

물-에너지-식량 넥서스 분석을 위한 시설재배지의 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하 관계 분석

Relationship Analysis of Reference Evapotranspiration and Heating Load for Water-Energy-Food Nexus in Greenhouse

김귀훈^a · 윤푸른^b · 이윤희^b · 이상현^c · 허승오^d · 최진용^{e, †}

Kim, Kwihoon · Yoon, Pureun · Lee, Yoonhee · Lee, Sang-Hyun · Hur, Seung-Oh · Choi, Jin-Yong

ABSTRACT

Increasing crop production with the same amount of resources is essential for enhancing the economy in agriculture. The first prerequisite is to understand relationships between the resources. The concept of WEF (Water-Energy-Food) nexus analysis was first introduced in 2011, which helps to interpret inter-linkages among the resources and stakeholders. The objective of this study was to analyze energy-water nexus in greenhouse cultivation by estimating reference evapotranspiration and heating load. For the estimation, this study used the physical model to simulate the inside temperature of the agricultural greenhouse using heating, solar radiation, ventilated and transferred heat losses as input variables. For estimating reference evapotranspiration and heating load, Penman-Monteith equation and seasonal heating load equation with HDH (Heating Degree-Hour) was applied. For calibration and validation of simulated inside temperature, used were hourly data observed from 2011 to 2012 in multi-span greenhouse. Results of the simulation were evaluated using R^2 , MAE and RMSE, which showed 0.75, 2.22, 3.08 for calibration and 0.71, 2.39, 3.35 for validation respectively. When minimum setting temperature was 12°C from 2013 to 2017, mean values of evapotranspiration and heating load were 687 mm/year and 2,147 GJ/year. For 18°C, Mean values of evapotranspiration and heating load were 707 mm/year and 5,616 GJ/year. From the estimation, the relationship between water and heat energy was estimated as 1.0~2.6 GJ/ton. Though additional calibrations with different types of greenhouses are necessary, the results of this study imply that they are applicable when evaluating resource relationship in the greenhouse cultivation complex.

Keywords: Water-Energy-Food Nexus; greenhouse; temperature simulation; evapotranspiration; heating load

1. 서 론

2017년 기준 우리나라 경지면적은 162만 1천 ha이고, 논 면적 86만 4천 ha, 밭 면적 75만 6천 ha로 이뤄져 있으며, 이 중 시설재배면적은 논과 밭에 걸쳐 8만 1천 ha에 이른다 (MAFRA,

2018). 시설재배는 외부환경으로부터 내부를 차단하여 습도, 온도, 빛 등의 환경 조건을 작물 생육에 이상적이도록 만들어 주기 때문에 에너지와 물이 많이 들어가는 자원 집약적 농업 형태이다 (Udink ten Cate, 1983). 특히 한국은 농업 면적 대비 인구가 많아 높은 생산성이 요구되고, 큰 연교차와 비교적 추운 겨울을 가진 특성상 많은 물과 에너지가 시설재배지에 투입된다 (Shin and Nam, 2016). 이처럼 국내 시설재배 농가에서는 생산비 중 수도광열비가 차지하는 비중이 높아, 겨울철 영농을 하는 축성 토마토 재배의 경우 농가 총수입의 10%를 넘어간다 (RDA, 2018). 그리고 이는 작물의 종류 및 내부 설정 온도, 지역 그리고 재배시기에 따라 상이하다. 이에 기후변화 등 외부 조건 변화에 적절하게 대처하고, 농업 생산에 투입되는 자원의 생산성을 평가하기 위해서는 지역별 시설재배지의 작물과 시기에 따른 필요수량과 난방 에너지 부하에 대한 분석이 필요하다.

물-에너지-식량 넥서스는 각 자원의 상충관계 (trade-off)와 상승관계 (synergy)를 분석하여 자원을 보다 효율적으로 이용하기 위해 등장한 개념이다 (Choi, 2017). 2011년 세계경제포럼 (World Economic Forum)에서 제시되었으며, 2015년 SDGs

^a MS Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b PhD Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^c Researcher, Research Institute for Humanity and Nature

^d Agricultural Researcher, Division of Climate Change and Agroecology, Department of Agricultural Environment, National Institute of Agricultural Sciences (NAS), Rural Development Administration (RDA)

^e Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Institute of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4583 Fax.: +82-2-873-2087

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

Received: May 10, 2019

Revised: May 15, 2019

Accepted: May 27, 2019

(Sustainable Development Goals)가 제안된 이후 이를 달성하기 위해 자원 간 관계를 분석하는 연구가 활발히 이뤄져 오고 있다. 현재까지 진행된 물-에너지-식량 넥서스 관련 연구는 크게 시나리오 기반 평가, 통합적 평가 모델링, 의사결정 지원, 데이터 기반 모델 등으로 구분할 수 있다 (Namany et al. 2019). Daher and Mohtar (2015)는 사용자가 정한 시나리오 기반의 플랫폼을 통해 물, 에너지 그리고 식량의 상호 의존성을 분석하였으며, 카타르의 사례를 통해 적용성을 평가하였다. 이외에도 MENA (Middle East and North Africa) 지역, 터키의 게디즈 지역, 텍사스 지역 등에서 자원 간의 상충 작용을 바탕으로 물-에너지-식량 분석을 하였고, 이를 바탕으로 변화하는 자연·사회적 조건에 대응하기 위한 방안을 시나리오 기반으로 평가하였다 (Daher et al., 2019; Lee et al., 2019; Degirmencioglu et al., 2019).

위의 기존 연구들은 구축된 통계자료를 통해 도출된 자원 간 관계식과 사용자가 입력한 시나리오를 바탕으로 지속가능성을 평가하였다. 그러나 이러한 접근 방법은 구축된 통계자료의 지역적 범위를 벗어날 경우 적용이 불가능한 경우가 있고, 사용자가 입력하는 시나리오에 국한된 구조로 인해 기후 변화와 같은 외부 조건을 유연하게 모의하지 못하는 단점이 있다. 특히, 시설재배 농업에서 물-에너지-식량 넥서스 분석을 적용한 Irabien and Darton (2016)은 가상수와 탄소발자국으로 넥서스 분석을 하였지만 대상지역의 통계자료만을 이용했다는 한계가 있었다. 시뮬레이션 기반의 물-에너지-식량 넥서스 분석을 위해서는 통계자료만을 이용한 방법이 아닌 온실 내부에서 각 자원의 상충 및 상승 관계를 모의할 수 있어야 한다.

