ARTICLE

TRNSYS를 이용한 Borehole 방식 태양열 계간축열 시스템의 성능에 관한 연구

박상미* · 서태범**†

*인하대학교 기계공학과, 석사과정
**인하대학교 기계공학과, 교수

A Study on Performance of Seasonal Borehole Thermal Energy Storage System Using TRNSYS

Park Sang-Mi* · Seo Tae-Beom**†

*Department of Mechanical Engineering, Inha University, Master's Course
**Department of Mechanical Engineering, Inha University, Professor

†Corresponding author: seotb@inha.ac.kr

Abstract

The heating performance of a solar thermal seasonal storage system applied to a glass greenhouse was analyzed numerically. For this study, the gardening 16th zucchini greenhouse of Jeollanam-do agricultural research & extension services was selected. And, the heating load of the glass greenhouse selected was 576 GJ. BTES (Borehole Thermal Energy Storage) was considered as a seasonal storage, which is relatively economical. The TRNSYS was used to predict and analyze the dynamic performance of the solar thermal system. Numerical simulation was performed by modeling the solar thermal seasonal storage system consisting of flat plate solar collector, BTES system, short-term storage tank, boiler, heat exchanger, pump, controller. As a result of the analysis, the energy of 928 GJ from the flat plate solar collector was stored into BTES system and 393 GJ of energy from BTES system was extracted during heating period, so that it was confirmed that the thermal efficiency of BTES system was 42% in 5th year. Also since the heat supplied from the auxiliary boiler was 87 GJ in 5th year, the total annual heating demand was confirmed to be mostly satisfied by the proposed system.

Keywords: 유리온실(Glass Greenhouse), BTES(Borehole Thermal Energy Storage), TRNSYS(Transient System Simulation), 태양열 계간축열 시스템(Solar Thermal Seasonal Storage System)

기호설명

Q : 총 난방 에너지 [kWh]

$P_{specific}$: 건물의 비열손실률 [kWh]

D : 난방도일 [–]

T_i : 태양열집열기의 입구 유체온도 [℃]

OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.38, No.5, pp.37-47, October 2018
https://doi.org/10.7836/kses.2018.38.5.037

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 3 August 2018

Revised: 18 September 2018

Accepted: 30 October 2018

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.

T_a : 외기온도 [℃]

G : 집열면에 작용하는 일사량 [Wh]

$Q_{extracted}$: BTES 시스템에서 추출되는 에너지 [GJ]

$Q_{injected}$: BTES 시스템으로 주입되는 에너지 [GJ]

그리스 문자

η : 집열 효율 [–]

η_{BTES} : BTES 시스템의 전체 열효율 [%]

1. 서 론

IEA가 발표한 '2017년 세계 에너지 수요전망 보고서(World Energy Outlook 2017)'에 따르면, 전 세계적 인구 증가와 중국의 경제성장과 함께 인도 및 동남아시아 국가들의 산업이 발달하게 되면서 세계 1차 에너지에 대한 수요가 지속적으로 증가할 것으로 전망하고 있다[1]. 이와 같은 추세는 주요 에너지원인 화석연료 고갈에 대한 위기감을 고조시키고, 지구온난화 및 환경오염에 대한 장기적인 문제를 야기하고 있어 향후 에너지 수요를 효율적으로 충족시킬 수 있는 신·재생에너지 기술 개발이 주목받고 있다[2].

신 · 재생에너지 중에서 태양에너지는 무공해, 무한정 청정에너지원으로 다른 에너지원에 비해 상대적으로 에너지 저장 밀도와 에너지 변환 효율이 높다는 점에서 가장 경쟁력 있는 에너지원으로 평가되고 있다[3]. 태양에너지를 이용하는 방법 중 변환형태가 열에너지인 태양열시스템은 경제성과 활용도가 높아 난방 및 냉방산업 등 다양하게 이용되고 있지만 에너지 수요와 공급의 시간적 불일치 문제로 인해 많은 제약을 받고 있는 실정이다. 따라서 비난방기의 잉여 태양열을 저장하여 난방기에 사용함으로써 태양열 의존율을 크게 높일 수 있는 태양열 계간축열 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다[4].

