Journal of Bio-Environment Control, Vol. 31, No. 3:246-254, July (2022)
DOI https://doi.org/10.12791/KSBEC.2022.31.3.246

pISSN 1229-4675
eISSN 2765-3641

옥상온실에서의 여름철 엽채류 작물에너지 교환 모델 개발

조정화[1] · 이인복[2*] · 이상연[3] · 김준규[1] · 크리스티나[1] · 최영배[1] · 이민형[1] · 정효혁[1] · 정득영[4]

[1]서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학과 대학원생, [2]서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학과 교수,
[3]서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학과 연구조교수, [4]정보통신기획평가원 책임연구원

Development of Summer Leaf Vegetable Crop Energy Model for Rooftop Greenhouse

Jeong-Hwa Cho[1], In-Bok Lee[2]*, Sang-Yeon Lee[3], Jun-Gyu Kim[1], Cristina Decano[1], Young-Bae Choi[1], Min-Hyung Lee[1], Hyo-Hyeog Jeong[1], and Deuk-Young Jeong[4]

[1]*Graduate Student, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*
[2]*Professor, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*
[3]*Post-doctoral Research Associate, Department of Rural Systems Engineering, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 08826, Korea*
[4]*Senior Researcher, Institute for Information and Communications Technology Planning and Evaluation, Daejeon 34054, Korea*

Abstract. Domestic facility agriculture grows rapidly, such as modernization and large-scale. And the production scale increases significantly compared to the area, accounting for about 60% of the total agricultural production. Greenhouses require energy input to create an appropriate environment for stable mass production throughout the year, but the energy load per unit area is large because of low insulation properties. Through the rooftop greenhouse, one of the types of urban agriculture, energy that is not discarded or utilized in the building can be used in the rooftop greenhouse. And the cooling and heating load of the building can be reduced through optimal greenhouse operation. Dynamic energy analysis for various environmental conditions should be preceded for efficient operation of rooftop greenhouses, and about 40% of the solar energy introduced in the greenhouse is energy exchange for crops, so it should be considered essential. A major analysis is needed for each sensible heat and latent heat load by leaf surface temperature and evapotranspiration, dominant in energy flow. Therefore, an experiment was conducted in a rooftop greenhouse located at the Korea Institute of Machinery and Materials to analyze the energy exchange according to the growth stage of crops. A micro-meteorological and nutrient solution environment and growth survey were conducted around the crops. Finally, a regression model of leaf temperature and evapotranspiration according to the growth stage of leafy vegetables was developed, and using this, the dynamic energy model of the rooftop greenhouse considering heat transfer between crops and the surrounding air can be analyzed.

Additional key words : bok choy, evapotranspiration, heat transfer, rooftop greenhouse energy, urban agriculture

서 론

국내 시설 농업은 현대화 및 대형화되는 등 급속도로 성장하였고, 면적 대비 생산 규모가 크게 증대되어 전체 농업 생산액 중 약 60%를 차지한다. 1990년대부터 시설원예 면적이 급증하여 현재는 59,000ha에 달하며 이는 대략 서울특별시 면적인 60,000ha와 유사하다(MAFRA, 2020). 온실은 연중 안정적인 대량생산을 위해 적정 환경을 조성하기 위한 에너지를 투입해야 하나, 상대적으로 단열성이 낮은 외피로 인해 단위면적당 에너지 부하가 크다. 단동 비닐온실의 가온 재배 면적은 18년 기준 32.8%이며, 경영비 중 난방비는 작물에 따라 12－44%에 해당하며, 여름철의 최대 냉방부하는 난방부하의 3.5배이다(RDA, 2018). 우리나라 기후 특성상 시설원예 재배 시 소모되는 높은 에너지량을 절감하기 위하여 온실 구조, 설비, 제어 등 여러 연구들이 계속 이루어지고 있다(Ahamed

*Corresponding author: iblee@snu.ac.kr
Received July 19, 2022; Revised July 26, 2022;
Accepted July 27, 2022

등, 2018; Singh 등, 2018; Mobtaker 등, 2019; Shakir과 Farhan, 2019). 또한 기후변화의 위험을 해소하기 위하여 전 세계적으로 탄소 중립을 위한 배출량을 감축하고자 노력 중이다. 농업 부문에서 비교적 에너지 사용량이 많은 시설원예는 화석 연료와 전력을 현재와 같이 무차별하게 이용할 경우 목표 시나리오 달성에 따른 탄소 배출량에 대해 전반적인 검토가 필요하다. 에너지 안보 차원에서 일별 및 계절별 피크 부하를 경감하거나 전기 소비량을 줄이려는 노력들과 대체에너지를 활용하는 연구 개발이 연이어 이루어지고 있다(Yoo, 2016; Kim 등, 2021).

최근 세계적으로 도시에서 작물을 재배하는 면적이 커지고 있다. 도시화로 인해 전 세계 인구의 50%, 우리나라의 경우 인구의 90% 이상이 도시에 거주한다(UN DESA, 2019). 도시에서 소비하는 에너지와 식량을 자체적으로 감당할 수 없는 수준이다. 도시 내 생산으로 공급 구조를 변화시킨 도시농업은 재배, 저장, 유통 과정이 기존 재배보다 단축되어 비용 뿐만 아니라 에너지까지 절감할 수 있다. 소비자가 작물을 이용하기까지의 푸드 마일리지를 줄여 이는 탄소 배출량 감소로 이어진다. 또한 도시농업은 밀집화된 지역에서 사교 및 취미활동 등 공동체 구축 플랫폼 역할을 수행하며, 일자리 창출뿐만 아니라 교육 프로그램을 통하여 도심에서 농업을 체험할 수 있다.

