

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol. 20, No. 3, 2000

감압 튜브 및 팽창헤더를 이용한 직접식 태양열 온수기의 설계 및 제작에 관한 연구

천원기*, 김형택**

* 제주대학교 에너지공학과

** 아주대학교 에너지학과

Design and Manufacture of Direct Solar Hot Water Heating System Using Pressure Relief Tube and Expandable Header

Wongee Chun*, Hyung Taek Kim**

* *Department of Nuclear and Energy Engineering, Cheju National University, Cheju, Korea*

** *Department of Energy, Ajou University, Suwon, Korea*

Abstract

This paper deals with the design, construction and operation of a direct solar hot water heating system developed to harness the solar energy more effectively. The system introduced here uses a unique network of riser tubes and header pipes apart from the existing concept to exploit the physical properties of water which expands when it freezes. It also employs a special pressure relief mechanism for the header to prevent its breakage due to freezing. A number of tests are made to assure its functional reliability during frigid weather conditions and its superior performance over indirect systems.

1. 서 론

본 논문은 전천후 직접식 자연순환 태양열 온수기의 설계 및 제작에 관한 실험적 연구 개발 결과를 소개하고 있는데 겨울철에도 열매체의 이용없이 집열기에서 물을 직접 가열하여 사용할 수 있는 메커니즘의 개발 및 이의 적용에 대하여 다루고 있다. 즉, 본 연구에서 개발한 직접식 태양열 온수기는 기존의 시스템과는 상이한 집열기 배관망 구조를 지니고 있을 뿐 아니라 집열기의 헤더도 물의 동절기 결빙시 파손되지 않도록 특수한 설계 구조를 지니고 있다. 이는 물이 다른 물질과 달리 결빙시 그 부피가 팽창하게 되어 집열기의 라이저 튜브(riser tubes)와 헤더(headers)에 상당한 압력을 가하게 되는데 이를 충분히 흡수할 수 있는 메커니즘을 갖추지 못하면 파손될 가능성이 상당히 크기 때문이다¹⁾. 실제로 현존하는 직접식 시스템은 이와 같은 문제 때문에 비교적 기온이 온화한 지방에 주로 보급되고 있으며 우리 나라와 같이 겨울철 기온이 영하로 떨어지는 지방에서는 특수한 장치를 설치하여 집열기 내의 물이 결빙되지 않도록 사용하고 있다²⁾. 그 한 예가 온도 센서에 의해 작동하는 배수 밸브의 집열기 설치인데, 기온이 영하로 떨어지면 집열기 내의 물을 자동적으로 배수하여 집열기가 동파되지 않도록 하는 것이다. 일반적으로 직접식 태양열 온수기는 혹한기의 이러한 동파 문제 때문에 그 보급에 커다란 제약을 받아왔으며 현재 국내에 보급되고 있는 자연순환형 태양열 온수기는 거의 모두 열매체를 이용하여 전천후로 태양열을 이용하고 있다.

그림 1은 기존에 널리 보급되고 있는 간접식 자연순환형 태양열 온수 시스템을 나타내고 있는데, 그림에서와 같이 열매체로 부동액을 사용하므로 축열조는 물을 데우기 위한 이중 탱크 방식 등 별도의 열교환 장치를 필요로 하며 이는 부동액을 열매체로 사용하지 않고 집열기에서 물을

직접 가열할 경우 겨울철에 집열기의 라이저 튜브와 헤더 그리고 집열기와 축열조를 연결하는 파이프 등의 내부에 들어 있는 물이 기온의 강하로 인해 얼게될 때 물의 결빙에 따른 부피 팽창과 이로 인한 내부의 압력 상승을 흡수할 장치가 없어 헤더나 파이프가 동파 파손되기 때문이다. 물을 직접 가열하지 않고 부동액을 사용할 경우, 열전달 측면에서 볼 때 열매체 사용으로 인한 열저항이 증가하여³⁾⁻⁵⁾ 그 열효율이 물을 직접 가열할 경우에 비해 상당히 떨어지게 되며, 부동액의 정기적인 보충에 따른 여러 불편함도 초래하게 된다⁵⁾. 아울러 일반적으로 부동액은 유해하며 이로 인하여 축열조 내의 데워진 물에 대한 안전성 등에 문제가 발생할 수 있으며 부동액의 사용으로 인한 환경 오염 등도 무시할 수 없는 현안이다.

본 연구에서 개발한 태양열 온수기는 이와 같은 기존의 간접식 태양열 온수기의 단점을 지양하고, 보다 효율적으로 태양열을 활용하며 아울러 환경 오염 등의 문제도 해결할 수 있는 데에 그 의의가 있다고 할 수 있다.

