고온 지중 계간축열시스템을 갖는 온실의 태양열 난방시스템 장기 열성능평가

임희원¹ · 이현승² · 이왕제³ · 신우철^{4†}

¹대전대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

²한국교육녹색환경연구원, 연구원

³한국에너지기술연구원 신재생열융합연구실, 기술원

⁴대전대학교 건축공학과, 교수

Long-Term Thermal Performance Evaluation of a Solar Heating System of Greenhouse with High Temperature Underground Seasonal Thermal Energy Storage

Lim Hee-Won¹ · Lee Hyun-Seung² · Lee Wang-Je³ · Shin U-Cheul^{4†}

¹Ph.D.Candidate, Department of Architectural Engineering, Graduate School, Daejeon University

²Researcher, Korea Institute of Sustainable Design and Educational Environment

³Engineer, Renewable Heat Integration Laboratory, Korea Institute of Energy Research

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Daejeon University

[†]Corresponding author: shinuc@dju.ac.kr

Abstract

In this study, we analyzed the long-term feasibility of a solar heating system for a citrus greenhouse to address the financial difficulties facing farms and to reduce greenhouse gas emissions. The solar heating system consisted of an auxiliary boiler, a solar storage tank with a capacity of 100 m³ and a cylindrical borehole thermal energy system (BTES) with a storage volume of 2,905 m³. We installed an evacuated tube collector and flat-plate collector (both with a capacity of 302 m²) to measure and compare each solar fraction and thermal storage efficiency. TRNSYS 18 was used as the simulation tool. The annual solar fraction was found to be 83.2%, and the efficiency of thermal storage was 35.7%. In this case, the efficiency of evacuated tube collector and flat-plate collector was 68.7% and 33.2% respectively. This shows that the evacuated tube collector, operating at a relatively high temperature, was more efficient than the flat-plate collector. Despite the high solar fraction, the maximum operating temperature of the solar storage tank was 90° or less, indicating that the tank was less likely to fail due to overheating.

Keywords: 만감류(Citrus), 보어홀 열저장(Borehole thermal energy storage), 온실(Greenhouse), 태양열시스템(Solar heating system), 태양의존율(Solar fraction)

기호 및 약어 설명

f : 태양의존율

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.6, pp.59-72, December 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.6.059>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 27 August 2021

Revised: 18 October 2021

Accepted: 9 November 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- I_T : 집열면 총일사(W)
 q_{col} : 집열열량(W)
 Q_{aux} : 보조보일러 공급열량(W)
 Q_{Load} : 난방부하(W)
 Q_{ext} : BTES 방열열량(W)
 Q_{inj} : BTES 축열열량(W)
 η_{BETS} : 축열효율(%)
 η_{solar} : 집열효율(%)

1. 서론

제주지역 특화작물로 한정되었던 만감류 등 아열대 작물의 재배면적이 중부 이남 지역으로 확대되고 있다. 지구온난화에 따른 긍정적인 측면으로 아열대작물 재배는 생산농가에게 새로운 소득원으로 관심이 높아지고 있기 때문이다. 그러나 온난한 제주지역에서도 별도의 난방장치가 없는 비가온온실은 냉해와 습해에 취약한 실정으로 가온재배 면적이 꾸준한 증가 추세에 있다. 제주지역 가온재배 만감류가 농가 경영비에서 광열비가 차지하는 비중이 44%로 전체 원예작목 중 가장 높으며 장미 36%, 가지 34% 등 시설채소나 시설화훼에서 광열비 비중이 높은 작목과 비교해도 매우 높은 수준이다¹⁾. 이는 농가 경영난의 주요인으로 작용하고 있으며, 특히 국제유가 상승시 농가경영 여건 변동에 취약한 구조를 나타내고 있다²⁾. 또한 지구온난화 등 기후변화문제를 고려할 때 농업부문의 에너지 소비에 따른 온실가스 배출도 시급한 과제로 제시되고 있다. 이에 따라 농업부문의 경영난 해소와 온실가스 배출 감축 방안으로 “농업에너지이용효율화사업”에서 지열 및 공기열 히트펌프, 폐열 재이용, 목재 펠릿 보일러 등으로 한정된 신재생에너지 보급 및 기반구축사업에서도 태양광발전 및 태양열, 연료전지 등의 확대 적용이 추진되고 있다. 이 가운데 태양열시스템은 무한한 태양복사를 열의 형태로 변환하여 다양한 용도(급탕 및 난방, 건조, 냉방, 산업공정열 등)에 활용되는 고효율의 재생에너지시스템으로 기술적 안정성과 신뢰성을 기반으로 하고 있다. 최근 농수산물 태양열 건조기의 보급과 더불어 온실 가온을 위한 태양열 난방시스템의 개발과정에서 비 난방기간의 집열된 잉여열을 저장하기 위한 대용량 장기 계간 축열조 확보가 주요 현안이 되고 있다.