도시농업 중 에너지 효율을 높이기 위한 방법으로 건물의 유휴 공간인 옥상을 활용하는 옥상온실이 있다. 옥상온실은 건물에서 버려지거나 활용되지 않는 에너지를 온실에 이용할 수 있고 건물은 옥상에 온실이 위치하여 최상단 층의 에너지 부하를 절감하고 분산발전을 확대할 수 있다는 장점이 있다. 농업 선진국에서 여러 건물 위에 상업용, 주거용, 연구용, 교육용 등의 목적으로 지어 건축 면적이 계속 증가하고 있다(Gotham, Lufa, UAB, Hotel QO, Agrotopia 등). 옥상온실의 효율적인 운용을 위하여 기존에 지상의 토지 위에서 재배하는 일반 온실과 다른 양상을 파악하고자 시설 내외의 환경 변화를 시간에 따라 고려하는 동적 에너지 분석이 선행되어야 한다.

옥상온실의 적정 에너지 부하를 계산하기 위해서는 작물로부터 발생하는 에너지 부하 고려가 필수적이다. 온실 에너지를 산정할 때 작물에너지 고려 여부에 따라 약 7 – 15%의 부하가 차이를 보인다고 분석하였다(Lee 등, 2016). 온실 내 유입된 일사에너지 중 약 40%가 작물의 에너지 교환에 활용되며, 토마토 등 캐노피가 큰 작물은 최대 75%까지 활용된다는 결과가 있다(Boulard와 Baille, 1987; Eumorfopoulou와 Aravantinos, 1998). 작물 종류와 생육 단계 및 재식 밀도에 따라 부하량이 매우 상이하기 때문에 작물에너지에 따른 온실 내 에너지 부하는 큰 영향을 미칠 수 있다.

작물에 도달한 일사는 주변 공기와의 현잠열 교환, 광합성, 자체 축열량으로 변환되어 에너지 평형을 이룬다. 작물의 광합성에 쓰이는 에너지와 자체 축열량은 비중이 적다. 작물과 주변 공기와의 현열 및 잠열 교환 에너지가 온실 에너지 흐름에 지배적이므로 이에 대한 분석이 중요하다. 현열 에너지는 잎의 물리적인 형상과 주변 공기와의 온도 차이에 의해 지속적인 전도 및 대류열이다. 또한 잠열 에너지는 엽면의 증산과 응결과정에서의 상변화에 의한 손실 열량이다. 엽면적지수, 엽온, 기온 등 작물의 상태 특성을 활용한 경험식 위주로 개발된 산정식이 대부분이며, 우리나라 기상 조건의 옥상온실에서 생산되는 청경채와 관련된 전반적인 에너지 흐름을 설명하고 작물의 현열과 잠열이 온실의 에너지 분포에 미치는 영향 정도에 대한 연구는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 옥상온실에서 하절기에 청경채를 재배하며 생육 단계에 따른 현잠열 에너지 교환량을 동적으로 분석하고자 한국기계연구원 옥상온실에서 실험을 수행하였다. 실험 일정은 약 7월 12일부터 8월 5일까지 진행되었다. 작물 주변 미기상과 양액 환경은 상시로 계측하였으며, 생육조사는 5일 간격으로 파괴조사를 실시하였다. 또한 국외에서 개발된 작물에너지 모델에 우리나라의 여름철에 강한 일사량을 그대로 적용할 경우, 일사 강도와 증산율이 비례한 것으로 적용되어 높은 증산율을 가질 것으로 계산된다. 그러나 높은 일사 조건에서는 온도도 상승하며 온실 내 수증기압차 조건을 변화시켜 식물의 기공이 닫히고 증산속도가 감소하는 경향이 있다(Gonzales-Dugo 등, 2007; Del Amor 등, 2010). 따라서, 본 연구에서는 광 강도와 증산율은 양의 상관관계지만 선형관계가 없으므로(Shin 등, 2014), 낮 동안 일사량의 변동이 클 경우의 증산율을 기존의 작물 문헌과 비교하여 관계를 규명하고자 하였다.

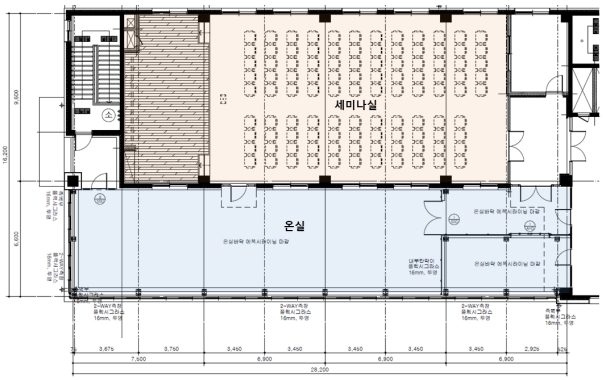
재료 및 방법

1. 대상 온실

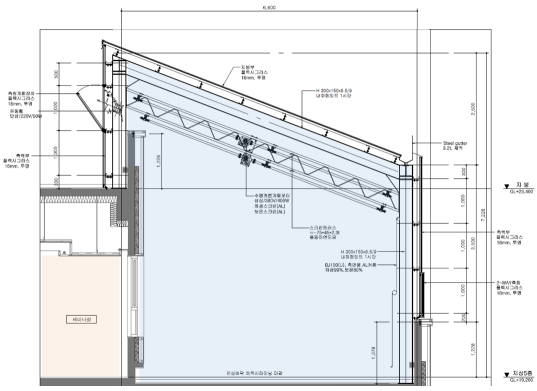
본 연구에서는 대전 소재의 한국기계연구원(36°23′N, 127°21′E)에 있는 옥상온실을 대상 온실로 선정하였다. 온실의 외부기상 관련 자료 구축을 위하여 온실 서쪽에 외부기상대를 설치하여 기온, 습도, 일사, 풍향, 풍속 등의 기상 데이터를 수집하였다. 대상 온실은 단동 외지붕형 유리온실로 Fig. 1과 같이 폭 6.6m, 길이 28.02m, 측고 3.5m, 동고 7.2m로 설계되었다. 온실 내부는 크게 시설 내부의 기계적 시스템 제어를 목적으로 한 전실과 작물 재배를 위한 공간인 생육실로 구분되며, 온실의 북쪽은 건물 세미나실과 접하고 있는 구조이다. 온실의 피복은 16mm 투명 복층 유리로 천정, 측면, 전후면 모두 단일 피복되어 있으며, 바닥은 건물 옥상의 방수를 위해 에폭시

(a) Exterior facility

(b) Internal machine room section



(c) 5th floor plan of a building



(d) Cross-sectional plan

Fig. 1. Target rooftop greenhouse at the Korea Institute of Machinery and Materials (36°23′N, 127°21′E).