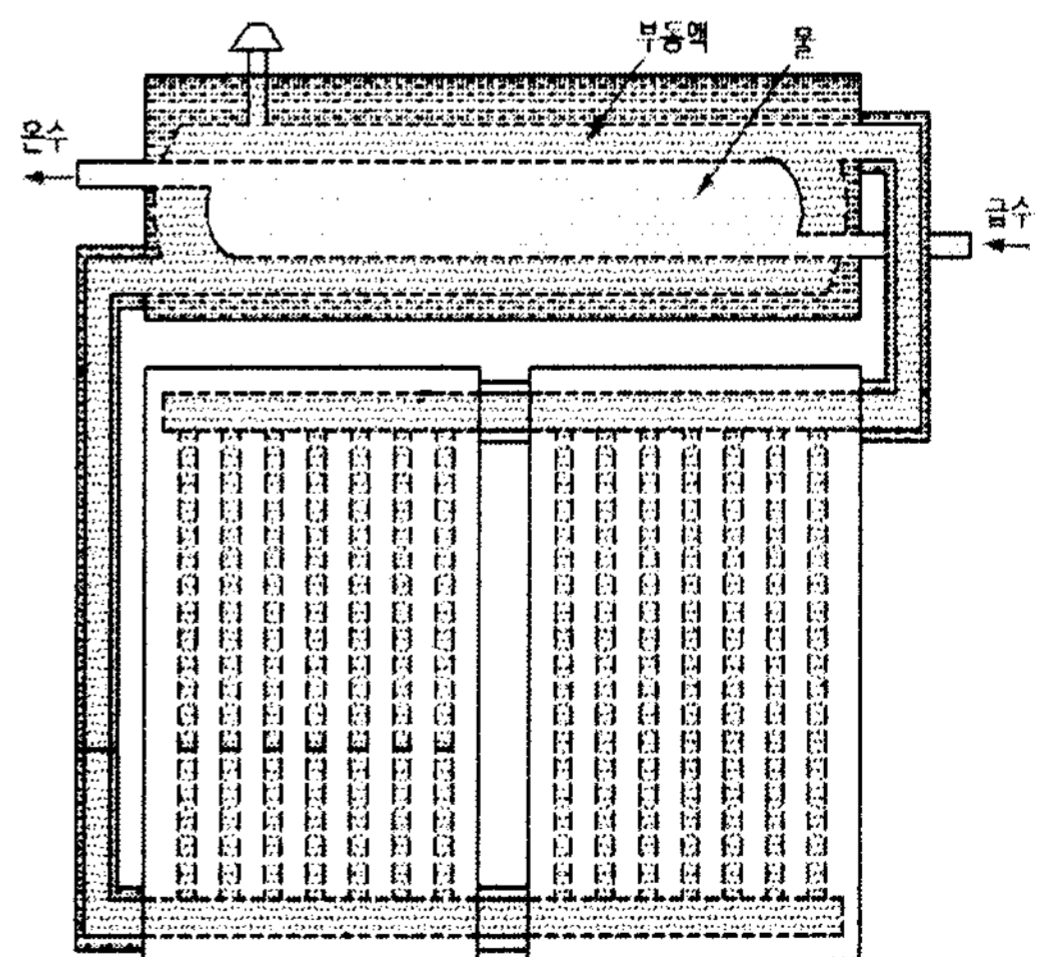


Fig. 1. Schematic diagram of an indirect solar water heating system with natural circulation.

2. 시스템의 기본 설계안 및 제작

앞서 서론에서 언급한 바와같이 기존의 태양열 온수기는 대부분 간접식으로서 열매체를 사용하고 있으므로, 열매체가 자연순환에 의해 최대한도로 집열기에서 모아진 태양열을 축열조 내의 물탱크에 전달할 수 있도록 설계되어야 한다. 즉, 태양열 온수기의 집열기는 직사각형 형상을 기본으로하고 좌측과 우측에는 반드시 축열조와 연결되는 짧고, 긴 2개의 파이프가 각각 설치될 수 있도록 설계되어 있는데(그림 1 참조), 이는 작동유체(부동액)가 자연대류에 의해 순환될 때 축열조의 역부압을 최소화하여야 태양열 집열기로서의 역할을 수행할 수 있기 때문이다.

이에 반하여 본 고안(설계안)은 비록 기존의 직사각형 형태를 취하고 있기는 하지만 특수 설계로(특허출원 제 97-73857, 제 98-5663호) 집열기는 일체식으로 제작되며, 기존의 부동액 사용 집열기와는 달리 물을 집열기에서 직접 가열하도록 되어 있다(그림 2).

본 고안의 특징을 전체적으로 기존의 태양열 온수기 설계와 1 대 1로 비교하자면, 기존의 시

스템은 집열기의 좌측 또는 우측에 각각 짧고, 긴 2개의 축열조로의 연결 파이프가 설치된 형태로 비교하여야 하며 이는 일체식으로 설계된 본 고안과는 기본적으로 그 형상이 상이함을 알 수 있다. 우선, 기존 온수기의 하강관(축열조로부터 차가운 유체가 집열기로 흘러 들어가도록 연결되어 지는 파이프 - downcomer)이 집열기 내부에 설치되어 헤더와 집열기 안에서 연결되어 있는데 이는 동절기 물의 하강관 결빙시 집열기의 열로써 이를 신속히 해빙시키기 위함이다. 물론, 이 방식을 기존의 비직접식 시스템에 적용할 필요는 없으며 이는 열매체의 사용으로 인한 열적 저항 외에 하강관의 역부압을 발생시켜 유체역학적으로 시스템의 효율을 저하시키기 때문이다. 직접식의 경우도 역부압이 발생하나 물을 직접 집열기에서 가열하므로 열매체에 의한 열적 저항이 존재하지 않아 전체적으로는 역부압으로 인한 시스템 효율의 저하에도 불구하고 간접식에 비해 높은 시스템 효율을 나타낸다.