농업용 태양열난방시스템과 관련한 주요 연구동향을 살펴보면, Xu et al.은 온난 습윤 기후에 속한 중국 상하이 지역 2,304 m²의 온실을 대상으로 500 m²의 진공관형 태양열집열기와 4,970 m³의 축열용량을 갖는 보어홀 계간축열시스템의 장기 열성능을 실험을 통해 분석하였다³⁾. 식물 선반과 지면에 설치된 열교환 튜브를 통해 난방 공급되는 방식으로 동절기 온실 내부온도는 최저 10℃로 설정된 상태에서 가동 첫째 태양의존율은 100%로 나타났으며, 이 중 50.6%를 지중 계간축열조가 담당하였다. Zhang et al.은 온실 난방부하와 태양열시스템 열공급 사이의 불일치 문제를 해결하기 위해 저가의 지중 계간축열시스템을 제안하였다⁴⁾. 상하이 지역 231 m²의

온실을 대상으로 30 m²의 진공관형 태양열집열기와 깊이 15 m의 25개 보어홀로 구성된 계간축열시스템의 열 성능을 TRNSYS를 통해 분석하였으며, 그 결과 동절기 연속되는 춥고 흐린날의 경우에도 서리 방지를 위한 보조열원이 필요하지 않았으며 온실 내부온도를 연중 12°C 이상으로 유지할 경우 온실의 단위면적당 연간 에너지 절약량은 27.8 kWh로 나타났다. Semple et al.은 냉대 습윤 기후대에 속하는 캐나다 온타리오주 남서부의 4,000 m² 온실을 대상으로 각각 2,009 m²와 861 m²의 평판형 태양열 집열기로 구성된 고온 및 저온 지중 계간 축열시스템의 열성능을 분석하였다⁵⁾. 지중 계간축열시스템은 30 m 깊이 120개의 보어홀을 고온 및 저온방식에 따라 각각 2.5 m와 3 m 간격으로 설계되었다. 지중 축열온도가 40°C를 초과하는 고온방식의 경우 직접 난방이 공급되었으며, 40°C 미만인 저온방식에서는 히트 펌프가 적용되었다. 주간과 야간의 온실온도를 각각 22°C와 18°C로 설정한 상태에서 TRNSYS 시뮬레이션을 통해 해석된 피크부하 및 연간 난방부하는 각각 800 kW와 1,440 MWh로 나타났으며, 두 시스템의 난방공급량은 연간 난방부하의 약 64%에 도달하였다. Park et al.은 전남 광주지역 애호박 재배를 위한 660 m²의 유리온실을 대상으로 419 m²의 평판형 집열기와 깊이 59 m의 35개 보어홀로 구성된 계간축열시스템의 열성능을 TRNSYS를 통해 분석하였다⁶⁾. 159MWh의 연간 총 난방부하를 기준으로 태양의존율과 보어홀 계간축열시스템의 연간 축열효율이 각각 84%와 42%로 나타났다. 여기서 난방 부하는 침기와 주간의 일사 등이 배제된 난방도일법(18°C 기준)으로 해석되어 다소 과다하게 추정된 것으로 판단된다. 상기와 같이 전세계 다양한 기후조건에서 보어홀 타입의 지중 계간축열조를 갖는 온실의 태양열난방시스템 개발연구가 수행된 바 있으나, 국내의 경우 재배작물의 생육조건 분석과 이에 따른 온실 부하해석이 다소 미흡하여 정확한 시스템 설계자료가 부족한 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 아열대 작물 재배를 위한 2300 m²의 온실을 대상으로 지중 계간축열시스템을 갖는 태양열난방시스템의 구현 가능성을 검토하였다. 비 동절기 잉여 태양열을 저장하기 위한 고온방식의 보어홀 지중축열시스템이 적용되었으며, 집열기 유형에 따른 동적 열성능 분석을 위한 시뮬레이션 도구로 TRNSYS를 사용하였다.