시설재배 농업에서 기준작물증발산량과 난방에너지 부하를 산정하기 위해서는 온실 내부에서 측정된 온도 자료는 중요한 요소인데 (Fernandez et al., 2010; Nam and Shin, 2015), 광역단위의 모든 시설재배지에서 내부 온도를 측정하는 것은 현실적으로 매우 어렵다. 이 때문에 실측할 수 있는 자료를 바탕으로 온실 내부의 온도를 모의하는 것이 필요하다. 온실 내부 온도모의에 관한 연구는 국내에서는 Hong et al. (2015)이 시설 외부 기상 변화에 따라 데이터 기반의 블랙박스 모델을 이용하여 시설 내 기온의 변화를 예측하였다. 또한, Ha et al. (2015)은 김제시에 위치한 유리온실에서 BES를 적용하여 실내온도를 모의하였고, 가장 좋은 시나리오의 경우 평균 1.1℃, 최대 3.3℃ 차이를 보였다. 국외에서는 생물 환경조절에 대한 정성적 분석으로 실내 온도를 모의하고자 하는 연구를 시작으로 (Udink ten Cate et al. 1978), Bot (1983)과 Udink ten Cate (1983)에 의해 실내 온도 모의를 위한 관계식들이 제시되었다. 이후 난방, 태양복사, 관류열 손실, 틈새 및 인위적 환기를 변수로 삼아 단위 시간동안 내부온도를 모의한 연구가 있었으며

(van Henten, 1994; van Henten et al., 2009), van Beveren et al. (2015)은 온실 환경과 경제성을 최적화하기 위해 투입 에너지와 작물 생육 등 각 변인들에 범위를 설정하여 온실 내부온도를 모의하였다. 이와 같이 온실 내부 온도에 대한 다양한 연구가 진행되었으나 모의된 온도를 통한 물과 에너지 자원의 투입 관계를 분석한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 van Henten (1994)의 온도 모의 물리모델을 이용하여 종관기상관측소 자료와 온실 제원을 입력 변수로 실내온도를 모의하고 이를 활용하여 에너지-물 넥서스 분석에 사용할 수 있도록 시설재배 온실에서 기준작물증발산량과 난방에너지 부하를 산정하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 물-에너지-식량 넥서스 구성

아래 Fig. 1은 본 연구에서 구성한 물-에너지-식량 넥서스의 모식도이다. 넥서스 요소를 들녘단위에서 농업에 직접 쓰이는 자원과 국가 단위의 활용가능한 자원 총량으로 구분하여 자원의 흐름을 나타내었다. 삼각형 밖에 위치한 물과 에너지는 국가적 단위의 통계자료를 바탕으로 구성되고, 내부에 있는 물, 에너지, 식량 요소는 들녘 단위의 온실로 구성되어 시뮬레이션 기반으로 해석한다. Fig. 1에서 점선은 자원의 이동 흐름을 보여주는 선이고, 실선은 한 요소가 다른 요소에 미치는 영향을 나타낸다.

본 연구에서는 Fig. 1의 물-에너지-식량 넥서스에서 물-에너지 관계를 분석하기 위하여 실내 온도를 모의할 수 있는 모형을 이용하여 실내 온도를 산정하였다. 모의한 실내온도를 이용하여 기준작물증발산량을 산정한 후, 실내온도와 외부온도의 차이로부터 시설 내의 난방 에너지 부하를 산정하였다. 이후 산정된 값을 시설재배에서의 물과 에너지 필요량으로 하여 이들의 관계에 대해 분석하였다.

2. 실내온도 모의

실제 온실 내 열역학은 에너지 전달과 물질균형의 조합으로 시시각각 변화한다 (Chen, 2018). 하지만 본 연구에서는 향후 시설재배지역의 자원투입량을 광역단위로 산정하고자 하기 때문에 온실 내 열분포의 편차로 인한 오차가 상대적으로 작을 것으로 예상하여, 시설 내부의 공기는 모두 균질하며 같은 온도를 가지고 있다고 가정한 van Henten (1994)의 식을 사용하였다. 실내 온도 모의 모델은 아래 식 (1)과 같고, 내부의 변인과 외부 기상 그리고 실내 고정된 조건들로 구성된다.

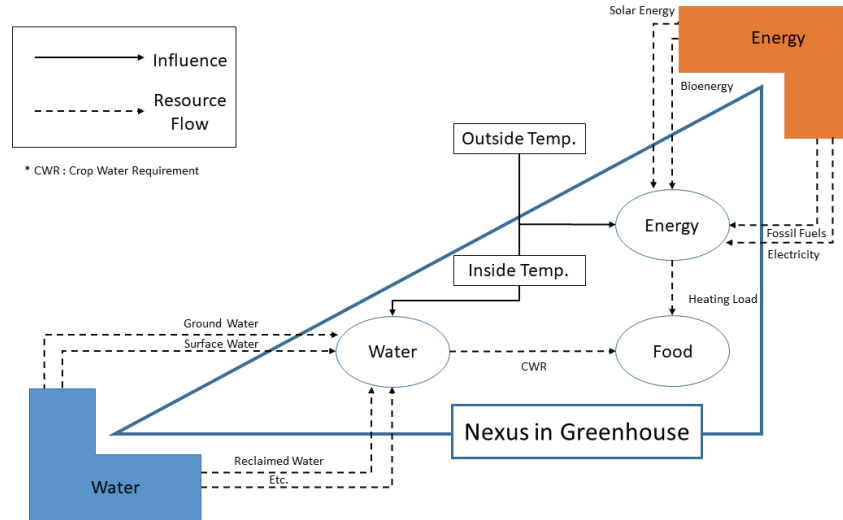


Fig. 1 Diagram of the energy–water–food nexus in greenhouse cultivation

$$\frac{dT_{in}(t)}{dt} = \frac{1}{C_g} (u_q(t) + C_{rad}S_r(t) - (T_{in}(t) - T_{out}(t))(c_{cap}u_v + c_{ai})) \quad (1)$$