라이닝으로 마감되어 있다. 온실은 환기를 위해 남쪽 창이 개폐가 가능하며 북쪽 천정에는 랙앤피니언(rack and pinion) 천창이 설치되어 있어 중력환기에 유리하도록 설계되었다. 생육실 내부에는 전도로 인한 열손실을 줄이기 위한 보온커튼과 일사를 차단하기 위한 차광커튼이 설치되어 있다. 온실의 냉난방을 위하여 가스히트펌프와 팬코일 유닛이 구축되어 있다. Fig. 1에 기계연구원 옥상온실의 내외부 모습과 건물 5층의 온실과 세미나실 구조 도면을 나타내었다.

2. 실험 방법

2.1 작물 재배 방법

대상 온실에서 청경채(*Brassica campestris* ssp. *chinensis*)를 정식하기 전 다음과 같은 과정으로 육묘하였다. 종자를 240공 암면 파종판(Kiemplug standard tray, Grodan, Denmark)에 파종하여 23±2°C, 상대습도 65 − 75% 환경에서 48시간 암처리하였다. 이후 1,200mm 길이의 LED 24W(cool white: deep red, 8:1)를 이용하여 광강도는 180±10μmol·m^{-2}·s^{-1}으로 21일간 육묘하였다. 본엽이 1 − 2매 전개된 시점에서 Hoagland 양액을 공급하였으며, 양액 농도는 EC 1.0dS·m^{-1}로 하였다. 본엽이 3 − 4매 나왔을 때 기계연 옥상온실 내 담액수경(deep flow technique, DFT) 베드에 정식하였다. 정식 후 재배 조건으로는 공기 온도는 주간과 야간에 각각 23±1, 20±1°C이고 습도는 60±10%, 광도는 200μmol·m^{-2}·s^{-1} 이상으로 유지되도록 환경 조건으로 설정하였다. 양액의 산도와 농도는 각각 pH 6.0 − 6.5, EC 1.8 − 2.5dS·m^{-1}로 설정하였다. 또한 식물에서 일정한 화학물질이 생성되어 다른 식물의 생존을 막거나 생장을 저해하는 현상인 타감작용(alleopathy)로 인해 순환식 DFT 재배방식의 양액 교체는 2주에 1회 교체하였다.

작물을 순환식 DFT 베드에서 재배하였으므로 일정기간 동안에 양액의 유입량과 유출량을 측정하여 물수지 계산으로 증발산량을 산정하기 위해 재배조와 재배 탱크를 지지하는 베드 전체의 무게를 측정이 필요하였다. 그래서 5m 길이의 베드 중간에 1m 길이의 간이 베드를 프로파일과 아크릴을 이용해 제작하여 양액이 DFT 베드에서 전체적으로 순환하되, 제작된 베드 내의 무게 변화를 연속적으로 측정하기 위하여 베드 하부에 로드셀을 두어 설계하였다. DFT 재배 시스템의 베드로 물이 순환되어 유입되는 시간은 일사량이 없어서 작물의 증발산량이 미비할 것으로 예상되는 야간 시간에 80W의 다이아프램 펌프(Shurflo Corp., USA)가 작동하도록 타이머를 설정하였다. 또한 작물 주변의 미기상과 양액 환경을 상시로 측정

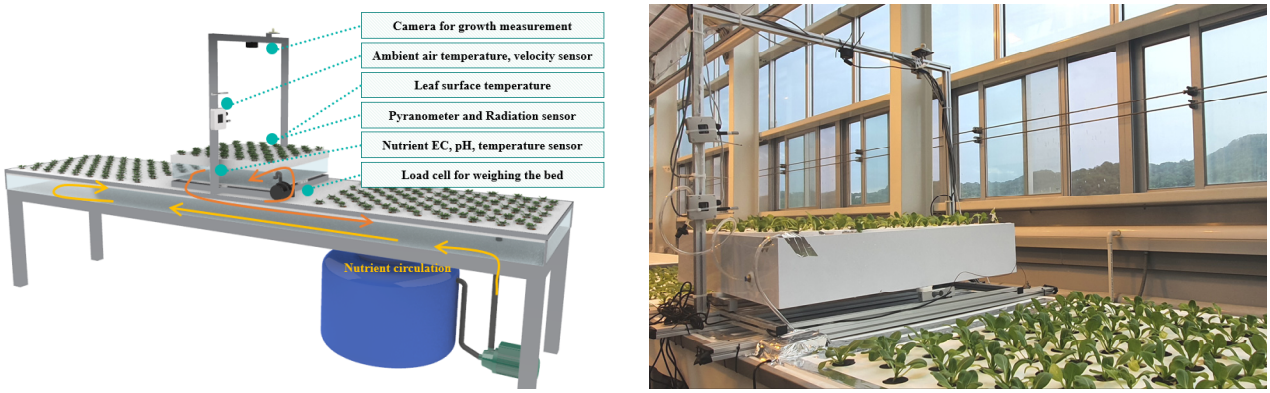


Fig. 2. Sensor location and field view for environmental monitoring in the deep flow technique DFT bed cultivation method.

