

열교환코일 내장형 태양열 축열조의 성능향상 (제1보 실증실험)

Performance Enhancement of Solar Thermal Storage Tank with Heat Exchange Coils (Part 1 : Verification Experiment)

이육재(Uk-Jae Lee)¹, 홍희기(Hiki Hong)^{2*}

¹경희대학교 대학원 기계공학과, ²경희대학교 기계공학과

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Kyung Hee University, Yongin, 446-701, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Yongin, 446-701, Korea

(Received January 13, 2015; revision received February 16, 2015; Accepted: February 23, 2015)

Abstract A thermal storage tank with internal heat exchange coils is commonly used in solar thermal systems with a collector area below 100 m². The coils are installed in the lower part of the tank because the temperature of the upper part of the tank can drop if the outlet temperature of the collector becomes lower than the upper temperature of the tank, which is a kind of temperature reversal. As an alternative to the well-mixed storage tank with lower coil only, we have proposed a tank with lower and upper coils and have achieved superior thermal stratification in the tank, which results in increased collector efficiency and solar fraction. But, the phenomenon of temperature reversal was often observed in the tank when the load or solar radiation changed rapidly. In the present work, revised control was successfully applied, i.e., to heat only the lower coil using a three way valve if temperature reversal occurs and to operate the collector at a low flow rate when the quality of solar radiation is not good.

Key words 3-way valve(삼방밸브), Collector efficiency(집열효율), Stratification(성층화), Temperature reversal(온도 역전현상), Variable flow control(변유량 제어)

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

기호설명

A_c : 집열기 면적 [m²]
 C_p : 비열 [kJ/kg · K]
 F_R : 집열효율 수정계수
 I_t : 경사면 투사 일사량 [kW]
 \dot{m} : 집열유량 [lpm]
 R : 유량비
 r : 유량변화 효율비
 Q : 획득열량 [kW]
 T : 온도 [°C]
 ΔT : 집열기 출구온도와 축열조 하부온도차
 ($T_{co}-T_{sb}$) [K]
 U_L : 열손실계수 [kJ/h · m² · °C]

η : 집열효율 [%]
 τ : 투명 덮개 투과율

하첨자

a : 외기
 b : 하부
 c : 집열기
 i : 입구측
 low : 저유량
 $normal$: 정상유량
 o : 출구측
 off : 펌프 작동 중지
 on : 펌프 작동 시작
 s : 축열조
 t : 상부

그리스 문자

α : 흡수판 흡수율

1. 서 론

저자들은 선행연구⁽¹⁻³⁾를 통해 축열조의 상·하부가 열 방식을 통한 성층화 촉진, 집열효율 및 태양열의존율의 향상을 확인할 수 있었다. 동절기 동파 우려가 있는 우리나라에서 태양열온수기에는 열교환기를 사용하는 것이 일반적이다. 집열기 50매 이하에서는 통상 열교환코일 내장형 축열조를 사용하는데, 이때 열매체의 순환 유량을 증대시키면 열전달 촉진효과와 더불어 집열기 내 작동유체의 평균온도를 낮출 수 있어 집열효율 향상으로 이어진다.

전통적인 방식에서는 축열조의 중간 이하에 코일을 설치하는 하부가열을 사용하고 있는데(Fig. 1 참조), 그 이유는 온도 역전현상 방지 때문이다. 실제로 상·하부가열 방식에서 다양한 조건 하에서의 실험을 통해 집열운전 후반부에 축열조 온도가 충분히 높아지고 일사조건이 나빠지면 집열기 출구온도보다 축열조 상부온도가 높은 온도 역전현상이 일부 관찰되었다.

이를 보완하기 위해 축열조 상·하부 열교환코일의 유로 조정을 통해서 온도 역전현상을 방지하는 방안을 제시하였고⁽⁴⁾ 이를 TRNSYS 프로그램을 이용하여 가능성을 보였다.

Lee⁽⁵⁾는 동일조건 하에서 설비형과 자연형 태양열시스템을 비교한 연구를 수행한 바 있다. 전반적으로 설비형의 성능이 우수하지만 일사조건이 불량한 경우에는 오히려 자연형이 더 높은 성능을 보이는 흥미로운 결과를 밝힌 바 있다. 자연형은 아주 낮은 유량에서부터 비교적 큰 유량까지 선형적으로 집열 유량이 변하는 반면 설비형은 열매체 순환펌프 작동조건 $\Delta T > \Delta T_{on}$ 을 만족하지 못하면 집열운전이 이루어지지 않기 때문이다. 설비형에서도 인버터 펌프를 사용한 변유량제어에서는 이와 같은 자연형의 장점을 살릴 수 있으나, 추가 설치 비용으로 중·소형에 적용하는 것은 어렵다.