$T_{in}(t)$ 는 실내온도, $T_{out}(t)$ 는 실외온도를 나타내며, C_g 는 내부 공기의 단위 면적당 비열로 van Henten (1994)에 의해 제시된 실험값이다. u_q (W/m^2)는 시설 내 난방기에 의한 난방, C_{rad} 는 태양복사에 의한 열 부하계수, S_r (W/m^2)은 온실 외부의 태양 복사, C_{cap} 는 시설 내부 공기의 부피 단위 비열, u_v 는 환기율, C_{ai} (W/m^2K)는 시설의 평균 관류열 손실이고, 값은 아래 Table 1과 같다.

van Henten (1994)와 Chen et al. (2018)에서는 관류열 손실 C_{ai} 값으로 $6.1 W/m^2K$ 를 적용하였는데, 본 연구는 NAAS (2015)의 온실환경설계기준을 참고하여 실험 대상온실에 해당하는 $3.1 W/m^2K$ 를 적용하였다. u_q 는 최대난방부하 값을 계산하여 실험 대상온실의 경우 $150 W/m^2$ 로 설정하였다. S_r 은 수원 기상관측소에서 측정된 시간별 일사량 값을 적용하였다. u_v 는 기상관측소의 풍속자료에 $3.75 \times 10^{-4} \sim 7.5 \times 10^{-4}$ 의 값을 곱하여 적용하였다. van Henten (1994)와 Chen et al. (2018)은 C_{rad} 를 0.20으로 모의하였으나, 본 연구에서는 겨울철에 일별 최대 기온이 $0^\circ C$ 아래로 내려가는 경우 C_{rad} 값을 0.30으로 조정하여

모의하였다. van Henten (1994)이 모델의 보정을 위해 사용한 네덜란드 외부 기온이 한국의 겨울철에 비해 높아 겨울철 한국의 온실에서는 일사량의 영향이 과소하게 반영되는 경향이 있었기 때문이다.

3. 난방 에너지부하 산정

NAAS (2015)의 온실 환경설계기준과 Nam et al. (2015)에 의하면 온실의 기간난방부하는 난방디그리아워 (HDH, Heating Degree-Hour)와 평균난방부하계수를 이용하여 다음 식으로 구한다.

$$Q_H = k_c \bar{U} A_c (HDH) \quad (2)$$

Q_H 는 기간난방부하 (J), \bar{U} 는 평균난방부하계수 (W/m^2C), A_c 는 온실의 피복면적 (m^2), HDH는 난방디그리아워 ($^\circ C \cdot h$), k_c 는 일조시간에 따른 조정계수이다. 평균난방부하계수는 다음 식으로 구한다. 이때, T_{in} 에는 실내온도 모의 값을 적용하였다.

$$\bar{U} = \frac{H_T}{A_c (T_{in} - T_{out})} \quad (3)$$

HDH는 설정온도와 외기온의 차이를 적산한 것으로 주간

Table 1 Comparison of parameter specifications between van Henten (1994) and this study

Parameter	C_g	C_{rad}	C_{cap}	C_{ai}	S_r	u_v	$T(t)$	u_q
Unit	J/m^2K	—	J/m^3K	W/m^2K	W/m^2	m/s	$^\circ C$	W/m^2
Value	van Henten (1994)	30,000	0.2	1,290	6.1	input		
	This study	30,000	0.2~0.3	1,290	3.1	input		

Table 2 Adjust coefficient (k_c) depending on the duration of sunshine

Duration of sunshine (h)	3.0	4.5	6.0	7.5	9.0
k_c	3,020	2,820	2,620	2,420	2,220

외기온이 설정온도보다 낮으면 플러스가 되지만 일사량 때문에 난방이 필요 없는 경우가 있다. 따라서 기간난방부하의 계산에서 일조시간에 따른 조정계수 (k_c)를 Table 2와 같이 고려한다.

HDH는 난방기간 동안 난방설정온도와 외기온과의 온도차를 적산한 것으로 다음 식으로 구한다.

$$HDH = \sum_{i=1}^n \left[\int_{t_1}^{t_2} (T_{in} - T_o) \right]_i \quad (4)$$

T_{in} 은 실내 설정온도 (°C), T_o 은 외기온 (°C), t 는 hour, i 는 day이고, $T_{in} < T_o$ 이면 $T_{in} - T_o = 0$ 이다. 온실의 최대난방부하는 작물재배 기간의 최저 설계 외기온 하에서 온실로부터 손실되는 열량으로 관류열 부하, 틈새환기전열부하 및 지중전열부하로 구성되며 다음 식과 같다.

$$H_T = (H_W + H_V + H_S) f_w \quad (5)$$

H_W 는 관류열부하 (W), H_V 는 틈새환기전열부하 (W), H_S 는 지중전열부하 (W), f_w 는 풍속보정계수이다.

4. 기준작물증발산량 산정

기준작물증발산량을 산정하는 공식은 FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)에 의해 Blaney-Criddle 식, FAO 56 Penman-Monteith식, FAO 24 Penman식, FAO 24 일사량법, FAO 증발계법 그리고 Hargreaves식 등이 제안된다. 이 중 FAO 56 Penman-Monteith식이 전 세계적으로 다양한 기후조건에서 검증되어 널리 사용되고 있다 (Yoon and Choi, 2018). Fernandez (2010)는 지중해 연안의 온실을 대상으로 FAO 56 Penman-Monteith식, FAO 24 Penman식, FAO 24 일사량법, FAO 증발계법, Hargreaves식을 통해 증발산량을 모의하였고, Penman-Monteith식을 이용하여 0.97의 R^2 값을 얻었다. 이에 따라 본 연구에서는 기준작물증발산량 모의를 위해서 Penman-Monteith 식을 적용하였다. 아래 식 (6)은 사용된 Penman-Monteith식이다.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \frac{900 \gamma U_2 (e_a - e_s)}{T + 273}}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (6)$$

여기서 ET_0 는 기준작물증발산량 (mm/day), Δ 는 포화수증기압의 기울기 (kPa/°C), R_n 은 순복사량 (MJ/m²/day), G 는 토양 열속밀도 (MJ/m²/day), γ 는 건습계 상수 (kPa/°C), U_2 는 온실 내에서의 풍속 (m/s), e_s 는 일평균 포화수증기압 (kPa), e_a 는 일평균 수증기압 (kPa), T 는 일평균 기온 (°C)이다 (Fernandez et al. 2010). 본 연구에서는 일별 최대·최소 기온과 평균기온은 실내온도 모의 값을 이용하였고, 일사량은 실험 온실의 평균 투광율인 46%를 고려하여 수원기상관측소의 일사량 값을 적용하였다 (Hong et al., 2013). 또한, 상대습도는 시설재배지 내부에 위치한 AWS (Automated Weather Station)에서의 측정값과 Lee et al. (2016)을 참고하여 일별 최솟값으로 65%를, 일별 최댓값으로 80%를 사용하였고, 풍속은 시설재배지 내부에서 일반적으로 측정되는 값인 0.1~0.3 m/s를 적용하였다 (Fernandez et al., 2010).