태양열 계간축열 방식에는 TTES (Tank Thermal Energy Storage, 이하 TTES), BTES (Borehole Thermal Energy Storage, 이하 BTES), PTES (Pit Thermal Energy Storage, 이하 PTES), ATES (Aquifer Thermal Energy Storage, 이하 ATES)방식이 있다. 특히 BTES 방식은 유리한 지질 상태인 경우 비교적 저비용으로 많은 양의 에너지를 장기 저장할 수 있는 장점이 있어 기술적, 경제적인 관점에서 경쟁력이 높아 관련 연구가 활발히 진행되고 있다[5].

BTES시스템에 대한 연구는 1976년 프랑스와 스웨덴에서 최초로 수행되었으며, 1982년 스웨덴에서 대규모 BTES 시스템이 건설되었다[6]. 그 후 캐나다, 미국 등 선진국들과 독일, 스웨덴 등 유럽 중심으로 진행된 다양한 연구를 통해 태양열 계간축열 시스템의 보급이 활성화되었고, 실험용, 상업용 및 지역난방용의 계간축열 시스템이 설치되어 현재 가동 중에 있다. 북유럽의 태양열 계간축열 시스템에 따르면, 태양열 개별 시스템과 비교하

여 경제성이 50% 정도 향상되었을 뿐만 아니라 건물의 열부하의 50~70% 이상을 감당할 수 있어 기존의 태양열시스템의 단점을 크게 향상시킬 수 있는 시스템이라 평가되고 있다[7].

국내의 경우, 2014년부터 환경부 주관으로 친환경에너지타운을 준공하여 총 24개 지역에서 에너지 자립에 힘쓰고 있지만 BTES를 활용한 국내 사례는 찾아보기 어려운 실정이다[8]. 또한 독자적인 태양열 계간축열 설계 기술이 미흡한 수준에 있고 태양열 시스템의 보급현황도 초기단계에 머무르는 수준이므로 국내 기후 및 지질 상태를 고려한 태양열 계간축열 시스템 기술 개발이 필요하다.

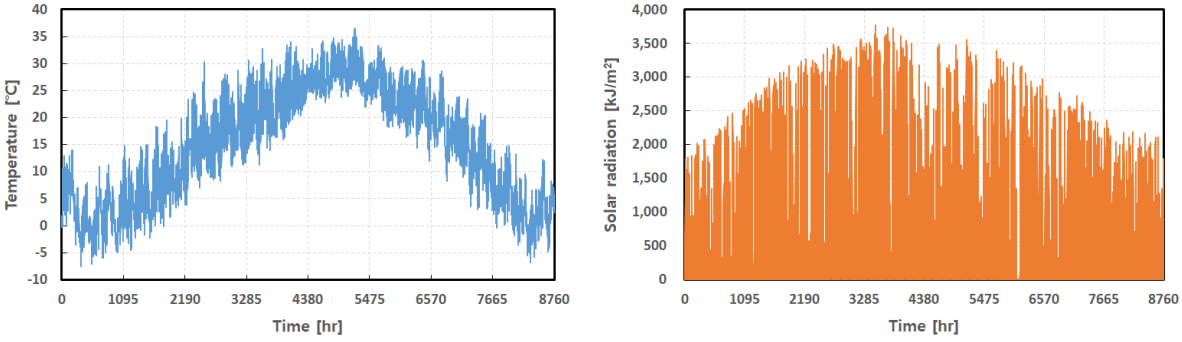
본 연구에서는 농가의 유리온실에 적용 가능한 Borehole 방식 태양열 계간축열 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 수행하였다. 일정기간 동안의 축열효율, 축열열량 등 태양열 계간축열 시스템에 대한 성능을 예측하고 분석하여 전체 시스템 설계에 활용할 수 있는 유용한 정보를 도출하고자 한다. 시뮬레이션은 시간에 따른 태양열시스템의 동적 성능 예측 및 해석을 위해 TRNSYS 프로그램을 사용하였다.

2. 해석대상

2.1 기상데이터

해석대상 유리온실은 576 GJ의 난방부하를 소비하는 전라남도농업기술원의 원예 16번동 애호박 재배온실을 선정하였고, 온실면적은 660 m^2이며 온실온도는 16~18℃로 유지된다.

해석대상 유리온실의 기상자료는 2017년도 전라남도 광주의 기상관측자료를 활용하였다. Fig. 1(a)은 시간에 따른 광주의 연간 기온을 나타낸 것이고, Fig. 1(b)은 시간에 따른 광주의 연간 일사량을 나타낸 것이다. 광주의 연간 평균기온은 14.7℃이고, 연간 총 일사량은 5.656 GJ/m^2이다.