하는 센서들을 주변에 설치하였으며, 엽온 측정을 위하여 열전대와 열화상 카메라를 이용하였다. DFT 베드 전체에 작물을 정식하여 작물 군집 환경을 형성하고자 하였으며, 생육 조사를 위한 작물은 DFT 베드에서 자라는 작물을 이용하였다. 작물을 재배하고 주변에 설치한 센서들의 조감도와 현장 사진을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 변수 측정 방법

청경채의 생장 단계에 따라 작물과 주변 공기와의 열교환 흐름을 해석하기 위하여 주변 미기상, 양액 환경 인자, 작물 생육 특성 인자를 나누어 모니터링하고 조사하였다(Table 1, Fig. 3). 온실 내부의 미기상 환경 인자 중 공기 온도와 습도는 휴대용 센서(UX100-003, Onset Inc., USA)를 이용하여 측정하였으며, 유사한 위치에 일사계(SP-510-SS, SP-610-SS Apogee Instruments, USA)를 이용하여 내부에 도달하는 광량을 측정하였다. 작물 주변 유속은 열선 풍속계(4-Ch Anemometer Model 1570, Kanomax Corp., Japan)를 이용하였다. 양액 환경은 전기전도도(EC)와 수소이온 농도(pH), 그리고 양액의 온도를 측정하였다. EC와 pH는 각각의 전극 프로브 센서(Irriwa Corp., Korea), 양액 온도는 저항온도 센서(Tantan electrices, Korea)를 이용하였다. 또한, 베드의 무게 변화는 로드셀(CB1-50K, Komein Instrument, Korea)을 베드 밑변 모서리에 4개를 수평을 맞추어 두고 측정하였다. 즉, 증발산율은 주어진 단위시간 내에 베드 무게 변화를 기초로 분석되었다. 식(1)에서 나타내었듯이 물수지 산정법을 이용하여 증발산량을 산정하였다. 일정기간 동안에 유입량과 유출량을 측정하여 증발산량은 이 값 차이로 보며, 이론 자체가 간단하므로 대중적으로 쓰이는 방법이다. 엽온은 작물 잎의 뒷 면에 열전대(Thermal-couple, Ondo, Corp., Korea)를 미세 기공 테이프를 이용하여 부착하여 측정하였다. 언급한 여러 환경 변수들은 데이터 로깅장치(GL-840, Graphtec Inc., USA)에 연결하여 1분 간격으로 연속 측정하였다.

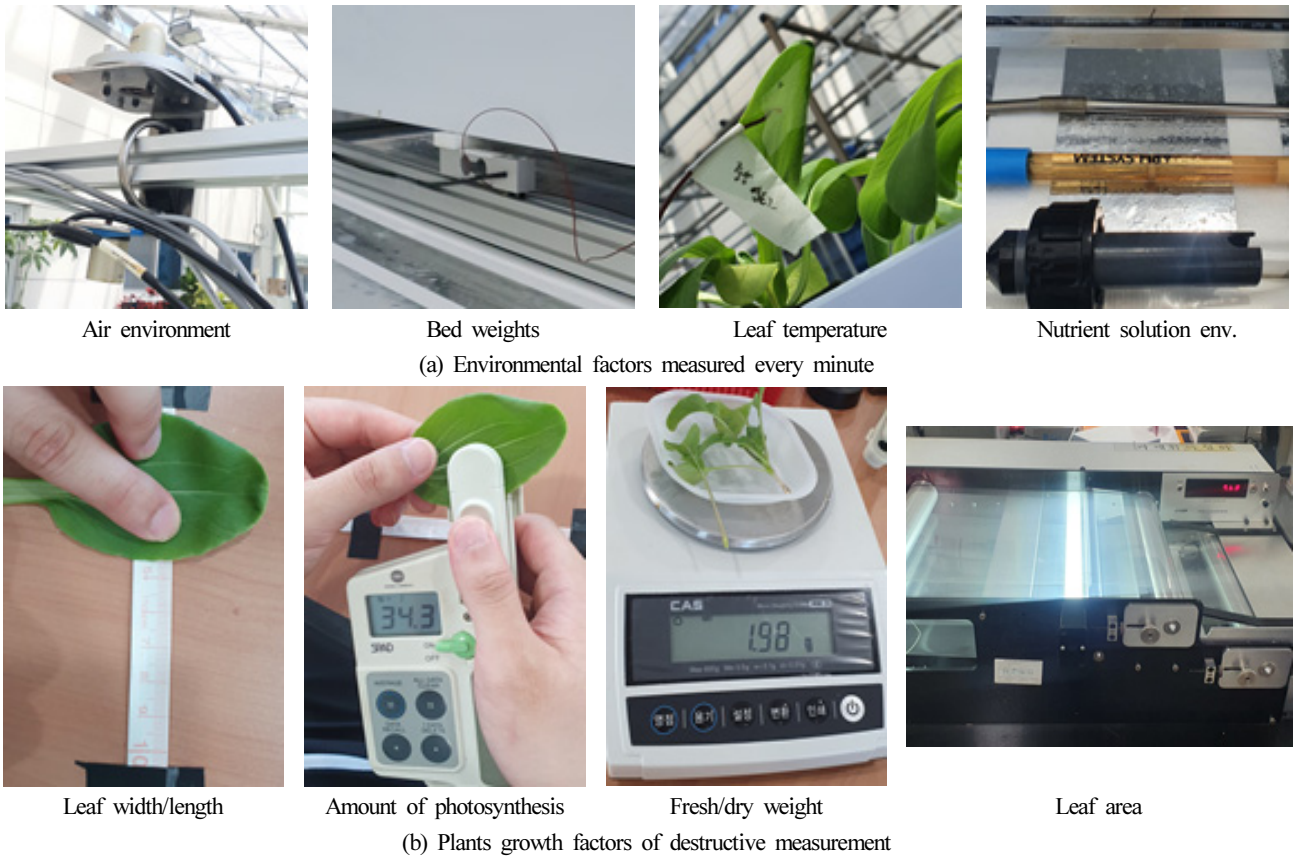
작물의 생장 해석은 최대 엽장, 엽폭, 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중, 엽면적, 엽록소 함량 및 광합성량을 각각 파괴 조사하였다. 생육 조사는 작물을 온실에 정식 후 1일차부터 시작하여 5일 간격으로 8개의 샘플을 측정하였다. 샘플의 한 개체 중 가장 큰 잎을 기준으로 엽장, 엽폭, 엽수, 광합성량을 측정하였다. 엽장과 엽폭은 엽병을 제외한 길이를 측정하였으며, 엽수를 셀 때 1cm 미만의 잎은 무시하였다. 생체중 및 건물중은 지상부(shoot)와 근계(root)를 나누어 측정하였다. 건물중은 70°C의 건조기에서 5일간 건조한 후에 정밀저울(MW2, CAS, Korea)로 측정하였다. 엽록소 함량 측정은 엽록소계(SPAD-502Plus, Minolta, Japan)를 이용하였다. 이 기기는 식물의 건강도를 측정하는 데 필요한 잎의 엽록소(chlorophyll) 함량을 측정하는 계측기이다. 가장 큰 잎을 기준으로 하여 줄기 정단부로부터 아래로 완전히 전개된 잎을 대상으로 엽맥을 제외한 엽면적에서 뒷면의 3점 평균 값을 측정하였다. 엽면적 측정은 엽면적계(LI-3100c, Area meter, LI-COR Inc., USA)를 이용하였다. 이 장비는 엽면적을 측정하여 식물체의 군락 특성을 평가할 수 있는 장비로 분리한 잎 시료를 하단의 투명 벨트 사이로 통과시켜 형광 광원 위를 지나 투사된 이미지가 스캐닝 카메라에 투영되어 잎의 면적을 측정한다. 이 장비를 이용하여 엽면적지수(leaf area index, LAI)를 계산하였고 청경채의 생장 정도를 해석하였다.

