

자연형 및 설비형 태양열 온수기의 집열특성에 대한 실험적 연구

The Experimental Research for the Collecting Characteristics of the Passive and Active type Domestic Solar Hot Water Systems

이동원*† · 이경호**

Lee, Dong-Won*† and Lee, Kyoung-Ho**

(Submit date : 2013. 09. 06., Judgment date : 2013. 09. 13., Publication decide date : 2013. 12. 16.)

Abstract : Domestic solar hot water system can be divided into a passive type and an active type. In a passive type the storage tank is horizontally mounted immediately above the solar collectors. No pumping is required as the hot water naturally rises into the storage tank from the collectors through thermo-siphon flow. While, in an active type the storage tank is ground- or floor-mounted and is below the level of the collectors; a circulating pump moves water or heat transfer fluid between the storage tank and the collectors. We installed two types solar hot water systems consisting of the same storage tank and collectors at the same place, and were measured and compared typical operating characteristics under the same external conditions. In particular, the daily system performance was presented through the stirring test after the sunset. The results show that the amount of solar radiation obtained for an active type were less than a passive type on a cloudy day, because the operation of the circulation pump stops frequently took place on that day. However, on a sunny day, depending on the stable operation of the circulation pump, the amount of solar radiation obtained for an active type were increased than a passive type.

Keywords : Domestic solar hot water system(태양열 온수기), Active type(설비형), Passive type(자연형),
Collecting characteristic(집열특성), Stirring test(교반시험)

*† 이동원(교신저자) : 한국에너지기술연구원 태양열연구실
E-mail : dwlee@kier.re.kr, Tel : 042-860-3533
**이경호 : 한국에너지기술연구원 태양열연구실

*† Lee Dong-Won(corresponding author) : Solar Thermal
Laboratory, Korea Institute of Energy Research.
E-mail : dwlee@kier.re.kr, Tel : 042-860-3533
**Lee Kyoung-Ho : Solar Thermal Laboratory, Korea Institute
of Energy Research.

기 호 설 명

- F : Flow rate [Liter/min]
- I : Solar radiation [W/m²]
- T : Temperature [°C]
- DT : Temperature difference [°C]

Subscript

- amb : Ambient
- in : Inlet of the collector
- OFF : Circulation pump off
- ON : Circulation pump on
- out : Outlet of the collector

1. 서 론

온수급탕에 이용되고 있는 가정용 태양열 온수기는 크게 자연형(passive type)과 설비형(active type)으로 구분할 수 있다. 자연형은 집열기에서 집열된 태양열을 집열매체의 자연순환에 의해 축열조로 전달하는 방식이다. 따라서 집열매체의 순환을 위한 펌프가 필요 없으며, 이에 따라 펌프의 동작을 제어하는 제어부도 필요 없다는 장점을 갖고 있다. 그러나 집열매체의 자연순환이 이루어져야 하므로, 축열조는 반드시 집열기 상부에 위치해야 한다는 단점이 있다. 집열기는 설치여건 상 지붕 위나 옥상 등에 설치되는 것이 일반적이므로 그 위에 설치되어야 하는 축열조는 당연히 야외에 노출될 수밖에 없으며, 이에 따라 외관이 미려하지 못하고 축열된 열의 손실이 증가하는 문제도 발생한다.