(a) Hourly air temperature (b) Hourly solar radiation

Fig. 1 2017 Weather data in Gwangju

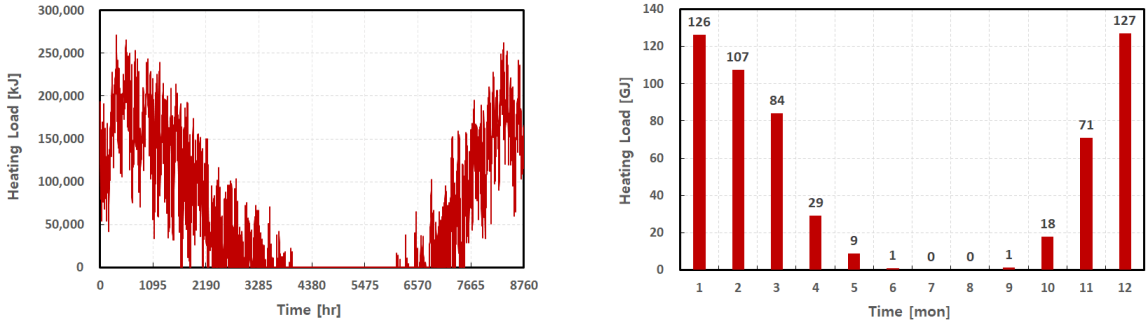
2.2 난방부하

본 연구에서는 해석대상 유리온실과 비슷한 난방부하를 얻기 위해 2017년도 전라남도 광주의 기온과 난방도

일을 활용하여 난방부하를 산출하였다. 난방도일의 기본온도는 18℃로 설정하였고, 1년 동안의 난방도일을 계산하여 식(1)을 통해 573 GJ의 총 연간 난방부하를 산출하였다[9].

$$Q = P_{specific} \times 24 \times D/1000 \tag{1}$$

해석대상 유리온실에서 소비하는 총 연간 난방부하는 576 GJ이고, 2017년도 전라남도 광주의 기온과 난방도일을 통해 산출된 총 연간 난방부하는 573 GJ로 유사한 값을 얻어낼 수 있었다. Fig. 2(a)는 2017년도 전라남도 광주의 기온과 난방도일을 통해 산출된 시간에 따른 난방부하를 나타낸 것이고, Fig. 2(b)는 2017년도 전라남도 광주의 기온과 난방도일을 통해 산출된 월별 난방부하를 나타낸 것이다. 최대 월 난방수요는 12월로 127 GJ이고, 6~9월에 난방수요는 거의 없다.



(a) Hourly (b) monthly

Fig. 2 Calculated heating load

3. 시스템 구성

3.1 TRNSYS 모델링

시간에 따른 태양열시스템의 동적 성능 예측 및 해석을 위해 TRNSYS 16 프로그램을 이용하였고, 평판형 태양열집열기(Flat plate solar collector), BTES 시스템, 단기 저장 축열조(Short-term storage tank), 보일러(Boiler), 열교환기(Heat exchanger), 펌프(Pump), 제어부(Controller)로 구성된 태양열 계간축열 시스템을 모델링하였다.

Fig. 3은 본 연구에서 제안된 시스템에 대한 단순화된 구성도이고, Fig. 4는 TRNSYS 모듈 구성도이다. 제안된 시스템은 평판형 태양열집열기로부터 태양열을 수집하여 열교환기를 통해 단기 저장 축열조에 저장되도록 하였고, 비난방기의 잉여 태양열은 BTES 시스템으로 이동되어 저장된 후, 난방기에 열이 추출되어 단기 저장 축열조에 저장되도록 하였다. 또한 축열량이 없거나 부족하면 보조열원에서 단기 저장 축열조로 열을 공급하도록 하였고, 보조열원이 난방에 이용되는 경우의 최소 설정 온도는 41℃이다.