5. 대상지역

본 연구에서는 경기도 용인시 처인구 남사면 진목리 (E 37° 06' 04", N 127° 08' 08")에 위치한 이동저수지 주변 시설재배지를 연구 대상 지역으로 선정하였고 그 위치는 Fig. 2와 같다. 또한 온실 내부온도를 모의함에 있어 필요한 기상자료는 수원 종관기상관측소 (ASOS, Automated Synoptic Observing System) (E 37° 16' 20", N 126° 59' 07")의 시간별 자료를 이용하였다. 실험 온실과 기상관측소는 직선거리로 약 23.1km 떨어져 있다.

실험 온실에서는 2011년 오이를, 2012년 토마토를 재배하였으며, 토경으로 작물을 재배하였다. 온실은 1-2W형 4연동에 얇아비닐 필름으로 이중 피복되었고, 온실의 가로 길이와 세로 길이는 각각 100 m와 30 m이다. 동고와 측고는 1-2W형 온실의 표준인 4.7 m와 2.8 m로 계산하였다. 온실 내부에 설치된 AWS는 Watchdog사의 제품을 사용하였고 성능은 아래 Table 3과 같으며, 온도의 측정 오차는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 이다.

III. 결과 및 고찰

1. 온도 모델 보정 및 검정

본 연구에서는 실험 대상지 내에서 2011년 1월 27일부터 5월 31일까지 측정된 온도자료를 통해 온도 모델을 보정하였고, 2012년 2월 18일부터 4월 18일까지 측정된 자료를 통해 검정하였다. 아래 Table 4는 온도 모델의 보정 및 검정 결과를 나타내었으며, 모델의 성능은 R^2 (결정계수) MAE (평균 절대 오차), RMSE (평균제곱근 오차)를 이용해 평가하였다. 보정 결과는 평가지표 순서대로 0.75, 2.22, 3.08을, 검정 결과는

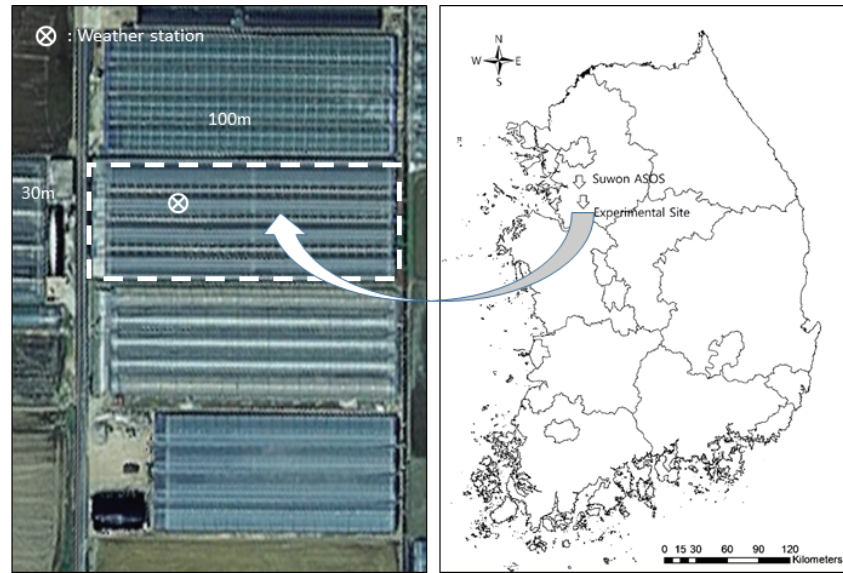


Fig. 2 Location map of experimental site and weather stations (Hong et al., 2013)

Table 3 Specification of the greenhouse and AWS in the experimental site

Greenhouse			AWS	
Type	Cover	Size	Specification	Accuracy
1-2W (Four-span arch-typed)	Double cover with Vinyl chloride	100m × 30m	-40°C~125°C	±0.3°C at -40°C~90°C

Table 4 Evaluation results of temperature simulation model calibration (2011) and validation (2012)

Year	R ²	MAE	RMSE	Period	
				From	To
2011 (Calibration)	0.75	2.22	3.08	27th Jan 2011	31st May 2011
2012 (Validation)	0.71	2.39	3.35	18th Feb 2012	18th Apr 2012

0.71, 2.39, 3.35를 보였다. 이때, 보정 시 내부 설정온도는 최저 14°C, 최대 30°C로, 검정 시는 최저 12°C, 최대 30°C로 설정했고, 이는 온실 실측자료를 기반으로 정하였다. 보정 기간 결정 계수가 0.75, 평균제곱근 오차가 3.08로 모델이 실측 값을 모의하는 데에 충분히 적합하였다고 판단하였고, 이로부터 검정을 한 결과 결정계수와 평균 제곱근 오차가 0.71, 3.35로 보정 기간의 평가지표와 큰 차이를 보이지 않았다.

아래 Fig. 3은 보정기간 실내온도 모의치와 실측치의 산포도를 나타내고, Fig. 4는 검정기간 산포도를 나타낸다.