본 고안은 또한 유리 덮개 안쪽으로 비쳐지는 집열기의 배관망도 완전히 다른 설계로 되어 있음을 알 수 있다. 이는 기존의 태양열 집열기가 겨울철의 동파 문제로 인하여 부동액을 작동유체로 하는데 비해 본 고안은 물을 직접 집열기에서 가열하고 겨울철의 동파 문제도 특수 배관망 및 신소재의 사용으로 해결하였기 때문이다. 기존의 비간접식 시스템의 집열기는 열매체의 결빙 등을 고려할 필요가 없으므로 그 설계가 비교적 간단한 측면이 있으나, 본 연구에서 개발하고자 한 직접식 시스템은 동절기 집열기 내부의 물의 결빙을 고려하여야 하기 때문에 이에 대한 합리적인 해결책이 구조적으로 마련되어야 한다. 본 고안에서는 우선 물의 결빙시 얼지 않은 물의 축열조로의 자연 회수를 유도하도록 라이저 튜브 및 헤더로 구성되는 배관망을 설계하였는데, 이는 물이 얼면서 부피가 팽창하는 현상이 동파의 직접적인 요인이나 이를 역으로 이용하여 배관망 내의 여

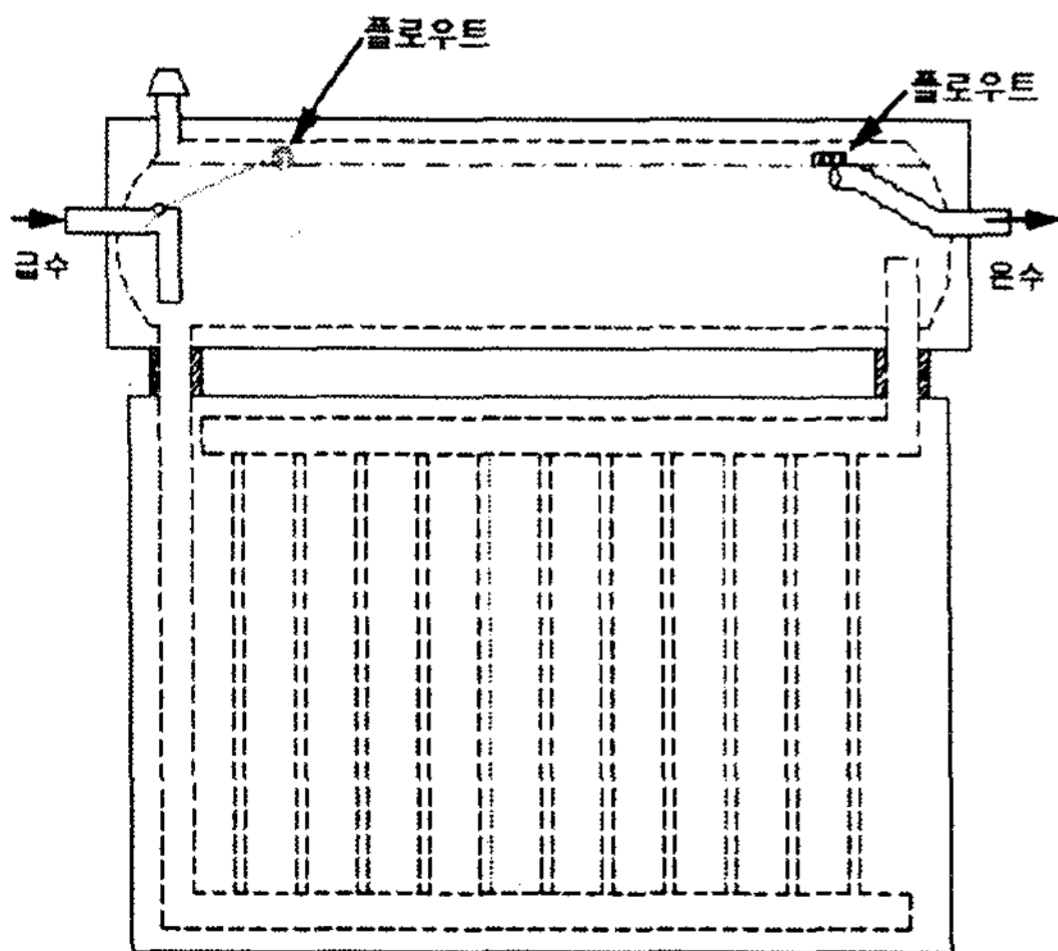


Fig. 2. Design of a direct solar water heating system with natural circulation.

분의 물이 얼기 이전에 축열조로 되돌아가 배관망 내에는 최소한의 물만 남아 있게 하기 위함이다. 실제로 이와같은 배관망은 집열기의 동파방지에 매우 효과적이었음이 여러 차례에 걸친 결빙 실험으로 입증되었다.

한편, 물이 헤더 내에서 국부적으로 결빙되는 경우도 고려해야 되는데 이를 해결하기 위하여 본 고안에서는 물의 국부적 결빙에 따른 내압 상승을 차단하기 위하여 헤더 내에 감압 튜브를 설치하거나 탄력성 있는 재질의 헤더를 사용하였는데 이에 대해서는 다음 절에서 자세히 언급하고자 한다.

이와같이 본 고안은 기존의 집열기보다 그 성능이 우수할 뿐 아니라 파이프가 집열기의 좌측 및 우측에 집열기 길이 방향으로 존재할 필요가 없으므로 그 외관이 미려하고 전체적으로는 시스템 구성이 단순해짐을 알 수 있다.

본 고안은 또한 모듈라 방식의 시스템 설계를 취하고 있는데, 이는 시스템의 탄력적인 운영 뿐 아니라, 뛰어난 시스템 확장성을 보장하고 있다. 우선, 모듈라 방식의 태양열 온수기는 그 고안에 있어 기존의 태양열 온수기와는 전혀 다른 새로운 형태를 취하고 있다. 즉, 기존의 온수기는 대부분 간접식으로 부동액을 작동유체로 사용하므로 물을 직접 가열하여 사용하는 본 온수기와는 그 메카니즘이 전혀 다를 뿐 아니라 이로 인한 시스템 디자인도 전체적으로 완전히 다르다고 할 수 있다.

