

나선유로에 의한 태양열 축열조 성층화 촉진(제1보 실증실험)

권재욱, 홍희기,*†

경희대학교 기계공학과 대학원, *경희대학교 기계공학과

Enhancement of Stratification for Solar Water Storage Tank with Spiral Jacket and Coil(Part 1 : Verification Experiment)

Jae-Wook Kwon, Hiki Hong*†

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

(Received January 16, 2012; revision received February 2, 2012)

ABSTRACT: Large-scale active solar heat systems are generally using heat exchanger between collector and storage tank loops to prevent damage by freezing. It is difficult to maintain stratification in a storage tank in the system owing to greater flow rate enhancing heat transfer. In the previous study, we introduced a spiral-jacketed storage tank and obtained good results to keep system performance of general level without better stratification. We added a scroll-shaped heat exchanger coil on the upper part in the spiral-jacketed storage tank. As a result of the experiment, it was verified that degree of stratification of the new type storage tank is higher than that of the previous one with a possibility of better collector efficiency and solar fraction.

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

기 호 설 명

I_t	: 경사면 투사 일사량 [kW]
Q_u	: 획득열량 [kW]
T_{fi}	: 열매체의 집열기 입구온도 [°C]
T_s	: 축열조 온도 [°C]

그리스 문자

η	: 집열 효율
--------	---------

하첨자

i	: 입구측
o	: 출구측

1. 서 론

기후변화협약의 발효와 배럴당 100달러 이상의 고유가로 신재생에너지의 중요성이 지속적으로 주목받고 있으며, 그 중에서도 경제성 면에서 가장 경쟁력을 갖춘, 변환형태가 열에너지인 태양열 시스템의 보급과 확대가 예상되고 있다.⁽¹⁾

태양열 분야의 활성화를 위해서는 무엇보다도 가정용 및 소형건물, 복지시설용의 소·중형 시스템이 집중적으로 보급되어야 한다. 이를 위해서는 단순한 구조이면서도 성능향상이 이루어진 시스템의 도입이 전제되어야 한다. 그 동안 축열조 내의 상·하부의 온도차를 크게 하는 성층화촉진기술을 통해 태양열시스템의 효율향상이 가능하다는 것은 이론적, 실험적으로 규명되었다.⁽²⁻⁵⁾ 그러나 다양하게 개발된 디퓨저, 분배기 등의 성층화촉진기구를, 열교환

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2925; fax: +82-31-202-2625

E-mail address: hhong@khu.ac.kr

이 필요한 강제순환방식에 적용하기에는 어려움이 있었다. 즉, 동파에 안전하기 위해서는 실외측 배관과 집열기에는 부동액을 순환시키며 축열조 내의 물과는 열교환이 요구되나, 열전달촉진을 위해서는 순환유량이 커지고 이로 인해 축열조에 유입되는 유속이 커져 성능화촉진기구는 제 기능을 발휘하기 어렵게 된다. 이에 본 연구에서는 디퓨저 대신 축열조 상부에 와선형의 열교환 코일을 설치하여 상부를 집중적으로 가열한 후, 측면 나선재킷을 통해 조 내의 물에 고르게 열을 전달하는 구조의 축열조를 제작하여 실증실험을 수행하였다.⁽⁶⁾

2. 시스템의 설치 및 실험

본 실험에서는 이전실험⁽⁷⁾에 사용하였던 나선재킷 축열조 대신 추가적으로 상부에 와선형 열교환 코일을 설치한 축열조를 사용하였다. 시스템에 대한 개략도를 Fig. 1에, 주요 제원을 Table 1에 나타내었다. 집열부는 최대 집열효율 72%인 집열기(면적 2.5 m²) 4장을 직렬로 연결하여 사용하였다. 인증받은 집열기의 성능곡선은 Fig. 2에 나타내었으며, 전면적을 기준으로 하였을 때

$$\eta = -3.9488 \frac{T_{fi} - T_a}{I_t} + 0.7203 \quad (1)$$

와 같이 집열효율 η 을 나타낼 수 있다. 집열기 입구 온도 T_{fi} 가 낮아질수록, 그리고 외기온도 T_a 및 경사면 투사 일사량 I_t 이 높아질수록 집열효율이 증가하는 것을 알 수 있다.⁽⁸⁾