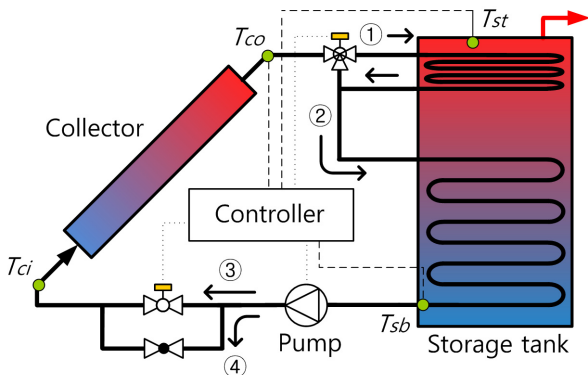


Fig. 1 Schematic of system with 3-way valve and variable flow control.

Table 1 Specification of system

collector	size	1180×2400 mm
	area	2.83 m ² ×4
	slope	45°
storage tank	capacity	550 L
	material	STS304
heating coil	upper	15 A×12 m
	lower	15 A×20 m
	material	STS304
pump	capacity	35 lpm (H : 3 m)
	output	40 W

본 연구에서는 기존의 상·하부가열 방식에 삼방밸브를 통한 유로조정과 단순한 변유량 제어를 채택하여 성층화의 극대화와 집열운전시간 연장 및 집열효율 향상을 도모하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에서 사용한 축열조는 이전 연구⁽¹⁾의 것과 유사하나, 제작의 용이함을 위해 열교환용으로 재킷 대신 코일을 이용하였다. Fig. 1과 같이 하부 열교환코일

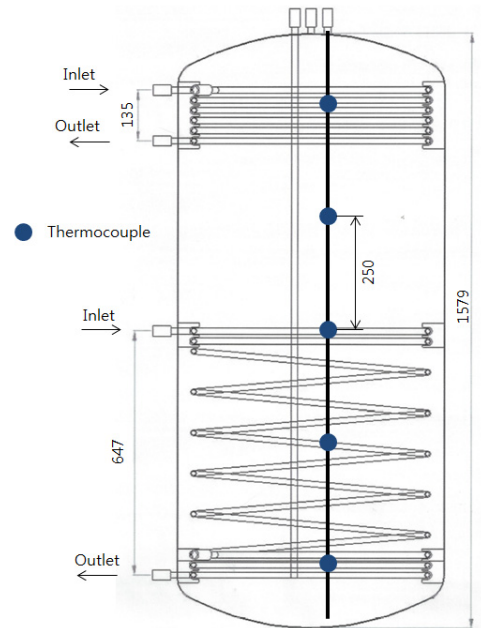


Fig. 2 Schematic of storage tank used in the experiment.

에 상부 열교환코일을 추가하여 상부를 일차적으로 가열할 수 있는 구조이다. Fig. 2는 실험에서 사용한 축열조의 도면을 나타내었다. 집열기 출구와 축열조 사이에는 삼방밸브가 설치되어 있어 온도 역전을 방지한다. 또한 열매체 순환배관에는 솔레노이드 밸브와 바이패스 밸브가 설치되어 있다. 이를 이용하여 평상시에는 ③, ④번 방향으로 열매체가 흐르고, 일상상태가 좋지 않거나 축열조 상부온도가 높아지면 솔레노이드 밸브가 닫혀 ④번 방향으로만 열매체가 흐르게 된다. 집열 운전은 $\Delta T (= T_{co} - T_{sb}) > \Delta T_{on}$ 이면 작동하게 되고, $\Delta T < \Delta T_{off}$ 이면 멈추게 된다. 실험에서 ΔT_{on} 는 12 K이고 ΔT_{off} 는 2 K의 값을 사용하였다. 집열부는 2.83 m² 집열기 4장을 직렬로 연결하였으며, 총 집열면적은 11.32 m²이다.