$$ET = IRR - DRA + \triangle BDW \quad (1)$$

식(1)에서 ET는 증발산량(mL/min), IRR은 관수량(mL/min), DRA는 배수량(mL/min), BDW는 베드 중량 증가량(mL/min)을 의미한다.

Table 1. Sensor type and resolution used in the experiment.

Sensor type	Measurement factor	Resolution
UX100-003	Temperature, Humidity	T: 0.024°C, RH: 0.07% at 25°C
SP-510-SS	Solar radiation	0.045 mV per W/m^2
Anemometer Model 570	Wind velocity	0.01 m/s at range of 0 to 9.99 m/s
Nutrient solution sensor	EC, pH	EC: 0.1 dS/m, pH: 0.1
PT100	Water temperature	0.1°C
CB1-50K	Weight of bed	1.5 mV/V ± 1%
Thermal-couple	Temperature at leaf	0.1°C
SPAD-502plus	Chlorophyll content	0.1 SPAD
LI-3100c	Leaf area	1 mm^2



Air environment　Bed weights　Leaf temperature　Nutrient solution env.

(a) Environmental factors measured every minute

Leaf width/length　Amount of photosynthesis　Fresh/dry weight　Leaf area

(b) Plants growth factors of destructive measurement

Fig. 3. Devices measuring variables in greenhouse and plants.

3. 작물에너지 모델

온실 내부에 형성되는 미기상 환경(공기온도, 상대습도, 일사량)은 청경채 엽온의 변화를 일으키며, 엽온과 더불어 실시간 미기상 환경 변화로 인하여 청경채의 증발산량에 대한 차이를 발생시킨다. 따라서, 온실에서 일반적으로 모니터링 되는 환경변수가 아닌 엽온과 증발산량을 온실 내부 미기상 환경변수로부터 예측하기 위하여 다중회귀모형을 설계하였다. 작기 중 청경채의 생장은 sigmoid 형태를 나타내며, 생장에 따른 엽온과 증발산량에 대한 다중 회귀식을 설계하고 설계된 회귀식은 온실 BES 모델 내 청경채의 에너지 교환 특성을 고려하기 위하여 적용되었다. 설계된 엽온 추정 모델은 작물의 현열을 산정함에 있어서 식(2)와 같이 적용되었고, 증발산량 추정 모델은 잠열을 산정함에 있어서 식(4)와 같이 적용되었다.

$$Q_{CropSen} = \frac{f(day) \cdot \rho_a \cdot c_p(f(T,\ H,\ R) - T_a)}{r_a} \quad (2)$$

$$T_L = f(T, H, R) \quad (3)$$

$$Q_{CropLat} = \lambda \cdot ET \quad (4)$$

식(2)에서 $Q_{CropSen}$는 작물 생육에 따른 현열에너지 교환량(W/m^2), day는 정식 후 일수, ρ_a는 공기 밀도(g/mL), C_p는 공기 비열(kcal/kg°C), T는 공기 온도(°C), H는 공기 상대습도(%), R은 일사량(W/m^2), r_a는 기공저항(s/m)을 의미한다. 식(3)에서 T_L은 잎의 표면온도(°C)를 의미하고, 식(4)에서 $Q_{CropLat}$는 작물 생육에 따른 잠열에너지 교환량(W/m^2), λ는 증발 잠열량(W/kg), ET는 증발산량(kg)을 의미한다.

