

나선유로에 의한 태양열 축열조 성층화 촉진 (제2보 시뮬레이션)

Enhancement of Stratification for Solar Water Storage Tank with Spiral Jacket and Coil(Part 2 Simulation)

이성훈(Seong Hoon Lee)¹, 손효석(Hyo Seok Son)¹, 홍희기(Hiki Hong)^{2†}

¹경희대학교 기계공학과 대학원, ²경희대학교 기계공학과

¹Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Republic of Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin 449-701, Republic of Korea

(Received August 8, 2013; revision received October 23, 2013; Accepted: October 28, 2013)

Abstract We have performed experiments to enhance the stratification in a storage tank in order to raise the collector efficiency and solar fraction in solar thermal systems. The storage tank with a spiral jacket in the side wall has a scroll-shaped heat exchanger coil added to the upper part. The performance was compared between only the side and upper-side heating part through simulation using TRNSYS under the same weather conditions and initial conditions. As a result, the upper-side heating has a 4.2% advantage in solar fraction, but almost no increase in collector efficiency.

Key words Active solar heat system(설비형 태양열 시스템), Spiral-jacketed storage tank(나선재킷 축열조), Stratification(성층화), Collector efficiency(집열효율)

† Corresponding author, E-mail: hhong@khu.ac.kr

기호설명

I_t : 경사면 투사 일사량 [kW]

Q_u : 획득열량 [kW]

Q_{aux} : 보조열원 열량 [kW]

그리스 문자

η : 집열 효율

1. 서 론

신재생에너지 분야에서도 변환형태가 열에너지인 태양열 시스템은 경제성 및 활용도가 높아 큰 경쟁력을 갖춘 분야로 평가된다.⁽¹⁾

태양열 시스템 보급의 확대를 위하여 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이를 바탕으로 적용분야가 점차적으로 넓어지고 있는 추세이다. 분야의 활성화를 위해서는 무엇보다도 가정용 및 소형건물, 복지시설용의 소형 및 중형시스템이 집중적으로 보급되어야 하며, 이를 위해서는 기존의 문제점이 해결되고 획기적으로 기술혁신이 이루어진 시스템의

도입이 전제되어야 한다. 이를 위해 지난 연구에서 나선재킷 축열조⁽²⁾ 대신 축열조 상부에 와선형 열교환코일을 추가로 설치하였다. 즉 상부를 집중적으로 가열한 후 측면 나선재킷을 통해 축열조 내의 물에 열을 전달하는 구조의 실증실험을 통하여 성층화 촉진을 통한 집열효율 상승과 작동유량의 변화에 대한 태양열시스템의 성능변화를 보였다.⁽³⁾ 그러나 동일 조건의 반복 및 재현이 힘든 실험의 특성상 정확한 비교가 불가능하였다. 따라서 본 연구에서는 시뮬레이션을 통해 상부·측면가열과 측면가열의 동일 조건에서 성능변화 분석을 수행하였다.

2. 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 Wisconsin 대학 SEL에서 개발한 TRNSYS를 사용하여 수행하였다. 수행한 시스템에 대한 개략도를 Fig. 1에, 주요 제원을 Table 1에 나타내었다.

시뮬레이션 모듈구성은 Fig. 2에 보이며, 실측된 기상데이터는 Data Reader 모듈 Type 9c를 통하여

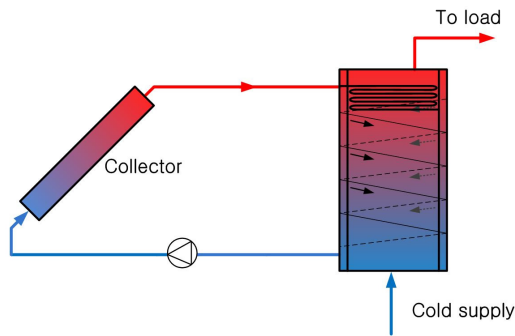


Fig. 1 Schematic diagram of system.