본 연구의 핵심요소인 축열조의 개략도와 사진을 Fig. 3, Fig. 4에 보인다. 550 L 용량의 축열조 상부

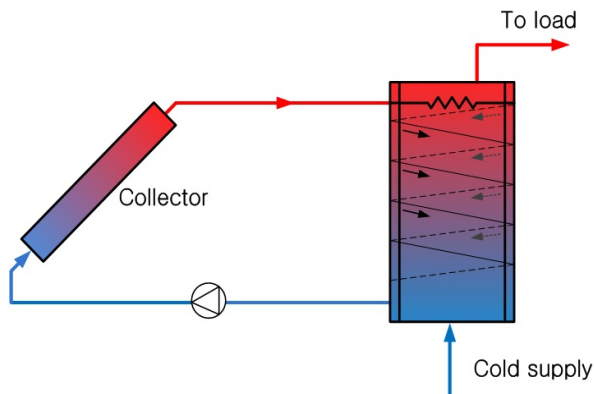


Fig. 1 Schematic diagram of system.

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

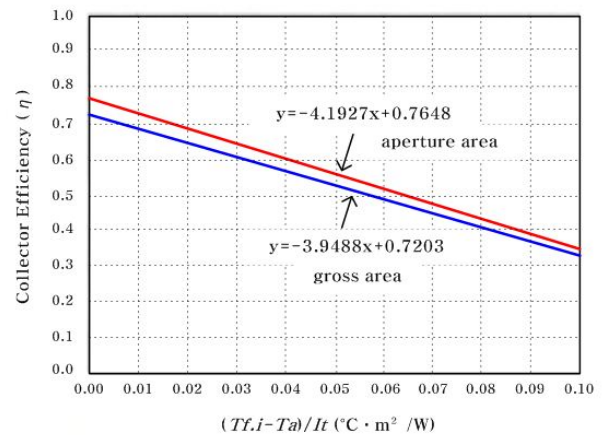


Fig. 2 Collector efficiency curve used in the present study.

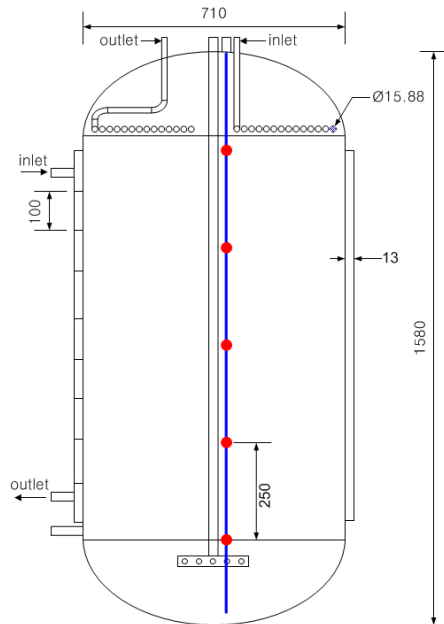


Fig. 3 Schematic of storage tank used in the experiment.

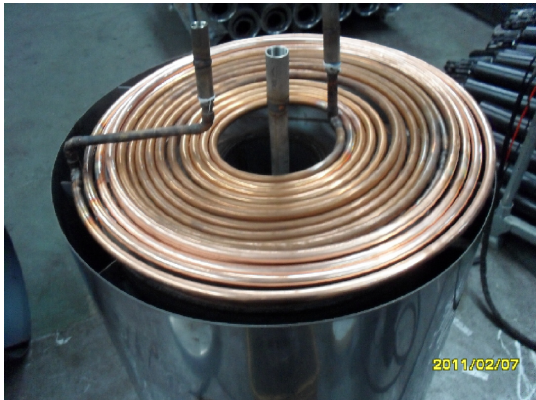


Fig. 4 Scroll-shaped heat exchanger coil located in the upper part.