결과 및 고찰

1. 환경 인자 모니터링

옥상온실에 청경채를 정식하고 나서 일별로 외부기상 조건을 먼저 분석하였다. Fig. 4는 실험 기간 동안의 평균 기온 양상을 보여준다. 순복사량은 화창한 날이 410W/m^2으로 가장 높았으며, 구름이 있는 날은 200W/m^2으로 측정되었다. 상대습도는 60 – 85% 사이의 값을 보였으며 기온은 야간에 25°C 값에서부터 더울 때 30°C까지 증가하였다. 일사량이 높을 때 공기가 머금을 수 있는 수증기 양이 늘어나므로 상대습도가 낮아지는 반대 경향을 확인할 수 있다. 증발산량은 수증기압차에 의해 결정되는데, 수증기압차는 기온과 상대습도에 의해 결정된다. 외부 기상이 증발산량에 큰 영향을 미치는 것을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

기상 인자들과 증발산량의 관계성을 더 잘 파악하기 위해 Pearson correlation analysis를 수행하였다. Table 2 결과에 따르면, 증발산량과 일사량 및 광합성유효방사는 양의 상관관계를 가지고 있는 것을 볼 수 있고, 증발산량과 상대습도는 음의 상관관계를 가지고 있는 것을 확인할 수 있다. 한편, 증발산량과 기온은 별 상관관계가 없는 것으로 나타났다.

온실 내부와 외부 환경 모니터링을 비교한 결과는 Table 3에 나타내었다. 온실 내부에서 평균 기온과 표준편차는 각각 28.5°C와 4.2°C를 나타냈으며, 상대습도는 64.8%(표준편차: 10.8%)로 나타났다. 밤 동안의 여름철 최대 37.4°C까지 온도가 올라가지만 온실 내부 평균 온도는 39.9°C(최소: 21.6°C, 표준편차: 4.2°C)를 보였다. 상대습도는 64.8%(표준편차: 10.8%)를 보였다. 여름철에 온실에서 주간에는 자연환기를 하며 냉방기를 가동해도 적정 생육 온도를 맞출 수 없다. 그래서 야간 동안에 생육온도를 낮추어 작물의 고온스트레스를 막기 위해 상시로 냉방기를 가동하였기 때문에, 온실임에도 불구하고 외부 평균 기온과 내부 공기 온도가 크게 차이나지 않고, 내부 상대습도가 평균 64%이며, 최대 96%까지만 도달한 것으로 보인다.

우리나라의 연평균 일사량은 약 1,450kWh/m^2로 작물 모델이 주로 개발된 유럽은 1,000 – 1,200kWh/m^2에 비해 일사량이 많다(Masson과 Kaizuka, 2019). 실험 기간 동안 옥상온실 외부 기상대에서 측정한 일사량은 4,820MJ/m^2으로 우리나라 연평균 일사량의 94% 수준으로 높은 일사가 유입되었다. 청경채와 온실 내부에 주변 공기는 열에너지 균형을 이룰 때까지 지속적인 열 교환을 한다. 잎의 표면온도는 전체 실험 기간 동안 평균 25.8°C(표준편차: 5.7°C)을 보였으며, 온실 내 기온과 엽온을 비교하면 2.7°C 정도 온도차가 발생하였다. 밤 동안에도 평균 엽온이 23.4°C 로 주변 공기온도보다 낮은 온도를 유지하였다. 또한 낮 동안의 엽온은 밤보다는 4.8°C 더 높은 28.2°C로 나타냈고, 낮 동안 최대 34.4°C까지 증가하였다.

