BES 프로그램을 이용한 국내 대표적 대형온실의 에너지 부하 예측

Prediction of Greenhouse Energy Loads using Building Energy Simulation (BES)

이성복* · 이인복*[†] · 홍세운* · 서일환* · Jessie P. Bitog* · 권경석* · 하태환* · 한창평**

Lee, Sung-bok · Lee, In-bok · Hong, Se-woon · Seo, Il-hwan

Bitog, P. Jessie · Kwon, Kyeong-seok · Ha, Tae-hwan · Han, Chang-pyoung

ABSTRACT

Reliable estimation of energy load inside the greenhouse and the selection of cooling and heating facilities are very important preceding factors to save energy as well as initial and maintenance costs of operating a greenhouse. Recently, building energy simulation (BES) technique to simulate a model similar to the actual conditions through a variety of dynamic simulation methods, and predict and analyze the flow of energy is being actively introduced and developed. As a fundamental research to apply the BES technique which is mainly used for analysis of general buildings, to greenhouse, this research designed four types of naturally-ventilated greenhouses using one of commercial programs, TRNSYS, and then compared and analyzed their energy load properties, by applying meteorological data collected from six regions in Korea. When comparing the greenhouse load of each region depending on latitude and topographical characteristics through simulation, Chuncheon had nearly 9~49 % higher heating load per year than other regions, but its annual cooling load was the reverse to it. Except for Jeju, 1-2W type greenhouses in five regions showed about 17 % higher heating load than a widespan type greenhouse, and 1-2W type greenhouses in Chuncheon, Suwon, Cheongju, Daegu, Cheonju and Jeju had 23 %, 20 %, 17 %, 16 %, 18 % and 20 % higher cooling load respectively than a wide span-type one. Glasshouse and vinyl greenhouse showed 8~11 % and 10~12 % differences respectively in heating load, while 2~10 % and 7~10 % differences in cooling load respectively.

Keywords: Building Energy Simulation (BES); Cooling load; Greenhouse; Heating load

1. 서 론

산업혁명 이후, 화석연료 (석탄, 석유, 가스)는 현대사회에서 주요한 에너지원으로 인식되어왔다. 화석연료의 사용으로 인한 오늘날 사회의 고도성장과 기술 발전은 결코 간과할 수 없으나, 그 이면에는 온실가스 증가로 인한 지구온난화 및 기후변화 등의 환경위기와 에너지의 막대한 수요를 충족시키지 못하는 자원의 유한성으로 인한 자원위기에 동시에 직면하고 있다. 이러한 상황에서 범세계적으로 화석연료를 대신할 친환경적이며 자원의 안정화를 위한 에너지원의 다양화를 필요로 하고 있으며, 1차 에

너지의 해외의존도가 약 97 %, 화석연료 의존도가 81 인 우리나라에서도 에너지의 다양화는 국가와 사회 전체적으로 큰 이슈가 되고 있다 (KEEI, 2010).

계절의 영향이 지대적인 국내 농업분야에서 연중 균일한 고품질의 생산을 위한 시설원예는 필수불가결한 요소이나, 총 경영비 중 난방비 비중이 최대 58 %, 난방 에너지원의 대부분인 약 92 %가 유류 (면세유)인 시설원예 산업에서 국제유가의 상승문제는 농가의 경영에 큰 어려움을 주고 있다. 국내 시설원예 재배면적은 1990년 25,000 ha에서 2008년 52,000 ha로 약 2.1배 증가하였고, 그 중 가온면적은 약 9 %에서 약 25 %로 증가하였다 (RDA, 2006). 이처럼 시설은 증가하나 그 시설에 이용되는 화석 에너지에 대한 사용의 어려움이 가중되고 있는 시점에서 농가의 경영 안정성을 확보하기 위한 안정적인 에너지 수급과 절약이 필요하며, 이에 앞서 온실 내부의 에너지 부하 산정 요인들의 가중치를 선정하고 정확한 에너지 부하 산출과 이에 따르는 냉난방 설비의 선정은 에너지 절약 측면에서 반드시 선행되어야 할 과제이다.