반면 설비형은 집열기에서 집열된 태양열이 펌프에 의한 집열매체의 강제순환에 의해 축

열조로 전달되는 방식이다. 펌프에 의한 집열매체의 순환이 이루어지므로 축열조를 집열기의 위치와 상관없이 자유롭게 설치할 수 있으며, 따라서 외부로는 집열기만 노출시킬 수 있어 외관을 미려하게 꾸밀 수 있고 축열된 열이 외기로 손실되는 것도 줄일 수 있다. 또한 집열기 내를 흐르는 집열매체의 유속이 자연형에 비해 상대적으로 크므로, 내부 열전달 계수의 증가로 인한 열적성능의 향상도 기대된다. 그러나 설비형은 집열매체 순환을 위한 별도의 펌프가 필요하며 이를 동작시키기 위한 전력소비가 필수적이라는 단점을 갖는다. 이외에 펌프가 동작하기 위한 조건을 설정하고 이에 따라 펌프를 동작시키는 제어장치가 필요하며, 제어조건을 확인하기 위한 센서가 필요하다는 점도 자연형에 비해 불리한 점이다.¹⁾⁵⁾ 또한 이러한 펌프나 제어장치, 그리고 센서 등은 고장이 발생할 수 있는 요소기기이기 때문에, 설비형은 자연형에 비해 고장이 발생하기 쉬운 시스템으로 인식되어 있는 것이 사실이다.

이와 같이 자연형과 설비형 태양열 온수기의 개념에 대해서는 잘 알려져 있지만, 의외로 각 시스템의 특성을 실험적으로 확인하여 비교한 사례는 찾아보기 어렵다.²⁾³⁾⁴⁾ 본 연구에서는 동일한 집열면적을 갖는 자연형 및 설비형 태양열 온수기를 각각 설치하고 실증시험을 수행하면서, 각 태양열 온수기의 동작 특성을 실험적으로 살펴보고 비교하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

자연형과 설비형 태양열 온수기의 동작특성을 관찰하고 비교분석하기 위해서, 자체 제작한 설비형을 그림 1과 같이 자연형과 동일한



Fig. 1 A photo of a passive and an active type solar water heating systems

장소(대전 소재 한국에너지기술연구원)에 함께 설치하였다. 이 때, 태양열 온수기의 성능에 영향을 미치는 주요 부품인 집열기(집열면적 6 m²)와 축열조(축열조 내용량 280 Liter)는 자연형과 설비형 모두 같은 회사(K사)의 제품을 이용함으로써, 동일한 조건 하에서 두 태양열 온수기에 대한 실증시험이 이루어지도록 하였다.

자연형은 제작업체에서 제공한 상태 그대로 설치하였으며, 단지 각종 센서들의 삽입을 위한 배관의 수정만이 이루어졌을 뿐이다. 반면, 설비형은 집열기와 축열조 사이의 동 배관과 집열매체 순환펌프, 그리고 제어장치를 자체적으로 설치하였다. 각 태양열 온수기에 이용된 축열조는 2중 탱크형의 열교환기 일체형 축열조로써, 온수가 저장되는 내통의 외부와 그 바깥쪽 외통 사이의 환상공간으로 집열매체가 순환하면서 축열조 내부에 있는 물의 온도를 상승시키는 방식이다. 집열매체로는 에틸렌글리콜 50% 수용액을 이용하였다.³⁾

각 태양열 온수기의 집열성능 등을 확인하기 위해서, 집열과정이 끝난 후 축열조 내 저장된 물을 순환시키거나 축열조에 시수공급이 이루어지면서 온수가 배수될 수 있도록 그림 2와 같이 태양열 온수 시스템을 구성하였다. 시스템에는 각 태양열 온수기의 동작상태와

열적성능 등을 측정하여 확인할 수 있도록 각종 센서를 설치하였다. 설치된 센서는 온도센서, 유량센서, 압력센서, 일사량계 등이다.

온도의 측정은 정확도를 높이기 위해서 RTD를 이용하였으며, 설치 전 보상선이 연결된 상태에서 정밀 항온조와 표준 온도계를 이용하여 ±0.1℃ 이내의 오차를 갖도록 교정하였다. 집열기와 축열조 사이를 순환하는 집열매체의 유량과 축열조에 공급되는 시수의 유량을 측정하기 위해서는 ±0.2%의 오차를 갖는 전자기 유량계를 이용하였다. 그러나 유량이 너무 적은 경우 측정의 정확도가 다소 떨어지는 문제점이 있기 때문에, 차압계를 이용하여 검증하였다. 일사량계는 집열기와 같은 경사각을 갖도록 설치하였다.