본 고안은 모듈라 개념을 도입하여 집열기 하나에 축열조 하나로 태양열 급탕 시스템을 구성할 수도 있고 온수 사용량에 따라 사용자가 임의로 축열조를 여러 개 간단히 접속시켜 급탕 용량을 확장시킬 수 있다(그림 3). 즉, 축열조의 측면 하부에 축열조와 축열조를 연결하는 접속부가 돌출되어 있어(특허출원 제 97-73859) 집열기에서 데워진 물이 사용자가 큰 수온의 변화없이 온수를 장시간 사용할 수 있도록 얼마든지 연결할 수

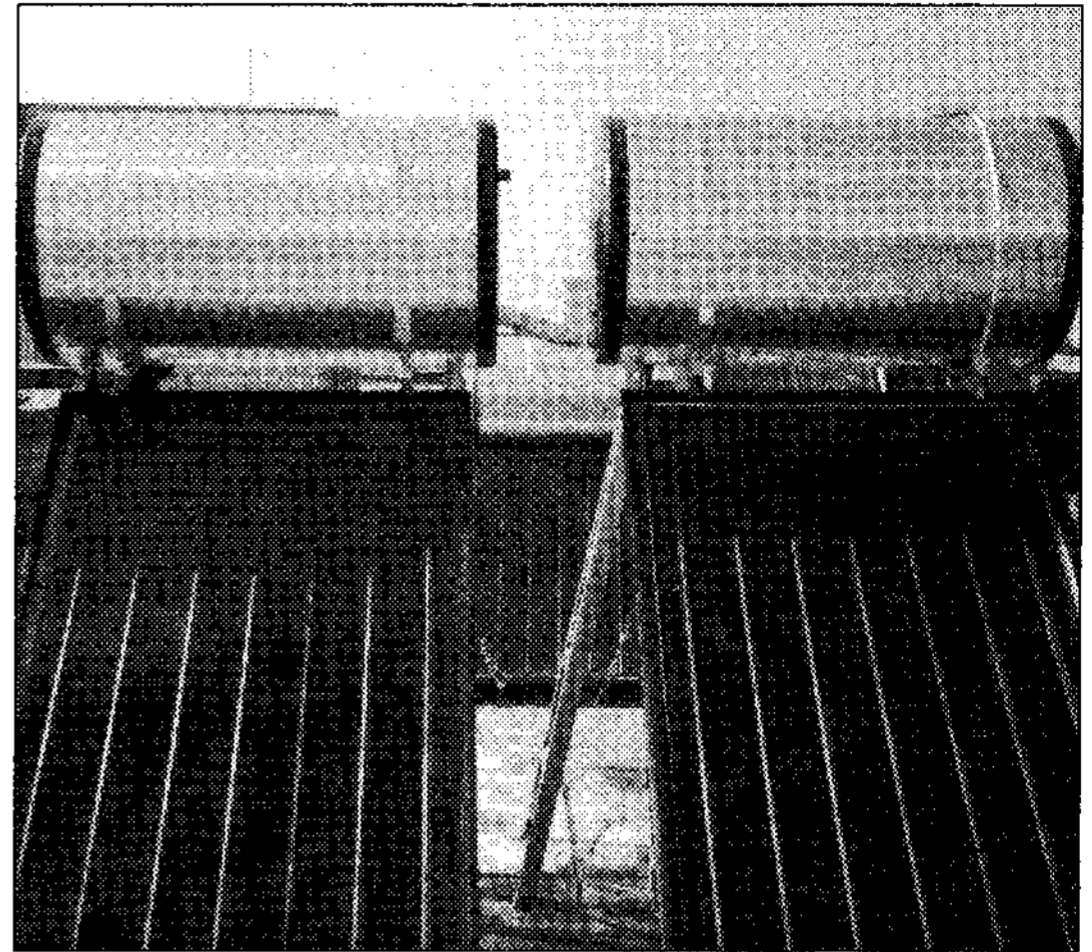


Fig. 3. The present system with two modules connected in parallel.

있도록 되어 있으며 이는 기존의 설계와는 전혀 다른 개념의 고안이라 할 수 있다. 축열조는 또한 대기압 하에서 시스템이 작동하고 별도의 열교환기 등이 필요 없으므로 기존의 시스템처럼 금속재(SUS 등)를 사용하여 축열 탱크를 제작할 필요가 없어 탱크의 제작이 용이할 뿐 아니라 가볍고 저렴하며 또한 용접 부위가 없어 내구성도 상당히 증진될 수 있는 장점이 있다.

기존의 태양열 온수기는 일반적으로 대형화되어 있어 이와 같은 모듈라 개념이 도입되어 있지 않을 뿐 아니라 전술한 바와 같이 대부분 부동액을 열매체(작동유체)로 사용하고 집열기에는 반드시 축열조까지 연결되는 2 개의 파이프가 측면에 길게 설치되어 있어(그림 1 참조) 시스템 성능은 차치하고 그 외관이 본 고안보다 미적인 면에서 상당히 떨어진다. 아울러 본 고안은 물을 직접 집열기에서 가열하는 방식으로 겨울철에도 특수 설계(특허출원 중 제 97-73857, 제 98-5663호)로 동파문제를 해결하였으며 대기압 하에서 작동하도록 고안되었다. 한편, 기존의 온수기는 대부분 대기압 이상으로 시스템 내부가 유지되므로 본 고안에서와 같이 모듈라 방식의 채택은 물론 축

열조와 축열조를 필요에 따라 다수 연결되어지는 형태로 설계하기는 거의 불가능한 일이다.