에 동관을 와선형으로 감아 설치하였으며, 축열조 측면의 외부에 재킷 형태로 틀을 씌우고 그 사이의 공간에 나선형의 유로를 구성하였다. 도면에 보이는 바와 같이 상부와선 코일에는 외경 15.88 mm, 두께 1.24 mm, 길이 21 m의 동관(열전달 면적 : 1.05 m²)을 사용하였다. 나선재킷에 사용된 나선유로는 폭 13 mm, 피치 100 mm, 전체길이 18 m(열전달 면적 : 1.78 m²)로서, 열전달면의 두께는 1.5 mm이며, 재질은 스테인리스강(SUS304)이다. 축열조 내부에는 높이에 따른 온도변화를 알아볼 수 있도록 250 mm 간격으로 5개의 온도센서를 설치하였다. 측면의 나선재킷만 적용할 때(이하 측면가열)와 상부를 먼저 가열하고 나선재킷을 가열할 때(이하 상부·측면가열)의 직접적인 성능 비교를 위해, 유로를 변경할 수 있도록 배관을 구성하였다. 배관 내의 열매체로는 40%wt의 프로필렌글리콜을 사용하였다.

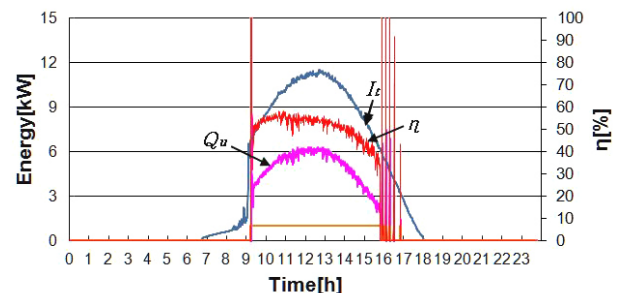
본 시스템은 수원에 설치되었으며, 일사 상태가 좋은 2011년 9월부터 본격적으로 데이터를 획득하였다. 측정은 시스템 각부에 설치되어 있는 센서에서 36초 간격으로 이루어지며 데이터로거를 거쳐 PC에 저장된다. 경사면에 투사되는 일사량은 집열기와 같은 각도인 45°로 일사계를 설치하여 측정하였으며, 정확도를 높이기 위해 기상청 데이터와 비교를 통해 교정하였다. 각 측정점의 온도는 K-type의 열전대를 이용하여 측정하였다. 시스템의 제어는 집열기 출구측 온도와 축열조 출구측 온도를 측정하여 그 온도차로 시스템을 제어하였고 12°C 이상이면 펌프가 작동하고, 2°C 이하가 되면 작동이 중지되도록 설정하였다.

3. 실험결과 및 분석

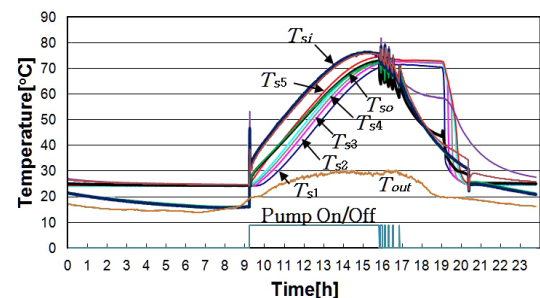
3.1 상부·측면가열과 측면가열 비교

일사조건이 매우 양호한 2011년 9월 27일의 데이터를 Fig. 5에 보인다. 실험은 상부와 측면을 동시에 가열하는 조건으로 진행하였으며, 일사량과 시스템 각 부 및 축열조 내부의 온도변화를 그래프로 나타내었다. 축열조 초기온도는 24.2°C, 집열기 순환 유량은 10.5 lpm으로 시스템 동작 시간은 오전 9시 경부터 16시까지 총 7시간 진행되었다. 이 시간 동안 경사면에 투사된 일사량은 260.6 MJ, 획득열량은 119.8 MJ로 집열효율은 46.0%를 보였다.