TRNSYS에 입력된다. 기상데이터의 온도와 일사량 처리 모듈 Type 16a를 거친 기상조건이 집열기 모듈 Type 1b에 입력되며 이러한 조건을 바탕으로 시뮬레이션이 이루어진다. 상부가열코일과 나선재킷 등 2개의 열교환기를 내장하고 있는 축열조 모듈 Type 60d는 동일한 체적을 갖는 실린더 형태로 단순화시켰으며, 10개의 노드로 구성된 성층화된 축열조로 가정하였다. 축열조 상부에 설치된 와선형 코일에는 외경 15.88 mm, 길이 21 m의 동관(열전달 면적 : 1.05 m²)을 입력하였다. 폭 13 mm, 피치 100 mm의 사각형단면을 갖는 전체길이 18 m(열전달 면적 : 1.78 m²) 나선재킷 유로의 재질은 스테인리스강(SUS304)이며, 시뮬레이션에는 같은 수력 직경을 갖는 원관으로 대체하였다. 이처럼 실제 축열조와 최대한 유사하게 형상을 모델링한 후 축열조 제작에 사용된 재료의 열전도도와 열전달 면적, 열교환기의 위치를 반영하여 컴포넌트에 입력하면

Table 1 Specification of system

Collector	Size	1180×2400 mm
	Area	2.83 m ²
	Unit	4
	Slope	45°
Storage tank	Capacity	550 L
	Material	SUS
Pump	Capacity	60 lpm(H : 4 m)
	Output	80 W

내장된 식에 의해 열전달계수 등 결과값이 계산된다. 시스템의 제어는 집열기 출구측과 축열조 출구측 온도차로 제어하였고 12℃ 이상이면 펌프가 작동하고, 2℃ 이하가 되면 작동이 중지되도록 설정하였다. 부하측은 사용자가 42℃의 물을 하루 동안 600 L를 사용하는 것으로 구성하였으며, 시수온도는 기상청에서 제공하는 1.5 m 지중온도의 월 평균값을 사용하였다. 부하측 공급온도를 사용온도 42℃에 맞추기 위해 축열조 출구온도를 고려한 시수유량 및 월별 시수온도를 EES를 통해 식으로 구현하였으며, TRNSYS의 Calling external programs 모듈 Type 66b를 통해 나타내었다. 이 모듈은 Type 14h로부터 정해진 시간에 작동 신호를 전달받으며, Type 6으로부터 축열조 출구온도를 전달받아 시수유량을 결정한다. 여기서, 시수온도는 Type 518로부터 월별 신호를 전달받아, 월별 평균 시수온도가 사용된다. 이렇게 결정된 시수와 온수의 온도 및 유량이 각각 Type 11h로 전달되어 부하측으로 공급된다.