3. 동파 방지를 위한 설계

본 시스템은 집열기 헤더 내의 물이 동결기 결빙시 부피 팽창으로 인한 내압 증가로 헤더가 파손되지 않도록 헤더 내에 감압 튜브를 설치하거나(그림 4) 특수 소재를 이용하여 이의 파손을 방지하였다(특허출원 제 97-73857, 제 98-5663호, 특허등록 제0251489호). 즉, 전자의 경우, 헤더는 열전도성이 양호한 구리 등 금속으로 제작되며 헤더 내측에 $-20^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 의 태양열 활용 범위 내에서 내열성과 탄력성이 입증된 재질의 부드러운 감압 튜브를 장착하여 헤더와 파이프 내부에 들어있는 물이 감압 튜브의 수축 및 팽창 작용으로 헤더와 파이프가 겨울철 혹한 속에서 결빙으로 인해 동파·파손되는 것을 방지하도록 하였다. 이와 같은 메커니즘은 시스템 전체에 걸쳐 동파

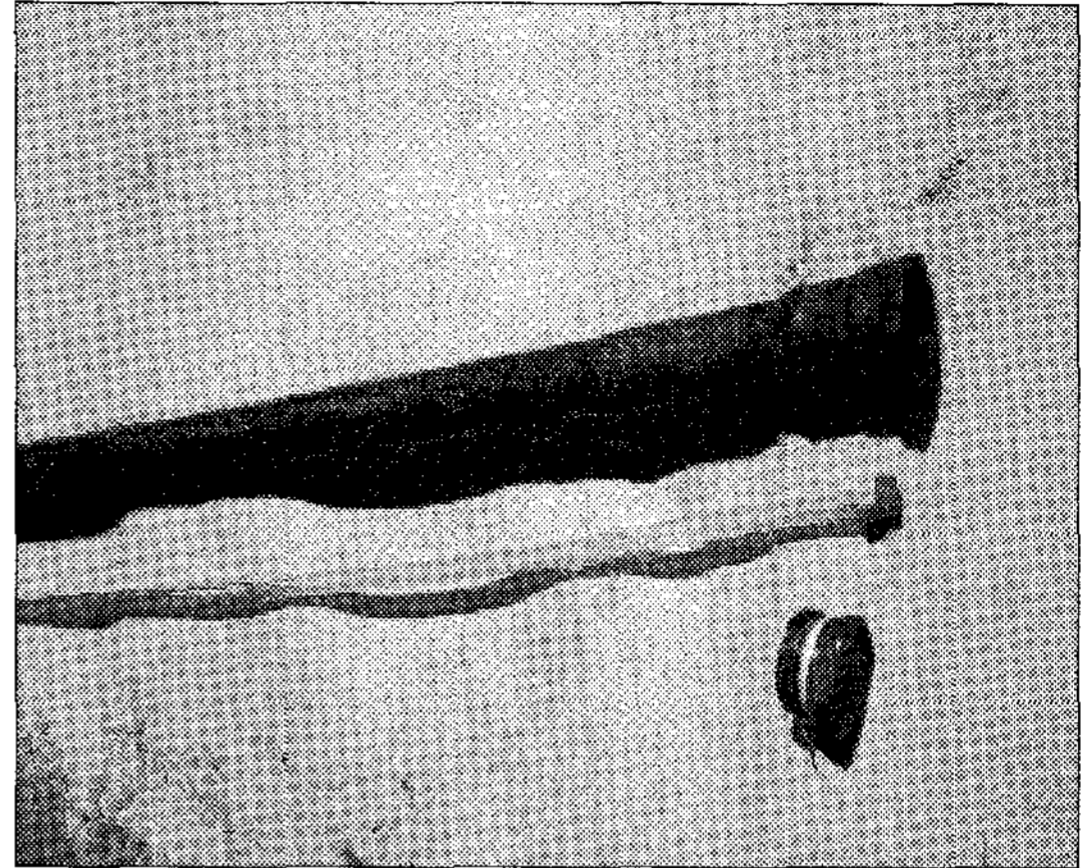


Fig. 4. Pressure relief tubes

방지를 위하여 적용될 수 있으며 이를 다시 살펴보면 다음과 같다.

집열기의 라이저 튜브와 헤더 그리고 집열기를 축열조와 연결하는 파이프로 구성되는 태양열 온수기의 구조(그림 2 참조)에 있어서;

축열조 내측 중앙에 횡으로 감압 튜브를 삽입 설치하는 것과, 파이프(축열조와 집열기 연결 파이프)와 헤더 내측에 감압 튜브를 삽입하여 헤더와 파이프를 통과하는 물이 기온의 하강으로 인해 결빙되더라도 감압 튜브가 일시적으로 수축이 되어 파이프와 헤더의 파손을 방지할 수 있으며 또한 기존의 온수기의 경우 집열기와 축열조를 연결하는 파이프가 외부에 노출되어 있으나(그림 1 참조) 이를 헤더의 일부분으로 집열기 내에 설치하여(그림 2 참조) 야간에 결빙된 물을 주간 집열기 내부의 열로써 녹일 수 있도록 구성되어진 동파를 방지할 수 있도록 하는 것이다.