건물 에너지의 해석방법은 정적해석과 동적해석으로 구분할 수

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학연구원

** 상지영서대학교 자동차과

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4586

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iblee@snu.ac.kr

2012년 3월 6일 투고

2012년 5월 15일 심사완료

2012년 5월 16일 게재확정

있다. 정적 에너지 해석은 기존의 에너지 부하계산 방법으로, 실내 조건을 정상상태로 가정하여 건물의 냉난방 설비 선정을 위하여 최대부하계산을 이용하는 방법이다. 이러한 방법은 실제 건물에서 일어나는 다양한 환경 및 에너지의 변화양상을 반영하지 못하는 단점을 가지고 있어 결과의 신뢰도와 정확도가 낮은 한계점을 보인다. 반면 동적 에너지 해석은 건물의 실제 에너지 흐름을 외부의 풍향, 풍속, 일사량, 태양위치, 온도 등 기상변화에 따라 전도, 대류, 복사의 모든 열전달 현상이 복합적으로 상호영향을 미치는 비정상상태로 가정한 방법이다. 근래에 다양한 비정상상태 시뮬레이션 프로그램을 통해 모델을 실제 상황과 유사하게 모의하여 에너지의 흐름을 예측, 분석하는 기법이 도입되어 발전되고 있으며, 이러한 시뮬레이션의 강점을 이용한 다양한 많은 부분의 연구가 활발히 이루어지고 있다. Lee et al. (2009)은 공동주택 건물에너지효율등급 인증제도의 간이 평가도구와 기존 Building Energy Simulation (BES) 프로그램을 실제 공동주택 단위세대를 대상으로 한 시뮬레이션을 통하여 평가도구의 특성을 비교 검증하였다. 건물에너지효율등급 평가도구와 TRNSYS (Wisconsin, USA)간의 방위, 유리, 벽체 등에 따른 에너지요구량은 각각 $-2 \sim 14.4\%$, $-11.55 \sim 2.3\%$, $-9.8 \sim 8.6\%$ 로 매우 유사한 결과를 보였다. 또한 Kim et al. (2006)은 시험공간의 냉난방부하 실증실험 데이터와 TRNSYS 시뮬레이션의 비교를 통하여 프로그램의 타당성을 검증하였으며, 결과는 냉방에서는 시뮬레이션이 1.8% 정도의 오차를 보였고, 난방 부하의 경우 실험데이터의 값과 정성적·정량적으로 대단히 좋은 일치를 보였다. 최근 농업분야에서도 비정상상태를 모의하는 BES 기법을 적용한 연구가 이루어지고 있다. 일반 건축물보다 더 복잡하고 민감한 환경조절을 필요로 하는 농업시설을 연구한 사례로 Hong et al. (2008)은 TRNSYS를 이용하여 육계사의 난방에너지 효율성을 분석하였다. 또한 Jang et al. (2009)은 유리 온실 시설의 연간 및 피크 냉난방 부하를 TRNSYS 시뮬레이션을 이용하여 산출하였다. 그러나 구형 유리온실의 형태를 박스형으로 단순화시켜 모델링하여 실제 온실의 형상을 구현하지 못하였으며, 실제의 벽체를 고려하지 않았다.

이에 본 연구에서는 BES 프로그램 중 하나인 TRNSYS (Ver. 16, Wisconsin, USA)를 이용하여 온실 모델을 검증한 후 국내에서 주로 이용되는 대표적인 자연환기식 4가지 유형의 온실들을 최대한 실제 형태와 유사하게 모델링하고, 이를 국내 6개 지역의 2010년 1년간의 기상데이터를 적용하여 에너지 부하 특성을 비교 분석하는데 목적이 있다. 일반 건축물의 해석에 이용되는 BES 기법을 농업분야의 온실에 적용시킨 기초연구로 다양한 조건의 에너지 부하 분석을 실시하였다. 시설 내 작물은 이의 복잡성 때문에 이번 연구에서는 고려하지 않았다.

II. 재료 및 방법

1. 대상시설 및 지역

가. 시설 1: 검증용 온실

BES는 일반 건축물의 동적 열 부하 특성을 시뮬레이션 하여 건물 내부의 부하특성을 파악하는데 유용하다. 하지만 본 연구에서는 일반 건물이 대상이 아니라 농업시설인 온실에 BES기법을 적용한 것으로 먼저 대상시설에 대한 검증이 선행되어야 한다. 이에 검증을 위하여 김제시 공덕면 황산리 (위도: 35.51° , 경도: 126.55°)에 위치한 유리온실을 대상 시설로 선정하였다 (Fig. 1). 김제 온실은 지어진지 얼마 되지 않은 신축 온실로 내부에 작물 및 다른 어떤 설비도 설치되어 있지 않아 시설 자체의 외파와 일사의 영향에 따른 내부 온도변화 관찰에 용이할 것으로 판단하여 본 연구의 대상 시설로 이용하였다. 이 온실은 폭 19.2 m, 길이 52 m, 동고 5.76 m, 측고 4.8 m의 6연동 벤로형 온실로 바닥면적은 998.4 m^2 이다.

Fig. 1 BES validation greenhouse in Gimje used for this study

나. 시설 2: 국내 대표적 온실

본 연구에서는 Fig. 2에 나타난 것처럼, 우리나라의 대표적인 자연환기식 다연동 온실들인 와이드스팬형, 벤로형, 1-2W형과 광폭단동형 등 4가지 형태의 온실을 대상으로 하였다. 와이드스팬형과 벤로형은 유리온실이며, 1-2W형과 광폭단동형은 플라스틱온실이다. 광폭단동형은 단동 온실이지만 폭이 일반온실에 비하여 넓기 때문에 다연동 온실과의 비교가 용이할 것으로 판단된다.

우리나라는 좁은 국토면적을 가지고 있지만 사계절이 뚜렷하고 지역과 지형별로 온도차가 상이하게 나타나기 때문에 각 도를 대표하는 6개 도시인 춘천, 수원, 청주, 대구, 전주, 제주를 대상 지역으로 선정하였다. 기상청으로부터 각 지역의 2010년 기상 데이터를 확보하여 기상분석을 실시하였고, 각 지역의 위도와 경도는 Table 1에 나타나 있다.

(a) Widespan

(b) Venlo

(c) 1-2W

(d) Widewidth

Fig. 2 Typical greenhouses in Korea used for this study

Table 1 Latitude and longitude of 6 different areas used for this study

	latitude (°)	longitude (°)
Chuncheon	37.54	127.44
Suwon	37.16	126.59
Cheongju	36.38	127.26
Daegu	35.53	128.37
Jeonju	35.49	127.09
Jeju	33.17	126.09

2. 현장실험

BES 프로그램의 검증에 위한 현장 실험은 김제시 공덕면 황산리에 위치한 유리온실에서 2012년 2월 27일 18시부터 2월 29일 18시까지 2박 3일간 이루어졌다. 기상 측정은 간이형 기상대 (Watchdog 2900ET, Spectrum Technologies Inc., USA)를 이용하여 1분 간격으로 온도, 습도, 일사, 풍향, 풍속 등을 측정하였다. 간이형 기상대는 설치 시 주변 장애물들에 의해 영향을 받지 않도록 해당 실험 지역에서 비교적 평탄한 곳에 설치하였다. 온실 내부 온도 측정용 장비로는 온습도 기록 센서 (Hobo data logger, Onset computer corp., USA)를 사용하였으며, 1분 간격으로 온도를 측정하였다. Fig. 3과 같이 바닥으로부터 1.5 m

높이에 십자형으로 13 군데에 온습도 기록 센서를 설치하여 측정하였으며, 센서에 태양광의 직접적인 영향으로 인한 온도 간섭을 피하기 위하여 플라스틱 접시를 이용하여 빛을 차단하였다.