Fig. 3을 살펴보면 x축은 실측값을, y축은 모의값을 나타내며, 상호간의 1차 관계식은 $y = 0.90x + 2.04$ 로 나타났으며, 상관계수는 0.87로 계산되었다. Fig. 3을 통해 온도모델의 최대·최소 설정온도인 30°C와 14°C 근처로 모의 값들이 많이 분포하는 것을 확인할 수 있는데 이는 야간과 주간에 설정온도 근처로 수렴한 온도가 많았기 때문인 것으로 판단되며, 일부

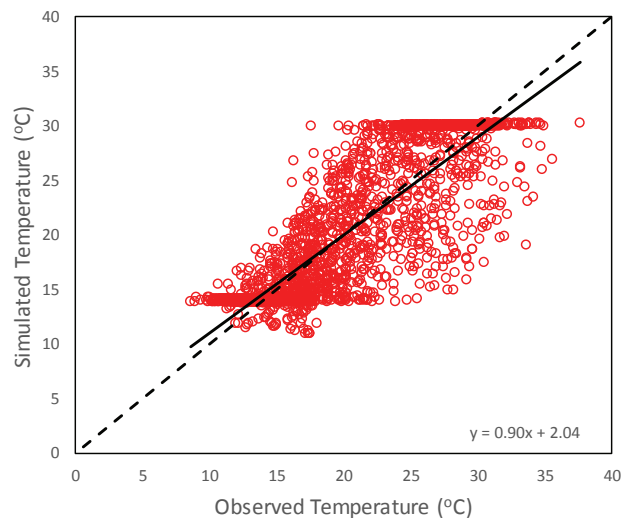


Fig. 3 Scatter plots of the observed and simulated temperature for calibration in 2011

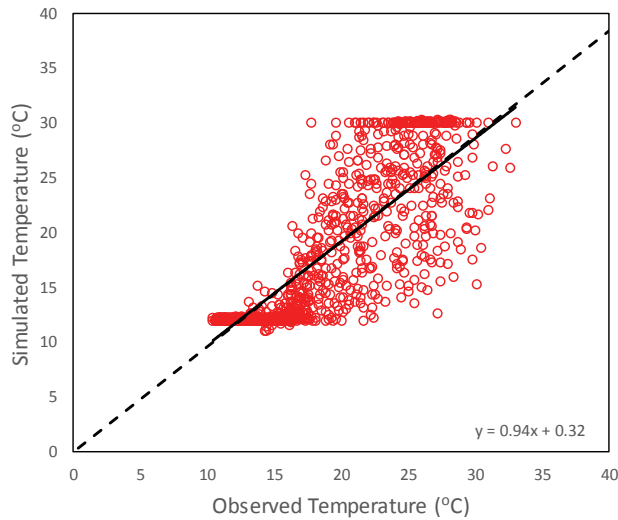


Fig. 4 Scatter plots of the observed and simulated temperature for validation in 2012

중심으로부터 먼 곳에 위치한 점들은 수원 기상관측소의 일사량 자료와 실험 대상지의 기상과 차이가 있던 시기에 발생한 오차로 판단된다.

Fig. 4는 동일한 온실에서 2012년 자료로 검정한 결과로 Fig. 3과 비슷한 분포를 보이고 있다. 상호간의 1차 관계식은 $y = 0.94x + 0.32$ 로 나타났으며 상관계수는 0.84로 계산되었다.

Fig. 5와 6은 실측한 온실 내부온도와 외기온도 그리고 모의한 온실 내부온도를 시간 단위로 나타낸 그래프이다. 두 그림의 x축은 시간 단위이며 y축은 섭씨 기온을 나타낸다. Fig. 5는 보정기간인 2011년의 결과이며 최저 설정온도 14°C와 최대 설정온도 30°C로 모의하였다. Fig. 6은 검정기간인 2012년의 결과이며 최저 설정온도 12°C와 최대 설정온도 30°C로 모의하였다. Fig. 5에서는 1~2월 동안 온도가 과소 모의되고, 3~4월

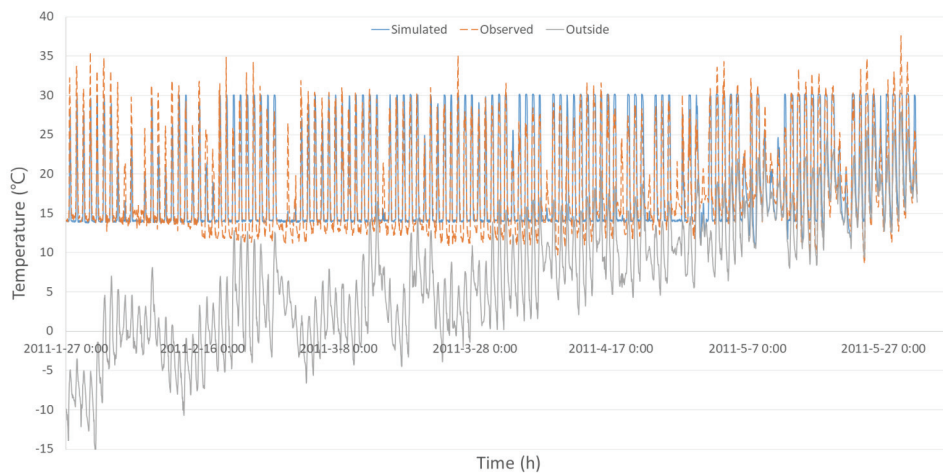


Fig. 5 Comparison of observed and simulated inside temperature for model calibration in 2011



Fig. 6 Comparison of observed and simulated inside temperature for model validation in 2012

동안은 과다 모의되는 경향이 있다. 이는 겨울철과 봄철에 태양복사량이 온도모의에 미치는 영향이 다르기 때문인 것으로 분석되었다. 두 그래프를 살펴보면 2월 16일과 3월 8일 사이 구간에서 모의값이 낮 시간대에 충분히 상승하지 않는 경우가 있는데, 이는 본 연구에서 사용한 관측소의 일사량 자료가 실험 대상지의 기상과 차이가 있었기 때문인 것으로 판단된다. 또한 모의값과 실측값이 최저값에서 보이는 분포를 비교해 볼 때, 실측값은 설정한 최저온도를 기준으로 진폭이 비교적 큰 분포를 보이는 반면 모의 값은 설정한 최저온도 값에 수렴하는 분포를 보인다. 실제 온실에서 설정온도 이하로 내려간 후 난방기를 통해 실내를 가온해주기까지 시간이 걸리는데 이때의 실내온도 변화가 큰 진폭으로 반영된 것으로, 이로부터 최저온도의 오차가 발생한 것으로 판단된다. 모의값과 실측값이 최댓값에서 보이는 분포를 비교해 볼 때, 모의값의 경우 30℃로 최대 설정온도를 정하였는데, 이로 인해 실측값이 30℃를 넘은 경우 오차가 발생하였다.