2.2 실험방법

먼저 바이패스 배관의 수동 유량조절밸브를 조정하여 Fig. 1의 ③, ④번 유동에 비해 ④번만의 유량을 20%가 되도록 한다. 기존의 하부가열 모드를 포함하여 총 5개 모드의 실험결과를 비교하였다. Table 2는 각각의 모드에 대한 예상되는 운전효과를 비교한 표이다.

2.2.1 모드 1

현재 일반적으로 사용하고 있는 방식으로서 축열조 내의 하부코일만으로 가열하게 된다. Fig. 1에서 삼방밸브를 ② 방향으로만 유동이 이루어지도록 고정시킨다. 축열조 내의 온도는 거의 균일한 완전혼합의 양상을 보인다. 집열기 출구 온도 T_{co} 가 축열조 온도보다 항상 높게 되어 온도 역전현상이 거의 일어나지 않는다.

2.2.2 모드 2

이전 연구⁽¹⁾에서 제안한 방식이다. 상부 열교환코일로 축열조 상부를 우선 가열하고 하부 열교환코일로 나머지 축열조 중·하부를 가열하는 구조로서 축열조 상·하부 온도차가 10 K 이상 차이나게 된다. 하지만 열매

체 순환펌프의 작동 조건 $\Delta T > \Delta T_{on}$ 를 만족해도 집열기 출구온도가 축열조 상부온도보다 낮으면(온도역전, $T_{co} < T_{sb}$) 축열조 상부온도가 떨어지는 온도 저하 현상이 발생하기도 한다. 이러한 온도 역전이 발생할 경우 하부 열교환코일만 가열하거나 순환유량을 감소시킬 필요가 있다.

2.2.3 모드 3

모드 2의 축열조 온도 저하를 방지하기 위해 평상시의 ① 방향에서 $T_{co} < T_{sb}$ 이면 삼방밸브를 작동시켜 유로를 ② 방향으로 바꿔 하부만 가열하게 한다.

2.2.4 모드 4

모드 2의 역전시 온도저하를 막을 수 있는 또 하나의 방법으로 유량을 감소시켜 집열기 출구온도를 상승시키는 것을 생각할 수 있다. 예비실험을 통해 유량을 1/10정도로 감소시켜도 기대하였던 효과를 충분히 얻지는 못했으나, 부수적으로 일상 상태가 좋지 못한 경우에도 펌프 운전이 지속되는 효과를 볼 수 있었다. $\Delta T < \Delta T_{low}$ 이면 솔레노이드 밸브를 닫아 ④ 방향으로만 유동이 이루어지게 한다. 실험에서 사용한 저유량은 펌프에 무리가 가지 않는 범주에서 정상유량의 1/5로 설정하였다. $\Delta T > \Delta T_{normal}$ 이면 다시 원래의 유량으로 복귀시킨다. 이에 대해서는 제 2.3절에서 상술하기로 한다.

2.2.5 모드 5

삼방밸브와 변유량 제어가 동시에 적용된 방식, 즉 모드 3과 모드 4가 결합된 방식이다. 상부가열에 의해 온도 성층화를 촉진시키고, 삼방밸브 제어에 의해 온도 역전에 대처한다. 또한 변유량 제어를 통해 집열 운전시간을 늘리고 최대한으로 태양열을 획득한다. 즉, $\Delta T < \Delta T_{low}$ 이면 저유량 상태로 운전하며, $T_{co} < T_{st}$ 이면 삼방밸브를 통해 열매체를 ②번 방향으로 전환시켜 하부 열교환코일만 가열하도록 한다. 이를 Table 2에 정리하였으며 기대되는 효과를 함께 표시하였다.

Table 2 Comparison of expected operation effect about each mode

Mode	control	degree of stratification	prevention of temperature reversal	operation under bad radiation
1	LH	×	○	×
2	LH+UH	△	×	×
3	LH+UH+3W	△	○	×
4	LH+UH+VF	○	△	○
5	LH+UH+3W+VF	○	○	○

low heating(LH), upper heating(UH), control by 3-way valve(3W), control of variable flow(VF).

○ : good, △ : normal, × : bad.

