supply ratio for the school building applied PV system. Journal of the Korean Solar Energy Society 32(2):50-57 (in Korean).
- Kim, D.S., U.C. Shin and J.H. Yoon. 2014. Annual energy yield prediction of building added PV system depending on the installation angle and the location in Korea. The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment 14(1):67-74 (in Korean).
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA). 2016. Greenhouse cultivation present condition and product statistic. Sejong, Korea (in Korean).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). 2016. New & renewable energy white Paper. Sejong, Korea (in Korean).
- Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). 2017. Enforcement Decree of the Development, Uses and Promotion of New Energy and Renewable Energy Act (in Korean).
- Lee, S. B. 2012. Analysis and validation of dynamic thermal energy for greenhouse with geothermal system using field data. MS. diss., Seoul National University, Seoul, Korea.
- 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). Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers 54(3):113-124 (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 Horticulture and Plant Factory 25(2):123-132 (in Korean).
- Park, S.H. and J.H. Seo. 2012. A Study on the Photovoltaic Module Layout Considering the Azimuth and Inclination in Region. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 24(6):461-466 (in Korean).
- Quesada, B., C. Sanchez, J. Canada, R. Royo and J. Paya. 2011. Experimental results and simulation with TRNSYS of a 7.2 kWp grid-connected photovoltaic system. Applied Energy 88:1772-1783.
- Rural Development Administration (RDA). 2017. Guidelines for environmental management of smart greenhouses. Suwon, Korea (in Korean).
- Song, S.Y., B.K. Koo and B.I. Lee. 2009. Analysis of annual heating load reduction effect for thermal bridge-free externally insulated apartment buildings using the steady-state method. Architectural Institute of Korea 25(8):365-372 (in Korean).
- Yu, M.G., Y.J. Nam and K.H. Lee. 2015. Design method of heat storage type ground source heat pump system considering energy load pattern of greenhouse. The International Journal of The Korea Institute of Ecological Architecture and Environment 15(3):57-63 (in Korean).