온실난방을 위한 태양열 지중 계간축열시스템의 최적 운전 방안

김원욱, 김용기^{*} 한국건설기술연구원 국민생활연구본부 녹색건축연구센터

Optimal Operation Methods of the Seasonal Solar Borehole Thermal Energy Storage System for Heating of a Greenhouse

Wonuk Kim, Yong-Ki Kim^{*}

Green Building Research Center, Department of Living and Built Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT)

요 약 태양열은 지구에서 가장 풍부한 재생에너지 중의 하나이지만, 일반적으로 태양열이 풍부한 계절과 열부하가 큰 계절 이 서로 달라 사용에 제한이 있다. 유럽과 캐나다에서는 하절기의 풍부한 태양열을 저장하고 그 열을 동절기 난방부하에 활용하여 에너지를 절감하는 태양열 계간축열시스템을 활용하고 있다. 최근 물탱크방식 및 지중축열방식의 태양열 계간축열 시스템이 국내에 소개되어 실증연구가 활발히 진행 중이다. 본 연구에서는 연간 2,164 GJ의 난방부하를 가진 경기도 화성시 의 유리온실 1개동에 2,000㎡의 평판형 태양열 집열기, 20,000㎡의 지중 계간축열조를 사용하고 단기축열조를 사용하지 않는 보어홀 방식의 태양열 지중 계간축열시스템을 모델링하여, 운전제어조건에 따른 태양열 이용률을 평가하였다. 시간에 따른 태양열 지중 계간축열시스템의 동적성능예측을 위하여 TRNSYS 18 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 태양열 지중 계간축열시스템은 태양열 집열과 지중 계간축열조 방열에 각각 차온 제어 하였을 때, 5년간 평균 약 60%의 태양열 이용률을 나타내었다. 본 연구에서 제안된 시스템은 태양열 지중 계간축열시스템의 구성과 제어방법 을 단순화하고 성능을 확보하였다.

Abstract Solar energy is one of the most abundant renewable energy sources on Earth but there are restrictions on the use of solar thermal energy due to the time-discrepancy between the solar-rich season and heating demand. In Europe and Canada, a seasonal solar thermal energy storage (SSTES), which stores the abundant solar heat in the summer and uses the heat for the winter heating load, is used. Recently, SSTES has been introduced in Korea and empirical studies are actively underway. In this study, a 2,000 m⁴ flat plate type solar collector and 20,000 m⁴ of borehole thermal energy storage (BTES) were studied for a greenhouse in Hwaseong City, which has a heating load of 2,164 GJ/year. To predict the dynamic performance of the system over time, it was simulated using the TRNSYS 18 program, and the solar fraction of the system with the control conditions was investigated. As a result, the solar BTES system proposed in this study showed an average solar fraction of approximately 60% for 5 years when differential temperature control was applied to both collecting solar thermal energy and discharging BTES. The proposed system simplified the configuration and control method of the solar BTES system and secured its performance.

Keywords : Solar Energy, BTES(Borehole Thermal Energy Storage), SSTES(Seasonal Solar Thermal Energy Storage), Differential temperature control, Solar fraction, Greenhouse

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20172010105000) *Corresponding Author : Yong-Ki Kim(KICT) Tel: +82-31-910-0490 email: kimyk@kict.re.kr Received November 19, 2018 Revised December 28, 2018 Accepted January 4, 2019 Published January 31, 2019

1. 서 론

태양열은 지구에서 가장 풍부한 재생에너지중의 하나 이다. 태양열을 열 및 난방부하에 사용하면 온실가스배 출을 효과적으로 절감할 수 있다. 그러나 태양열이 풍부 한 하절기와 열 및 난방부하가 큰 동절기의 시기가 서로 달라 사용에 어려움이 따른다. 그것을 극복하기 위한 방 법이 하절기의 태양열을 저장하여 동절기에 사용하는 계 간축열시스템이며[1], 물탱크방식(TTES; Tank Thermal Energy Storage), 피트축열방식(PTES; Pit Thermal Energy Storage), 지중축열방식(BTES; Borehole Thermal Energy Storage), 지하수축열방식(ATES; Aquifer Thermal Energy Storage) 등의 계간축열시스템이 연구되고 실증 되어 왔다[2, 3]. 태양열 계간축열의 방식가운데 지중축 열방식이 가장 경제성이 좋다고 알려져 있지만, 태양열 집열기의 설치면적과 축열을 위한 지중 열환경조건이 우 선적으로 확보되어야 한다[4].