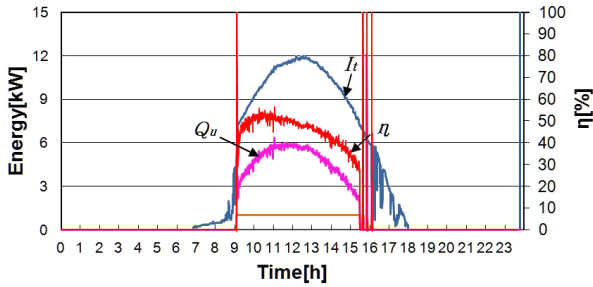
상부와 측면을 동시에 가열했을 때와 측면만 가열했을 때의 집열효율 및 성층화정도(축열조 상하부 온도차)를 비교하고자 하였다. 이를 위해 유로를 측면만 가열하도록 변경하여 실험한 2011년 9월 30일의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 축열조 초기온도는 23.3°C이며, 작동 유량은 밸브의 개도를 조정하여 10.5 lpm으로 상부·측면가열 실험과 동일하게 설정하였고 시스템 동작 시간도 오전 9시 경부터 16시까지 총 7시간 진행되었다. 투사된 일사량은 271.3 MJ, 획득열량은 109.8 MJ로서 집열효율은 40.2%로



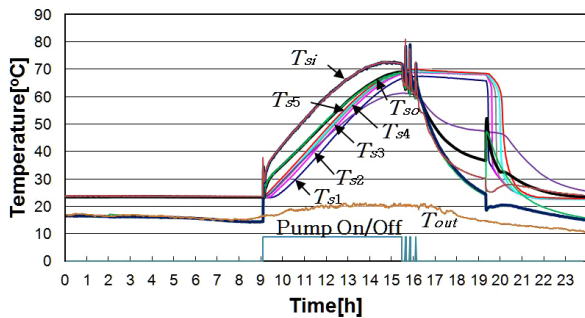
(a) Solar radiation, acquired heat and efficiency



(b) Timewise variation of temperatures
Fig. 5 Result graph of upper and side spiral-jacket heating.



(a) Solar radiation, acquired heat and efficiency



(b) Timewise variation of temperatures

Fig. 6 Result graph of side spiral-jacket heating.

상부 · 측면가열 실험과 비교해 5.8%p 적게 나왔다.

일사조건이 유사하지만 시스템의 집열량 및 집열 효율이 차이 나는 이유는 상부 · 측면 동시가열의 경우 열전달 면적이 60% 정도 늘어난데다가 이 면적이 상부에 집중되었기 때문이다. 또한 상부를 우선 집중 가열한 후 측면을 가열하기 때문에 상대적으로 축열조 상하부의 온도차가 커지고, 즉 성층화가 촉진되면서 축열조 하부온도가 낮아지게 된다. 이로부터 보다 충분한 열전달과 성층화 촉진효과로 축열조 출구온도(집열기 입구온도)가 낮아지고 집열 효율 향상으로 이어지게 된다. 축열조 내의 상하부 온도 및 온도차를 Fig. 7과 Fig. 8, Table 2에 나타내었다.

최대온도차가 상부 · 측면가열 방식이 10.6°C, 측면가열 방식이 5.9°C로서 4.7 K 높은 것을 확인할 수 있다. 12시경에 최대온도차, 즉 성층화가 최대로 이루어지다 그 이후에는 점차 완화되는 양상을 보인다.