3. 건물 에너지 시뮬레이션 (Building Energy Simulation, BES)

BES는 건축물의 열 및 에너지 흐름과 적정 환경 조절을 위한 에너지 부하량을 산정하는 기술로 일반 건축분야에서는 높은 정확도와 활용성으로 널리 사용되고 있다. BES 프로그램 중 하나인 TRNSYS는 태양열 시스템의 동적인 시뮬레이션 및 모델링을 위하여 개발된, 전 세계적으로 널리 애용되는 시스템 시뮬레이션 프로그램이다.

TRNSYS는 설계자가 원하는 기간별 외기조건, 일사조건, 벽체의 특성, 실내 온습도 조건, 환기량 등을 실시간으로 고려할 수 있기 때문에 현장실험의 한계를 보완할 수 있으며, 짧은 시간에 비교 분석을 위한 충분한 양의 정량적 데이터 확보에도 도움이 될 수 있다. 특히, 사용자의 고유한 목적에 부합되는 부속모듈이 검증 및 개발된다면 그 용도는 매우 다양하다고 볼 수 있을 것이다. TRNSYS는 모듈구조를 갖는 비정상 시스템 해석 프로그램으로, 메인 프로그램과 컴포넌트라고 불리는 많은

서브루틴으로 구성되어 있다. 특별히 온실을 구성하는 모듈인 Type 56은 전달함수법에 근거하여 공간에서 일어나는 여러 가지 형태의 복잡한 열취득과 이때 관련되는 복사 및 대류현상, 그리고 축열체의 축열 및 방열 등을 고려한 열평형을 통해서 동적 열에너지 해석이 수행되는데, Figs. 3 및 4에서 온실 냉난방부하 계산의 개념이 나타나 있다 (TRNSYS 16 Manual, 2007). 여기서, $\dot{Q}_i$ 는 영역 i 의 총 열량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{inf,i}$ 는 침기에 의한 열량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{surf,i}$ 는 모든 내표면의 대류에 의한 열량

Fig. 3 Field experiment and sensor locations

($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{vent}$ 는 환기에 의한 열량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{gain,i}$ 는 내부 발열로 인한 대류에 의한 취득열량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{cplg,i}$ 는 영역 i 나 경계조건으로부터의 공기의 유동에 따른 취득열량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), ρ 는 공기의 밀도 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), C_p 는 공기의 비열 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), V 는 영역의 체적 (m^3), T_{out} 은 외기온도 ($^\circ\text{C}$), T_r 은 실내온도 ($^\circ\text{C}$), $U_{w,i}$ 는 벽체의 열전달계수 ($\text{kcal} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), $A_{w,i}$ 는 벽체의 면적 (m^2), $T_{wall,i}$ 는 벽체온도 ($^\circ\text{C}$), $T_{ventilation}$ 은 환기설정온도 ($^\circ\text{C}$), $T_{zone,i}$ 는 영역 내부 온도 ($^\circ\text{C}$), $\dot{q}_{s,i}$ 는 내표면 벽체로부터의 전도 열 유속, $\dot{q}_{s,o}$ 는 외표면에서의 벽체 내부로의 전도 열 유속, $\dot{q}_{comb,s,i}$ 는 내표면의 결합된 대류 및 복사 열 유속, $\dot{q}_{comb,s,o}$ 는 외표면의 결합된 대류 및 복사 열 유속, $\dot{q}_{c,s,i}$ 는 내표면에서 실내 공기로의 대류 열 유속, $\dot{q}_{r,s,i}$ 는 영역 내부의 다른 모든 표면들과의 순 복사 열전달, $\dot{q}_{c,s,o}$ 는 외기에서 외표면으로의 대류 열 유속, $\dot{q}_{r,s,o}$ 는 외표면이 보이는 모든 표면들과의 순 복사 열전달, $R_{equiv,i}$ 는 열전달저항, $A_{s,i}$ 는 내측 표면적 (m^2), $T_{s,i}$ 는 내표면온도 ($^\circ\text{C}$), $h_{conv,s,o}$ 는 외표면에서의 대류열전달계수 ($\text{kcal} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), $T_{a,s}$ 는 외기온도 ($^\circ\text{C}$), $T_{s,o}$ 는 외표면온도 ($^\circ\text{C}$), σ 는 스테판-볼츠만 상수, $\varepsilon_{s,o}$ 는 외표면의 장파 방사율, T_{fsky} 는 장파장 복사교환을 위한 가상천공온도 ($^\circ\text{C}$), f_{sky} 는 외표면에서 보이는 하늘의 부분이다.

여기서, θ 는 수평면 직달일사의 입사각, θ_z 는 태양 천정각 ($^\circ$),

Fig. 4 Flowchart of energy balance in greenhouse considering infiltration, surface of wall, ventilation, internal gain and coupling between zones, etc.

Fig. 5 Flowchart of the detail mechanism of energy balance including radiation, convection, sky temperature, etc.