4. 실증 실험

본 연구에서는 상기의 본 설계안에 대하여 신빙성 있는 실증 데이터를 얻고자 하절기의 옥외 성능 실험(그림 5) 뿐 아니라 냉동고 내의 결빙

Table 1. Design specifications

Collector	
description	materials
absorber plate	Cu + Al
area	2.16 m ² (1 sheet)
insulation	polyurethane foam
dimension(mm)	1200 × 1800 × 70
Storage Tank	
description	materials
tank	high density PE
insulation	polyurethane foam
exterior wrap	anticorrosion Al
capacity(litre)	150
weight(kg)	15

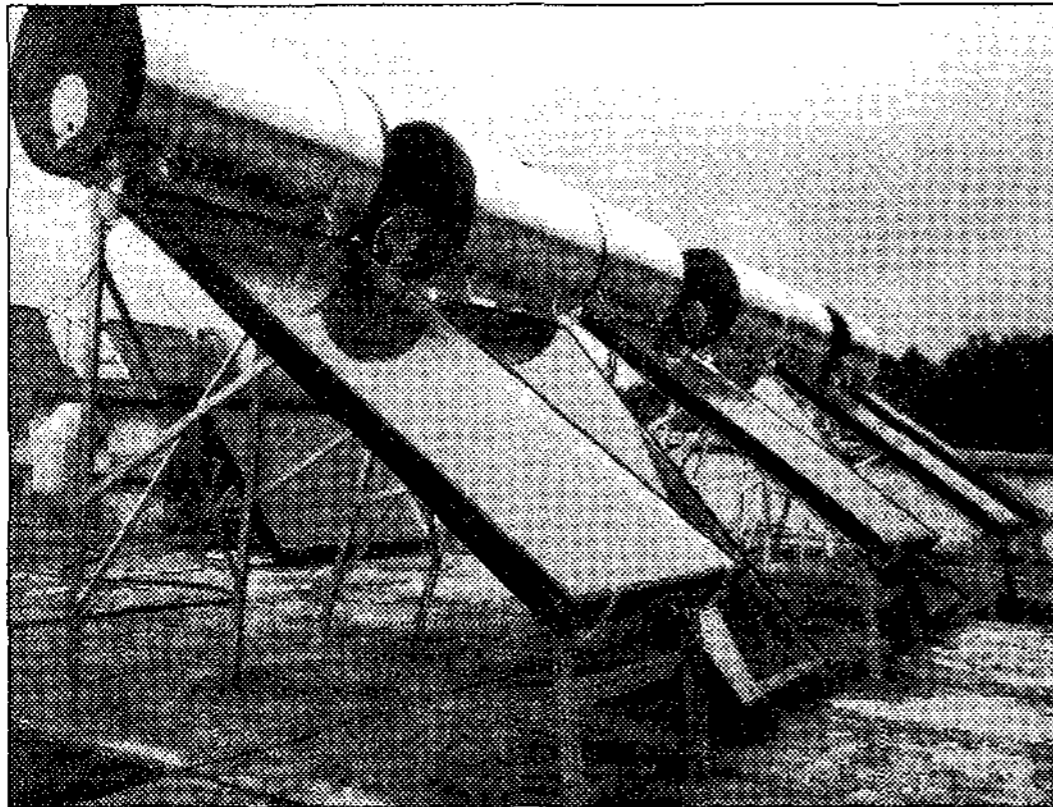


Fig. 5. Outdoor test of direct solar water heaters

실험을 수행하였으며 특히 후자는 흑한기의 내구성에 대한 확실한 신뢰성을 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 우선 시스템의 전체적인 성능 실험은 한국에너지기술연구소(KIER)에서 제시한 프로토콜에 따라 수행되었는데 그 1차 결과 (Preliminary Results)는 이미 발표된 바 있으며¹⁾ 다음의 데이터는 이에 대한 추가적인 실험에서 얻은 것으로 앞서의 결과를 거의 반복하고 있다. 식(1)은 본 연구에서 사용된 시스템의 열 성능 산출에 적용된 식으로 이는 전술했듯이 이미 소개된 바 있으므로 이에 대한 자세한 과정 등은 참고문헌을 참조하기 바람직하며 자세한 설명은 생략한다.

$$S = \frac{5000 \times (T_n - T_w) V}{A_c I} \text{ (kcal/m}^2\text{)} \quad (1)$$

여기서 T_n : 탱크 중앙부 온도(°C)

T_w : 시수 온도(°C)

V : 저장탱크 내의 용수 용량(kg)

I : 1일 집열면 일사량(kcal/m²)

시스템의 내한성 실험은 1차적으로 길이 1.5m의 동파이프 안에 감압튜브를 설치하고(그림 6, 그림 7 참조) 이를 반복적으로 냉동고 안에서 동

Table 2. Thermal performance data of the present system

	Thermal Performance (5000 kcal/m ²)	Efficiency (%)
May 30, 1999	2880.6	57.6
June 4, 1999	2992.4	59.8