2. 온 실

2.1 재배작물

만감류는 FTA 시설지원사업에 따른 작형 전환과 상대적으로 소득이 높아 타 품종에서의 전환 영향으로 최근 제주도 이외 내륙지역(호남·영남·경기)에서의 재배면적이 늘어나고 있다. 특히, 2020년 경북지역 재배면적은 2019년 대비 약 3배 확대되었다⁷⁾. 따라서 본 연구에서는 아열대 재배면적 증가세가 뚜렷한 경상북도 영천시를 중심으로 만감류 재배에 대하여 검토하였다.

Table 1과 Table 2는 만감류 생육조건 및 영천지역의 기후조건을 각각 나타낸 것이다. 만감류는 생육 초기 3월 중하순에 온도를 높여 줄수록 발아가 빨라지고, 야간 온도를 높게 유지하면 생육이 왕성해 짐에 따라 이 시기의 온도관리가 중요하다⁸⁾. 영천시의 기후조건을 고려할 때 11월부터 4월까지 지속적인 난방공급이 요구되는 것을 알 수 있다. 분석을 위한 영천지역(위도 : 36.1°, 경도 : 129°)의 기상자료는 한국표준과학연구원에서 제공

하는 국가참조표준기상데이터⁹⁾를 사용하였다.

Table 1 Growing conditions of citrus

Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Growing state	Ripening period			Germination	Bloom	June drop		Fruit hypertrophy			Coloring	Ripening period
Temp. (°C)	Max.	Natural Temp.	25	27 ~ 30	28 ~ 30	30		Natural temperature			20	10 ~ 15
	Min.	0 ~ 2		15				Natural temperature			15	0 ~ 2

Table 2 National reference weather data of Yeongcheon city

Month		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperature (°C)	Max.	7.3	17.4	16.9	27.2	30.9	32.9	34.1	35.5	27.8	22.4	20.1	15.1
	Min.	-9.9	-10.3	-4	-1.1	7.4	13	17.6	17.1	11.5	3.6	-4.8	-13.6
	Ave.	-1.7	0.7	5.3	11.7	17.2	21.4	24.7	24.5	19.2	13.2	6.9	-0.6
Insolation (kWh/m ² mon)		78.3	90.0	134.3	141.3	189.8	119.4	124.5	141.3	119.5	111.3	87.6	82.2

2.2 온실구조

온실의 구조형식에 따라서 단동형(Single-span)과 연동형(Multi-span)으로 Fig. 1과 같이 구분된다. 아치형의 지붕이 하나인 단동형 온실은 소규모 농가에서 많이 사용하고 있으며 2018년 기준 국내 비닐하우스 농가의 약 85%인 약 44,000 ha를 차지하고 있다. 이에 반해 지붕을 두 개 이상 연결해서 붙인 모양의 연동형 온실은 대규모의 재배단지에 유리한 형태로 단동형에 비해 열손실 면적이 상대적으로 적고 통풍이 잘되는 등 환경이 쾌적하며 기계화 농사에 효율적인 구조로 점차 시설면적이 증가하고 있다¹⁰⁾.