β 는 표면 경사 ($^\circ$), γ_s 는 중심축의 방위각 ($^\circ$), γ 는 표면의 방위각 ($^\circ$), R_b 는 수평면 직달일사에 대한 경사면 직달일사 비율, I_{bT} 는 입사되는 직달 일사량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), I_b 는 수평면 직달일사 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), I_{gT} 는 경사면에서 지표면에 반영되는 일사 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), I 는 수평면 전일사 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), R_r 은 수평면 전일사에 대한 경사면 반영된 일사 비율, ρ_g 는 지표면 밀도($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), f 는 조절 인자, I_{dT} 는 입사되는 확산 및 반사 일사량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), I_d 는 수평면 산란일사 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), A_f 는 이방성 지수, I_o 는 외기복사 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), ω', ω'' 는 시작과 종료시간에 따른 시간각 ($^\circ$), S_c 는 태양상수, E 는 균시차, ϕ 는 위도 ($^\circ$), δ 는 태양 적위 ($^\circ$), ω 는 시간에 따른 평균 시간각 ($^\circ$), t 는 ω 에 대응하는 시간의 시각, $SHFT$ 는 해당지역의 경도와 표준자오선에 대한 경도의 차, T_{amb} 는 외기온도 ($^\circ\text{C}$), ϵ_0 는 청천공의 방사율, C_{cover} 는 천공의 운량, E_{Dif} 는 수평면 확산 일사량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), $E_{Glob,H}$ 는 수평면 전일사량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$), T_{sat} 은 외기 조건에서의 노점온도 ($^\circ\text{C}$), p_{atm} 은 대기압력 (atm), p_0 는 높이 h_0 에서의 대기압력 (atm), g 는 중력가속도 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), h 는 해수면으로부터의 고도 (m), ρ_0 는 높이 h_0 에서의 공기밀도($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), L_{loc} 는 해당지역의 경도 ($^\circ$)이다.

4. 분석 방법

건물에너지 해석 소프트웨어인 TRNSYS는 동적부하계산이지만, 해석에 설비 및 제어시스템의 포함여부에 따라 Energy Rate

Control (ERC)과 Temperature Level Control (TLC)로 구별된다. 전자는 공간을 유출입하는 열량으로부터 실온의 변화를 계산하는 해석방법으로서, 공간 자체의 부하특성을 파악하는데 적합하며, 후자는 실내온도 변화의 허용범위 이내로 설비가 운전 중인 실제 상태를 모사하여, 공간과 설비가 결합된 종합적인 열에너지 해석에 유용하다 (Hyun et al, 2002). 본 연구에서는 작물의 생육적정온도에 대한 온실의 냉난방부하 시뮬레이션을 ERC 기법에 의존하여 부하계산을 실시하였다. 어떤 시간단계에서 실내를 냉난방하지 않은 상태로 두었다고 가정하고 이로부터 외부 열손실로 인해 계산된 실내온도가 설정된 온도범위를 벗어나는 경우 계산된 온도가 설정온도까지 상승 (난방) 또는 하강 (냉방) 시키는데 필요한 열량을 부하로 취하며 식 (1)~(3)에 나타나 있다.

$$C_r \frac{dT_r}{dt} = \dot{Q}_{surf} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{gain} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{cplg} \quad (1)$$

$$Q_{heating} = MC_p (T_{set} - T_r) \quad (2)$$

$$Q_{cooling} = MC_p (T_{set} - T_r) \quad (3)$$

여기서, C_r 은 온실내부의 열용량 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), $\dot{Q}_{surf}$ 는 벽체에서의 열손실 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{vent}$ 는 환기에 의한 열손실 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{gain}$ 은 작물 등에 의한 열획득 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{inf}$ 는 침기

에 의한 열손실 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), $\dot{Q}_{\text{aply}}$ 는 인접한 공간에서의 공급열량 ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$), M 은 질량 (kg), C_p 는 비열 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$), T_{set} 은 실내 설정온도 ($^\circ\text{C}$), T_r 은 실내 온도 ($^\circ\text{C}$)이다. 온실 외피를 통한 열손실 등에 의해 어떤 순간의 온실내부 온도 T_r 이 구해지게 되고, 이를 T_{set} 만큼 상승시키는 데 필요한 열량, 난방 및 냉방 부하가 산출된다. 또한 BES를 이용한 온실의 적용가능성에 초점을 맞춘 기초연구로 일사 등의 외기 조건이 온실의 기본구조 및 외피인 창호에 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 환기, 침기 및 보온커튼, 작물 등은 고려하지 않았다.

5. 모델 설계

가. 검증용 온실 모델링

검증을 위한 온실은 Fig. 6과 같은 6연동 벤로형 온실로 시물레이션 상에서 온실의 정확한 계산을 위하여 연동별로 공간영역을 나누어 모델링 하였다. 구조 모델링과 더불어 중요한 요인으로는 벽체를 꼽을 수 있는데 온실의 벽체인 창호는 유리이며, 낮 동안 유리를 투과하여 온실로 유입된 태양에너지는 바닥에 흡수되어 온도를 상승시키는데 이 때 유리에 의한 복사열의 차단

Fig. 6 Schematic diagrams of the validation greenhouse used for this study

으로 내부공기의 온도가 상승하는 온실효과가 나타난다. 따라서 창호의 물리적 특성은 온실의 내부 에너지 계산에 중대한 영향을 미칠 것이다. 이에 본 연구에서는 창호설계프로그램인 WINDOW (6.3, LBNL, USA)를 이용하여 대상온실에 사용된 5 mm 맑은 유리를 모델링하였다.

본 연구에 사용된 벽체 및 창호의 물리적 특성은 Table 2과 3에 나타나 있으며, 설계도에 따라 온실의 골조율은 10 %로 모델링하였다. 벽체 및 지붕면의 기울기에 따른 일사 영향을 고려하기 위하여 각각 벽체 및 지붕의 경사각도 고려하였다.