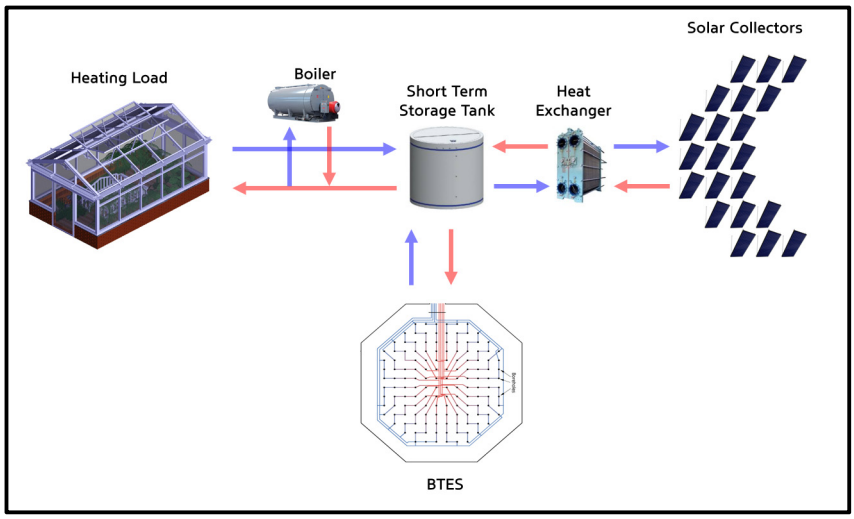


Fig. 3 Simplified system schematic

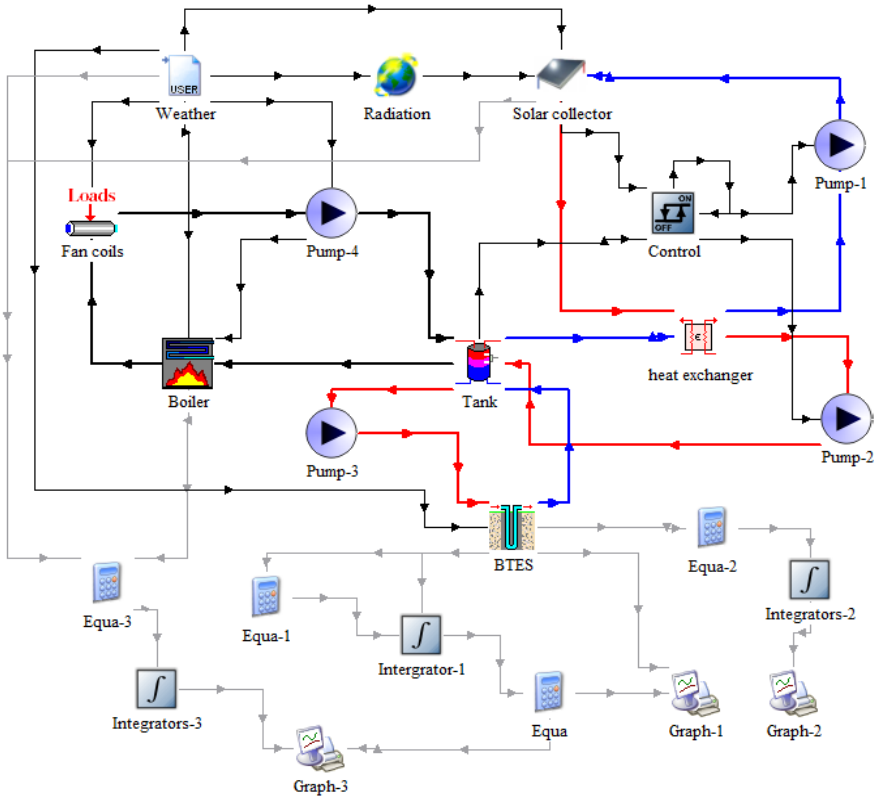


Fig. 4 TRNSYS modelling

3.2 시스템 주요 장비

(1) 평판형 태양열집열기

평판형 태양열집열기는 Type 1b (Quadratic efficiency collector)를 사용하여 모델링하였고, 남향 45° 표면

기울기를 가지도록 하였다[10]. 또한 집열 효율식은 SRCC™에서 인증된 Enerworks 社의 식(2)을 사용하였으며, 기타 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다[11].

$$\eta = 0.762 - 3.2787\left(\frac{T_i - T_a}{G}\right) - 0.0129\left(\frac{(T_i - T_a)^2}{G}\right) \quad (2)$$

Table 1 Type 1b parameter

	Value
Number in series [-]	1
Collector area [m^2]	419.02
Fluid specific heat [kJ/kg·K]	3.6
Tested flow rate [kg/hr·m^2]	66.24
Intercept efficiency [-]	0.762
Efficiency slope [kJ/hr·m^2·K]	3.2787
Efficiency slope curvature [kJ/hr·m^2·K^2]	0.0129

(2) BTES 시스템

BTES 시스템은 Type 557a (Vertical U-tube ground heat exchanger)를 사용하여 모델링하였고, 자세한 제원은 Table 2에 나타내었다[12].

