

## 동파방지 태양열온수시스템 실증실험

김 종 현, 홍 희 기\*\*

경희대학교 기계공학과 대학원, \*경희대학교 기계공학과

### Verification Experiment on Freeze Protection for Solar Hot Water System

Jong Hyun Kim, Hiki Hong\*\*

**ABSTRACT:** In the present work, a new freeze protection method has been proposed for a natural circulation system of solar hot water. Though electrothermal wire is popularly used for the purpose, there are freezing troubles by wire cut-off and shortage of excessive electric power consumption. In the experimental device, hot water in storage tank was used to heat the outlet pipe from the tank if the pipe surface temperature falls lower than a set point. The inlet pipe to the storage tank was installed to directly contact the outlet pipe, so its temperature rose by transferred heat.

**Key words:** Solar thermal energy(태양열 에너지), Freeze protection(동파방지), Natural circulation(자연순환), Hot water tracing technique(온수트레이싱법)

#### 1. 서 론

기후변화협약의 발효와 원유가격의 지속적인 인상 등으로 태양열시스템의 보급확대에 청신호가 켜진 상태이다. 특히 원유가격이 배럴당 80달러를 상회하면서, 태양열온수기의 경우 기존의 화석연료시스템과 비교하여도 충분한 경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

태양열 온수급탕 시스템과 관련된 요소기술은 선진국 수준에 거의 접근한 것으로 판단되나, 동파에 취약한 시스템 혹은 불안정한 성능을 보이는 시스템이 보급되는 경우 시장의 신뢰성을 회복하기는 어렵다.<sup>(1)</sup>

현재 국내에 보급되어 있는 태양열시스템은 소형의 경우 집열기의 상부에 축열조가 밀착되어 있는 구조의 자연순환형이, 중대형의 경우에는

열교환기를 가지고 있는 강제순환형이 많다.

1990년대 중후반에 대량으로 보급된 후 태양열에 대한 불신과 함께 시장에서 외면을 받은 제품은 크게 두 부류로 나눌 수 있는데, 우리나라의 기후특성에 적합하지 않은 동파에 취약한 저가형 자연순환형과 동파에 안전하기는 하나 시스템이 복잡하고 고장가능성이 높은 열교환기가 있는 강제순환형이다.

자연순환형의 경우 간단한 구조와 효율성으로 국내외에 보급된 태양열시스템의 90%를 차지하나, 혹한기를 거치는 우리나라의 중부지방에서는 동파문제가 심각한 상황이었다. 영하로 기온이 내려가면 배관 내의 물이 어는 것을 방지하기 위해 배관 주위의 열선이 가열되지만, 빈번한 작동으로 열선이 끊어져 동파가 이어지거나 과도한 전기사용료로 보급에 장애가 되어 왔다.

이러한 문제를 해결하면 태양열 에너지의 경쟁력 강화 및 보급에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.<sup>(2)</sup> 이에 본 연구에서는 자연순환형 태양

† Corresponding author

Tel.: +82-31-201-2868; fax: +82-31-202-2625

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

열운수기의 옥외 배관에 대해 기존의 전열선 가열법 이외에 온수 가열법을 제안하고, 이를 실증 실험을 통해 성능을 평가하였다.

## 2. 동파방지기술

자연순환형 시스템은 Fig. 1, 2에 보인 바와 같이 매우 단순한 구조이면서도 비교적 효율적인 운전이 가능한 방식으로 집열기에서 가열된 작동매체는 밀도차에 의해 자연순환되며, 순환펌프, 제어계통 등의 설비가 없으면서도 효율적인 운전이 가능하다. 국내외에 현재까지 보급된 태양열 시스템의 90% 이상을 자연순환형 태양열운수기가 차지한다. 이 방식의 가장 큰 단점은 0℃ 이하에서 동파의 가능성이 대단히 높다는 것이다. 따라서 혹한기가 있는 기후 조건의 지역에서는 작동매체로 부동액을 사용하고 부하측의 수도물은 조 내에서 열교환하는 구조를 취하게 된다.