설비형은 집열펌프가 동작하고 정지하는 조건을 운전자가 정해주어야 하며, 이를 감지하

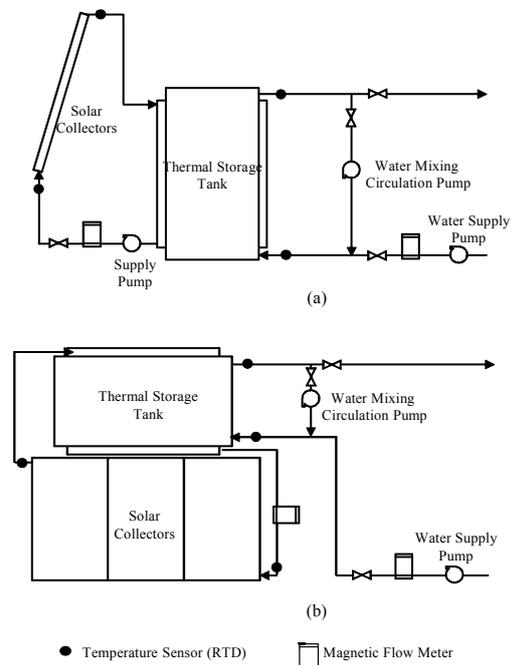


Fig. 2 A schematic diagram of an active(a) and a passive(b) type solar water heating systems

고 실행시키는 센서 및 제어장치가 필수적이다. 일반적으로 집열기 입구에서의 집열매체 온도(또는 축열조 하단부 물의 온도, T_{in})와 집열기 출구에서의 집열매체 온도(T_{out})의 온도차를 감지하여 집열펌프 구동을 제어하는 차온(差溫)제어 방식을 이용하고 있다. 차온 제어 방식에서는 집열펌프의 동작과 정지를 지시할 기준이 되는 두 개의 온도를 설정해 주어야 한다. 두 개의 설정온도 중 하나는 정지해 있는 집열펌프를 동작시키는 기준이 되는 온도인 ΔT_{ON} 이며, 또 다른 하나는 동작하고 있는 집열펌프를 정지시키는 기준이 되는 온도인 ΔT_{OFF} 이다($\Delta T_{ON} > \Delta T_{OFF}$). 본 연구에서는 ΔT_{ON} 과 ΔT_{OFF} 를 일단 6°C 와 2°C 로 고정시킨 상태에서 설비형을 운전하였다. 한편, 설비형의 집열매체 순환유량 F 는 약 7 Liter/min 으로 하였는데, 이것은 집열기 단위면적(m^2)당 1.2 Liter/min 이 적정하다는 기준에 근거한 것이다.

3. 각 태양열 온수기의 동작특성

전술한 제어 및 운전조건 하에서 설비형 태양열 온수기를 동작시키면서, 그 결과를 자연형의 그것과 비교하였다. 그림 3은 비교적 청명한 날(누적 일사량 19.85 MJ/m^2)에 측정된 설비형 및 자연형의 대표적인 운전 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에는 측정된 경사면 일사량 I (Insolation)와 각 집열기 입구 및 출구에서 측정된 집열매체 온도, 그리고 집열매체 순환유량의 시간에 따른 변화를 나타내었다.