태양열 지중 계간축열시스템은 태양열 집열부, 지중 축열부, 열사용처의 3부분으로 나누어지며, 집열부의 작 동유체는 동파방지를 위해 부동액(에틸린글리콜 수용액 또는 프로필렌글리콜 수용액)을 사용하고, 지중 축열부 는 물 또는 알코올 수용액, 열사용처는 물을 주로 사용한 다. 각 부분의 운전에 따라서 운전모드는 1) 태양열 집열 및 계간축열조 축열모드, 2) 계간축열조 방열모드가 있 으며, 단기축열조와 열부하의 상황에 따라 3) 태양열 집 열 및 계간축열조 방열모드가 추가될 수도 있다. 각 운전 모드의 가동 및 정지의 판단은 주로 차온제어로 하고 있 으며 집열부는 집열기 출구온도와 단기축열조 상단부 유 체온도의 온도차, 축열부는 단기축열조 상단부 유체온도 와 지중계간축열조 중심부온도의 온도차를 사용한다.

일반적으로 지중 축열방식의 계간축열조는 열용량이 크고 열전달율이 낮기 때문에 축열과 방열시 시간이 많 이 걸린다. 그러므로 축열시에는 태양열을 집열하여 계 간축열조로 투입하는 온수의 온도를 충분히 높게 유지하 기 위한 목적과 계간축열조의 큰 열용량과 낮은 열전달 율로 인한 축/방열 효율저하를 막고 전체 축/방열 효율을 향상시키기 위한 목적을 위해 계간축열조보다 열전달율 이 높고 열용량이 작은 물탱크방식의 단기축열조를 태양 열 집열장치와 계간축열조 사이에 설치하는 방식을 많이 사용한다. 지중축열방식에 관한 기존의 연구는 주로 주 거용 건물의 난방을 위한 목적으로 단기축열조가 포함된 시스템을 대상으로 진행되었다[2-4].

국내 농촌에서는 동절기 농작물 재배를 위하여 비닐 또는 유리온실을 많이 사용하고 있으며, 일사가 풍부한 주간에는 난방이 필요 없는 반면, 일사가 없는 야간시간 대의 난방은 주로 전기와 유류를 사용하고 있다. 태양열 집열면적 확보와 열활용 측면에서 온실은 태양열 계간축 열시스템에 매우 적합하다. 주거용 건물의 난방을 위한 단기 축열조를 포함한 계간축열시스템과는 달리 농업용 온실의 경우는 난방부하의 시간대별 패턴이 일정하고 근 무 및 휴무일에 영향을 받지 않으므로 장기간 충분히 축 열된 상태에서 단기축열조 없이 난방으로 활용 가능하다.

본 연구에서는 온실을 위한 태양열 지중계간축열시스 템을 TRNSYS 18을 이용하여 태양열 집열 및 계간축열 조 축열순환을 위한 차온제어와 계간축열조 방열순환을 위한 차온제어 조건에 대하여 실험계획법에 기초한 29 개 케이스를 해석하였다. 단기 축열조는 포함하지 않았 으며 연결 난방부하는 경기도 화성에 위치한 유리온실의 시간대별 난방사용패턴을 사용하였다.