성층화가 촉진됨으로써 얻을 수 있는 이득은 집열효율 향상 이외에도 가용에너지 증대를 들 수 있으며, Fig. 8을 통해 쉽게 이해할 수 있다. 온수급탕인 경우 40°C 이상이면 부하측에 공급할 수 있는데, 11시경에 상부 · 측면가열에서는 공급이 가능하며, 40°C 이르지 못한 상황에서 보조보일러를 통해 승

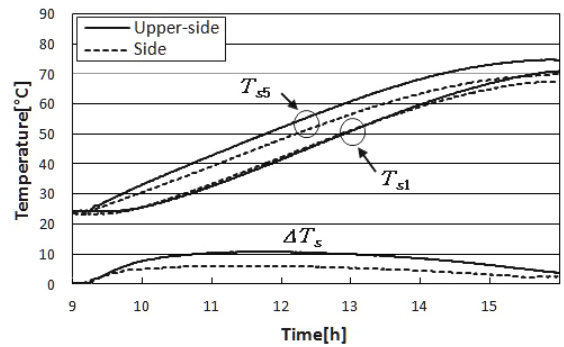


Fig. 7 Temperature difference between top and bottom in storage tank.

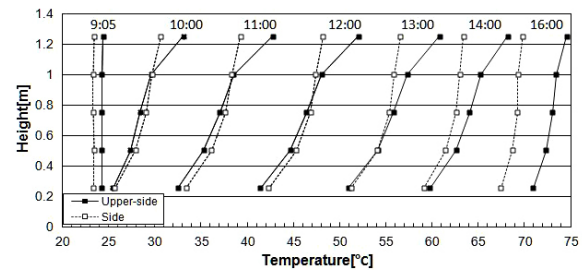


Fig. 8 Temperature profile in storage tank.

Table 2 Comparison according to heating method

	Upper and side spiral-jacket heating	Spiral-jacket heating
Solar radiation [MJ]	260.6	271.3
Heat collected [MJ]	119.8	109.1
Collector efficiency[%]	46.0	40.2
Modified efficiency[%]	46.0	43.0
Flow rate[lpm]	10.5	10.5
Initial temp in storage tank[°C]	24.2	23.3
Outdoor average temp[°C]	26.7	19.5
Start time	09 : 13	09 : 05
Experiment date	9/27	9/30

온폭이 작아 에너지절약으로 이어진다.

일사조건은 거의 비슷한 반면 평균외기온도는 상부 · 측면 가열이 26.7°C, 측면가열 방식이 19.5°C로

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

time	Upper and side spiral-jacket heating	Spiral-jacket heating
10 : 00	7.6	4.9
11 : 00	10.3	5.9
12 : 00	10.6	5.9
13 : 00	9.9	5.3
14 : 00	8.5	4.4
15 : 00	6.3	3.1
16 : 00	3.7	2.3

서 적지 않은 차이를 보인다. Fig. 2의 집열효율곡선 및 식(1)로부터 이와 같은 외기온도를 적용했을 때 집열기 입구온도 50℃, 경사면일사량 900 W/m² 기준으로 $(T_{fi}-T_a)/I_t$ 는 각각 0.026과 0.034이 되며, 집열효율은 약 3% 차이를 보이게 된다. 따라서 동일한 외기온도였다면 측면가열방식은 실측된 값 40.2%에서 43% 정도로 향상될 것이며, 실험을 통한 집열효율의 차이는 외기온도의 영향이 중첩됨으로써 과장된 것으로 판단된다. 그러나 상부·측면가열이 46.0%로서 측면가열보다는 3%p 상승하였다고 할 수 있다.

초기수온, 일사량 및 외기온도 등의 변동으로 인하여 실증실험을 통한 재현성 및 성능향상의 효과를 엄밀하게 보이기 어렵다. 따라서 이러한 요인을 배제한 시뮬레이션에 의한 분석이 필수적이며, 이에 대한 분석결과는 제2보에서 보이기로 한다.