2.3 설정값의 결정

정상유량(\dot{m}_{normal})과 저유량의 비(\dot{m}_{low})를 유량비(R)로 다음 식과 같이 정의하였다.

$$R = \frac{\dot{m}_{normal}}{\dot{m}_{low}} \quad (1)$$

본 실험에서는 유량비를 5로 고정시켰다. 저유량 모드의 설정값 $\Delta T_{low} = \Delta T_{off} + 1$ 로 취하였다. 실험에서는 ΔT_{off} 는 2 K이므로 ΔT_{low} 는 3 K이다. ΔT 가 3 K보다 작아지면 잠시 후에 펌프가 정지한다는 것을 의미한다. 따라서 유량을 떨어뜨려 ΔT 를 크게 함으로써 운전시간을 연장하게 된다. 정상유량으로 복귀하는 조건은 $\Delta T > \Delta T_{normal}$ 로서, $\Delta T_{normal} = R \cdot \Delta T_{low}$ 즉 (5)(3) = 15 K으로 취하였다. 이에 대한 이론적 배경을 설명토록 한다.

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_c - T_a)}{I_t} \quad (2)$$

$$F' U_L = - \frac{\dot{m} C_p}{A_c} \ln \left(1 - \frac{F_R U_L A_c}{\dot{m} C_p} \right) \quad (3)$$

$$r = \frac{F_R U_L|_{low}}{F_R U_L|_{normal}} = \frac{F_R(\tau\alpha)|_{low}}{F_R(\tau\alpha)|_{normal}} = \frac{\frac{\dot{m} C_p}{A_c F' U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c F' U_L}{\dot{m} C_p} \right) \right]_{low}}{\frac{\dot{m} C_p}{A_c F' U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c F' U_L}{\dot{m} C_p} \right) \right]_{normal}} \quad (4)$$

식(2)는 집열기의 효율곡선을 나타낸 것인데, 유량이 바뀌었을 때 집열기 성능이 달라지는 이론은 Duffie and Beckman⁽⁶⁾을 참고하기 바람직하며 식(3), 식(4)로 정리할 수 있다. 열매체 유량이 줄어들면 식(3)에 의해 $F' U_L$ 가 줄어든다. 유량이 20%로 줄어들었을 경우 식(4)에 의해서 r 값은 0.854가 된다. 따라서 $F_R(\tau\alpha)$ 과 $F_R U_L$ 이 감소하게 된다. 이로 인하여 집열효율 및 획득열량이 감소한다. 유량이 100%인 정상시에는 $F_R(\tau\alpha)$ 가 0.7203, $F_R U_L$ 이 3.9488을 나타내었다. 반면 유량이 20% 감소하면 $F_R(\tau\alpha)$ 과 $F_R U_L$ 이 85.4%로 감소하며 각각 0.6151, 3.3723가 된다.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \text{와 } \eta = \frac{Q}{A_c I_t} \text{로부터}$$

$$\Delta T = \frac{\eta A_c I_t}{\dot{m} C_p} \quad (5)$$

가 되는데, 이로부터 순환유량이 100%일 때의 $\Delta T = 3$ K에 해당되는 20% 유량에서의 $\Delta T (= 3 \text{ K}) \cdot R (= 5)$ 는 15 K가 아닌 13.7 K가 된다. 즉 저유량으로 바뀌는 순간 3 K에서 13.7 K로 상승하게 된다. 따라서 빈번한 온·오프를 막기 위해서는 이보다 큰 15 K, 즉 $\Delta T_{normal} = R \cdot \Delta T_{low}$ 의 설정값이 적합하다. 하지만 R-1로 계산한 12 K의 경우에도 빈번한 온·오프가 발생하지 않고 원활한 작동을 한 것을 보면 그다지 민감하지는 않은 것으로 판단된다.

일출시에는 점차 일사조건이 좋아지므로 ΔT 가 증가하는 추세를 보이며 저유량 모드로 운전되다 몇 번의 순간적인 고유량 상태를 보이고, 그 후 고유량 모드에서 운전되기 시작한다. 일몰 전에는 축열조 온도가 충분히 상승하고 일사량이 감소하면서 ΔT 가 떨어지기 시작하고 이후 저유량 상태로 1시간 정도 운전이 지속된다. 한편 일사상태가 좋지 않은 날은 조건에 따라 저유량과 고유량이 반복되는 경향을 보인다.