본 연구에서는 비용 절감효과와 토지이용률이 높은 연동형 온실을 대상으로 만감류 재배를 검토하였다. 2,300 m²의 면적을 갖는 온실은 자연환기 개폐창 및 강제 환기시스템을 갖는 반 밀폐형 구조로 동절기 열손실 방지를 위하여 온실내부에 개폐 가능한 단열커튼과 하절기 과도한 일사유입 방지하기 위한 가동형 외부 차양막을 설치하였다.

Fig. 1 Types of greenhouse

3. 시스템해석

지중 계간축열시스템을 갖는 만감류 재배 온실의 태양열 난방시스템 분석을 위한 시뮬레이션 도구로 TRNSYS 18을 사용하였다. 온실의 난방부하 해석을 선행하였으며, 그 결과를 기반으로 시스템을 분석하였다.

3.1 시스템 모델

Fig. 2는 태양열집열기가 설치된 온실의 전경을 나타낸 것이다. 태양열 집열기는 남북으로 설치된 온실의 북쪽에 설치하게 된다. 연동형의 경우 남북으로 유지하는 것이 아침과 저녁에 투광량이 많아져서 온도 상승이 빠르고 작물의 광합성 이용률도 높기 때문에 유리하다¹¹⁾.

Fig. 3은 지중 계간축열시스템을 갖는 온실의 태양열 난방시스템 계통도를 나타낸 것이다. 동절기 태양열집열기에 의해 집열된 태양복사에너지는 태양열 축열조로부터 직접 난방공급(난방공급 최저온도 40℃)되며, 난방부하가 없는 중간기 및 하절기의 잉여 태양열은 지중 축열되어 동절기 난방 열원으로 사용되고 부족할 경우 보조열원이 작동된다.

Fig. 2 View of a greenhouse with solar heating system

Fig. 3 Schematic diagram of solar heating system with seasonal storage for greenhouse

3.2 온실 난방부하 해석모델

Table 3은 온실의 주요 사양을 나타낸 것이다. 온실의 외피는 1중 폴리에틸렌(Polyethylene) 필름이 사용되었으며, 침기횟수는 0.5회/h (ACH)로 가정하였다¹²⁾. 동절기 열손실을 감소시키기 위한 단열커튼은 온실 내부의 상부와 측면에서 일출 및 일몰 시에 개폐되며 하절기에는 자연환기나 강제환기 시스템 및 가동형 외부차양 작동을 통해 과열을 억제하게 된다. 따라서 본 연구에서는 만감류 재배 온실의 난방부하는 없는 것으로 가정하였다.

온실에 대한 현열 난방부하는 Table 1의 최저온도(0 ~ 2°C를 5°C로 상향 설정)를 기준으로 지중 및 외피를 통한 관류열전달 및 침기, 일사 등을 고려하여 비정상 해석된다. Table 4는 온실의 난방부하 해석을 위해 사용된 TRNSYS 모델의 주요 컴포넌트를 나타낸 것이다. 중간기 및 하절기 온실의 과열방지를 위한 강제환기는 Type 534를 통해 구현하였으며, 바닥 열전달은 장방향 슬래브에 대해 ASHRAE의 근사법(Simplified method)이 적용된 Type 714을 사용하였다.

Table 3 Greenhouse characteristics

Items		Contents
Size	Area	2300 m ² (90 m × 25.6 m)
	Gutter height	5.75 m
	Ridge height	7.25 m
Cover	Material	Polyethylene film
	U-value	5.72 W/m ² K
	Solar transmittance	0.84
Insulation curtain	U-value	2.49 W/m ² K
	Operating time	pm 4 ~ am 9
Infiltration rate		0.5 ACH
Ventilation system	Operation temperature	over 30°C
	Ventilation rate	50 ACH

Table 4 Main components of TRNSYS model for the thermal load of greenhouse

Components	Type	Descriptions
Multi-zone building	56	Greenhouse
Slab Heat Loss	714	No Under-Floor Insulation: ASHRAE approach
Air-Side Economizer	534	Natural ventilation

3.3 태양열시스템 해석

본 연구에서 저온 응용분야(100°C 이하)에 적합한 이중 진공관형 집열기(Evacuated tube collector, ETC)과 평판형 집열기(Flat-plate collector, FPC)를 비교 분석하였다. Table 5는 태양열시스템의 주요 사양을 나타낸