2. 해석모델 및 방법

2.1 해석모델

본 연구에서는 온실을 위한 태양열 지중 계간축열 시 뮬레이션을 위해 TRNSYS 18 프로그램을 사용하였다. TRNSYS는 에너지시스템의 동적성능예측에 일반적으 로 사용되고 있으며, 태양열 계간축열시스템의 개념설계 와 해석에도 활발하게 사용되고 있다. 태양열 이용 지중 계간축열시스템의 해석을 위하여 매시간 측정된 1년간



Fig. 1. TRNSYS model of the BTES system

의 난방부하와 기상청의 관측데이터를 시뮬레이션기간 (5년) 동안 반복 사용하였다. 시뮬레이션 시간 단계(time step)는 1시간으로 설정하였다. Fig.1은 TRNSYS 시뮬 레이션 모듈의 구성도이다.

2.2 해석방법

해석에 사용된 기상데이터는 2013년 경기도 화성시 와 가까운 수원시의 기상관측자료이며, 기상데이터모듈 (TRNSYS Type 15)에 입력하였다. Fig. 2의 (a), (b)는 각각 2013년 수원의 시간별 외기온도와 일사량을 보여 준다. 연간 최저기온은 -17.5℃, 연평균기온은 12.4℃이 고, 연간 총 일사량은 4.85 GJ/m2이다.





Fig. 3은 본 해석에 사용된 난방부하이며, 2013년 01 월에서 2013년 12월까지 측정된 경기도 화성에 위치한 유리온실 1개동의 난방사용량이다. 연간 열사용량은 2,164 GJ이고, 최대부하는 463.8 kWth이다. Fig. 4는 유 리온실과 공동주택[5]의 난방부하 사용패턴을 비교하기 위하여, 시간대별 난방사용량을 해당 일의 일간 사용량 으로 나눈 값으로 표현한 것이다. 공동주택의 난방사용 패턴은 취침시간전(21시)에 가장 큰 난방부하를 보이고, 주간에도 재실자을 위한 난방이 연속적으로 사용되는 반 면, 유리온실의 난방사용패턴은 야간시간대(21시~09시) 의 사용량과 주간시간대(10시~20시)의 사용량이 현저하 게 차이가 나타났다. 난방부하 모델은 TRNSYS의 열부 하모듈(Type 682)을 사용하였으며, BTES에 의해 공급 되는 온수의 온도가 외기보상에 의한 난방공급온도 이상 일 경우 운전되도록 설정하였다. 지중 계간축열조는 수 직밀폐형 지중열교환기 배열을 원통형태의 제어체적 내 에 균등하게 배치한 모델인 Type557 모듈을 사용하였으 며, 60개의 보어홀을 3개의 레이어(반경방향) 내부에 각 각 20개씩 병렬로 배치하였다. 계간축열조는 유리온실 이 설치된 지역의 지중열전도계수를 사용하고, 하나의 보어홀에 하나의 유자형 관(u-tube)이 설치된 방식인 Single u-tube 방식으로 설정하였다. 지중 계간축열조의 상세내용은 Table 1에 정리하였다.



Fig. 3. Hourly heating use of the glass green house in 2013



Fig. 4. Hourly heating use patterns of the glass green house and the apartment house

태양열 집열기는 평판형 모델인 Type 539 모듈을 사용하였으며, 선행실험연구[6]에서 식(1)과 같이, 집열기 입구 유체온도(T_i), 외기온도(T_{amb}), 경사면일사량(G)의 함수로 나타난 집열효율을 사용하였다. 집열기는 2장이 직렬로 연결된 500개의 블록으로 구성되었으며, 총 집열 면적은 2,000㎡ (2㎡/장)이다. 태양열 순환부의 유량은 평판형 집열기의 정격유량인 단위면적당 0.02 kg/s를 사용하여 전체유량은 20 kg/s로 설정하였다.

$$\eta = 0.75 - 4.5 \times \frac{(T_i - T_{amb})}{G}$$
(1)

Table 1. Specification of BTES

Spec.	Value	
Volume of BTES(m ³)	20,000	
Depth of BTES(m)	41	
Diameter of BTES(m)	25	
Top side insulation of DTES	R-40(0.142 W/m ² K)	
Top-side insulation of BTES	+1.8m soil	
Number of borehole	60	
Configuration	3 in series x 20	
Diameter of a borehole(m)	0.15	
Distance between boreholes(m)	2.5	
Flowrate per a borehole(kg/s)	0.17	
Outside/inside diameter of U-Tube	0.025/0.02	
pipe(m)		
Initial temperature of ground(°C)	15	
Heat conductivity of ground(W/mK)	1.3	
Heat capacity of BTES(kJ/m ³ K)	2,000	
Working fluid	water	