나. 국내 대표적 온실 모델링

국내에서 주로 이용되는 각 온실의 구조적 특성과 온실의 형태는 Hong (2008)의 연구를 따랐으며, Table 4와 Fig. 7에 각각 나타나 있다. 각 온실의 형태별로 약 900 m^2 규모의 크기로 모델링하였으며, 구조 및 크기, 시설의 외피 등에 따른 에너지 부하 특성을 비교 분석하기 위하여 각 온실의 바닥면적 및 체적 등을 최대한 유사하게 모델링하였다.

와이드스팬형과 벤로형은 각각 3개, 8개의 영역으로 연동수대로 나누어 검증용 온실과 동일한 방법으로 모델링하였다. 그리고 나머지 두 온실 1-2W형과 광폭단동형은 Fig. 8과 같이 아치형지붕을 구현하기 위하여 각각 16개, 4개의 영역으로 연동 수뿐만 아니라 1개의 연동 내부를 4개의 영역으로 나누어 모델링하였다.

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

	Materials	Density ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thermal conductivity ($\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	Thickness (m)
Surface	Aluminium alloy	2700	0.88	730	0.1
	GPVHS	7830	0.63	214.02	0.0254
Floor	Concrete	2240	0.92	6.23	0.3
	gravel	1800	1	7.2	0.2
	sand	2240	0.92	6.29	0.35
Air layer	Air	Massless			

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

	Glass 4 mm	Glass 5 mm	PET 0.1 mm
Solar transmittance	0.830	0.816	0.862
Solar reflectance (exterior and interior facing side)	0.074	0.071	0.105
Visible transmittance	0.897	0.894	0.881
Visible reflectance (exterior and interior facing side)	0.081	0.080	0.108
Thermal infrared transmittance	0	0	0
Infrared emittance (exterior and interior facing side)	0.837	0.837	0.658
Conductivity ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	1	1	0.140
U factor ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)	5.869	5.834	5.412

Table 4 Structural specifications of experimental greenhouses

Types	Widespan	Venlo	1-2W	Widewidth
Model	3-3 S-type	NJ97-NA-1	1-2W type	-
Number of span	3	8	4	1
Ridge height (m)	5.25	4.95	4.55	4.50
Eaves height (m)	3.0	4.3	2.7	2.6
Width (m)	27.0	25.6	28.0	27.0
Length (m)	33.0	33.0	33.0	33.0
Floor area (m^2)	891.0	844.8	924.0	892.0
Volume (m^3)	3675.38	3907.2	3661.68	3421.44

Fig. 7 Schematic diagrams of the experimental greenhouses used for this study

Fig. 8 Schematic diagram of 1-2W greenhouse with arch roof

본 연구에 대상시설인 와이드스팬형과 벤로형 온실은 대표적인 유리 온실이며, 1-2W형과 광폭단동형은 대표적인 플라스틱 온실이다. 구조체의 골조율은 와이드스팬형은 18 %, 벤로형은 10 % 그리고 플라스틱온실의 경우는 13 %로 모델링하였다 (RDA, 2006). 또한 유리는 농림부에서 발행한 한국형 유리온실 표준 설계도에서 명시한 4 mm 맑은유리 (KSL-2012, Float)로 상용제품인 한글라스사의 ‘한라이트’ 제품의 물성치를 이용하여 모델링하였으며, 비닐은 상용제품의 물성치를 얻기 어려워 프로그램의 표준라이브러리를 참고하여 Polyethylene Terephthalate (PET) 제품 0.1 mm로 모델링하였다. 벽체와 창호의 물성치는 각각 Table 2와 3에 나타나 있다.

다. 동적 부하 시스템 모델링

TRNSYS를 이용한 에너지 부하 계산을 위한 시스템 각 모듈들의 상호간의 연결은 Fig. 9에 나타나 있으며, 각 모듈의 소개는 Table 5에 나타나 있다. Type 9 모듈은 기상청으로부터 제공받은 데이터를 입력받아 타 모듈에 필요한 형태로 데이터의 변환 및 보간의 역할을 한다. Type 16 모듈은 수평면전천일사량을 직달일사와 산란일사의 순서 값으로 직산 분리시켜 위도와 온실의 외피 경사에 따라 일사량을 계산하는 기능을 한다. 또한 Type 33은 습공기 데이터를 처리하며, Type 69는 가상의 천공 온도를 결정하여 대기와 지구표면사이의 복사열교환 계산하는 모듈이다. 이처럼 각 모듈을 통해 각각의 기상인자들은 온실의

Table 5 TRNSYS common modules for load calculation of greenhouse

	Modules	Specification
	TYPE 9 (Data Reader)	Used to read a weather file in combination with other components
	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. 9 Connection of modules for energy load calculation in TRNSYS

부하계산에 영향을 주며 Type 56 모듈을 통해 각 시간 단위별로 냉난방부하가 산출되어 진다.