그림을 보면 설비형의 경우 오전 7시 30분경부터 집열기 출구에서의 열매체 온도(T_{out})가 서서히 상승하여 8시를 조금 넘은 시간에 집열펌프 동작조건($T_{out} - T_{in} > \Delta T_{ON} = 6^{\circ}\text{C}$)이 만족되면서 집열펌프가 처음 동작하였다. 그러나 집

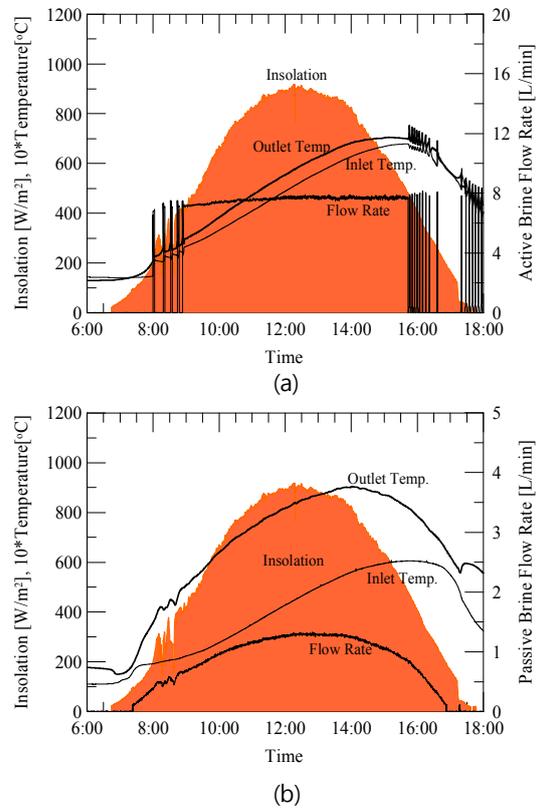


Fig. 3 Operating characteristics of an active(a) and a passive(b) type solar water heating systems (sunny day, 09/27, $T_{amb}=22.8^{\circ}\text{C}$)

열펌프가 동작하면 축열조를 거친 후 되돌아온 집열기 입구에서의 집열매체 온도(T_{in})가 상승하여 집열펌프 정지조건($T_{out} - T_{in} < \Delta T_{OFF} = 2^{\circ}\text{C}$)이 되고, 이에 따라 집열펌프가 바로 동작을 멈추는 것을 알 수 있었다. 집열펌프가 정지하면 다시 집열기 출구에서의 집열매체 온도가 상승하여 집열펌프 동작조건이 되어 집열펌프가 동작하였다가, 위와 같은 이유로 다시 집열펌프가 정지하는 과정이 몇 차례 반복되었다.

그러나 일사량이 어느 정도 이상이 되면 집열기 입구에서의 집열매체 온도와 함께 집열기 출구에서의 집열매체 온도도 지속적으로

상승하므로, 집열기 입구와 출구에서의 집열매체 온도차는 5~7℃를 유지하였고 집열펌프는 동작조건($T_{out}-T_{in}>\Delta T_{OFF}=2^{\circ}\text{C}$)이 되어 계속 동작하였다. 집열펌프는 오후 4시가 조금 못된 시간에 일사량의 감소로 집열기 출구에서의 집열매체 온도가 낮아져 정지조건($T_{out}-T_{in}<\Delta T_{OFF}=2^{\circ}\text{C}$)이 되어 멈추었다가, 오전과 같은 이유로 몇 차례 더 동작과 정지가 반복하였으며, 4시 40분 이후에는 더 이상 동작하지 않고 집열과정을 멈추었다. 따라서 이 실험에서는 집열펌프가 약 11시간의 일사 조건 중에서 약 7시간 동안 지속적으로 동작하면서 집열과정이 진행되었음을 알 수 있다.

이상의 과정을 살펴볼 때 설비형 태양열 온수기의 집열과정은 일사량이 적은 경우에는 간헐적으로, 일사량이 어느 정도 이상 유지되는 경우(본 실험조건에서는 약 400 W/m^2 이상)에는 지속적으로 진행되는 것을 알 수 있었다. 물론 집열과정이 계속 지속되는 조건은 각 설정온도와 집열매체의 유량, 외기온 등의 영향도 받으므로 일률적으로 말할 수는 없다. 한편 이와 같은 집열과정 결과에서 아쉬운 점은 일사량이 적은 시간대에 집열펌프의 동작시간이 너무 짧다는 점이며, 경우에 따라서는 이 시간대에 집열펌프가 좀 더 긴 시간동안 동작되도록 제어방식을 수정하는 것이 필요하다고 판단되었다.⁵⁾