태양열 계간축열시스템의 태양열 집열부(Solar loop), 지중축열부(BTES loop), 열사용처(Load loop)는 각각의 작동유체로 순환을 하며, 태양열 집열부와 지중축열부, 지중축열부와 열사용처는 열교환기로 연결되어 있다. 3 개의 순환루프가 각각 제어될 수 있으므로 운전모드를 세분화하여 Table 2에 나타내었다. Mode 1은 3개의 루 프가 모두 정지된 상태로 하절기의 야간시간, Mode 2는 동절기의 야간시간이지만 BTES 중심부의 온도가 설정 온도 이하인 경우, Mode 3는 동절기의 야간시간에 BTES에서 생산된 온수로 난방하는 경우, Mode 4는 난 방부하가 없고 태양열 집열과 BTES 축열이 되는 경우, Mode 5는 주간에 난방부하가 있지만 BTES 중심부의 온도가 설정온도 이하인 경우로, 태양열 집열과 BTES축 열이 진행되고, 난방부하는 BTES가 아닌 보조열원으로 충당하는 경우이다. TRNSYS에서 제공하는 마이크로프로세서 제어모듈 (Type 40)은 다수의 순환루프를 운전모드와 순환루프별 지정한 입력값으로 가동/정지할 수 있도록 개발된 것이 다. 태양열 계간축열시스템의 순환제어를 위해서 Table 2의 5개 운전모드를 입력하고, 태양열 집열순환과 계간 축열조 축열순환은 집열기 출구온도와 계간축열조 중심 부의 온도차(dT_{SOLAR}), 계간축열조 방열순환은 계간축열 조 중심부의 온도와 외기보상에 의한 난방공급설정온도 의 온도차(dT_{LOAD})에 의해 제어되도록 설정하였고, 난방 순환은 난방부하가 발생할 경우 순환되도록 설정하였다.

태양열 계간축열 난방시스템은 dT_{SOLAR}, dT_{LOAD} 두 온도차로 구동이 되기 때문에 두 변수의 다양한 조건에 대한 시스템의 성능을 확인하기 위해서 Fig. 5와 같은 시뮬레이션 케이스를 설정하였다. 시뮬레이션 케이스는 Box-Benken 실험계획법[7]에 기초한 9개 케이스에 영 역별로 추가하여 총 29개 케이스로 설정하였다.

Table 2. Operating modes of the solar BTES system

Mode	Solar collecting / BTES charging	BTES discharging	Load loop
1	OFF	OFF	OFF
2	OFF	OFF	ON
3	OFF	ON	ON
4	ON	OFF	OFF
5	ON	OFF	ON



Fig. 5. Simulation cases for parameter analysis

3. 해석결과

Figs. 6~11는 각각 1차년도부터 5차년도까지의 태양

열 이용률(SF; Solar Fraction, 연간 난방부하 대비 태양 열 계간축열시스템 공급량의 비율(%))과 5년 평균의 SF 등가선도를 보여주고 있다. SF 등가선도는 시뮬레이션 한 29개의 5년 데이터를 사용하여 Origin 2018 그래프 프로그램으로 작성하였다. 29개 데이터 사이의 영역은 보간법으로 계산된다.