이와 같은 방법으로 본 연구에서는 BES기법을 이용한 온실의 검증을 마친 후 4가지 형태의 대상온실과 6개 대상지역의 각 지역별 기상데이터를 이용하여 총 24 가지의 각 지역별 및 온실별 2010년 1년간의 부하특성을 비교 분석하여 농업시설로의 적용 및 활용성을 알아보고자 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. BES 온실 모델 검증

온실 내부 온도 시뮬레이션 결과와 현장실험 데이터를 비교해 보면 Fig. 10과 같이 온도 변화가 현장실험 데이터와 매우 유사한 경향을 보이고 있으며, 두 그래프의 온도 차이는 최고 3.3 °C, 최저 0 °C, 평균 1.1 °C를 나타냈다. 하지만 온도는 온실

Fig. 10 Comparison of the measured and computed temperature

의 부하산정에 있어 매우 중요한 요인으로 작은 차이도 에너지 소비에 민감하게 작용할 수 있으며, 온도 차이만으로는 정성적인 결과만을 보여주게 된다. 이에 정량적인 결과에 의한 검증이 모델의 신뢰성을 높여 줄 것으로 판단하여, 각 시뮬레이션의 결과와 현장실험 데이터의 결과를 이용하여 기간부하를 산정하여 비

교 분석하였다. 기간부하 산정은 기존 온실에 주로 이용되는 최대 난방부하를 산출하는 방법을 사용하였으며, 설정온도는 19 °C로 수 계산을 통해 산출하였다. 그 결과 현장실험 데이터의 부하는 4,625,636 kcal로 산정되었고, 시뮬레이션 모델은 4,881,816 kcal로 산정되어 두 데이터 간의 오차율은 5.5 %를 나타냈다. 시뮬레이션의 오차율을 감안할 경우, 정성적으로나 정량적으로 상당히 좋은 일치를 보여, 모델의 검증이 잘 이루어 졌다고 할 수 있다.

2. 기상 데이터 분석

Figs. 11과 12는 6개 대상 지역의 2010년 1월 1일부터 1월 3일까지의 온도 변화와 일사량의 변화 추이를 나타낸 것이다. 춘천과 제주의 온도는 최대 약 20 °C 이상의 차이를 보인다. 이처럼 국내 기상은 사계절이 뚜렷하고, 지역과 지형에 따라 온도 등

Fig. 11 Change of temperature according to time-step at 6 locations from Jan 1st to 3rd in 2010

의 기상환경 차이를 보인다. 따라서 시뮬레이션 모델링 조건으로 기상청으로부터 확보한 2010년 각 지역의 기상데이터인 일사량, 온도, 습도, 지중온도 등을 시간별 데이터로 분석, 가공하여 TRNSYS 기상데이터 형식에 맞추어 2010년 1월 1일 1시에서 2010년 12월 31일 24시까지 총 8760시간의 시간별 데이터로 변환 적용하였다. 온실 내부의 작물을 고려하지는 않았지만 각 온실의 부하를 산출하기 위하여 생육적정온도를 냉방설정 26 °C, 난방설정 19 °C를 적용하였다.

3. 동적 에너지 부하 분석

TRNSYS 시뮬레이션은 매 시간별 사용자가 원하는 결과를 실시간으로 확인할 수 있으며, 그래프 및 다양한 데이터형식의 출력결과로 나타낼 수 있는 장점을 가지고 있다. Fig. 13는 전체 24 가지 중 하나의 예로써, 전주지역 벤로형 온실의 2010년 1년

Fig. 12 Change of radiation according to time-step at 6 locations from Jan 1st to 3rd in 2010

Fig. 13 Output result of cooling and heating load using TRNSYS simulation at Jeonju in 2010

간의 시간에 따른 냉·난방부하 산출 결과를 보여준다. 실시간 외부 기상 조건을 입력 데이터로 받아 설정된 온실 내부 온도범위에 따라 각 영역의 실시간 냉방 및 난방 부하 결과를 산출한다.

4. 지역별 및 온실 형태별 난방부하

TRNSYS 시뮬레이션을 통한 온실의 형태 별, 그리고 지역 별 2010년도 연간 총 난방부하는 Table 6에 나타나 있다. 먼저 지역 별 연간 총 난방부하는 상대적으로 가장 고위도에 있는 춘천이 타 지역들에 비하여 높은 부하가 산출되었으며, 반대로 가장 저위도에 있는 제주의 경우가 낮은 부하가 산출되었다. 춘천의 연간 총 난방부하는 타 지역인 수원, 청주, 전주, 대구, 제주 순으로 적게는 약 9 %에서부터 많게는 약 49 %까지의 높은 부하를 나타내는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 고위도에서 저위도 순으로 국내 위도 및 지형의 특성에 따른 영향 등을 받은 것으로 판단된다. 또한 각 온실의 지역에 따른 부하 편차는 약 1~3 %로 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 온실의 형태에 따른 부하는 플라스틱온실 (1-2W형, 광폭단동형)이 유리온실 (와이드스팬형, 벤로형)보다 상대적으로 부하가 높게 나타났다. 제주지역을 제외한 나머지 다섯 지역의 1-2W형 온실이 와이드스팬형 온실보다 약 17 %로 모두 높은 부하를 보였는데 이는 외피의 소재 특성인 태양광투과율, 가시광선투과율, 전도율, 열관류율 등의 인자가 온실의 부하에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한 같은 외피 소재간에서도 유리온실의 경우 벤로형 온실이 와이드스팬형 온실보다 약 8~11 %의 높은 부하를 나타냈으며, 플라스틱온실의 경우에는 1-2W형 온실이 광폭단동형 온실에 비해 약 10~12 %의 높은 부하를 나타냈다. 이것은 온실 구조상의 차이가 결과로 반영된 것으로 보인다. 1-2W형과 벤로형이 각각 광폭단동형과 와이드스팬형보다 온실체적이 큰 구조인데, 이 차이가 부하 산정에 영향을 준 것으로 판단된다.