것이다. 전면적 기준 집열기 총 설치면적은 약 320 m^2 로 각각 140개와 160개가 설치된다. 정남향으로 배치된 집열기의 경사각은 의장적 측면과 주변 온실의 그림자 영향을 최소화하기 위해 30° 로 설정하였다. 시스템 제어는 차온제어(On/off differential controller) 정유량방식을 적용하였으며, 이에 따른 집열기 단위면적당 집열 및 축열 순환유량은 $30 \text{ kg/m}^2\text{h}$ 를 기준으로 하였다.

Fig. 4는 두 집열기의 입사각 수정계수(Incident angle modifier, 이하 IAM)를 나타낸 것이다. 여기서 이중 진공관집열기의 IAM은 세로(Longitudinal)와 가로(Transverse) 성분으로 구분된다. 이중 진공관형 집열기의 입사각 손실이 평판형에 비해 상당히 적은 것을 알 수 있다.

시스템의 작동은 태양열축열조 중상단부 온도가 40°C 이상일 때 난방으로 공급되며, 60°C 를 초과할 때 지중 축열된다. 이어서 축열조 상단부 온도가 40°C 미만이 될 때 축열된 지중으로부터 난방 열공급이 이루어지고 부족할 때(지중 출구온도 40°C 이하) 보조보일러가 가동된다.

Table 5 Solar heating system characteristics

System's components	Contents	Remarks
Evacuated tube solar collector	Size	$1.635 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 0.09 \text{ m}$
	Zero loss efficiency	0.466
	Efficiency slope	$1.0953 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Efficiency curvature	$0.0029 \text{ W/m}^2\text{K}^2$
Flat-plate solar collector	Size	$2 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.076 \text{ m}$
	Zero loss efficiency	0.7585
	Efficiency slope	$3.6403 \text{ W/m}^2\text{K}$
	Efficiency curvature	$0.0035 \text{ W/m}^2\text{K}^2$
	IAM coefficient	0.18
Solar storage tank	Capacity	100 ton
	Thickness of insulation	200 mm

Fig. 4 Incident angle modifiers

태양열시스템의 성능 평가는 집열효율(Collector's efficiency), η_{solar} 와 태양의존율(Solar fraction), f 로 다음과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\eta_{solar} = \frac{q_{col}}{I_T} \times 100 \quad (1)$$

$$f = \frac{Q_{load} - Q_{aux}}{Q_{load}} \times 100 \quad (2)$$

3.4 지중 계간축열시스템

지중 계간축열은 현열 축열 방식으로 탱크 축열(Tank thermal energy storage), 피트 축열(Pit thermal energy storage), 보어홀 축열(Borehole thermal energy storage, 이하 BTES), 대수층 축열(Aquifer thermal energy storage) 등으로 구분된다. 본 연구에서는 축열밀도는 다소 떨어지나 시공이 간단하고 경제성이 우수한 BTES를 적용하였다. 이 방식은 태양열집열기가 설치되는 부지의 하부를 사용함으로써 공간 활용도를 높일 수 있으며 지하수를 제외한 광범위한 지질조건에서도 시공 가능한 장점이 있다. 한편 동절기 온실 난방을 위한 BTES 시스템의 운용은 지중 축열온도 40℃를 기준으로 저온 및 고온의 2가지 방식으로 구분되며, 40℃ 미만의 저온방식에서는 히트 펌프를 필요로 한다¹³⁾. 전술한 바와 같이 본 연구에서는 직접 난방공급이 가능한 고온방식을 적용하였다.