Table 2 Type 557a parameter

	Value
Storage volume [m^3]	4720
Borehole depth [m]	59
Header depth [m]	1.2
Number of boreholes [-]	35
Borehole radius [m]	0.1
Storage thermal conductivity [kJ/hr·m·K]	7.2
Storage heat capacity [kJ/m^3·K]	2016
Outer radius of U-tube pipe [m]	0.0316
Inner radius of U-tube pipe [m]	0.0255

(3) 단기 저장 축열조

단기 저장 축열조는 두 개의 유입 및 유출흐름을 허용하고 내부 열교환기가 있는 Type 60f (Vertical cylinder storage tank)를 사용하여 모델링하였고, 자세한 제원은 Table 3에 나타내었다[10]. 단기 저장 축열조의 두 개의 입·출구와 내부열교환기는 각각 평판형 태양열집열기, BTES 시스템, 부하 측에 연결되도록 하였다.

Table 3 Type 60f parameter

	Value
Tank volume [m^3]	14.4
Tank height [m]	4.5
Height of flow inlet 1 − BTES loop [m]	3.7
Height of flow outlet 1 − BTES loop [m]	0.3
Height of flow inlet 2 − solar loop [m]	0.3
Height of flow outlet 2 − solar loop [m]	3.7
Tank loss coefficient [kJ/hr·m^2·K]	3
Total surface area of heat exchanger [m^2]	40
Heat exchanger inside diameter [m]	0.01587
Heat exchanger outside diameter [m]	0.016

(4) 기타 장비

펌프는 Type 3d (Single speed)를 사용하였으며, 제어부는 평판형 태양열집열기와 단기 저장 축열조의 출구 온도를 측정하여 온도차가 12℃ 이상이 되면 펌프가 작동하고 4℃ 이하가 되면 작동이 멈추는 Type 2b (On/Off differential controller)를 사용하여 모델링하였다[10]. 또한 열교환기는 평판형 태양열집열기에서 수집된 열을 단기 저장 축열조로 전달하기 위해 Type 5b (Plate and frame heat exchanger)를 사용하여 모델링하였다[10].

광주의 표준기상데이터(건구온도, 절대습도, 수평면전일사량 등)는 단위변환 및 보간 등을 통해 TRNSYS 구성요소들에 기상데이터를 입력할 수 있도록 Type 9c (Data reader)를 사용하여 모델링하였다[11]. 또한 Type 16a (Radiation processor)를 통해 Type 9c로부터 입력된 일사량을 방위별 및 경사각도별로 분리한 후 처리하도록 하였다[10,13].

4. 결과 및 고찰

4.1 BTES 성능

Borehole 방식 태양열 계간축열 시스템은 축열을 시작한 후, 약 3~5년 후부터 정상상태의 축열 및 방열이 가능하고 BTES 시스템의 열 손실을 통해 안정화기간을 판단하므로 Fig. 5에 BTES 시스템의 열 손실을 10년간 나타내었다[14,15].

BTES 시스템의 열 손실은 Type 557a에 의해 산출되는 값으로 BTES 시스템의 상단, 하단 및 측면에서의 열 손실의 합계이다. 5년차부터 BTES 시스템의 열 손실이 거의 일정해지는 것으로 보아 BTES 시스템의 안정화 기간은 5년으로 판단하였다.

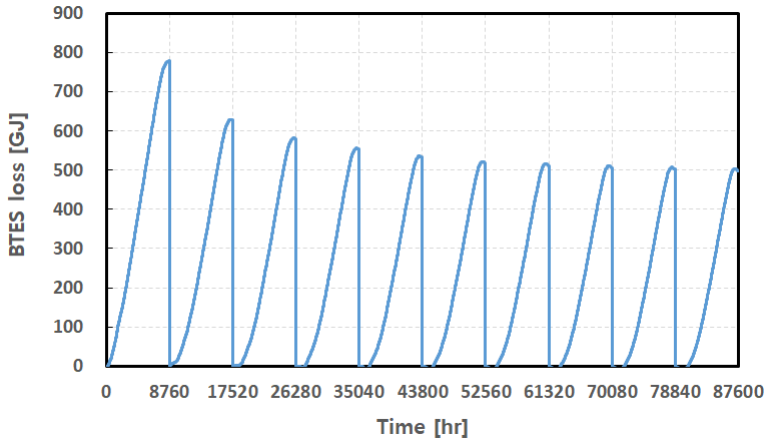


Fig. 5 Annual accumulated heat loss of BTES system

Fig. 6은 매년 1월 1일마다 갱신되는 BTES 시스템의 에너지와 평균 지중온도(AGT)를 5년간 나타낸 것이다.