열교환방식으로 과거에는 축열조 내에 열교환코일을 설치하는 방식도 사용되었으나, 최근에는 국내외를 막론하고 이중탱크(tank-in-tank)방식이 성능 면이나 제작의 용이성 면에서 유리하여 보편화된 상태이다. Fig. 2와 같이 바깥 탱크와 안쪽 탱크 사이의 재킷 부분에 집열기에서 가열된 부동액이 축열조 내부의 물을 가열하고 온도가 떨어진 상태에서 배출되어 다시 집열기로 자연순환하는 구조이다.<sup>(3)</sup>

집열기, 축열조 재킷 부분, 연결배관에는 부동액이 사용되어 동파 문제가 없으나, 축열조에 연결된 수도관 및 온수관이 야간에 외기온도가 영하로 떨어지면 동파의 가능성이 크다. 현재까지



Fig. 1 Photograph of experimental apparatus

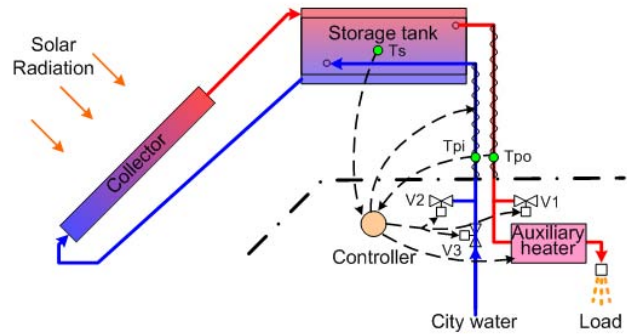


Fig. 2 Schematic diagram of system

사실상 표준화된 방식은 외기에 노출된 실외 수도관 및 온수관에 전열선을 설치하여 외기온도가 영하로 떨어지고 배관 내 물의 온도가 2℃ 정도까지 낮아지면 이를 가열하여 동파를 막는 ‘전열선 트레이싱법’이다. 동절기가 길면 장기간의 빈번한 작동으로 전열선이 파손되기 쉬우며 소비전력도 매우 크다. 한편 온수로 배관을 가열하는 ‘온수 트레이싱법’은 축열조 내의 온수로 온수관을 가열할 수는 있으나 수도관을 가열할 수 없어 지금까지 태양열운수기에 적용된 바가 없었다. 한편 자동배수방식은 축열조 및 배관 내의 물을 완전히 빼내기 어려울 뿐 아니라 일부 남아 있는 경우 동파의 우려가 높고 물 낭비가 커져 적용하기가 쉽지 않다.<sup>(4,5)</sup>

본 연구에서는 축열조 내의 온수로 배관 내의 동결을 방지하는 온수 트레이싱법을 제안한다. Fig. 2에서 실외의 온수관과 수도관을 맞게 설치하고 함께 단열하게 된다. 온수관의 표면온도가 일정온도 이하가 되면 이를 감지하고 제어기가 자동밸브를 개방하여 축열조의 온수를 유출시켜 온수관을 가열하고 설정온도 이상이 되면 밸브를 차단하게 된다. 이때 가열된 온수관은 수도관을 가열하게 되어 빈번한 밸브의 개폐를 방지하고 유출되는 온수의 양을 최소화시킨다.

## 3. 시스템의 설치 및 실험

### 3.1 시스템 구성 및 측정

본 실험을 위한 태양열운수시스템은 Fig. 1과 같이 집열기 1대와 축열조로 구성되어 있으며,

Table 1 Specification of system

Collector	Size	1937×1022
	Area	1.99m <sup>2</sup>
	Unit	1
	Slope	40°
Storage tank	Type	tank in tank
	Capacity	150L
Pipe	Material	Steel
	Diameter	15mm
Electrothermal wire	Capacity	16 W/m
Electromotion ball valve	Capacity	15-30 sec/cycle
	Output	3 W

경희대학교 공과대학 실험동 옥상에 설치하였다. 시스템 제원은 Table 1에 보인다.

집열기와 축열조를 순환하는 열매체로는 프로필렌글리콜 30wt% 수용액을 이용하였다. 태양열을 흡수한 집열관 내의 가열된 열매체는 자연대류로 집열기 상부에 설치된 축열조로 유동하고 축열조 내의 시수와 열교환하여 온수를 생산하게 된다. 부하측에서 온수를 사용하게 되면 축열조 하부를 통해 시수가 공급되고 온수가 축열조 상부를 통해 배출되도록 배관이 구성되었다.