TRNSYS에서 BTES 시스템은 보어홀이 원통형 지중에 균등하게 배치된 형태로 Hellström¹⁴⁾이 개발한 Type 557a을 사용하였다. 이 모델은 보어홀 내부 유로의 열매체 대류 열전달과 지중의 전도 열전달이 고려되며, 순환 열매체와 지중의 온도차에 따라 축열하거나 방열하게 된다. 이 과정에서 BTES 시스템의 열성능은 축열효율, η_{BTES} 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_{BTES} = \frac{Q_{ext}}{Q_{inj}} \times 100 \quad (3)$$

Fig. 5는 BTES 시스템의 보어홀 배치형태를 나타낸 것이다. 원통의 중심부에서 외주부로 6개의 보어홀이 직렬로 연결된 다수의 스티링(String)으로 구성된다. 축열과정에서 열매체는 중심부에서 외주부로, 방열 시에는 외주부에서 중심부로 순환하여 방사형 온도층화를 촉진하게 된다¹⁵⁾. 지면으로부터 1.5 m 하부에 20 m 깊이의 총 42개 보어홀을 2.0 m 간격으로 천공하고, 상부와 외주부 측면으로 0.5 m 두께의 발포 폴리스티렌(Expanded polystyrene)을 4 m 깊이로 설치하였다. 이에 따른 원통형 지중 축열용적은 2,908 m³가 된다. 영천지역의 지질¹⁶⁾

은 퇴적암층이 광범위하게 분포하고 있으며 표피층의 경우 모래와 세일층으로 구성되고 이에 따른 열전도율과 비열은 각각 각각 1.66 W/mK와 2,180 kJ/m³ K를 적용하였다¹⁷⁾.

Table 6는 시스템 해석을 위해 사용된 TRNSYS 시뮬레이션 모델의 주요 컴포넌트를 정리한 것이다. 여기서 태양열 축열조 수직 원통형 모델로서 100 m³의 용량으로 설정하였으며, 설계초기 단계에서 정확하게 파악되지 않는 태양열 및 보어홀 열매체 순환펌프의 동력은 분석에서 제외하였다.

Fig. 5 Borehole arrangement in BTES system

Table 6 Main components of TRNSYS model for solar heating system with BTES

Components	Type	Descriptions
Evacuated tube solar collector	71	Transverse and longitudinal IAMs
Flat-plate solar collector	1	Quadratic Efficiency
On/off differential controller	2	Solar system/Boiler controller
Cylindrical storage tank	534	Domestic hot storage tank
Heat exchanger with constant effectiveness	91	Plate heat exchanger
boiler	700	Auxiliary Heater
Vertical U-tube ground heat exchanger	557a	Borehole thermal energy storage

4. 결과분석

4.1 난방부하

Fig. 6과 Fig. 7은 2,300 m² 면적을 갖는 만감류 재배 온실의 연간 시간별 난방 부하와 월별 난방부하를 정리한 것이다. 난방부하가 11월 중순부터 4월 말까지 지속적으로 발생하는 가운데 최대 부하는 308 kW로 2월 말에 나타났다. 만감류 성숙기(Ripening period)와 발아기(Germination) 사이 3월의 난방부하가 37.9 MWh로 가장 많았으며 연간 총 난방부하는 약 180.8 MWh로 분석되었다.

Fig. 6 Hourly heating load of greenhouse

Fig. 7 Monthly heating load of greenhouse

4.2 시스템 분석

Fig. 8은 시뮬레이션 기간(총 10년)의 BTES의 평균 온도(BTES_ETC 및 BTES_FPC)를 각각 나타낸 것이다. 4년차부터 축열 및 방열의 1년 주기가 열적 평형상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 이중 진공관 집열기가 적용될 때 10월 말 73°C의 최고온도를 기록하였으며, 최저온도는 난방공급 온도조건(40°C)을 상회하는 약 43°C로 3월 말에 나타났다. 평판형 집열기의 경우 온도패턴은 거의 동일한 상태에서 BTES의 온도 작동범위는 40 ~ 64°C로 이중 진공관 집열기에 비해 축열온도가 크게 저하되었다.