3. 실험결과 및 고찰

모드 1과 모드 2의 비교는 이전연구⁽¹⁾의 실험과 시뮬레이션을 통해 보인 바 있으나 본 실험장치는 측면의 나선재킷이 아닌 중·하부에 열교환 코일을 사용했기 때문에 미세한 차이가 있을 것으로 판단되어 실험에 포함시켰다. 실험은 2014년 9월부터 5개의 모드에 대해 각각 쾌청한 날 무부하운전과 부하운전 그리고 일사가 좋지 못한 날의 무부하운전에 대해 실험하였다. 온도 역전현상은 특히 집열운전 중 온수급탕 부하가 걸려 축열조 하부온도가 떨어지는 경우에 발생하기 쉽다. 따라서 부하운전에서는 오후 1시부터 1시간 동안 약 11~12 lpm의 급탕부하를 걸어 축열조 하부에 시수가 유입되고, 상부에서 온수가 빠져나가도록 하였다.

모드 1의 실험결과(Fig. 3)를 보면 오전 9시에서 10시 사이에 열매체 순환펌프가 온·오프를 반복하는 전형적인 패턴을 보인다. Fig. 3과 같이 축열조 상부온도 T_{st} 와 하부온도 T_{sb} 가 거의 겹쳐 완전혼합된 것을 볼 수 있다. 부하가 걸리면서 축열조 하부부터 급격히 온도가 떨어지기 시작하여 온도 성층화를 잠시 보인다. 부하가 걸릴 때 일시적으로 집열기 출구온도가 축열조 상부온도보다 낮아지기는 하나 중·하부를 가열하기 때문에 바로 완전혼합의 양상을 보이게 된다.

모드 2의 일사가 좋은 무부하 상태에서는 역전현상이 관찰되지 않으나 Fig. 4와 같이 일사가 불규칙하거나 부하가 걸릴 때 온도 역전이 발생하고 축열조 상부온도가 미세하지만 떨어지는 현상을 보인다. 모드 3에서도 Fig. 5와 같이 일사상태가 좋지 않은 경우 집열기 출구온도보다 낮은 온도 역전현상이 나타나지만 상부를 거치지 않기 때문에 상부온도 저하는 발생하지 않

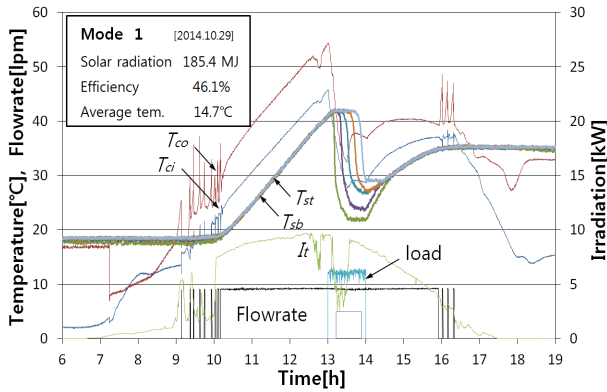


Fig. 3 Result of mode 1 with load.

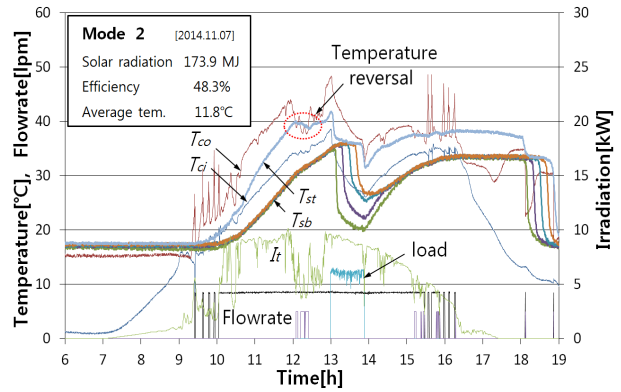


Fig. 4 Result of mode 2 with load.

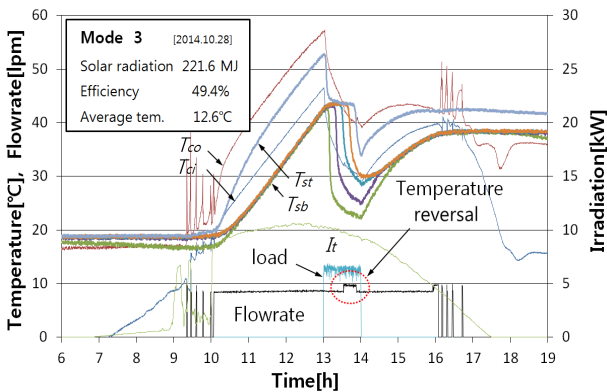


Fig. 5 Result of mode 3 with load.