지중온도는 깊이, 시간에 따른 지표면의 온도 변화와 대기온도에 의해 영향을 받는다[16]. 1년 초의 평균 지중온도는 20℃이고, 시간이 지날수록 상승하기 시작하여 5년차에 평균 지중온도는 최대 71℃에 도달한다. 또한 BTES 시스템의 열 손실과 BTES 시스템에 저장된 에너지는 5년차에 각각 533 GJ, 535 GJ에 도달함을 확인할 수 있다.

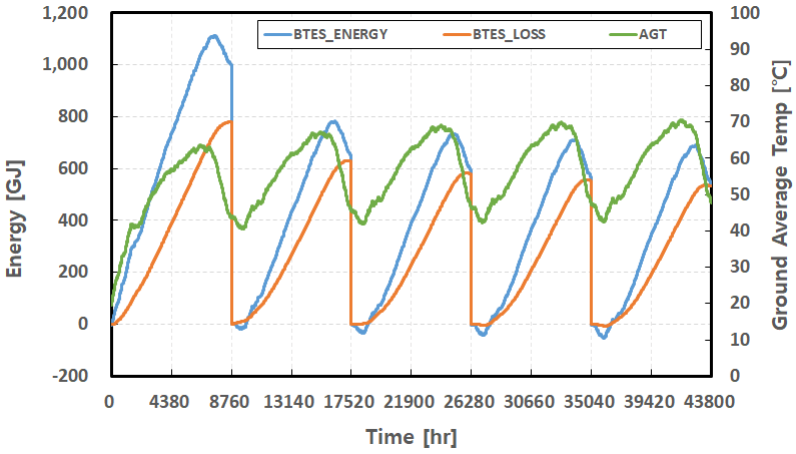


Fig. 6 Annual accumulated energy of BTES system and Average Ground Temperature (AGT)

Fig. 7은 매년 1월 1일마다 갱신되는 BTES 시스템에 주입되고 추출되는 에너지를 5년간 나타낸 것이다. BTES 시스템에 주입되고 추출되는 에너지 차이는 BTES 시스템의 열 손실로 인한 것이며, BTES 시스템으로부터 열이 추출되는 기간은 10월에서 3월까지이다.

5년차에 928 GJ의 열이 BTES 시스템으로 저장되고, 그중 393 GJ의 열이 난방에 활용되어 식(3)을 통해 BTES 시스템의 전체 열효율은 42%임을 확인할 수 있다.

$$\eta_{BTES} = \frac{Q_{extracted}}{Q_{injected}} \times 100 \quad (3)$$

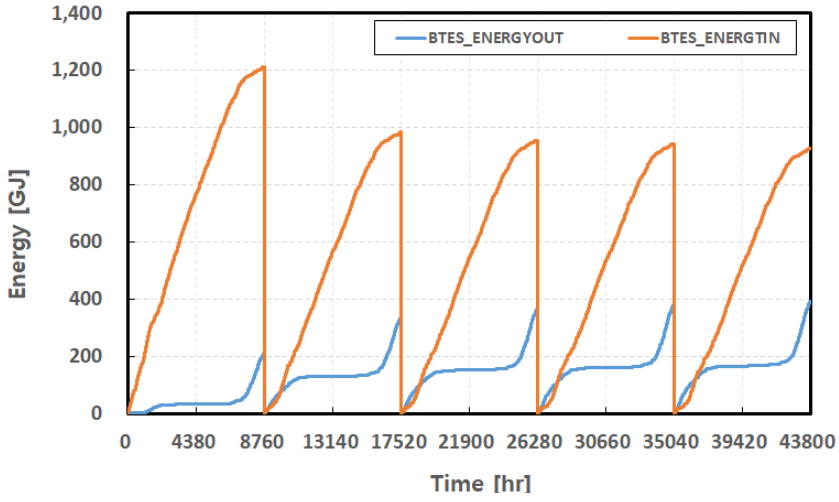


Fig. 7 Annual accumulated energy injected into and extracted from BTES system

4.2 태양열 계간축열 시스템 성능

Fig. 8은 매년 1월 1일마다 갱신되는 난방부하, BTES 시스템 에너지, 평판형 태양열집열기로 수집되는 열 및 보일러 보조 열을 5년간 나타낸 것이다.