Fig. 8 Average underground temperature of BTES system

Fig. 9는 6년차 태양열시스템의 월별 집열열량 및 평균 집열효율을 분석한 것이다. 전술한 바와 같이 집열된 열량은 난방에 직접 공급되거나 지중 계간 축열조에 저장(BTES 축열)된다. 진공관형 집열기의 월별 집열효율은 39.6 ~ 48.0%로 평판형 집열기의 31.0 ~ 43.2%에 비해 상대적으로 균일하고 높은 성능분포를 나타내고 있다. 이에 따른 집열량을 살펴보면 이중 진공관 집열기의 경우 가장 많은 5월의 26.4 MWh로, 가장 적은 6월의 14.5 kWh에 비해 82%가 증가하였으며, 동일 기간 평판형 집열기는 각각 22.6 MWh와 12.0 MWh로 그 편차(88%)가 더욱 커지고 있다. 연평균 이중 진공관형 집열기의 집열효율과 연간 총 집열량은 각각 43.5%와 227.4 MWh (709.4 kWh/m²)로 평판형 집열기의 36.2%와 189.5 MWh (592.2 kWh/m²)에 비해 20% 이상의 우수한 열적 성능을 보이고 있다.

Fig. 9 Solar fraction of solar heating system with BTES system

Fig. 10은 연간 태양열 축열조의 상부온도(ETC 및 FPC)와 BTES의 평균온도를 나타낸 것이다. 여기서 BTES의 축열은 동절기 태양열 축열조 상부의 온도가 60°C를 초과하거나, 비 동절기 BTES의 평균온도보다 10°C 이

상 높아질 때 이루어진다. 난방기가 종료된 후 BTES가 축열되는 4월부터 10월까지 태양열 축열조 상부 작동온도가 점차 상승하고 있으나 이중 진공관형 집열기가 적용될 때 최고 온도는 86°C, 평판형 집열기는 이보다 낮은 78°C 이하로 두 집열기 모두 과열 발생이 우려되는 90°C를 초과하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 10 Upper temperature of solar storage tank

Fig. 11은 이중 진공관 집열기가 적용된 시스템 월별 열전달을 분석한 것이다. 난방부하(Heating load)와 태양열 직접 난방(Direct solar heating), 음으로 표시되는 축열조로부터 BTES 축열(BTES injection), 축열조로 공급되는 BTES 방열(BTES extraction), 보조보일러 난방공급(Auxiliary boiler) 등으로 구분하였다. 11월부터 4월까지 태양열 직접 난방공급이 지속되는 가운데 BTES의 난방공급(BTES 방열)이 병행되고 있으며, 이 과정에서 BTES의 순 축열(축열 > 방열)은 4월부터 10월까지 이루어지고 있다. 보조보일러에 의한 실질적인 난방공급은 2월부터 시작되며 총 공급량의 86%가 2월과 3월에 집중되고 있다. 연간 태양열 직접 난방 및 BTES 난방공급은 각각 106.6 MWh와 43.5 MWh로 이에 따른 태양의존율은 83.2%가 되었으며, BTES의 축열량(116.5 MWh)을 기준으로 연간 BTES 축열 효율은 약 37.5%로 나타났다.

Fig. 11 Monthly energy transfer between system components with evacuated tube collector

Fig. 12는 평판형 집열기가 적용된 시스템 월별 열전달을 나타낸 것이다. 상대적으로 낮은 BTES의 축열로 인해 보조보일러에 의한 난방공급은 11월부터 지속되는 것을 알 수 있다. 연간 태양열 직접 난방 및 BTES 난방공급은 각각 93.4 MWh와 30.8 MWh로 태양의존율은 68.7%로 나타났으며, BTES의 축열열량(93.0 MWh)을 기준으로 연간 BTES 축열 효율은 약 33.2%가 되었다.