그림에서 (b)는 같은 외기조건 하에서 자연형의 집열과정을 보여주고 있다 일사량이 증가하면서 집열기 출구에서의 집열매체 온도가 일사량 변화와 거의 같은 형태로 상승하며, 이에 비례하여 집열기 입구 및 출구에서의 집열매체 밀도변화가 나타나므로, 집열매체의 순환유량도 같은 형태로 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉, 일사량의 강도에 따라 집열매체의

순환유량이 조절되면서, 자연형의 경우는 일사량이 존재하는 한 거의 항상 집열과정이 이루어지는 것을 알 수 있다. 그러나 자연순환에 따른 집열매체의 유량은 설비형에 비해 아주 적기 때문에 집열기 출구에서의 집열매체 온도가 설비형에 비해 높게 나타나고, 이에 따라 집열기 온도와 외기온과의 차이에 비례하는 열손실도 설비형에 비해 다소 많을 것으로 짐작할 수 있다.

두 태양열 온수기의 열적성능을 비교하기 위하여 집열과정이 시작되기 전인 오전 6시경 축열조 내 물을 15분간 순환시켜 온도를 측정하였으며, 집열과정이 종료된 후인 오후 7시경 다시 15분간 순환시켜 온도를 측정하는 교반시험을 수행하였다. 그 결과 설비형의 경우는 축열조 내 물 온도가 20.5℃에서 63.1℃로 42.6℃ 상승하였고, 자연형의 경우는 20.9℃에서 60.6℃로 39.7℃ 상승한 것을 알 수 있었다. 즉, 위와 같은 외기조건과 제어조건 하에서는, 설비형이 자연형에 비해 약 7% 정도 열적성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

그림 4는 같은 제어조건 하에서 흐린 날(누적 일사량 6.84 MJ/m^2) 측정된 대표적인 데이터를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 3과 같은 좌표이지만, 집열온도가 낮았기 때문에 온도축은 그림 3의 1/2이 되도록 한 것을 유의해야 한다. 설비형은 집열펌프 동작이 지속적으로 이루어지기에는 일사량이 충분하지 않았으므로, 정오 부근의 1시간 정도를 제외하고는 집열펌프가 동작과 정지를 계속 반복하는 것을 볼 수 있다. 반면 자연형의 경우는 집열유량이 좀 더 적어지기는 했지만, 일사량에 비례하여 집열과정이 계속 진행되는 것을 알 수 있다. 집열기 출구에서의 집열매체 온도는 맑은 날에 비해 20℃ 정도 낮은 것도 확인할 수 있다.

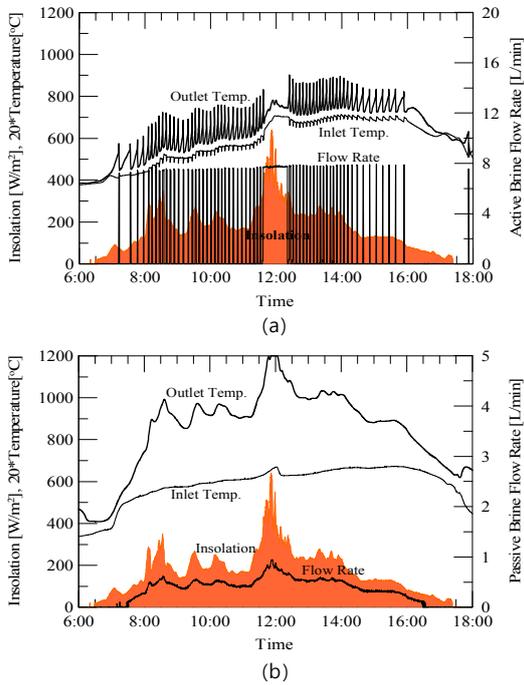


Fig. 4 Operating characteristics of an active(a) and a passive(b) type solar water heating systems (cloudy day, 05/24, Tamb=23.2°C)