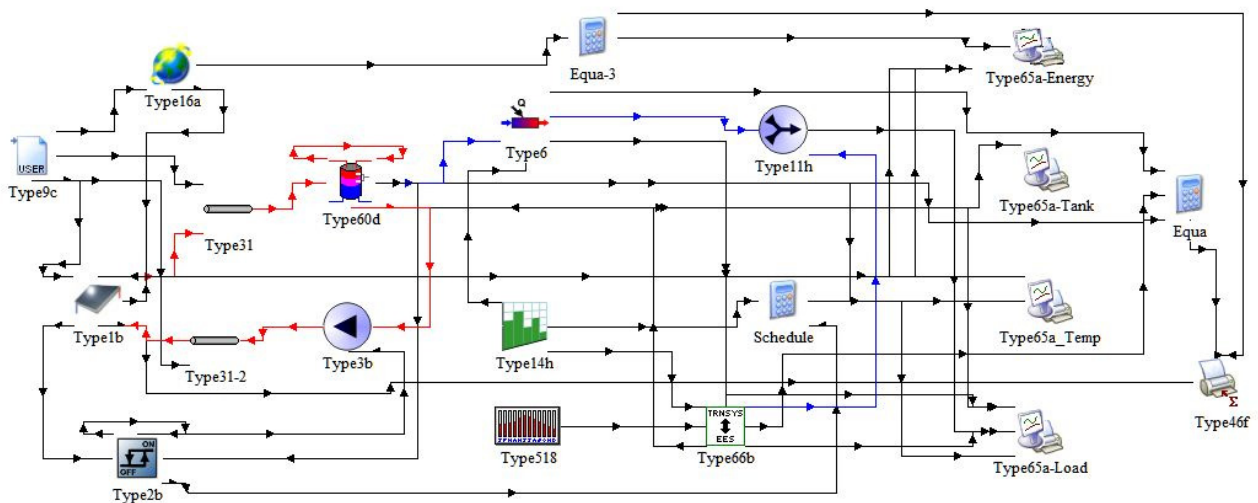


Fig. 2 Composition of TRNSYS module.

3. 결과 및 분석

3.1 실험과 시뮬레이션의 결과 비교

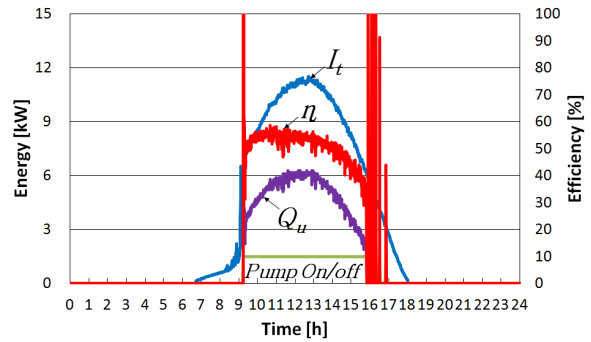
TRNSYS를 이용한 시뮬레이션의 적합성을 확인하기 위하여 일사조건이 매우 양호한 2011년 9월 27일을 대상으로 실험과 시뮬레이션의 결과를 비교하였다. Fig. 3은 대상일의 경사면에 투사되는 일사량, 획득열량, 집열효율 및 축열조의 높이변화에 따른 온도분포를 나타낸 것이다.⁽⁴⁾ 실험의 경우 하루 동안 집열면에 투사된 일사량은 260.6 MJ, 획득열량은 119.8 MJ로 46.0%의 집열효율을 보인다. 반면, 시뮬레이션의 경우 일사량은 260.4 MJ, 획득열량은 115.9 MJ로 44.5%의 집열효율을 보인다.

시뮬레이션에서의 집열효율이 실험에서의 집열효율보다 약 1.5%p 낮으며, 그래프로부터 온도분포의 경향은 상당히 일치하지만 약간의 온도차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 복잡한 실제의 축열조 구조가 모델링 및 시뮬레이션에 완전히 반영되지 않기 때문으로 판단된다. 축열조 구조의 단순화 과정에서 높이의 변화가 발생하였으며, 이러한 변화는 축열조 내 성층화에 영향을 미칠 수 있다. 또한 열교환기의 위치, 길이, 면적, 물성은 입력이 가능하나, 열교환기의 정확한 형태 및 세부 조건은 시뮬레이션에 반영하기 힘들다는 점은 축열조 내 온도분포에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 요인으로 인해 시뮬레이션에서의 축열조 하부 온도가 비교적 높게 나타나고, 이는 집열효율의 1.5%p 감소를 발생시킨 것으로 판단된다.

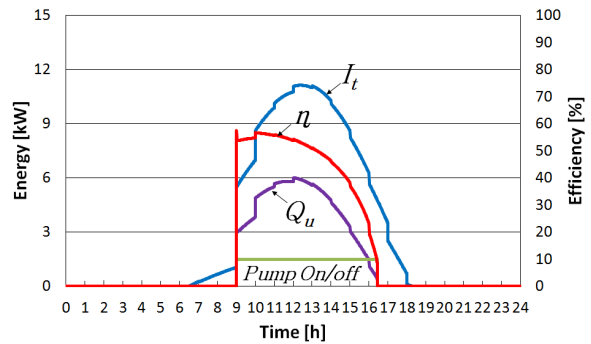
3.2 상부·측면가열과 측면가열 비교

실험과 시뮬레이션 결과의 비교를 통하여 시뮬레이션의 적합성을 확인할 수 있었다. Fig. 1의 축열조에서 본 연구에서 제안하는 상부·측면가열과 기존의 측면만 가열했을 때 집열효율 및 성층화정도를 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