먼저, Fig. 6은 태양열 축열이 시작되고 1차년도의 SF 결과를 보여주고 있다. SF가 15%이하로 낮으며 dT_{LOAD} 가 10℃근처에서 상대적으로 높은 SF를 보여준다. 축열 초기기간이기 때문에 10℃ 이상의 dT_{LOAD}에서는 BTES 중심부의 온도가 아직 설정값에 미치지 않는 기간이 많 고, 10℃ 이하의 dT_{LOAD}에서는 충분히 축열되기 전에 사 용함으로써 다시 난방사용 가능한 축열온도로 축열하는 시간이 필요한 것으로 판단된다. dT_{LOAD}과 dT_{SOLAR}가 모 두 높은 영역은 dT_{SOLAR}가 높아지면서 집열시간/집열량 과 축열량이 감소하고 BTES 중심부의 온도도 충분치 않아 가장 낮은 SF값을 보여준다.

Fig. 7은 태양열 축열이 시작되고 2차년도의 SF결과 를 보여주고 있다. dTLOAD가 낮아서 1차년도에 충분히 축열되기 전에, 저장된 열을 사용할 수 있었던 경우는 2 차년도에 SF가 현저하게 저하되었다. Fig. 8은 태양열 축열이 시작되고 3차년도의 SF결과를 보여주고 있다. SF가 50%가 넘는 결과들이 확인되고 있으며, dTLOAD가 높고, dTsoLar가 낮은 경우, 1, 2차년도에 축열된 열의 사용이 적고, 집열한 열량이 많은 상황으로 가장 높은 SF를 보여준다. Fig. 9는 태양열 축열이 시작되고 4차년 도의 SF결과를 보여주고 있다. dTLOAD가 큰 경우들에서 SF가 60%가 넘는 결과들이 확인되고 있으며, 이는 축열 된 열의 사용기준온도를 높게 설정함으로써 축열초기 사 용량이 적었던 케이스들이 사용기준온도 이상으로 충분 히 축열되었음을 의미한다. Fig. 10은 태양열 축열이 시 작되고 5차년도의 SF결과를 보여주고 있다. SF가 65% 가 넘는 결과들이 확인되고 있으며, dTLOAD, dTSOLAR가 각각 5℃, 15℃ 인 경우, 가장 높은 SF값(67.8%)를 보여 준다. 3차년도에 비해 4, 5차년도에서 관찰되는 변화는 3차년도에는 dTLOAD가 높아 축열된 열을 사용하지 않는 경우가 SF가 높은 상황이었지만, 4, 5차년도에는 dTLOAD 가 9℃인 경우에도 60% 이상의 SF값을 보여줌으로써. BTES가 충분히 축열된 것으로 판단된다. 예상되는 바와 같이 축열 1차년도부터 5차년도까지 해가 거듭될수록 축열량도 많아져서 SF값이 상승한다.



Fig. 6. Contour plots of solar fraction in heating of 1^{st} year with dT_{LOAD} and dT_{SOLAR}



Fig. 7. Contour plots of solar fraction in heating of 2^{nd} year with dT_{LOAD} and dT_{SOLAR}



Fig. 8. Contour plots of solar fraction in heating of 3^{rd} year with dT_{LOAD} and dT_{SOLAR}



dT_{SOLAR}

10

6 8

Fig. 9. Contour plots of solar fraction in heating of 4^{th} year with $dT_{\rm LOAD}$ and $dT_{\rm SOLAR}$

12 14 16 18 20 22 24



Fig. 10. Contour plots of solar fraction in heating of 5^{th} year with dT_{LOAD} and dT_{SOLAR}



Fig. 11. Contour plots of average solar fraction in heating of 5 years with dT_{LOAD} and dT_{SOLAR}

Fig.11은 5년간 평균의 SF를 나타내고 있다. 가장 높 은 SF는 dT_{LOAD}, dT_{SOLAR}가 각각 10℃, 10℃ 인 경우, 59.5%로 나타났으며, 이 결과는 일반적인 태양열 온수 난방 및 급탕시스템에서의 태양열측 순환펌프 가동을 위 한 차온제어가 10℃[8]이므로 유사한 결과로 판단된다. 한편, dT_{LOAD} 6℃이하에서는 SF 50% 이하의 결과를 보 여준다.