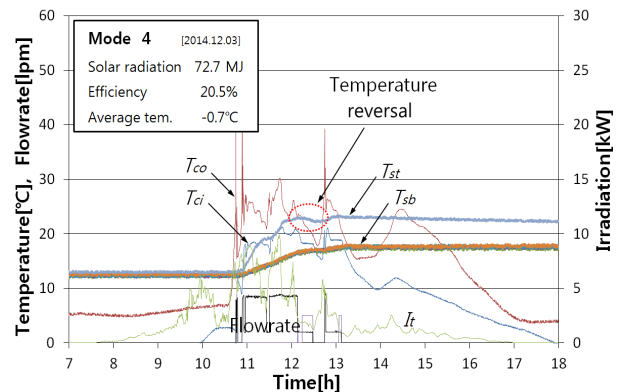


Fig. 6 Result of mode 4 without load.

는다(이때 유량은 미세하지만 증가하는 것을 주목하기 바람).

모드 4는 일사상태가 좋지 않을 때 저유량 모드로 운전함으로써 운전시간 연장 효과를 얻었으나 상부온도 저하를 막지는 못하였다. 즉 Fig. 6와 같이 일사상태가 불량한 경우 유량은 20%로 줄어 ΔT 는 커지나 온도 역전시 상부온도가 미세하게 떨어지는 현상이 발생하였다.

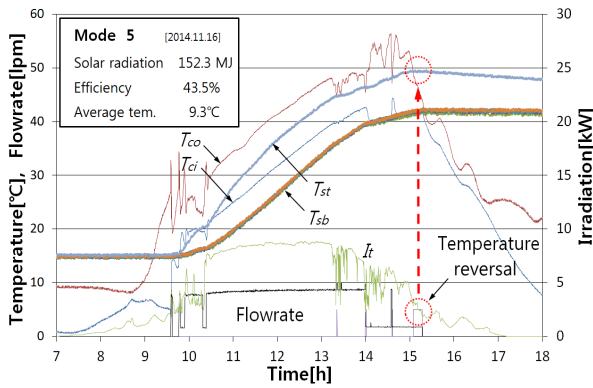
모드 5는 모드 3, 모드 4의 장점을 결합한 것으로 예상했던 대로 일출과 일몰 및 일사가 좋지 못한 경우 운전이 지속되는 것을 확인할 수 있었으며, 일사 및 부하로 축열조 내 급격한 변동이 있을 때 온도 역전이 발생하여도 하부코일만 가열하여 상부온도 저하를 방지할 수 있었다. 온도 역전으로 하부만 가열하는 경우에는 상부코일을 거치지 않아 유동저항이 감소하여 유량이 10% 정도 증가하는 것을 알 수 있다(모드 3의 Fig. 5에서도 동일한 현상이 나타남).

모드 3의 축열조 상부의 온도저하 방지는 유효에너지 증가효과로서 태양열의존을 향상으로, 모드 4의 저유량 운전은 일사 부족시에도 운전시간 연장효과로서 집

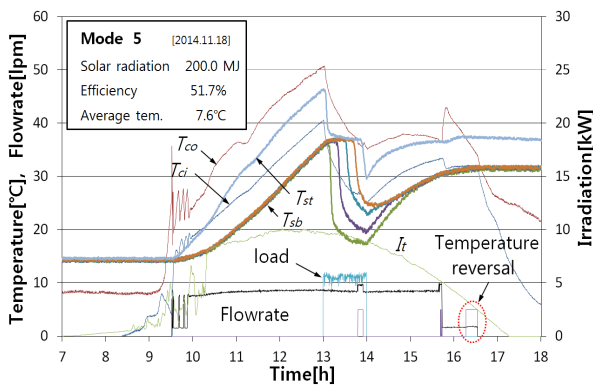
열효율 향상으로 이어질 것으로 예상된다. Fig. 7(a)의 청명한 날 모드 5의 저유량 집열운전에서 얻어진 획득 열량은 5.7 MJ로서 전체 획득열량 66.3 MJ의 8.2%에 해당한다. 반면에 모드 1에서 열매체 순환펌프의 온·오프가 반복된 구간에서 획득한 열량은 약 2 MJ로서 1.8%에 불과하다.