Fig. 12 Monthly energy transfer between system components with flat-plate collector

5. 결론

본 연구에서는 경북 영천지역에서 만감류를 재배하는 2,300 m²의 연동형 비닐온실을 대상으로 계간 지중축열시스템을 갖는 태양열 난방시스템 열성능을 분석하였다. 시스템은 전면적 320 m²의 이중 진공관형 집열기와 평판형 집열기가 각각 적용되는 가운데 100 m³의 태양열축열조, 2,905 m³의 축열용적을 갖는 원통형 보어홀 지중축열시스템, 보조보일러 등으로 구성하였다. 해석을 위한 시뮬레이션 도구로 TRNSYS 18을 사용하였으며 기상자료는 한국표준과학연구원에서 제공하는 영천지역 국가참조표준기상데이터(TMY3)를 적용하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 이중진공관형 집열기가 적용될 때 연간 태양의존율과 BTES 축열효율은 각각 83.2%와 35.7%로, 평판형 집열기의 68.7%와 33.2%와 비교할 때 상대적으로 고온영역에서 작동하는 진공관형 집열기가 더욱 우수한 열적성능을 갖는 것으로 나타났다.
- (2) 진공관형 집열기의 월별 집열효율은 40.4 ~ 48.0%로 평판형 집열기의 32.1 ~ 43.3%에 비해 상대적으로 균일하고 높은 성능분포를 나타내고 있다.
- (3) 높은 연간 태양의존율에도 불구하고 축열조의 최고 작동온도는 90도 이하로 과열에 따른 고장발생 우려가 크게 없을 것으로 판단된다.

후기

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 농업에너지 자립형 산업모델 기술 개발사업(태양열을 활용한 에너지 생산 저장 관리 및 실증모델 구축)의 지원을 받아 연구되었음(과제번호 120093-3).

REFERENCES

1. National Institute of Agricultural Sciences, Study on Technology of Controlling Thermal Insulation and Humidity Environment of Greenhouse Citrus for Saving Heating Energy, Rural Development Administration, 2019.
2. Park, J. Y. and Kim, Y. J., The Effects of Renewable Energy in Agricultural Sector, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 20, pp. 224-235, 2019.
3. Xu, J., Li, Y., Wang, R. Z., and Liu, W., Performance Investigation of a Solar Heating System with Underground Seasonal Energy Storage for Greenhouse Application, Energy, Vol. 67, pp. 63-73, 2014.
4. Zhang, L., Xu, P., Mao, J., Tang, X., Lui, Z., and Shi, Z., A Low Cost Seasonal Solar Soil Heat Storage System for Greenhouse Heating: Design and Pilot Study, Applied Energy, Vol. 156, pp. 213-222, 2015.
5. Semple, L., Cariveau, R., and Ting, D. S.-K., A Techno-economic Analysis of Seasonal Thermal Energy Storage for Greenhouse Applications, Energy and Buildings, Vol. 154, pp. 175-187, 2017.
6. Park, S.-M., and Seo, T.-B., A Study on Performance of Seasonal Borehole Thermal Energy Storage System Using TRNSYS, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 38, pp. 37-47, 2018
7. Agricultural Prospects 2021 (II), Korea Rural Economic Institute, 2021.
8. Hallabong Cultivation Technology, Jeju Special Self-governing Province Agricultural Research and Extension Services, 2014.
9. National Center for Standard Reference Data, <https://www.srd.re.kr:446/db/srdDbInfoView.do?scid=S06001003>, last accessed on the 10th December 2021.
10. RDA Interrobang, No. 218, National Institute of Agricultural Sciences, 2018.
11. National Institute of Agricultural Sciences, Facility Gardening Energy Conservation Guidebook, Rural Development Administration, 2006.
12. Aldrich, R. A. and Bartok, J. W., Greenhouse Engineering. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Ithaca, 1989.
13. Ruess, M., Beck, M., and Müller, J. P., Design of a Seasonal Thermal Energy Storage in the Ground, Solar Energy, Vol. 59, pp. 247-257, 1997.
14. Hellström G., Duct Ground Heat Storage Model, Manual for Computer Code, Department of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1989.
15. Thermal Energy System Specialists, TESSLibs 17, Component Libraries for the TRNSYS Simulation Environment, 2012.
16. The Digital Local Culture Encyclopedia of Korea, <http://www.grandculture.net>, last accessed on the 10th December 2021.
17. Kong, H. J., Kwon, S. K., and Ji, S. G., A Study on Regional Distribution of the Ground Effective Thermal Conductivity, Transactions of the KSME C Industrial Technology and Innovation, Vol. 4, pp. 43-47, 2016.