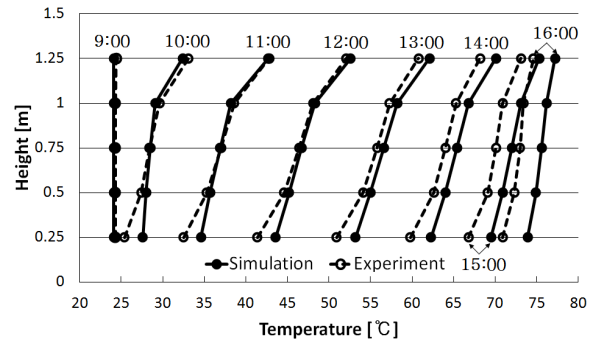
표준기상데이터에서 일사조건이 매우 양호한 4월 1일에 대하여 36초 간격으로 시뮬레이션을 실시하였다. 축열조 초기온도는 10℃, 집열기 순환유량은 10.5 lpm으로 동일하게 설정하였다. Fig. 4는 경사면에 대한 일사량, 획득열량, 집열효율 및 축열조의 높이에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 해당일 하루 동안 집열면에 투사된 일사량은 269.2 MJ이며, 상부·측면가열 방식의 획득열량은 119.6 MJ로



(a) Result of experiment



(b) Result of simulation



(c) Temperature profile in storage tank

Fig. 3 Comparing the results of experiment and simulation.

44.4%의 집열효율을 보인다. 반면, 측면가열 방식의 획득열량은 118.4 MJ, 집열효율 44.0%로 상부·측면가열 방식과 비교해 0.4%p 적게 나왔다. 이는 지난연구에서 실험을 통해 보인 3.0%p의 차이에 비해 작은 수치이다.

상부에 설치된 와선코일로 열전달면적이 60% 증가하였음에도 집열효율 향상으로 거의 이어지지 않은 것으로 보인다. 열교환코일 길이를 바꿔가면서

분석해본 결과 처음에는 집열효율이 급격히 증가하다 어느 이상이 되면 매우 완만해지는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서의 60% 증가는 완만한 영역에 들어간 것으로 판단된다.⁽⁵⁾ 즉 상부 집중가열을 통해 성층화 촉진으로 인한 이득은 집열효율 향상보다는 유용에너지 증대를 들 수 있으며, Fig. 4(c)를 통해 쉽게 이해할 수 있다. 온수급탕인 경우 40℃ 이상이면 추가적인 승온 없이 부하측에 공급할 수 있는데, 이 시점이 상부·측면가열 방식의 경우 12시경, 측면가열 방식의 경우 13시경으로 상부·측면가열 방식의 경우가 앞서는 것을 알 수 있다.

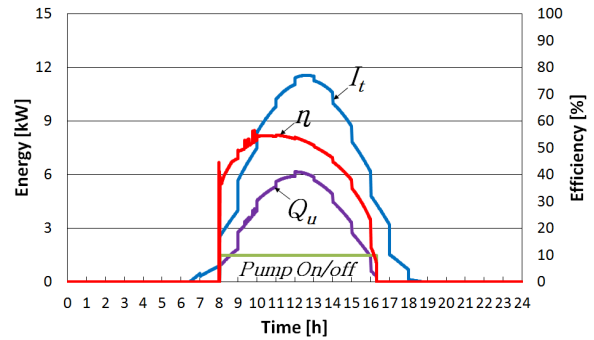
3.3 유량변화에 따른 결과

지난 연구에서 유량변화에 따른 집열효율 및 성층화정도를 비교하여 보인 바 있지만, 재현이 힘든 실험의 특성상 직접적인 비교가 불가능하였다. 본 연구에서는 상부·측면가열 방식에 대하여 시뮬레이션을 통해 비교하기로 하며, 일사조건이 매우 양호한 2011년 9월 27일로 기상조건 및 시스템 초기 상태를 동일하게 설정하고, 유량 10.5 lpm을 기준으로 75%, 50%, 25%로 각각 조절하여 비교를 실시하였다.