동파방지를 위해 Fig. 2와 같이 태양열사위실의 시수관과 온수관에 전동배수밸브를 부착하였으며, 옥외배관(각각 11 m)에 전열선을 설치한 후 두께 20 mm의 보온재로 단열하였다. 전열선과 전동배수밸브 동작을 위해 가장 온도가 낮을 것으로 추정되는 배관 위치에 열전대를 부착하고, 온도제어기를 통해 온·오프되도록 설정하였다. 전열선의 소비전력량 측정을 위해 전자식 전력량계를 이용하였다. 외기온도 변화에 따른 옥외배관의 온도 파악을 위해 각 측정점마다 K-type의 열전대를 부착하여 3초 혹은 36초 간격으로 측정하였다.

### 3.2 실험방법

실험은 2009년 12월부터 실제 사용 환경을 전제로 진행하였다.

온수트레이싱법의 1차 실험은 전동밸브 3개를 사용한 방식으로서 옥외 시수관 표면에 부착된

센서온도  $T_{pi}$ 가 2℃까지 떨어지면 시수공급밸브 V3이 차단되고 시수관 배수밸브 V2와 온수관 배수밸브 V1이 개방되어 축열조 및 배관 내의 물은 중력으로 V2와 V1로 배수된다. 배수 중에 시수가 유입되는 것을 방지하기 위해 V3이 차단되도록 한 것이다. 온도센서는 시수관 중에서 가장 온도가 낮을 것으로 추정되는, 실내로 들어오기 전 1 m의 위치로 하였다. 전동배수밸브 개방으로 배수된 물은 용기에 받아 무게를 측정하였다.

축열조의 온수관 출구는 Fig. 2와 같이 축열조 최상부에 위치하기 때문에 축열조의 수위가 낮아짐에 따라 약간의 물이 배수되어도 온수관측은 거의 완전히 배수가 이루어지고 미량의 온수만 간헐적으로 흐르게 된다. 시수관은 축열조 내의 온수로 채워져 시수관 표면온도  $T_{pi}$ 가 10℃ 이상으로 상승하게 되면 전동밸브는 원래 상태로 복귀한다. 결과에서 논의하겠지만, 온수관에 미량의 물이 남아 있는 경우에 동파로 이어지는 사례가 발생하였다. 또한 시수관이 축열조 온수로 채워져도 전동밸브 V3이 다시 열리고 V2가 닫히는 과정에서 시수가 유입됨으로써 온도 저하를 초래하기도 하였다. 축열조의 수위가 낮아짐으로써 부하가 걸릴 때 일정시간 동안은 부하측에서 온수를 사용할 없는 것도 문제점이다.

이를 개선하여 온수관 배수밸브 V1만 사용하고 시수관측의 V2, V3는 제거하였으며, 또한 시수관과 온수관을 맞게 설치하였다. 온도센서는 온수관 표면에 설치하였고  $T_{po}$ 가 4℃ 이하가 되면 V1을 개방하여 온수관의 온도가 상승토록 하였다. 10℃ 이상이 되면 V1을 차단하게 되며, 이때부터 온수관은 맞게 설치된 시수관의 온도를 상승시키게 된다. 온도센서의 위치를 1차실험과 달리 시수관이 아닌 온수관으로 한 이유는 여기에만 온수가 유동하기 때문에 10℃ 이상에 도달할 수 있다. 실험조건에서는 나타나지 않았지만, 축열조 온도가 10℃ 이하가 되면 내부에 설치된 전열선으로 가열할 수 있도록 조치하였다. 시수관과 온수관의 원활한 열전달을 위해 맞닿은 배관 사이의 미세한 틈을 은박지로 채웠다.

비교실험으로서 전열선에 의한 동파방지법도 수행하였다. 제어기를 통해 1차실험 조건과 동일한 온도에서 자동밸브 대신 전열선의 온·오프를 제어하였다.