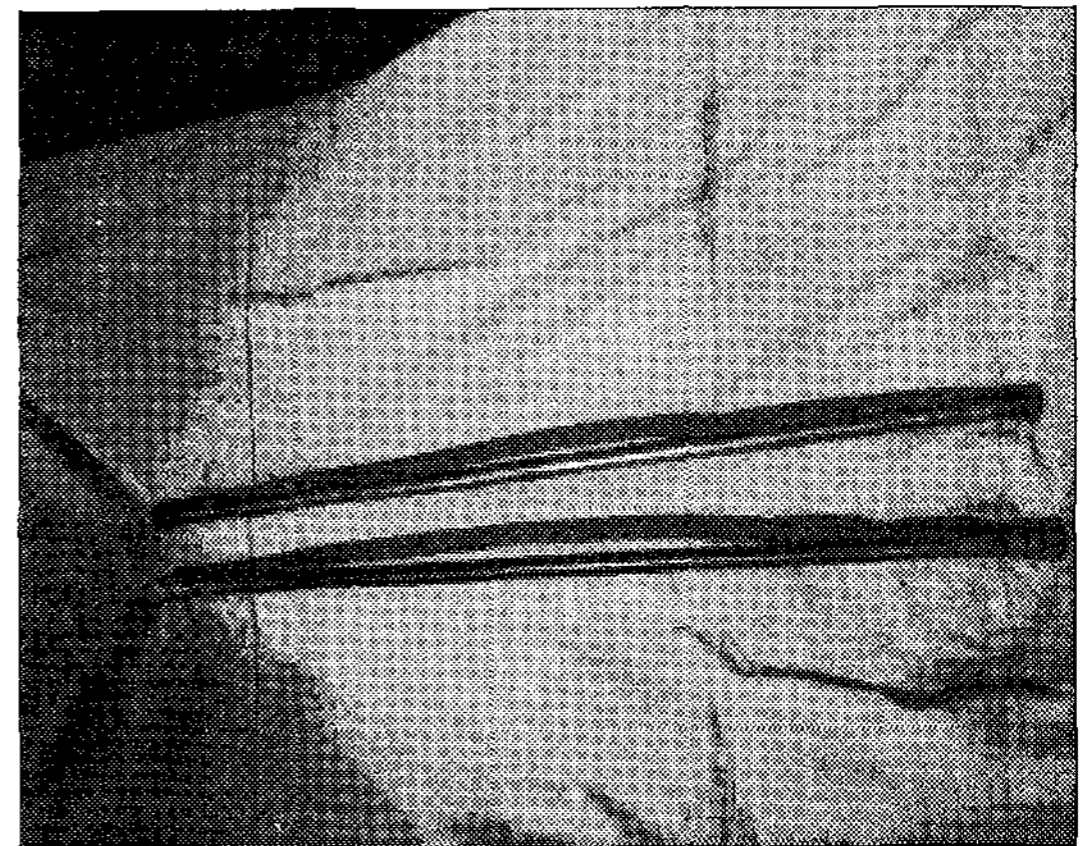


Fig. 6. Header element.

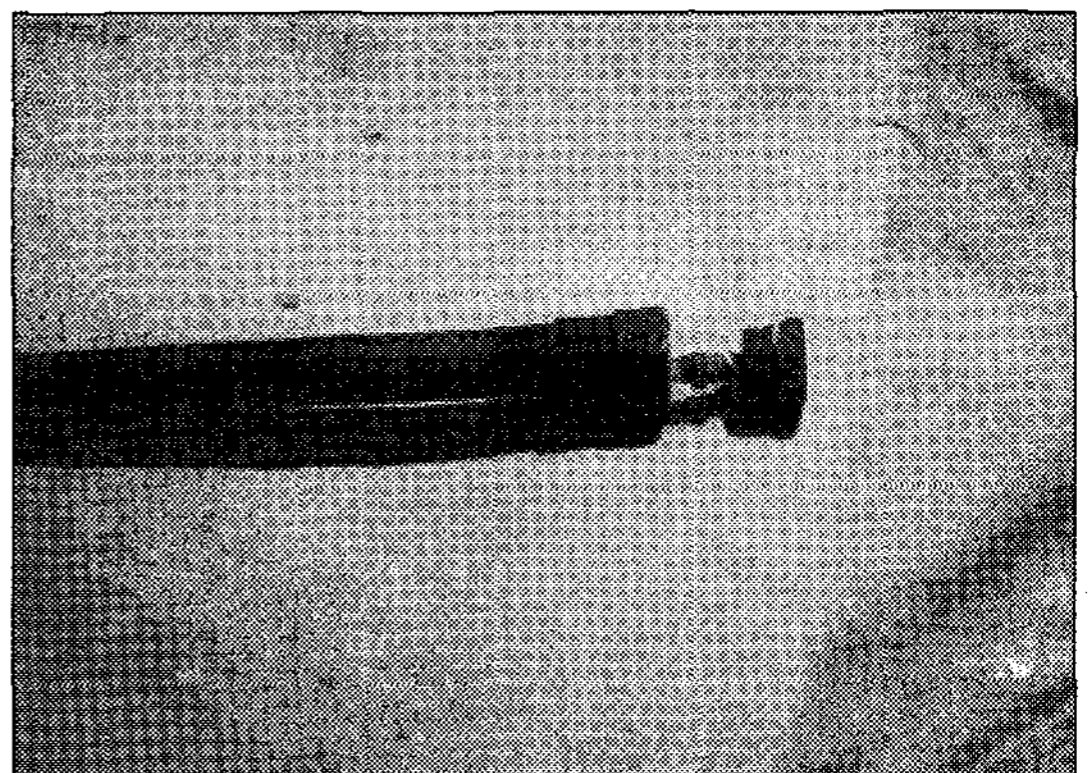


Fig. 7. Header element with pressure relief tubes

결시킨 후 그 변형 유무 및 누수를 관찰하고 아울러 감압튜브의 해빙 후의 원형 회복 등에 대한 데이터를 반복적으로 획득하는 방법을 수행하였다. 한편, 이와 같은 단편적인 실험 결과는 곧 전체적인 시스템의 설계에 중요한 데이터를 제공하

였으며 바로 본격적인 시스템 제작 및 실제적인 결빙 및 해빙 실험으로 연결되었다. 결빙 실험은 냉동 창고 내에서 시스템을 최저 영하 28 ~ 32도에서 10 ~ 12시간 놓아둔 후 이를 다시 12 ~ 13 시간 동안 해빙시키는 과정을 7회 반복하는 방법을 취하였는데 이는 동절기 우리나라의 기온을 감안하건데 거의 극한 실험 조건임을 알 수 있다.