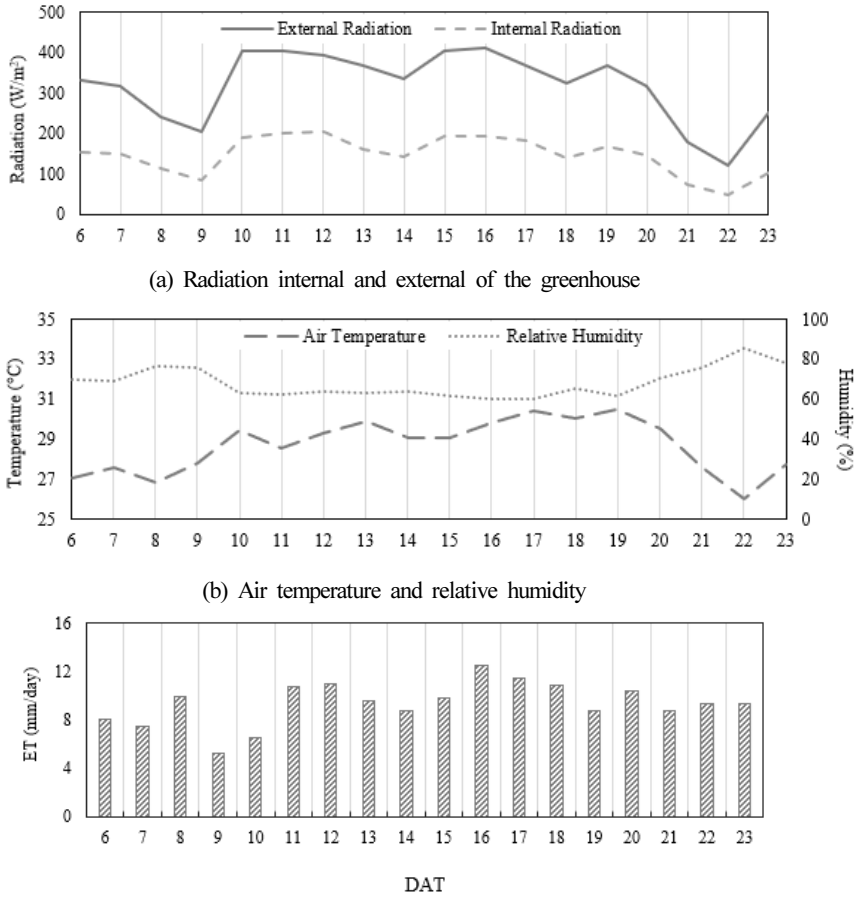
2. 작물 생육조사

청경채를 정식 후 5일 간격으로 파괴하며 생육 특성 인자들을 조사한 데이터를 토대로 생육 단계 값을 작물에너지에 같이 고려하고자 하였다. Fig. 5는 엽면적 지수 값의 변화를 확인할 수 있으며, 엽채류의 생장 정도를 나타내기 위하여 엽장 및 엽폭과 지하부, 지상부의 생체중도 보여주었다. (a)는 정식 후 14일 차에 옥상온실 내 DFT 베드에 정식한 것으로 정식 15일 차에 엽면적 지수가 3.0에 도달하는 것을 보여준다. 정식 이후 일수에 대한 엽면적지수 추정에 있어서 식(5)와 같은 3차 다항식 형태로 나타났다(R^2 = 0.99). (b)는 엽면적지수의 변화율을 나타낸 것으로, 그 변화율이 정식 후 5 – 15일 사이에 피크값인 60%에 도달하고 나서 증가 속도 자체는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. (c)에는 엽수와 엽장을 나타내었으며, (d)에는 지상부와 지하부의 생체중을 나타내었다. Table 4는 잎의 생장 양상을 분석하기 위하여 지하 및 지상부를 촬영하였고, 제작한 베드 위의 작물 군집을 나타내었다.

$$LAI = -0.0007(day)^3 + 0.0361(day)^2 - 0.2197(day) + 0.4476 \quad (5)$$

3. 작물에너지 모델 추정

청경채의 생장 단계에 따라 설계된 엽온과 증발산량 추정을 위한 다중 회귀식은 식(6) – (11)에 나타내었다. 엽면적지수 생장률에 따라 60%보다 낮을 때, 유지될 때, 그리고 생장 후반의 다시 감소할 때로 3단계를 나누어 각각 회귀식을 분석하였



(a) Radiation internal and external of the greenhouse

(b) Air temperature and relative humidity

(c) Evapotranspiration

Fig. 4. Greenhouse climate factors and measured actual average daily evapotranspiration.

Table 2. Correlation analysis of climate factors with evapotranspiration (ET).

	ET	Radiation	Air temperature	Relative humidity
ET	1	0.91	0.53	-0.67
Radiation		1	0.58	-0.75
T_{air}			1	0.83
RH				1

Table 3. Monitoring of air environment in and out greenhouse (Jul. 17. 2021 – Aug. 3. 2021, KIMM).

Classification	Avg	Max	Min	Dev
Internal temperature (°C)	28.5	39.9	21.6	4.2
External temperature (°C)	28.7	37.4	22.1	2.9
Internal relative humidity (%)	64.8	96.0	36.0	10.8
External relative humidity (%)	68.3	94.0	38.0	15.1
Internal solar radiation (W/m^2)	147.7	868.0	-	-
External solar radiation (W/m^2)	319.4	1453.1	-	-
Leaf temperature (°C)	25.8	34.4	19.3	5.7

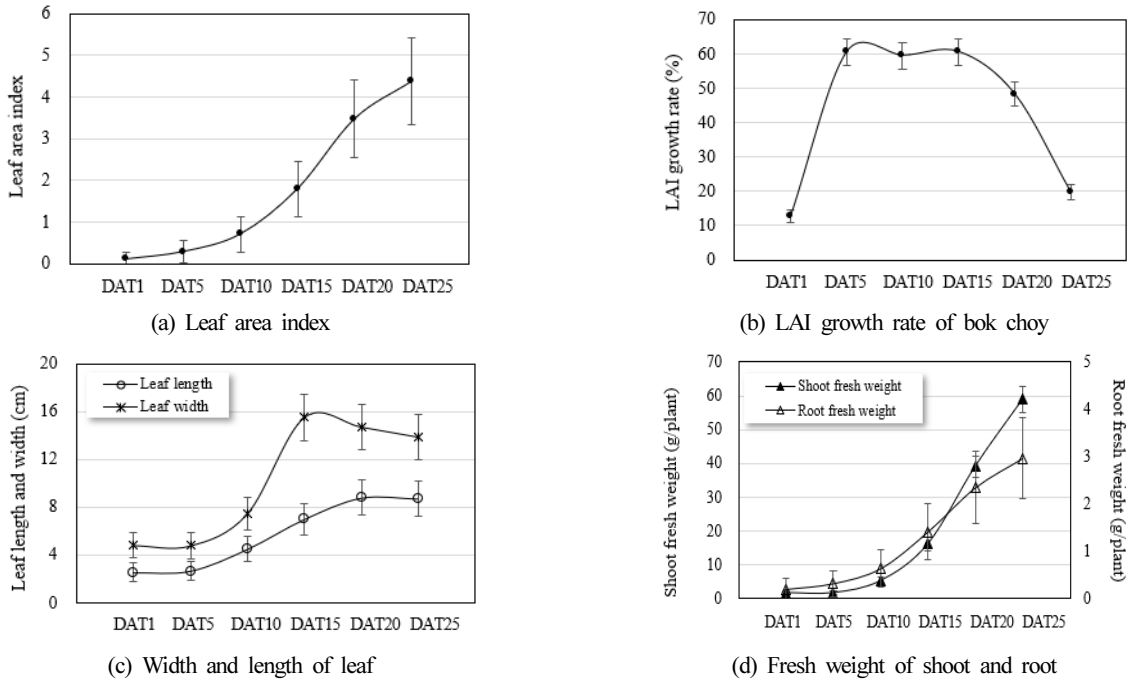
다. 다중 회귀식을 통하여 추정된 청경채의 증발산량과 현장 실험을 통하여 측정된 증발산량의 상관관계(R)는 0.68 – 0.74로 약한 양의 상관관계를 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다 (R^2 = 0.54). 추정된 회귀 모델의 적용시에는 평균 0.95g/hr의 오차를 보였다. 또한, 다중 회귀 모델을 이용하여 추정된 청경채의 엽온과 실측한 엽온의 상관관계(R)는 0.92 – 0.98로 강한 양의 상관관계를 가지며(R^2 = 0.96), 추정된 엽온과 실측한 엽온의 절대 오차에 대한 평균값은 0.7°C로 나타났다.

$$ET_1 = -54.625 + 5.652T + 0.271H - 2.851T_L + 0.524R \quad (6)$$

$$ET_2 = -32.525 + 0.758T + 0.325H - 0.169T_L + 0.201R \quad (7)$$

$$ET_3 = 26.248 + 3.821T + 0.514H - 1.257T_L + 0.248R \quad (8)$$

$$T_{L_1} = 4.348 + 0.783T + 0.016H - 0.007R \quad (9)$$



(a) Leaf area index (b) LAI growth rate of bok choy

(c) Width and length of leaf (d) Fresh weight of shoot and root

Fig. 5. Changes in factors according to the growth of bok choy.