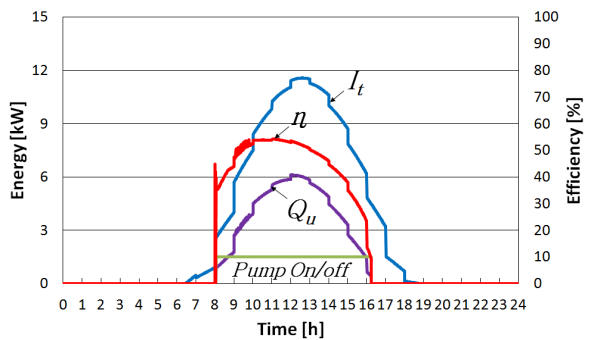
유량이 감소하면 상반되는 두 효과를 생각할 수 있다. 먼저 집열기 출구온도가 상승하여 성층화가 촉진되고 축열조 하부온도가 낮아지며, 이는 집열기 입구온도의 저하 및 집열효율 상승으로 이어진다. 반면에 유속 감소로 인해 축열조 내 열교환코일의 열전달계수가 감소함으로써 축열조 출구온도가 상승하고, 이는 집열기 입구온도의 상승으로 이어져 집열효율이 감소할 수 있다. 전자의 영향이 크다면 시스템의 효율이 상승할 것이고, 후자의 영향이 크다면 감소할 것이다.

집열기에서 획득된 열량으로부터 유량변화에 따른 집열효율 비교를 Table 2에, 성층화 정도를 Fig. 5와 Table 3에 나타내었다. 매우 작지 않는 한 유량이 집열효율에 미치는 영향은 일반적으로 그다지 크지 않으며, 본 연구에서의 25~100% 범위에서는 거의 차이가 없는 것으로 볼 수 있다.⁽⁶⁾ 다만 50%의 유량에서 다소 높은 집열효율을 보이는 것을 확인할 수 있는데, 이는 유속 감소로 인한 열전달계수 감소 효과보다 성층화 촉진에 의한 상승 효과가 더욱 컸음을 추정할 수 있다.

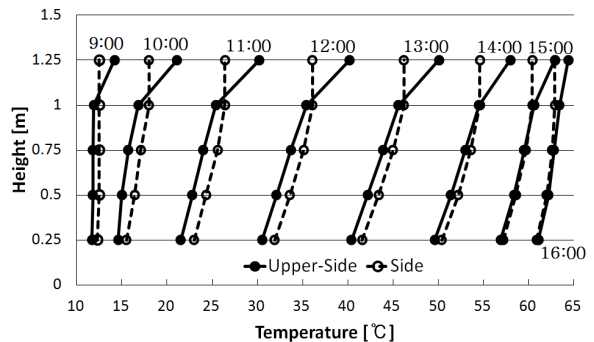
반면에 유량감소에 따라 성층화 정도는 현격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 12시 기준으로 유량



(a) Result on upper and side heating



(b) Result on side heating



(c) Temperature profile in storage tank

Fig. 4 Comparing the results of upper-side and side heating.

100%일 때 축열조 내 최대온도차가 9℃인데 반해 50%일 때 20℃ 정도이다. 하지만, 50% 이하의 유량에서는 축열조 상부온도가 집열기 출구온도보다 높은 역전현상을 나타낼 우려가 있으므로 대비를 요한다. 또한 유량과 상관없이 축열조 상부의 최종 온도가 75℃ 전후인 것을 보면 단순히 성층화를 촉진시키기 위해 유량을 줄이는 것은 의미가 없으며, 일사 상태가 약할 때 집열기 출구온도를 높이

Table 2 Comparison according to flow rate
(flow rate 100% : 10.5 lpm)

	100%	75%	50%	25%
Irradiation [MJ]	260.4			
Heat collected [MJ]	115.9	115.5	117.4	114.1
Collector efficiency [%]	44.5	44.4	45.1	43.8
Flow rate [lpm]	10.5	7.9	5.3	2.7
Initial temp in storage tank [°C]	24.2			
Simulation date	9/27/2011			