청명한 날과 마찬가지로 집열과정이 진행되기 전과 그 이후에 축열조 내 물을 순환시키면서 온도를 측정하여, 집열과정을 통해 각 태양열 온수기가 얻은 열량을 비교하였다. 그 결과 설비형은 17.7°C에서 28.9°C로 11.2°C가 상승한 반면, 자연형의 경우는 18.2°C에서 32.4°C로 14.2°C 상승한 것을 알 수 있었다. 따라서 설비형은 자연형에 비해 약 21% 정도 태양열을 적게 획득했다는 것을 확인하였다.

Table 1. Comparison of performance

누적 일사량 [MJ/m ²]	온수기 형태	온도변화 [°C]	축열열량 [MJ]
19.85	설비형	42.6	48.08
	자연형	39.7	44.81
6.84	설비형	11.2	12.64
	자연형	14.2	16.03

이와 같은 두 결과를 비교해 볼 때, 일사량이 충분한 청명한 날에는 설비형이 열적성능 면에서 우수하지만, 흐린 날에는 오히려 자연형의 성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 본 연구의 조건 하에서는 설비형의 집열펌프가 계속 동작할 수 있는 조건은 일사량이 약 400 W/m² 이상이어야 함도 알 수 있었다. 물론 각 설정온도와 집열매체의 유량 등에 따라 그 정도는 다르겠지만, 각 태양열 온수기가 대체로 위와 같은 경향을 갖는다는 것은 확실한 것으로 판단되었다. 표 1은 전술한 맑은 날과 흐린 날의 열적성능을 함께 비교하여 나타낸 것이다.

4. 결 론

동일한 집열기와 축열조로 구성된 자연형 및 설비형 태양열 온수기를 같은 장소에 함께 설치하고, 대표적인 외부조건에 따른 동작특성을 측정하고 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 단, 이 결과는 교반시험을 통해 집열성능과 밀접한 시스템성능만을 제시한 것으로, 이용성능과는 다를 수 있음을 감안해야 한다.

- (1) 설비형의 경우 일사량이 적은 경우 집열펌프의 동작과 정지를 반복하였으며, 이로 인해 이 조건에서 획득하는 집열량이 매우 적었다.
- (2) 그러나 일사량이 양호한 경우 안정적인 동작에 따라 상대적으로 집열량이 증가하고 열손실은 감소한 것으로 판단되었다.
- (3) 반면, 자연형의 경우 일사량이 적은 경우에도 꾸준한 집열과정이 진행됨으로써, 이 조건에서는 설비형보다 우수한 특성을 나타내었다.

- (4) 그러나 일사량이 양호한 경우에도 집열매체 순환유량이 상대적으로 적어 집열기 온도 상승에 따른 집열성능 저하가 나타났다.

후 기

본 논문은 산업자원부의 지원을 받았음.

참 고 문 헌

1. Baek, N.C. et al., A Study of the Field Test and Simulation of Active Solar System, Proceedings. of KSES, pp. 40-49, 2001.
2. Choi, B.S. et al., Verification Experiment and Analysis for 6 kW Solar Water Heating System, Journal of the SAREK, Vol. 16, No. 6, pp. 556-565, 2004.
3. KIER, Development of the Active Type Solar Domestic Hot Water System, Report, Ministry of Trade Industry Energy, 2004.
4. Dong Won Lee and Atul Sharma, Thermal Performance of the active and passive water heating systems based on annual operation, Solar Energy, Vol. 81, pp. 207-215, 2007.
5. Shin, W.C. et al., Thermal Performance Analysis for Optimal Operation of Solar Hot Water System, Journal of the KSES, Vol. 31., No. 2, pp. 143-147, 2011.