2. 실내 설정온도에 따른 기준작물증발산량의 합과 난방 에너지 부하 변화 (2013~2017년)

본 연구에서는 2011~2012년과 온실의 조건이 동일하다고 가정한 후, 2013년부터 2017년까지의 기상자료를 이용하여 온실 내에서 기준작물증발산량의 합과 난방 에너지 부하를 산정하였다. Fig. 7은 온실 내부 최대 설정온도를 30℃로 고정하고, 최저 설정온도를 12, 14, 16, 18℃로 바뀌가며 산정한 값을 나타내고 있다. 연도별 난방에너지 부하의 경우 최저 설정온도를 높이면 난방에너지 부하가 큰 차이를 보였으며, 연도별 기준작물증발산량의 합은 최저 설정온도의 증가에 따라 소폭 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 연도별 기준작물증발산량의 합을 최저 설정온도별로 비교한 그래프이고, Table 5는 그 값을 나타낸 것으로 매년 1월 1일부터 12월 31일까지 산정한 기준작물증발산량의 합을 나타낸 표이다. Fig. 8을 통해 살펴보면, 최저 설정온도가 높아질수록 기준작물증발산량의 합이 전반적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 하지만 설정온도에 따른 차이보다 연도에 따른 차이가 더 크게 나타나는 것으로 보아 기준작물증발산량

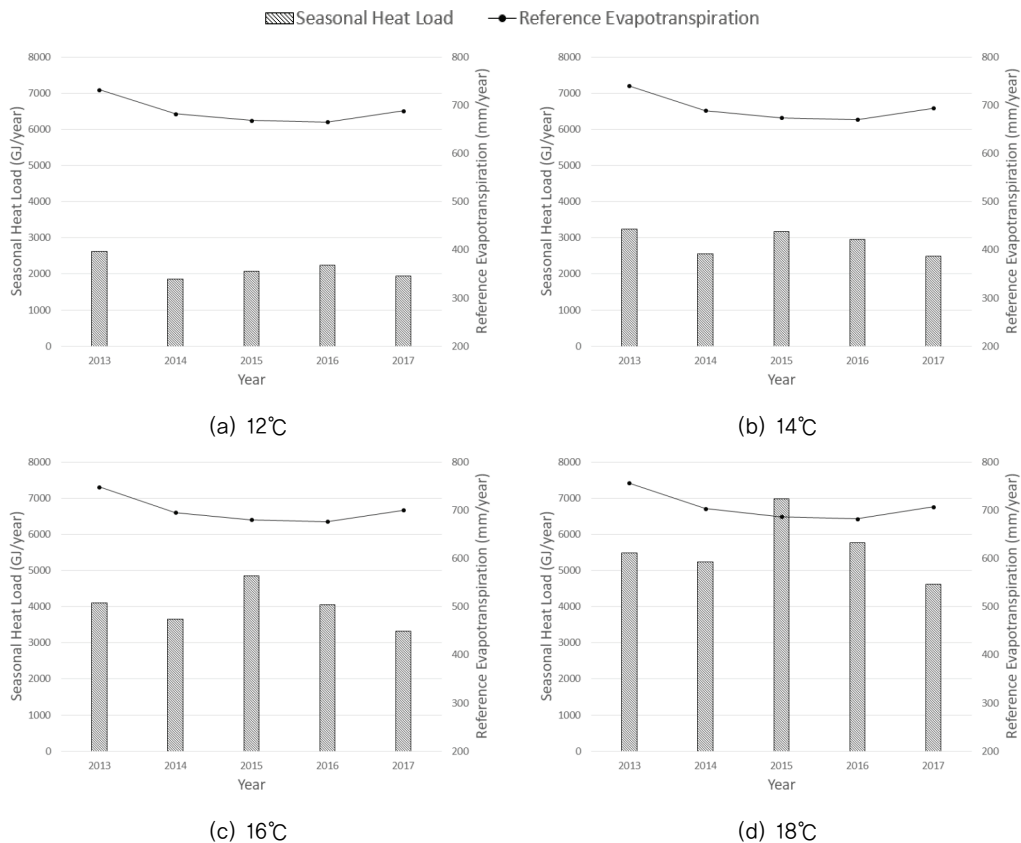


Fig. 7 Sum of reference evapotranspiration and seasonal heat load from 2013 to 2017 depending on the minimum temperature settings (12, 14, 16, 18℃)

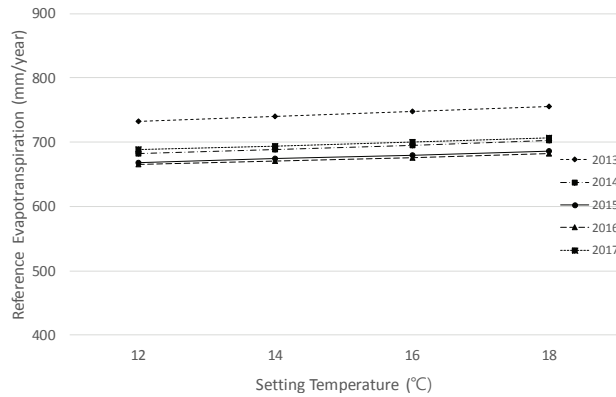


Fig. 8 Comparison of yearly reference evapotranspiration on different temperature settings

Table 5 Yearly reference evapotranspiration (mm/year) and increment rate on different temperature settings

Year	12°C		14°C		16°C		18°C	
	mm	(%)	mm	(%)	mm	(%)	mm	(%)
2013	732	—	740	101	748	102	756	103
2014	682	—	689	101	695	102	703	103
2015	668	—	674	101	680	102	686	103
2016	665	—	670	101	676	102	682	103
2017	688	—	694	101	700	102	707	103
Average	687	—	693	101	700	102	707	103

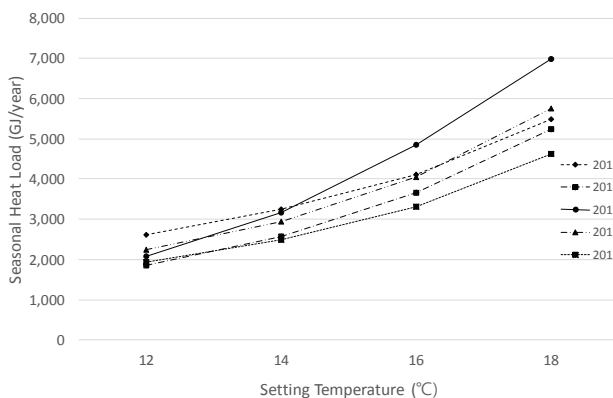


Fig. 9 Comparison of yearly seasonal heat load on different temperature settings

의 합은 설정온도보다 기상에 더 많은 영향을 받는 것으로 분석되었다.