Table 6 Total heating load of 4 different types of greenhouse at 6 locations in 2010 (Unit : MJ)

Region	Widespan	Venlo	1-2W	Widewidth
Chuncheon	1,187,836	1,302,341	1,432,929	1,280,000
Suwon	1,074,534	1,184,757	1,300,516	1,166,065
Cheongju	1,023,675	1,134,423	1,234,801	1,114,957
Daegu	810,928	878,081	972,130	869,188
Jeonju	914,466	1,008,374	1,120,320	998,301
Jeju	609,386	682,981	776,287	686,753

5. 지역별 및 온실 형태별 냉방부하

시뮬레이션을 통한 온실의 형태 별, 그리고 지역 별 2010년

Table 7 Total cooling load of 4 different types of greenhouse at 6 locations in 2010 (Unit : MJ)

Region	Widespan	Venlo	1-2W	Widewidth
Chuncheon	482,835	537,739	627,544	583,576
Suwon	528,845	571,389	662,774	612,885
Cheongju	598,726	615,715	720,271	653,534
Daegu	702,770	714,051	841,213	754,444
Jeonju	622,875	648,122	762,748	691,682
Jeju	620,389	673,187	778,187	721,404

도 연간 총 냉방 부하는 Table 7에 나타나 있다. 연간 냉방부하는 난방부하와 반대의 경향을 나타냈는데 최저위도인 제주로부터 고위도로 갈수록 부하량이 낮게 산정되는 경향이 있었다. 그러나 대구의 경우 잘 알려진 것처럼 지형이 분지형태를 취하고 있는데, 분지의 특성에 맞게 여름철 고온을 나타내 위도의 영향 외에 별개로 냉방부하가 가장 높게 나타난 것으로 확인되었다. 그러나 냉방부하는 난방부하와 비교하여 지역별 부하차이가 대구를 기준으로 제주 광폭형 온실로부터 춘천 와이드스팬형 온실까지 적게는 약 4 %에서 많게는 약 25 % 상대적으로 낮은 비율을 나타냈다. 이는 국내 하절기 지역간 온도 편차가 동절기에 비하여 더 작기 때문인 것으로 판단된다. 온실의 형태에 따른 부하는 1-2W형 온실이 와이드스팬형 온실보다 춘천, 수원, 청주, 대구, 전주, 제주지역 각각 약 23, 20, 17, 16, 18, 20 % 정도 높은 부하를 보였으며, 난방부하와 마찬가지로 외피의 소재 특성에 따른 영향으로 플라스틱온실에서 유리온실보다 부하가 크게 나타난 것으로 확인되었다. 온실 외피 소재간의 부하 차이에서는 유리온실의 경우 벤로형 온실이 와이드스팬형 온실보다 약 2~10 %의 높은 부하를 나타냈으며, 플라스틱온실에서는 1-2W형 온실이 광폭단동형 온실에 비해서 약 7~10 %의 높은 부하를 나타냈다. 이 또한 난방부하와 마찬가지로 온실 구조상의 차이가 결과로 반영된 것으로 보인다.

6. 지역별 및 온실 형태별 최대부하

2010년도 각 온실의 지역별 최대난방부하 산출 결과는 Table 8과 같으며, 최저기온 발생시각과 TRNSYS 시뮬레이션의 최대 난방부하 발생시각과 일치하였다. 최저온도에 따라 지역별 부하에 차이가 발생하였으며, 이는 위도의 영향을 받은 연간 총 난방 부하 산출의 결과와 유사하게 경향을 나타냈다. 온실 형태에 따른 부하의 차이는 와이드스팬형, 벤로형, 광폭단동형의 경우 약 3 % 내외로 유사한 경향을 보였지만, 1-2W형 온실의 경우에는 약 7~14 % 정도 높게 나타났다. 2010년도 온실의 지역별 최대 냉방부하 산출 결과는 Table 9와 같다. 온실 형태에 따른 부하산출결과는 가장 높은 부하를 보인 대구를 기준으로 지역별로 적게

Table 8 Maximum heating load of 4 different types of greenhouse at 6 locations in 2010 (Unit : MJ · h⁻¹)

Region (Date of lowest temp.)	Widespan	Venlo	1-2W	Widewidth
Chuncheon (Jan 14, 8am, - 21.1 °C)	789	826	900	816
Suwon (Jan 6, 6am, - 18.2 °C)	722	766	829	757
Cheongju (Jan 14, 7am, - 14.7 °C)	684	715	765	702
Daegu (Dec 25, 7am, - 9.9 °C)	551	587	640	582
Jeonju (Jan 14, 5am, - 10.9 °C)	586	615	673	609
Jeju (Jan 13, 10am, - 1.8 °C)	401	420	452	414

Table 9 Maximum cooling load of 4 different types of greenhouse at 6 locations in 2010

	Chun-cheon	Suwon	Cheong-ju	Daegu	Jeonju	Jeju
Date of lowest temp.	Aug 20, 3 pm	Aug 5, 3 pm	Aug 5, 1 pm	Aug 20, 3 pm	Aug 19, 3 pm	Aug 15, 4 pm
Ambient Temp. (°C)	33.9	33.9	35.6	35.7	35.3	35.6
Cooling load (MJ · h ⁻¹)	630	548	578	683	638	683
Widespan	Date by simulation	Aug 19, 5 pm	Aug 22, 4 pm	Aug 9, 4 pm	Aug 20, 4 pm	Aug 22, 10 am
	Ambient Temp. (°C)	33.6	32.1	34.5	35.4	35.0
	Max. cooling load (MJ · h ⁻¹)	632	618	667	696	643
Venlo	Date by simulation	Aug 19, 4 pm	Aug 22, 4 pm	Aug 20, 4 pm	Aug 20, 4 pm	Sep 3, 4 pm
	Ambient Temp. (°C)	33.3	32.1	34.9	35.4	33.5
	Max. cooling load (MJ · h ⁻¹)	631	615	643	675	637
1-2W	Date by simulation	Aug 19, 4 pm	Aug 5, 10 am	Aug 5, 10 am	Aug 5, 9 am	Aug 22, 10 am
	Ambient Temp. (°C)	33.3	31.2	32.4	31.5	32.1
	Max. cooling load (MJ · h ⁻¹)	670	719	762	750	777
Widewidth	Date by simulation	Aug 19, 4 pm	Aug 22, 4 pm	Aug 20, 4 pm	Aug 20, 4 pm	Sep 3, 4 pm
	Ambient Temp. (°C)	33.3	32.1	34.9	35.4	33.5
	Max. cooling load (MJ · h ⁻¹)	681	658	686	721	690