Table 3 Temperature differences between upper and bottom in storage tank(unit : K)

time	100%	75%	50%	25%
10 : 00	4.8	6.3	7.3	6.9
11 : 00	8.1	10.1	13.2	16.5
12 : 00	9.1	11.5	19.4	23.6
13 : 00	8.9	11.4	18.3	27.7
14 : 00	7.8	10.0	15.7	31.1
15 : 00	5.8	7.5	11.9	28.5
16 : 00	3.3	4.3	7.3	23.0

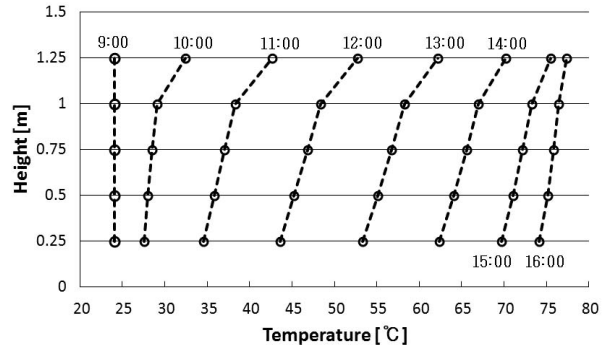
기 위해 일시적으로 유량을 줄이는 정도이다.

3.4 부하에 따른 결과

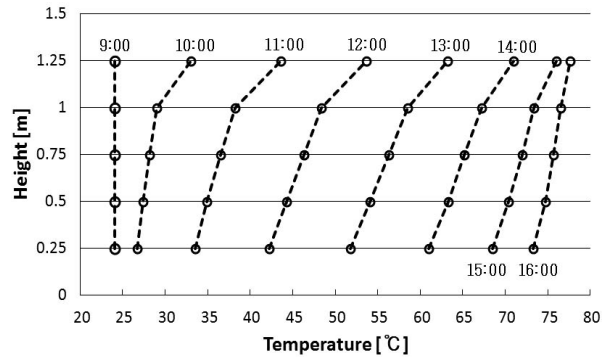
실제 시스템의 정확한 성능 및 거동 파악을 위해 부하패턴에 대한 모델링은 대단히 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 6에 나타낸 *Cardinale*⁽⁶⁾가 제시한 일일부하패턴을 적용하여 온수급탕 시스템의 시뮬레이션을 수행하고 시스템의 성능을 예측하고자 하였다.

앞서 무부하 상태에서 상부·측면가열과 측면가열 성능비교 시뮬레이션 조건과 동일하게 4월 1일의 표준기상데이터를 사용하여 36초 간격으로 시뮬레이션을 수행하였다. 사용온도는 42°C로 설정하였으며, 모델링된 시스템의 집열기 면적을 고려해 600 L/day의 부하를 적용하였다. 공급되는 시수온도는 시스템이 설치된 수원지역의 지중 1.5 m 평균온도인 10°C로 설정하였다.

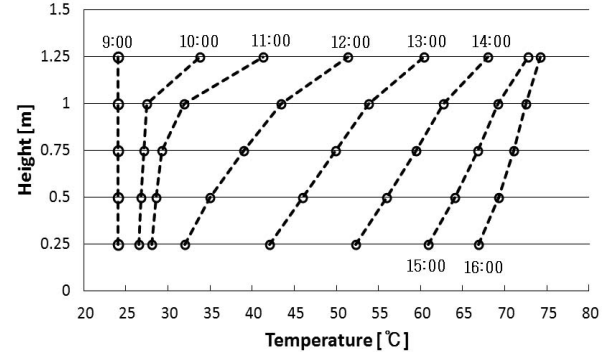
상부·측면가열 방식과 측면가열 방식에 대해 부하를 적용한 시스템의 시뮬레이션 결과를 Table 4와 Fig. 7에 나타내었다. 상부·측면가열 방식은 무부