5년차에 1,201 GJ의 열이 평판형 태양열집열기에 의해 수집되고, 그 해 보일러로부터 공급되는 열은 87 GJ 이므로 총 연간 난방수요는 제안된 시스템을 통해 대부분 충족됨을 알 수 있다.

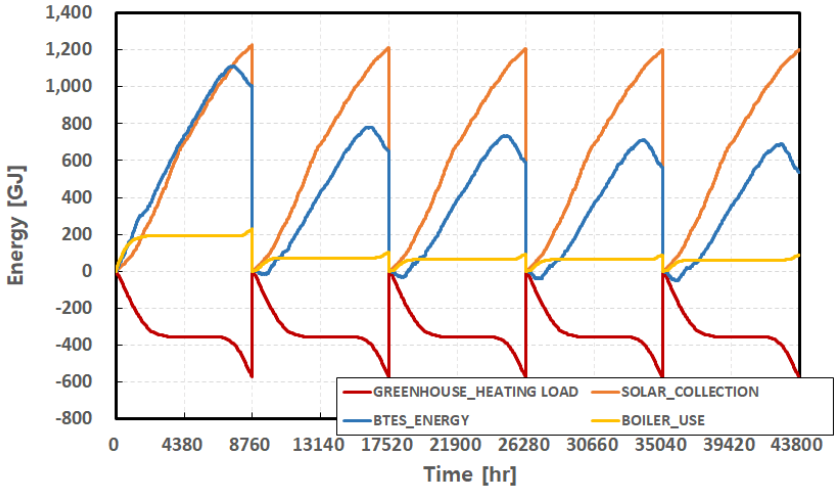


Fig. 8 Annual accumulated system energy

Table 4는 5년간 제안된 시스템의 성능을 분석하고, 그 결과를 정리한 것이다.

연도 말의 평균 지중온도는 1년차부터 각각 43.6℃, 45.6℃, 46.5℃, 47.4℃, 47.6℃로 1년차에 비해 5년차에 4.0℃ 상승하였고, BTES 시스템 열효율 또한 1년차부터 각각 17%, 34%, 38%, 41%, 42%로 1년차에 비해 5년차에 2.47배 향상됨을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 BTES 시스템의 안정화 기간인 5년차의 단순화된 열평형도를 나타낸 것이다.

Table 4 Simulation result summary

	1	2	3	4	5
Glass greenhouse thermal demand [GJ]	573	573	573	573	573
Solar energy gain [GJ]	1,227	1,212	1,205	1,202	1,201
Boiler supplement heat [GJ]	229	103	93	89	87
Solar energy injected into the BTES [GJ]	1,213	984	956	945	928
Solar energy extracted from the BTES [GJ]	211	336	367	383	393
BTES losses [GJ]	780	629	580	554	533
BTES average temperature at year end [°C]	43.6	45.6	46.5	47.4	47.6
BTES efficiency [%]	17	34	38	41	42

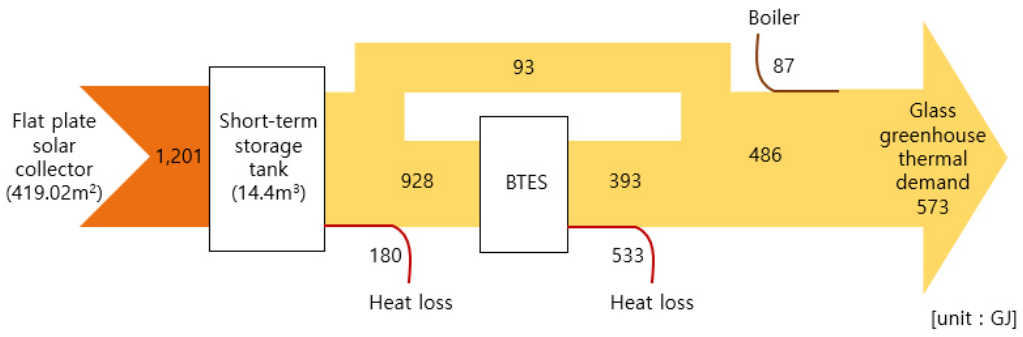


Fig. 9 Schematic heat balance for the system with BTES in 5th year

5. 결 론

본 연구에서는 농가의 유리온실에 적용 가능한 Borehole 방식 태양열 계간축열 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 수행하여 성능 분석을 하였다. 시간에 따른 태양열시스템의 동적 성능 예측 및 해석을 위해 TRNSYS 16 프로그램을 이용하였고, 평판형 태양열집열기, BTES 시스템, 단기 저장 축열조, 보일러, 열교환기, 펌프, 제어부로 구성된 태양열 계간축열 시스템을 모델링하였다.