Fig. 9는 연도별 난방 에너지 부하를 최저 설정온도에 따라 비교한 그래프이고, Table 6은 그 값을 나타낸 것으로 매년 1월 1일부터 12월 31일까지 산정한 난방 에너지 부하의 합을 나타낸 표이다. 그래프를 통해 최저 설정온도가 높아질수록

Table 6 Yearly seasonal heat load (GJ/year) and increment rate on different temperature settings

Year	12°C		14°C		16°C		18°C	
	GJ	(%)	GJ	(%)	GJ	(%)	GJ	(%)
2013	2,622	—	3,240	124	4,102	156	5,481	209
2014	1,863	—	2,563	138	3,660	196	5,240	281
2015	2,073	—	3,175	153	4,858	234	6,980	337
2016	2,234	—	2,949	132	4,053	181	5,762	258
2017	1,942	—	2,493	128	3,318	171	4,619	238
Average	2,147	—	2,884	134	3,998	186	5,616	262

Table 7 Average resource demands and resource relationship on different setting temperatures

Resource	12°C	14°C	16°C	18°C
Water (ton)	2,061	2,079	2,100	2,121
Energy (GJ)	2,147	2,884	3,998	5,616
Energy / water (GJ/ton)	1.0	1.4	1.9	2.6

난방 에너지 부하가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 평균적으로는 최저 설정온도 12°C에서 2,147 GJ/year, 18°C에서는 5,616 GJ/year까지 변화하는 것으로 나타났다. 최저 설정온도가 12°C일 때 난방 에너지 부하의 경우 가장 적은 2014년과 가장 큰 2013년을 비교했을 때 2013년이 약 1.4배 정도 더 큰 값을 보였다. 또한 최저 설정온도를 12°C에서 18°C로 높였을 때 2013~2017년 평균 약 2.6배 증가하였다. 이로부터 난방 에너지 부하는 실내 설정온도와 기상의 영향을 모두 많이 받는 것으로 분석되었다.

Table 7은 기준작물증발산량으로부터 작물계수를 고려하지 않고 시설 온실의 면적을 곱하여 산정한 총 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하와의 관계를 나타낸다. 최저 설정온도가 12°C일 때 단위 필요수량 당 소요된 난방 에너지 부하가 1.0 GJ/ton이고, 실내 설정온도가 18°C일 때 소요 난방 에너지 부하는 2.6 GJ/ton의 값을 보였다. 이로부터 최저 설정온도에 따른 총 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하의 변화로부터 시설재배지에서 물과 에너지는 서로 상승 (synergy)의 관계를 가지고 있음을 알 수 있으며, 향후 본 실험의 대상지 외에 다른 시설 온실을 대상으로 물과 에너지 사이의 관계를 분석하고 비교하여 해당 조건에서의 농업이 지속가능한 구조인지 평가해볼 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 시·도 단위로 시설재배 온실에서 에너지와 물

의 관계를 분석하기 위해 기준작물증발산량과 난방 에너지 부하를 산정하였고, 이를 위해 온실의 실내온도를 모의하였다.

1. 연구대상지는 경기도 용인시 남사면 진목리에 위치한 4연동 1-2W형 온실이고, 실내온도 모의를 위해 사용한 기상자료는 실험 온실에서 약 23 km 떨어진 수원 ASOS에서 시간 단위로 측정되었다.
2. 온실의 실내온도 모의를 위한 물리모델에서 입력변수는 최대난방부하를 바탕으로 산정한 난방열, 수원시 중관 기상관측소에서 시간 단위로 측정된 태양복사, 풍속, 실외기온 네 가지였고, 태양복사에 의한 열 부하계수 C_{rad} 를 조정하여 적용하였다.
3. 모델은 R^2 , MAE, RMSE를 통해 적용성을 평가하였다. 모델의 보정을 위해 2011년 1월 27일부터 2011년 5월 31일까지의 자료를 이용하였고, 검정을 위해 2012년 2월 18일부터 2012년 4월 18일까지의 자료를 이용하였다. 모의 결과 보정기간에는 R^2 , MAE, RMSE 각각 0.75, 2.22, 3.08의 값을 얻었고, 검정기간에는 각각 0.71, 2.39, 3.35의 값을 얻었다.
4. 실내온도 모의 결과를 이용하여 온실 내에서 기준작물 증발산량의 합과 기간난방부하를 산정하였고, 최저 설정온도를 12°C로 하였을 경우 2013년~2017년 평균 687 mm/year와 2,147 GJ/year의 값을 얻었다. 최저 설정온도를 18°C로 하였을 경우 2013년~2017년 평균 707 mm/year와 5,616 GJ/year의 값을 얻었다.
5. 2013~2017년 기준작물증발산량 합의 평균은 실내 설정온도에 따라 2,061~2,121 ton으로 산정되었으며 동일한 조건에서 난방 에너지 부하는 2,147~5,616 GJ로 산정되었다. 이로부터 대상 시설재배지에 대해 실내 설정온도에 따른 단위 기준작물증발산량당 난방 에너지 부하를 1.0~2.6 GJ/ton으로 산정하였다.