3. 결론

본 연구에서는 연간 2,164 GJ의 난방부하를 가진 경 기도 화성시의 유리온실 1개동에 2,000m²의 평판형 태 양열 집열기, 20,000m'의 지중 계간축열조를 가진 태양 열 지중 계간축열시스템을 연결하고, 태양열 집열 및 계 간축열조 축열순환을 위한 차온(dTsoLAR)제어와 계간축 열조 방열순환을 위한 차온(dT_{LOAD})제어 조건에 대하여 실험계획법에 기초하여 29개 케이스의 태양열 이용률 성능을 평가하였다. 시간에 따른 태양열 지중 계간축열 시스템의 동적 성능 예측을 위하여 TRNSYS 18 프로그 램을 이용하여 시뮬레이션하여, 단기 축열조가 없는 태 양열 지중 계간축열시스템에서 3차년도 이후로 태양열 이용률 50% 이상의 성능이 가능하고, 5차년도에는 태양 열 이용률 67% 이상의 성능이 확인되었다. 5년간 태양 열이용률이 가장 높은 제어방법은 태양열 집열과 BTES 방열에 dT_{SOLAR}, dT_{LOAD} 각각 10℃, 10℃로 차온제어한 경우로 5년간 평균 태양열이용률 59.5%임을 확인하였 다

본 연구에서 제안된 시스템은 태양열 지중 계간축열 시스템의 구성과 제어방법을 단순화하고 축열 및 방열성 능을 확보하기 위한 것이며, 추후 현장 실증과 연계하여 해석 신뢰성을 검증하고자 한다.

References

- H. Lund, S. Werner, R. Wiltshire, S. Svendsen, J. E. Thorsen, F. Hvelplund, B. V. Mathiesen, "4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems" *Energy*, Vol. 68, pp. 1-11, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089
- [2] J. Xu, R.Z. Wang, Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage", *Solar*

Energy, Vol. 103, pp. 610-638, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.06.006

- [3] T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen, "Seasonal thermal energy storage in Germany", *ISES solar world congress*. Vol. 14. No. 19.06. 2003.
- [4] L. Gao, J. Zhao, Z. Tang. "A review on borehole seasonal solar thermal energy storage" *Energy Proceedia*, Vol. 70, pp. 209-218, 2015.
 DOI: https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.02.117
- [5] J. Y. Eum, W. U. Kim, Y. K. Kim, "Analysis of Consumption Patterns by Energy Source in the Apartment House with District Heating System Using the K-apt Data and the AMR Data", *Journal of Korea facility management association*, Vol. 13, pp. 31-40, 2018.
- [6] Y. K. Kim, T. W. Lee, D. H. Lee, H. S. Choi, "An Effect Analysis of Circulation Flow Rate Variations for a Solar Collector on the Solar Heat Gain" *Proceedings* of the SAREK 2013 summer annual conference, pp. 335-338, 2013.
- [7] W. U. Kim, Y. S. Jeon, Y. C. Kim, "Simulation -based optimization of an integrated daylighting and HVAC system using the design of experiments method", *Applied Energy*, Vol. 162, pp. 666-674, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.153
- [8] N. C. Back, U. C. Shin, "Thermal Performance Evaluation of Solar Hot Water System according to Flow Rate Control", *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, pp. 140-145, 2011. DOI: https://doi.org/10.7836/kses.2011.31.5.140

김 원 욱(Wonuk Kim)

[정회원]



- •2009년 8월 : 고려대학교 일반대학 원 기계공학과 (공학석사)
- •2016년 2월 : 고려대학교 일반대학 원 기계공학과 (공학박사)
- •2016년 3월 ~ 현재 : 한국건설기 술연구원 박사후연구원

<관심분야> 에너지설비 시뮬레이션, 최적제어, 머신러닝, 신재생에너지

김 용 기(Yong-Ki Kim)

[정회원]

- 2000년 2월 : 전북대학교 일반대학 원 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2007년 8월 : 고려대학교 일반대학 원 기계공학과 (공학박사 수료)
- •2001년 5월 ~ 현재 : 한국건설기 술연구원 수석연구원

<관심분야> 건물에너지 관리, 신재생에너지, 도시에너지시스템 최적화