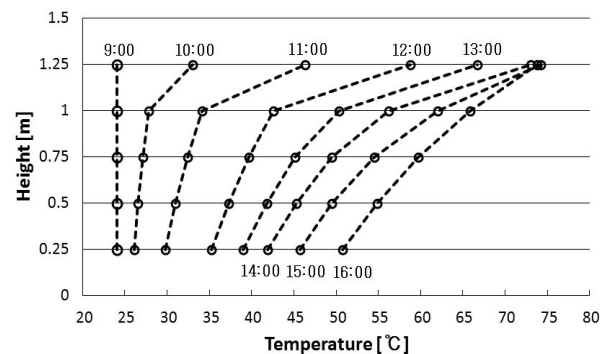
(a) Flow rate 100%



(b) Flow rate 75%



(c) Flow rate 50%



(d) Flow rate 25%

Fig. 5 Temperature profile in storage tank.

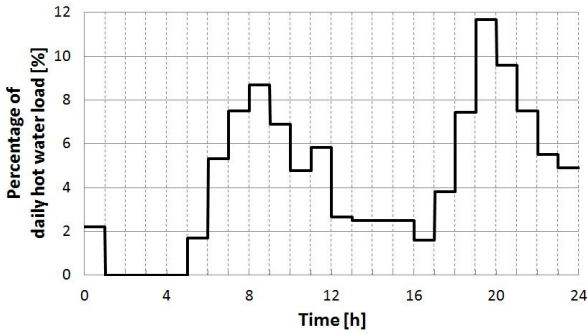


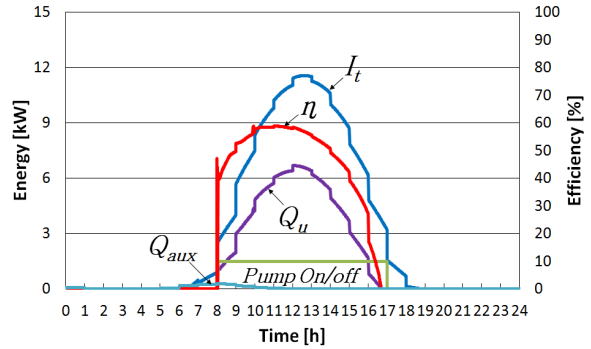
Fig. 6 Daily hot water load.

Table 4 Daily simulation results according to heating method

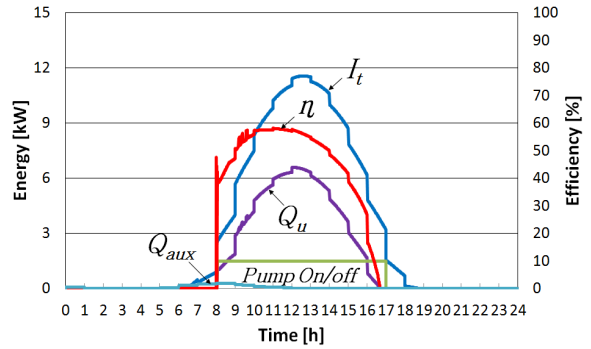
	Upper and side spiral-jacket heating	Spiral-jacket heating
Solar radiation [MJ]	269.2	
Heat collected [MJ]	131.5	129.7
Collector efficiency [%]	48.8	48.2
Flow rate [lpm]	10.5	
Heat load [MJ]	80.4	80.4
Auxiliary energy [MJ]	27.3	30.5
Solar fraction [%]	66.1	62.0

하 상태보다 11.9 MJ 많은 열량을 획득하였고, 4.4%p 높은 집열효율을 보였다. 이와 유사하게 측면가열은 무부하 상태보다 11.3 MJ, 4.2%p의 증가를 보였다. 이는 축열조 성층화가 극대화되고 지속적인 시수의 유입으로 하부온도가 낮아져, 무부하의 경우보다 집열기 입구로 공급되는 열매체의 온도가 낮아짐으로써 집열효율 증가로 이어진 것이다. 또한 무부하의 경우 약 16시경에 순환펌프의 작동이 멈추는 반면 부하가 있을 경우 약 17시경까지 순환펌프가 작동하며 약 1시간 동안 추가로 열량을 획득하게 된다.