3.2 유량변화에 따른 결과

앞서 상부·측면가열 실험과 측면가열 실험 결과의 비교를 통하여 상부·측면을 동시에 가열할 때 효율 향상과 좀 더 높은 상하부 온도차가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이에 상부·측면 동시 가열 조건일 때 유량 변화에 따른 집열효율과 성층화정도를 파악하고 보다 적절한 유량값 도출을 위해 실험을 수행하였다.

10.5 lpm을 기준으로 하여 유량을 25%, 50%, 75%로 각각 조절하고 그 결과를 Table 4에, 성층화 정도를 Table 5와 Fig. 9에 나타내었다. Table 4로부터 유량이 감소하면서 전반적으로 집열효율이 감소하는 추세를 보임을 알 수 있다. 반면에 상하부 온

Table 4 Experiment data comparison(flow rate 100% : 10.5 lpm)

	100%	75%	50%	25%
Irradiation[MJ]	260.6	262.7	225.5	209.8
Heat collected [MJ]	119.8	118.2	94.1	81.9
Collector efficiency[%]	46.0	41.2	41.7	39.0
Modified efficiency[%]	46.0	45.7	44.3	41.3
Flow rate[lpm]	10.5	8.3	5.3	2.5
Initial temp in storage tank[℃]	24.2	20.0	21.7	20.7
Outdoor average temp[℃]	26.7	16.4	20.8	21.5
Start time[h]	09 : 13	09 : 06	09 : 13	09 : 07
Experiment date	9/27	10/17	10/07	10/08

Table 5 Temperature differences between upper and bottom in storage tank (unit : K)

time	100%	75%	50%	25%
10 : 00	7.6	6.5	8.1	9.1
11 : 00	10.3	11.5	13.4	18.4
12 : 00	10.6	12.5	14.7	23.5
13 : 00	9.9	11.5	14.2	23.6
14 : 00	8.5	9.5	11.8	21.0
15 : 00	6.3	6.7	8.4	15.9
16 : 00	3.7	4.2	4.3	8.4

도차는 2배 이상 증가함으로써 성층화가 촉진되는 양상을 보인다.

유량이 75%일 때 미세하게나마 50%에 비해 평균집열효율이 작은 값을 보이는 이유는 앞서 언급한 바와 같이 주로 외기온도의 영향으로 볼 수 있다. 75% 실험의 경우 외기온도가 50%에 비해 현격히 떨어짐으로써 집열효율이 저하된 것으로 판단된다. 따라서 축열조 초기수온, 일사량 및 외기온도가 평균집열효율에 적지 않은 영향을 주므로 Table 3은 유량변화만에 따른 결과라고 단정지을 수가 없다.

유량이 감소하면 다음의 상반되는 두 개의 효과를 생각할 수 있다. 먼저 성층화가 촉진되어 축열조 하부온도 및 집열기 입구온도 저하에 의한 집열효

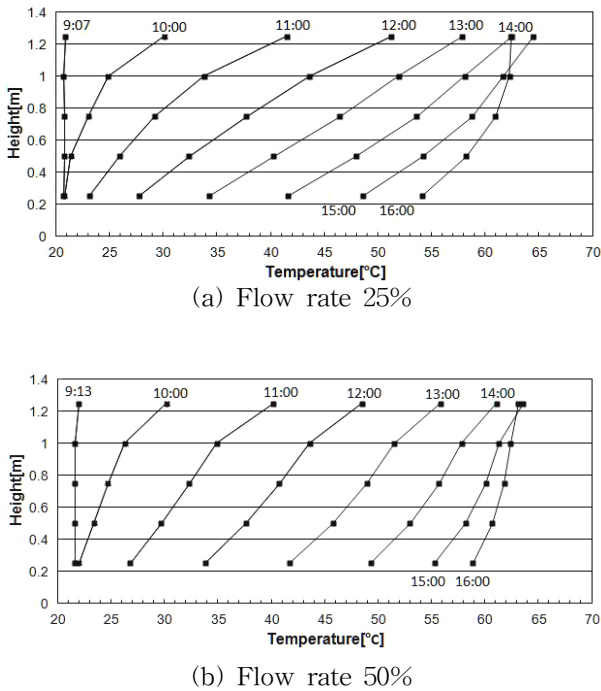


Fig. 9 Temperature profile in storage tank.