는 1 %에서 많게는 11 %의 부하차이를 나타냈다. 최대냉방부하의 경우 실제 최고기온이 발생한 시간과는 다르게 TRNSYS 시뮬레이션에서는 다른 일부 시간에서 최대냉방부하가 발생하였다. 이것은 온실의 다구획 분할 및 동적 프로그램의 특성에 따른 온실 내 축열 등이 기인한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 TRNSYS 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 온실모델을 검증한 후, 4가지 타입의 온실 (와이드스팬형, 벤로형, 1-2W형, 광폭단동형)을 모델링하고 6개 대상지역 (춘천, 수원, 청주, 대구, 전주, 제주)의 냉난방부하 특성을 산출 비교하여 BES 기법의 온실로의 적용 및 활용가능성을 검토하였다.

온실모델의 검증은 현장실험을 통한 온도 측정과 비교하였으며, 모델과 측정간의 온도 차이는 평균 1.1 °C를 보였으며, 부하산정 결과는 측정이 4,625,636 kcal, 모델이 4,881,816 kcal로 산정되어 5.5 %의 오차율을 보여, 정성적·정량적으로 좋은 일치를 나타냈다.

시뮬레이션을 통한 온실의 2010년 연간 총 난방부하는 춘천 지역의 온실들이 제주 지역의 온실들에 비하여 평균 47 % 정도 높은 부하를 나타냈으며, 총 냉방부하는 대구 지역이 춘천 지역에 비하여 평균 26 % 정도 높은 부하를 나타냈다. 이를 통해 각 지역별 위도와 지형적 특성에 따라 상이한 부하 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 온실의 형태별 비교에서는 1-2W형 온실이 와이드스팬형 온실보다 냉난방부하 각각 평균 17 %, 19 % 정도 높게 나타나 플라스틱온실이 유리온실에 비하여 높은 부하를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 동일한 외피 소재간에서도 냉난방부하 모두 유리온실은 벤로형 온실이, 플라스틱온실의 경우에는 1-2W형 온실이 높은 부하를 나타냈다. 각 온실별, 지역별 최대냉방부하 산출 결과, 시뮬레이션에서 최대냉방부하 발생 시간이 최고기온 발생시간과 일치하지 않음을 알 수 있었다. 가령, 춘천지역의 벤로형 온실의 경우 2010년 8월 20일 오후 3시, 33.9 °C의 최고 외기온일 때 최대냉방부하가 발생한 것이 아니라, 2010년 8월 19일 오후 4시, 33.3 °C의 외기온일 때 최대냉방부하가 발생하였다. 이는 최대냉방부하 발생시간 이전 과정에서의 계산 결과가 반영되어 나타나는 것으로 추측된다.

추후 온실의 침기, 환기, 보온커튼 및 작물 등 실제 온실의 에너지 부하 특성을 모사하고 현장실험과의 비교를 통한 검증과정은 BES기법의 신뢰성을 더욱 높여줄 것으로 기대한다. 이를 통해 온실의 냉난방 시설 설비의 최적 환경 조성을 위한 에너지 부하 계산에 중요한 기술로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구는 2011년도 농촌진흥청 어젠다 공동연구사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Hong, S. W., 2008. Analytical comparison on ventilation efficiencies of naturally-ventilated multi-span greenhouse and development of crop model using CFD technology. M.S. : Seoul National University (in Korean).
2. Hong, S. W., Lee, I. B., Hong, H. K., Seo, I. W., Hwang, H. S., Bitog, J. P., Yoo, J. I., Kwon, K. S., Ha, T. H., and Kim, K. S., 2008. Analysis of heating load of a naturally ventilated broiler house using BES simulation. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(1): 39-47 (in Korean).
3. Hyun, S. K., Hong, H. K., and Yoo, H. S., 2002. Verification experiment and calculation of cooling load for a test space. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 14(2): 153-160 (in Korean).
4. Jang, J. C., Kang, E. C., and Lee, E. J., 2009. Peak cooling and heating load and energy simulation study for a special greenhouse facility. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 29(1): 72-76 (in Korean).
5. Kim, D. H., Hong, H. K., Yoo, H. S., and Kim, O. J., 2006. Simulation and verification of cooling and heating load for test space with forced ventilation. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering* 18(12): 947-954 (in Korean).
6. Korea Energy Economics Institute (KEEI), 2010. Yearbook of energy statistics. Eui-wang, Korea. (in Korean).
7. Lee, J. H., Yu, K. H., and Cho, D. W., 2009. An analysis of comparison between the evaluation tool for building energy efficiency rating system and detailed analysis programs. *SAREK 2009 Summer Annual Conference*, 2009(6): 3-8 (in Korean).
8. Rural Development Administration (RDA), 2006. *Guide book of energy cost down protected horticulture for overcome of high oil price*. Suwon: National Institute of Agricultural Engineering of RDA. (in Korean).
9. Solar Energy Laboratory (SEL), 2007, *TRNSYS 16 reference manual*, Madison: University of Wisconsin.