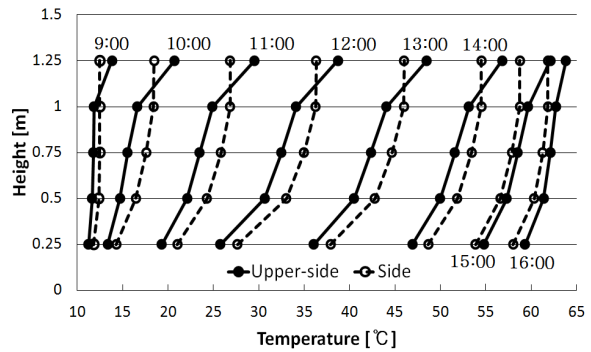
상부·측면가열 방식이 48.8%의 집열효율을 보여 측면가열 방식의 48.2%와 거의 같은 집열효율을 나타낸다. 반면에 축열조 출구온도가 사용온도에 미치지 못할 경우 가동되는 보조열원 열량의 경우 각각 27.3 MJ, 30.5 MJ로 상부·측면가열이 3.2 MJ 적게 사용한다. 즉 상부·측면가열 방식이 4.1%p 높은 태양열의존율을 나타내는데 두 방식 간 집열효율 차이에 비해 큰 수치라 할 수 있다. 이는 Fig. 7과 같이 상부집중 가열로 인해 측면가열 방식보다 축열조 상부가 빠른 시간에 승온되었기 때문이다.



(a) Result on upper and side heating



(b) Result on side heating



(c) Temperature profile in storage tank

Fig. 7 Comparing the results of upper-side and side heating.

4. 결 론

이전 연구에서 태양열 축열조의 성층화 촉진을 위한 실증실험이 이루어졌다. 하지만, 동일조건에서의 반복실험이 어려운 실험의 특성상 정확한 비교가 어려웠다. 본 연구에서는 TRNSYS를 이용한 시뮬레이션의 적합성을 검증하고, 가열방식 및 유량변화에 따른 비교와 더불어 부하가 적용된 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과 무부하의 경우 측면만을 가열하는 방

식에 비해 상부·측면가열 방식의 집열효율이 0.4%p 증가로 거의 차이가 없었으나, 축열조 상·하부 온도차가 커지는 성층화 촉진으로 유효에너지의 증가를 확인하였다.

최대유량인 10.5 lpm을 기준으로 75%, 50%, 25%로 변화시키며 시뮬레이션을 진행한 결과, 유량감소에 따라 집열효율의 차이는 미미하였으나 성층화는 현격히 촉진됨을 확인할 수 있었다.

부하를 적용한 시스템의 일간 시뮬레이션을 수행한 결과, 상부·측면가열 방식이 측면가열 방식에 비해 집열효율은 거의 차이가 없으나, 태양열 의존율은 4.1%p 높아 성층화 촉진을 통한 이득을 볼 수 있었다.

후 기

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제임(No. 20103010080011).

Reference

1. Hong, H., 2004, 3% Use of alternative energy in 2006 and solar thermal system, Magazine of the SAREK, Vol. 33, No. 11, pp. 47-54.
2. Kim, J. H., Choi, B. S., Hong, H., and Kim, Y. S., 2005, Experimental verification for a spiral-jacketed storage tank applied to solar thermal system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 341-346.
3. Kwon, J. W. and Hong, H., 2012, Enhancement of stratification for solar water storage tank with spiral jacket and coil(Part 1 : Verification experiment), Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 24, No. 4, pp. 336-342.
4. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Process, 2nd ed, John Wiley and Sons, New York., pp. 250-252.
5. Choi, B. S., Lee, B. J., Kang, C., and Hong, H., 2005, Verification experiment and analysis for 6 kW solar water heating system(Part 3 : Optimum design and economic evaluation), Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 16-24.
6. Cardinale, N., Piccininni, F., and Stefanizzi, P., 2003, Economic optimization of low-flow solar domestic hot water plants, Journal of the Renewable Energy, Vol. 28, No. 12, pp. 1899-1914.