을 상승효과가 있다. 반면에 유속 감소로 인해 축열조 내에서의 열전달계수가 떨어짐으로써 축열조 출구온도, 즉 집열기 입구온도가 올라가고 집열효율이 저하되는 효과도 생각할 수 있다. 이 둘이 상쇄되는 경우에는 집열효율의 변화가 거의 없을 것이며 가급적 유량이 적은 것이 바람직하다. 즉 펌프동력 감소와 성층화 촉진으로 이용할 수 있는 열량이 증대하게 된다.

제 3.1절에서도 논의한 바와 같이 집열효율에는 외기온도의 영향도 매우 크므로, Table 4에 정리한 결과만으로 유량이 감소함에 따라 집열효율이 감소한다고 할 수 없다. Fig. 2의 집열효율곡선 및 식(1)을 이용하여, 유량 100%일 때의 평균외기온도와 같다면 유량 75, 50, 25%에서의 집열효율은 각각 4.5, 2.6, 2.3%p씩 증대가 예상된다. 이를 Table 4에 수정된 집열효율로서 함께 정리하였다. 이로부터 유량 50%까지는 집열효율의 변화가 그다지 없으면서도 Table 5와 같이 성층화는 상당히 향상되는 것을 알 수 있다. 다만 집열효율 및 획득일사량은 실험오차와 불확실성이 워낙 크기 때문에 신중을 기할 필요가 있다. 동일한 기상조건 하에서 유량만의 영향을 파악하기 위해서는 시뮬레이션 기법에 의존할 수밖에 없으며, 이에 대한 분석은 제2보에서 다루기로 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 가용에너지를 높이고 집열효율을 향상시킬 수 있는 태양열 축열조의 성층화 촉진을 도모하기 위해 상부 와선코일 및 측면 나선채킷에 의해 가열하는 축열조를 제작하여 실증실험을 진행하였다.

실험결과 측면만을 가열하는 방식에 비해 상부·측면가열 방식의 집열효율이 3%p 증가하고, 축열조 상·하부 온도차가 2배 가까이 증가함으로써 성층화가 촉진되는 것을 확인할 수 있었다.

시스템 제어를 위한 최적의 유량을 선정하기 위해 최대유량인 10.5 lpm을 기준으로 75%, 50%, 25%로 각각 유량을 줄여 실험을 진행한 결과 유량이 줄어들수록 성층화 정도는 확연히 높아지지만 집열효율은 다소 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 다만 축열조 초기온도 및 기상조건이 상이하기 때문에 유량 저하로 인한 효율 감소로 단정짓기는 어려우며, 이에 대한 분석은 제2보에서 다루기로 한다.

후 기

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

참고문헌

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. Chung, J. D., Park, J. H., and Cho, S. H., 2004, Effect of design factors on the performance of stratified thermal storage tank, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 16, No. 11, pp. 1077-1083.
3. Chung, J. D., 2010, Integral approximate solution for stratified thermal storage tanks considering mixing region, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 43-48.
4. Lee, Y. S., Lee, S. N., and Kim, J. R., 2005, Effect on stratification due to diffuser shape in a thermal storage tank, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.

- 17, No. 11, pp. 990-997.
5. Musser, A. and Bahnfleth, W. P., 2001, Parametric study of charging inlet diffuser performance in stratified chilled water storage tanks with radial diffusers : Part 1-model development and validation, *Int. J. of HVAC&R Research*, Vol. 107, pp. 22-407.
 6. Kwon, J. W. and Hong, H., 2011, Enhancement of stratification for solar water storage tank, *Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference*, pp. 1196-1199.
 7. 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.
 8. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, *Solar Engineering of Thermal Process*, 2nd ed, John Wiley and Sons, New York, pp. 250-252.