Table 4. Image analysis according to growth of leafy vegetable crops.

DAT 1	DAT 5	DAT 10	DAT 15	DAT 20

$$T_{L_2} = 0.894 + 0.152T + 0.025H - 0.002R \quad (10)$$

$$T_{L_3} = 2.812 + 0.624T + 0.028H - 0.004R \quad (11)$$

적 요

본 연구는 급속하게 성장하는 시설농업과 동시에 증가하는 에너지 사용량 및 탄소배출량을 저감하기 위해, 온실의 에너지 부하를 동적으로 분석하기 위한 작물에너지의 다중 회귀 모델 개발을 수행하였다. 온실은 연중 안정적인 대량 생산을 위한 적절한 환경을 조성하기 위해 에너지 투입이 필요하다. 도시농업의 일종인 옥상온실 플랫폼을 통해 건물에서 버려지거나 활용되지 않는 에너지를 옥상온실에서 사용할 수 있다. 옥상온실의 효율적인 운영을 위해서는 다양한 환경 조건에 대한 동적 에너지 분석이 선행되어야 하며, 온실에 도입되는 태양 에너지의 40 – 75%가 작물을 위한 에너지 교환이므로 필수적으로 고려되어야 한다. 한국기계연구원 내 옥상온실에서 여름철에 청경채를 재배하며 생장단계에 따른 에너지 교환을 분석하였다. 작물을 중심으로 미기상 및 양액 환경 분석과 생장 특성 조사를 수행하였다. 정식일수에 따른 엽면적지수를 추정하였으며, 개발된 수식은 결정계수 0.99로 분석되었다. 또한 작물에너지 흐름에 지배적인 잎 표면온도로부터의 현열부하와 증발산에 의한 잠열부하로 나누어 모델을 개발하였다. 엽온과 증발산량을 각각 다중 회귀모델을 이용하여 추정하고 실측한 값을 비교해 보았을 때, 평균 결정계수 0.95, 0.71로 분석되었으며, 이 모델을 이용하여 옥상온실의 에너지 부하를 동적으로 산정하기 위한 모델에 입력값으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

추가 주제어: 도시 농업, 열전달, 옥상온실 에너지, 증발산, 청경채

사 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20212020800050).

Literature Cited

Ahamed M.S., H. Guo, and K. Tanino 2018, Development of a thermal model for simulation of supplemental heating requirements in Chinese-style solar greenhouses. Comput Electron Agric 150:235-44. doi:10.1016/j.compag.2018.04.025

Boulard T., and A. Baille 1987, Analysis of thermal performance of a greenhouse as a solar collector. Energy Agric 6:17-26. doi:10.1016/0167-5826(87)90018-0

Del Amor F.M., P. Cuadra-Crespo, D.J. Walker, and R.M. Camera 2010, Effect of foliar application of antitranspirant on photosynthesis and water relations of pepper plants under different levels of CO_2 and water stress. J Plant Physiol 167:1232-1238. doi:10.1016/j.jplph.2010.04.010

Eumorfopoulou E., and D. Aravantinos 1998. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. Energy Build 27:29-36. doi:10.1016/S0378-7788(97)00023-6

Gonzales-Dugo V., F. Orgaz, and E. Fereres 2007, Responses of pepper to deficit irrigation for paprika production. Sci Hortic 114:77-82. doi:10.1016/j.scienta.2007.05.014

Kim Y.J., Y.G. Park, J.M. Lee, and J.H. Park 2021, Mid to long term outlook of carbon dioxide emission and reduction target for horticulture carbon neutrality. Proceedings of the Fall Academic Presentation of the Korean Society of Industrial Academia and Technology.

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

Masson G., and I. Kaizuka 2019, Trends in photovoltaic application 2019. International Energy Agency, Paris, France.

Mobtaker H.G., Y. Ajabshirchi, S.F. Ranjbar, and M. Matloobi 2019, Simulation of thermal performance of solar greenhouse in north-west of Iran: An experimental validation. Renew Energy 135:88-97. doi:10.1016/j.renene.2018.10.003

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) 2020, Greenhouse cultivation present condition and product statistic. MAFRA, Sejong, Korea.

Rural Development Administration (RDA) 2018, Horticultural facility energy diagnosis & consulting manual. RDA, Jeonju, Korea.

Shakir S.M., and A.A. Farhan 2019, Movable thermal screen for saving energy inside the greenhouse. Association of Arab Univ J Eng Sci 26:106-112. doi:10.33261/jaaru.2019.26.1.014

Shin J.H., J.S. Park, and J.E. Son 2014. Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants. Agric Water Manag 135:9-18. doi:10.1016/j.agwat.2013.12.009

Singh M.C., J.P. Singh, and K.G. Singh 2018, Development of a microclimate model for prediction of temperatures inside a naturally ventilated greenhouse under cucumber crop in soilless media. Comput Electron Agric 154:227-238. doi:10.1016/j.compag.2018.08.044

United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN DESA) 2019, World urbanization prospects: the 2018 revision. UN, NY, USA.

Yoo N.H. 2016, Development of smart farm system for minimizing carbon emissions. J Kor Inst Electron Commun Sci 11:1231-1236. doi:10.13067/JKIECS.2016.11.12.1231