본 연구 결과는 시뮬레이션 기반의 에너지-물 넥서스 분석에서 시설재배지 작물 생산과 에너지 관계 모의에 적용 가능할 것으로 판단된다. 모델의 검증에 위해 4연동 1-2W 비닐 온실에서의 실측자료만을 이용하였는데, 해당 온실 이외의 다른 종류의 온실에서 자료를 바탕으로 보정이 필요하다. 본 연구 결과는 향후 시설재배단지에서 투입되는 자원 간의 관계를 파악하고 이로부터 정책 평가에 이용이 가능하고, 나아가 농업 시설재배 단지 조성을 위한 계획에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 농촌진흥청 연구사업 (세부과제번호 PJ013435022019)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

1. Bot, G. P. A., 1994. Greenhouse climate: from physical process to a dynamic model. Ph.D. diss., Wageningen, the Netherlands: Wageningen Agricultural University.
2. Chen, L., S. Du, Y. He, M. Liang, and D. Xu, 2018. Robust model predictive control for greenhouse temperature based on particle swarm optimization. *Information Processing in Agriculture* (2018). doi:10.1016/j.inpa.2018.04.003.
3. Choi, J., 2017. Sustainable resource management with Water-Energy-Food Nexus. *World Agriculture* 206: 3-19 (in Korean).
4. Daher, B. T., and R. H. Mohtar, 2015. WEF Nexus Tool 2.0; guiding integrative resource planning and decision-making. *Water International* 40(5-6): 748-771. doi:10.1080/02508060.2015.1074148.
5. Daher, B., S. Lee, V. Kaushik, J. Blake, M. H. Askariyeh, H. Shafiezhadeh, S. Zamaripa, and R. H. Mohtar, 2019. Towards bridging the water gap in Texas: A water-energy-food nexus approach. *Science of the Total Environment* 647: 449-463. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.07.398.
6. Degirmencioglu, A., R. H. Mohtar, B. T. Daher, G. Ozgunaltay-Ertugrul, and O. Ertugrul, 2019. Assessing the sustainability of crop production in the Gediz basin, Turkey: A water, energy and food nexus approach. *Fresenius Environmental Bulletin* 28(4): 2511-2522.
7. Fernandez, M. D., S. Bonachela, F. Orgaz, R. Thompson, J. C. Lopez, M. R. Granados, M. Gallardo, and E. Fereres, 2010. Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. *Irrigation Science* 28: 497-509. doi:10.1007/s00271-010-0210-z.
8. Ha, T., I. Lee, K. Kwon, and S. Hong, 2015. Computation and field experiment validation of greenhouse energy load using BES (Building Energy Simulation) model. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 8(6): 116-127. doi:10.3965/j.ijabe.20150806.2037.
9. Hong, E. M., J. Choi, W. H. Nam, M. Kang, and J. Jang, 2014. Soil moisture extraction characteristics of Cucumber crop in protected cultivation. *Journal of the Korean Society*

- of Agricultural Engineers* 56(2): 37-46. doi:10.5389/KSAE.2014.56.2.037 (in Korean).
10. Hong, S. W., A. K. Moon, S. Li, and I. B. Lee, 2015. Data-based model approach to predict internal air temperature of greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(3): 9-19. doi:10.5389/KSAE.2015.57.3.009 (in Korean).
11. Irabien, A., and R. C. Darton, 2016. Energy-water-food nexus in the Spanish greenhouse tomato production. *Clean Technol Environ Policy* 18: 1307-1316. doi:10.1007/s10098-015-1076-9.
12. Lee, S., R. H. Mohtar, and S. Yoo, 2019. Assessment of food trade impacts on water, food and land security in the MENA region. *Hydrology and Earth System Sciences* 23: 557-572. doi:10.5194/hess-23-557-2019.
13. Lee, T. S., G. C. Kang, Y. Paek, J. P. Moon, S. S. Oh, and J. K. Kwon, 2016. Analysis of temperature and humidity distributions according to arrangements of air circulation fans in single-span Tomato greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 25(4): 277-282. doi:10.12791/KSBEC.2016.25.4.277.
14. MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs), 2018. Agriculture, food and rural affairs statistics yearbook, 40-44; 88-89. Sejong, Korea (in Korean).
15. Nam, S., and H. Shin, 2015. Development of a method to estimate the seasonal heating load for plastic greenhouse. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(5): 37-42. doi:10.5389/KSAE.2015.57.5.037 (in Korean).
16. NAAS (National Academy of Agricultural Science), 2015. Standard for designing greenhouse environment, 71-84. Jeollabuk-do, Korea (in Korean).
17. Namany, S., T. Al-Ansary, and R. Govindan, 2019. Sustainable energy, water and food nexus systems: a focused review of decision making tools for efficient resource management and governance. *Journal of Cleaner Production* 225: 610-626. doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.304.
18. RDA (Rural Development Administration), 2018. 2017 Income analysis of agro and livestock products, 69-125. Jeollabuk-do, Korea (in Korean).
19. Shin, H., and S. Nam, 2016. Experimental study on the characteristics of ground heat exchange in heating greenhouse. *Protected Horticulture and Plant Factory* 25(3): 218-223. doi:10.12791/KSBEC.2016.25.3.218 (in Korean).
20. Udink ten Cate, A. J., G. P. A. Bot, and J. J. van Dixhoorn, 1978. Computer control of greenhouse climates. *Acta Horticulturae* 87: 265-272. doi:10.17660/ActaHortic.1978.87.28.
21. Udink ten Cate, A. J., 1983. Modelling and (adaptive) control of greenhouse climates. Ph.D. diss., Wageningen, the Netherlands: Wageningen Agricultural University.
22. van Beveren, P. J. M., J. Bontesma, G. van Straten, and E. J. van Henten, 2015. Optimal control of greenhouse climate using minimal energy and grower defined bounds. *Applied Energy* 159: 509-519. doi:10.1016/j.apenergy.2015.09.012.
23. van Henten, E. J., 1994. Greenhouse climate management: an optimal control approach. Ph.D. diss., Wageningen, The Netherlands: Wageningen Agricultural University.
24. van Henten, E. J., and J. Bontsema, 2009. Time-scale decomposition of an optimal control problem in greenhouse climate management. *Control Engineering Practice* 17: 88-96. doi:10.1016/j.conengprac.2008.05.008.
25. Yoon, P. R., and J. Choi, 2018. Assessment of reference evapotranspiration equations for missing and estimated weather data. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 60(3): 15-25. doi:10.5389/KSAE.2018.60.3.015 (in Korean).