#### 4. 실험결과 및 분석

Fig. 3에 각 실험에 대한 결과를 나타내었다. 1차 실험의 온도그래프를 Fig 3(a)에 나타내었으며, 실험은 2010년 1월 23일에 수행되었다. 외기온도는 최저  $-8^{\circ}\text{C}$ 까지 떨어졌음을 알 수 있다. 옥외시수관의 온도가  $2^{\circ}\text{C}$ 까지 떨어졌을 때 제어 조건에 의해 전동배수밸브가 개방되고 온수와 시수 배수밸브를 통해 배관내의 물이 빠져나가게 된다. 23일 00시부터 24시까지 19회 배수가 이루어졌으며, 총 배수량은 약 71.3 L로 많은 양의 물이 유출되었음을 확인할 수 있었다. 외기온도가 떨어질수록 동작주기가 더욱 짧아져 매우 빈번하게 개폐를 하게 된다. 특히 온수관 온도가 매우 낮은 것을 주목할 필요가 있다. 실험방법에서 설명하였듯이 온수가 원활히 빠져나가지 못하고 미세한 유량만이 간헐적으로 유동되기 때문이다. 또한 온수관의 배관 이음부위 및 엘보 등에 남아 있는 물이 동결되는 현상을 보이기도 하였다. 온수출구관이 축열조의 하부측에 위치한다면 이보다 더 심각하겠지만 온수유출량은 더욱 커질 것으로 예상된다.

실험방법에서 기술한 바와 같이 1차실험에서 온수 및 시수의 낭비가 심한데다가 여전히 동파 문제가 근본적으로 해결되지 않아 이를 해결할 수 있는 방안을 모색하였고, 2차실험을 통해 가능성을 확인하도록 하였다. 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었으며, 실험은 3월10일에 수행된 것이다. 온수관 표면온도  $T_{po}$ 가 약  $4^{\circ}\text{C}$ 까지 떨어지면 시수관에는 시수가, 온수관에는 축열조의 온수가 통과하면서 각각  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하게 된다. 온수관과 시수관이 맞닿은 상태에서 열전달이 서서히 이루어지고 시수관에서 약간의 온도상승후 거의 같은 온도로 하강하게 된다. 외기온도가  $-2^{\circ}\text{C}$ 에서 4시간 정도 지속되는 것을 알 수 있다. 만약 배관이 분리된 상태라면 지속시간은 2/3 정도로 단축될 것으로 판단된다.

유출된 온수량은 4 L/회 정도로서 회당 유출량은 1차실험과 유사하다. 외기온도가 매우 낮은 경우 시수온도가  $5^{\circ}\text{C}$  이하까지도 떨어질 수 있으며 이러한 상황에서는 효과가 극명하게 나타날 것으로 예상된다. 1차실험 후 장치의 개선 및 개조에 적지 않은 시간이 소요되어 외기온도  $-10^{\circ}\text{C}$  이하의 가혹한 조건에서 실험을 수행하지 못한

것이 아쉽기는 하나 충분한 가능성이 확인된 것으로 판단된다. 자동배수방식에서 배관 이음부 등에 미세하게 물이 남아 있으면  $-2^{\circ}\text{C}$  정도에서도 동파가 발생하는 사례가 관찰되었으나, 본 연구에서 제안한 방식(2차실험)에서는 전혀 발생하지 않았다.

비교대상인 열선트레이싱법의 결과를 Fig. 3(c)에 나타내었는데 1차실험과 비슷한 외기조건에서 실험이 이루어졌으나 시수관 표면온도가  $12^{\circ}\text{C}$ 까지 상승하였기 때문에 작동 주기는 1.5시간 정도를 보였다. 1일 전열선 동작은 총 13회 이루어졌으며 소비전력은 1.2kWh로 동파방지를 위해 전열선을 사용하는 것은 적지 않은 경제적인 부담이 수반됨을 확인하였다.

온수관과 시수관이 맞닿은 형태이기 때문에 정상시의 온수사용시 시수관으로의 열전달로 부하측 온수온도의 저하가 우려되기도 하나 배관길이가 극히 길지 않는 한 열전달 시간이 매우 짧기 때문에 무시할 수 있을 정도이다.

향후 동파에 안전하면서도 온수유출량이 최소화되는 합리적인 자동배수밸브 개폐의 제어조건과 더불어 혹한기 지역에서의 실증실험을 통해 신뢰성을 확인하는 연구가 이어질 예정이다.