이전 연구에서도 언급한 바와 같이 태양열 시스템의 경우 기상상태나 작동상황에 따라 실증실험을 통해 성능향상이 이루어졌다는 것을 직접적으로 보이기는 대단히 어렵다. 실증실험을 통해서 온도 역전현상 및 운전시간 연장 등을 확인할 수는 있으나 정량적으로 향상된 것을 밝히는 것은 어려우며 시뮬레이션에 의존할 수밖에 없다. 이에 대해서는 2보 시뮬레이션에서 다루기로 한다.

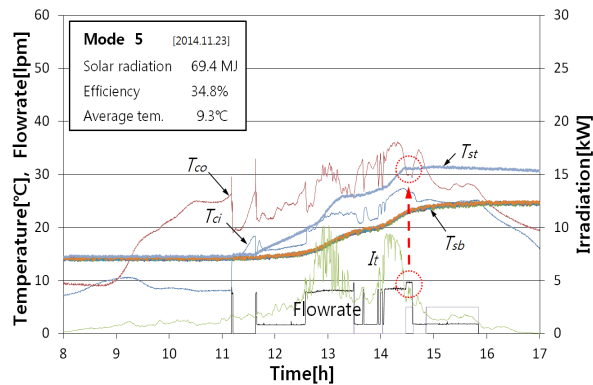
열교환 코일은 하부에 설치해야 한다는 고정관념에서 벗어나 상부 및 하부가열 방식이 결코 우려할 상황이 아니었음을 장기간의 실험을 통해 확인할 수 있었다. 여기에 본 연구에서 제안한 온도 역전현상 방지 및 저유량 운전 모드는 추가 비용이 거의 없이 기존의 태양열온수기의 성능향상을 도모할 수 있음을 보였다.



(a) Clear weather without load



(b) Clear weather with load



(c) Cloudy weather without load

Fig. 7 Result of mode 5.

4. 결론

본 연구에서는 상·하부가열 열교환코일 내장형 축열조와 이에 수반되는 온도 역전시 대처방안에 대해 제안하고 실증실험을 진행하였다. 고가의 인버터 대신 본 연구에서 제안한 2단 변유량 운전은 일출, 일몰 및 일사가 불량할 때 열매체 순환펌프의 운전시간 연장효과 즉 획득열량 증대로 이어짐을 확인하였다. 그 결과 다

음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 동일한 실험장치를 통해 기존의 하부가열방식의 축열조, 즉 모드 1은 성층화를 이루지 못하고 축열조 전체가 완전혼합되는 양상을 확인하였다.
- (2) 상·하부가열 축열조가 적용된 시스템에서 온도 역전현상이 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이때 축열조 상부온도가 미세하지만 하락하는 것이 관찰되었다. 삼방밸브를 사용하여 온도 역전시 축열조 상부온도를 그대로 유지할 수 있었다. 실증실험 결과 모드 2와 모드 3의 집열효율 차이는 미세하였으나, 축열조 상부온도를 유지함으로써 태양열의존율의 제고로 이어진다.
- (3) 2단 변유량 제어를 통하여 일사가 좋지 못할 경우 기존의 시스템처럼 빈번한 펌프의 온·오프 대신 저유량으로 최대한 집열열량을 획득하는 것을 확인하였다. 나아가 일사가 좋지 못한 흐린 날씨에도 집열운전시간이 연장되었다. 실증실험 결과 집열운전시간이 늘어남에 따라서 시스템 효율이 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

태양열 실험의 특성상 동일한 조건에서의 성능비교가 불가능하므로 추후 시뮬레이션을 통하여 정량적인 성능평가는 2보에서 다루기로 한다.

후 기

본 연구는 2014년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제임(No. G031637111).

References

1. 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.
2. Lee, S. H., Son, H. S., and Hong, H., 2014, Enhancement of stratification for solar water storage tank with spiral jacket and coil(Part 2 : Simulation), Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 008-0014.
3. 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.

4. Lee, U. J., Kim, C., and Hong, H., 2014, Operation effect of solar thermal storage tank by upper concentrate heating coil, Proceedings of the SAREK Summer Annual Conference, pp. 742-745.
5. Lee, D. W. and Lee, K. H., 2013, The experimental research for the collecting characteristics of the passive and active type domestic solar hot water systems, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 6, pp. 12-18.
6. Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Process, 2nd ed, John Wiley and Sons, New York, pp. 317-320.