해석결과, 5년차부터 BTES 시스템의 열 손실이 거의 일정해지는 것으로 보아 BTES 시스템의 안정화 기간은 5년으로 판단하였다. 또한 5년차에 본 연구에서 제안된 시스템의 BTES 전체 열효율은 42%이고, 그 해 보일러로부터 공급되는 열량은 87 GJ이므로 총 연간 난방수요는 제안된 시스템을 통해 충족됨을 확인하였다.

본 연구 결과를 기반으로 향후 각 지역의 지질 상태와 기후 및 경제성을 고려하여, 각 TRNSYS 모듈의 매개변수값과 입력값을 조정함으로써 시뮬레이션의 정확도와 태양열 계간축열 시스템의 성능을 향상시킬 예정이다. 또한 이를 통해 본 연구에서 제안된 시스템이 태양열 계간축열 시스템을 설계하고 분석하는데 유용하게 사용되었으면 한다.

후 기

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림수산식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(315015).

REFERENCES

1. IEA, World Energy Outlook 2017, Nov 14 2017.
2. Devabhaktuni, V., Alam, M., Depuru, S. S. S. R., Green II, R. C., Nims, D., and Near, C., Solar Energy: Trends and Enabling Technologies, Renewable and Sustainable Energy Review, Vol. 19, pp. 555-564, 2013.
3. Tian, Y. and Zhao, C. Y., A Review of Solar Collectors and Thermal Energy Storage in Solar Thermal Applications, Applied Energy, Vol. 104, pp. 538-553, 2013.
4. Xu, J., Wang, R. Z., and Li, Y., A Review of Available Technologies for Seasonal Thermal Energy Storage, Solar Energy, Vol. 103, pp. 610-638, 2014.
5. Reuss, M., The Use of Borehole Thermal Energy Storage (BTES) System, Advances in Thermal Energy Storage Systems, Vol. 6, pp. 117-147, 2015.
6. Lee, K. S., Underground Thermal Energy Storage, 1st ed., Springer Science & Business Media, 2013.
7. Yoon, H. K., 계간축열 시스템을 이용한 태양열 중앙난방, Academic Lecture and Journal of the SAREK, pp. 67-80, 1998.
8. Shim, B. O., International Case Studies on the Eco-friendly Energy Towns with Hybrid Thermal Energy Supply System and Borehole Thermal Energy Storage (BTES), Economic and Environmental Geology, Vol. 51, No. 1, pp. 67-76, 2018.
9. Heating Degree Day, 2017, https://terms.naver.com/entry.nhn?docId=3405685&cid=40942&categoryId=32299
10. TRNSYS, Volume 5 Mathematical Reference, 2007.
11. Rad, F. M., Solar Community Energy and Storage System for Cold Climates, Doctor of Philosophy, Ryerson University, pp. 35-36, 2009.
12. TRNSYS TESS, TYPE557:VERTICAL GROUND HEAT EXCHANGER, 2004.
13. Hong, H. K., TRNSYS를 이용한 태양열 시스템 설계, Magazine of the SAREK, Vol. 43, No. 9, pp. 60-73, 2014.
14. Lee, D., W., 계간 축열시스템, Magazine of the SAREK, Vol. 45, No. 9, pp. 14-21, 2016.
15. Xu, L., Torrens, J. I., Guo, F., Yang, X., and Hensen, J. L., Application of Large Underground Seasonal Thermal Energy Storage in District Heating System: A Model-based Energy Performance Assessment of a Pilot System in Chifeng, China, Applied Thermal Engineering, Vol. 137, pp. 319-328, 2018.
16. Kim, M. S., Park, C. S., and Park, K. W., Performance Simulation of the Field Site Geothermal System using TRNSYS, The Society of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers of Korea, pp. 859-862, 2012.