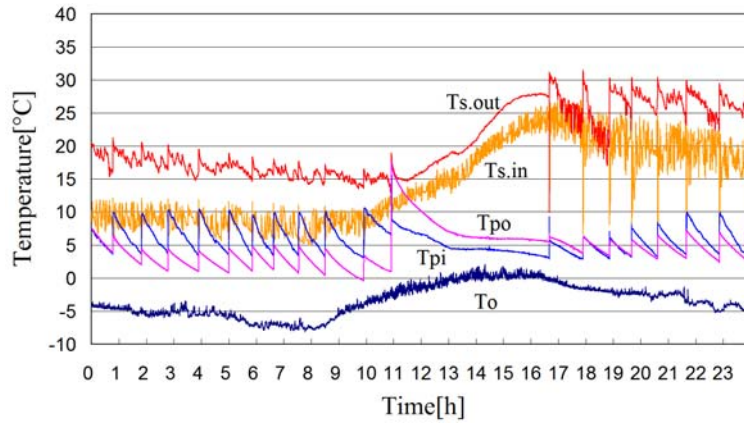
#### 5. 결론

자연순환형 태양열온수기의 문제점인 옥외배관의 동파를 해결하기 위해 온수트레이싱법을 제안하였다. 적지 않은 시행착오가 수반되었으나 최종적으로 온도제어기와 온수관측 자동배수밸브로 구성되는 단순한 시스템을 구현하였다. 특히 축열조에 유입되는 시수관과 유출되는 온수관이 맞닿은 형태로 열전달이 이루어지기 때문에 시수의 온도가 매우 낮은 경우에도 밸브의 빈번한 개폐를 억제할 수 있어 온수 유출량을 줄일 수 있었다.

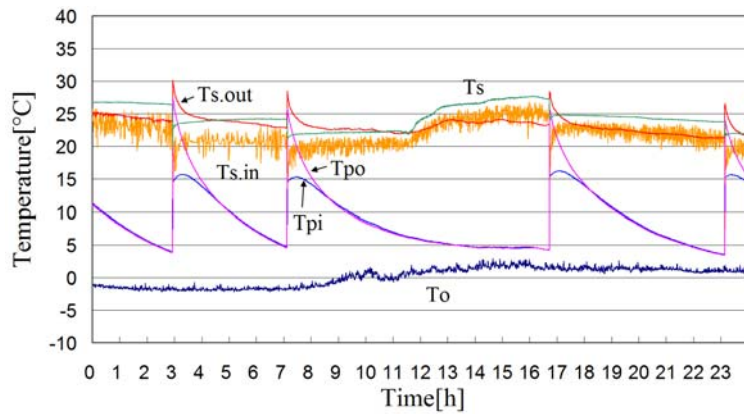
최종적으로, 동파를 방지하면서도 전기사용량이 기존의 열선트레이싱법에 비해 거의 무시할 수 있을 정도로 작은 것이 확인되었다.

#### 참고문헌

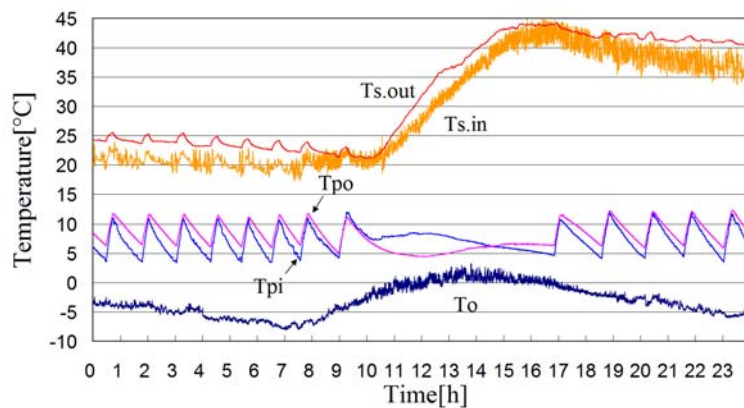
1. KEMCO, 2008, Solar Energy, BooksHill.
2. Kim, S. S., and Hong, H., 2008, Measures



(a) 1st experiment of hot water tracing



(b) 2nd experiment of hot water tracing



(c) Experiment of hot wire tracing

Fig. 3 Result graph

- and proposal for Korean solar water heating system, Korean J. of Air- Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 9, pp. 631-636.
3. Shah, L. J., Morrison, G. L. and Behnia, M., 1999, Characteristics of mantle heat exchangers for solar water heaters, Solar Energy, Vol. 67, pp. 79-91.
  4. Kim, Y. H., 2007, The dynamic of freeze, Proceedings of the SAREK Winter Annual Conference, pp. 503-509.
  5. Duffie, J. A., and Beckman, W. A., 1991, Solar Engineering of Thermal Processes 2nd ed., John Wiley & Sons, p. 489.