5. 결과 및 고찰

본 연구에서는 열매체를 사용하지 않고 집열기에서 물을 직접 가열하는 형식의 직접식 태양열 온수기에 대하여 옥외 실험을 통한 직접 가열뿐 아니라 냉동고 안에서의 결빙 실험을 통하여 중요한 설계 변수 및 시스템에 대한 구체적인 성능

데이터를 획득할 수 있었는데 이는 시스템의 실용화에 중요한 자료로써 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 옥외 성능 실험은 이미 그 1차 결과가 발표된 바 있으며¹⁾, 본 연구에서는 이 옥외 실험 데이터를 다시 한 번 확인하고 동일 조건하에서의 시스템 성능의 반복성을 확인하여 주고 있다고 할 수 있다.

그림 8는 5월말과 6월초에 걸쳐 5일 동안의 맑은 날(누적 일사량 4000kcal/m² 이상)의 평균 열 성능 데이터를 나타내고 있는데 직접식 시스템의 빠른 열응답성과 높은 열효율을 대변하고 있다. 한편, 이 데이터를 근간으로 하여 시스템의 열효율을 계산하면 거의 60%에 육박하는데 이는 현재 시스템 성능 평가에서 50%를 합격선으로 하는 것에 비해 약 10% 상회함을 알 수 있다. 이는 앞 절에서 전술한 바와 같이 본 시스템의 경우 물을 집열기에서 직접 가열하므로 비록 집

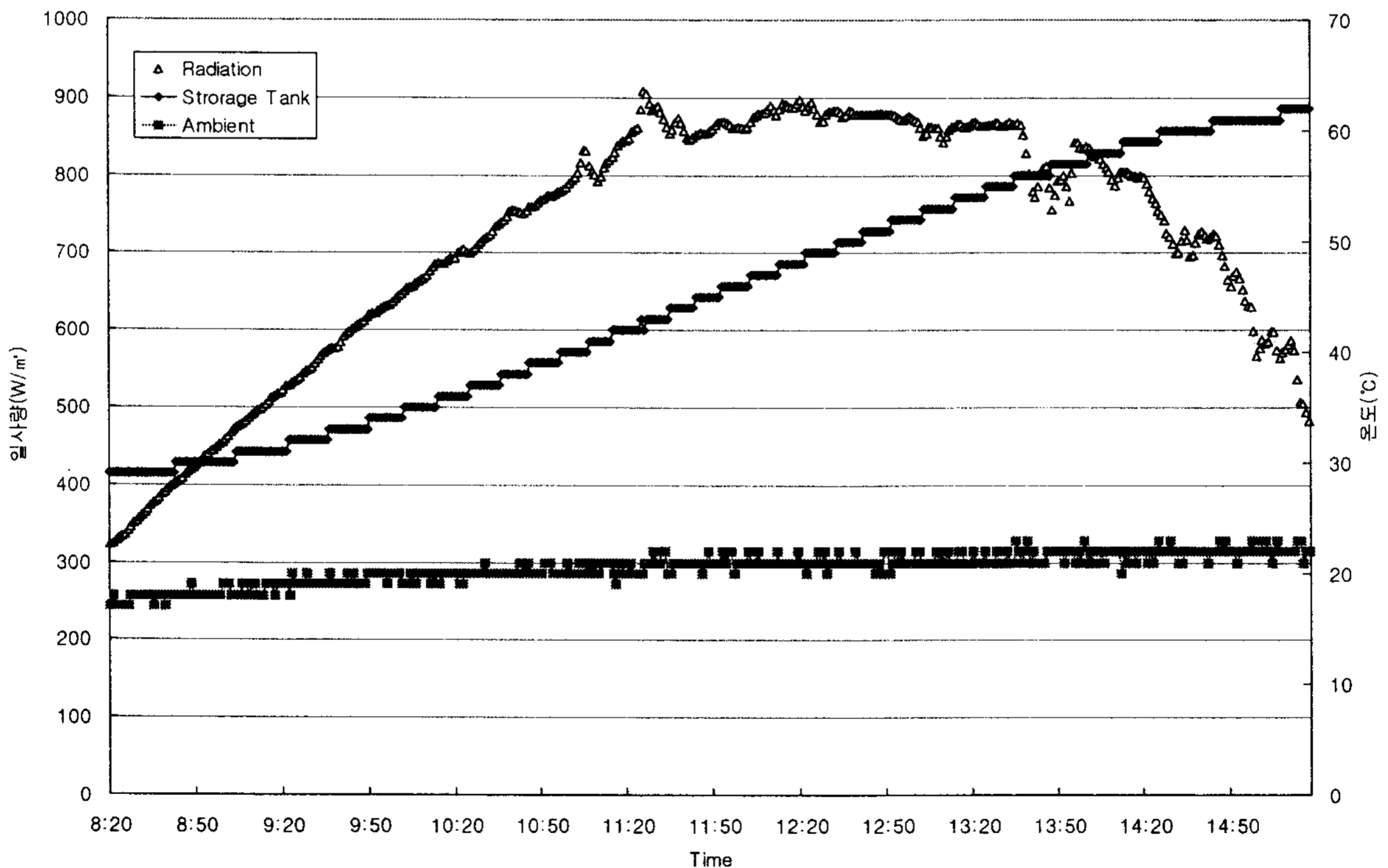


Fig. 8. System performance data(average data of 5 days).

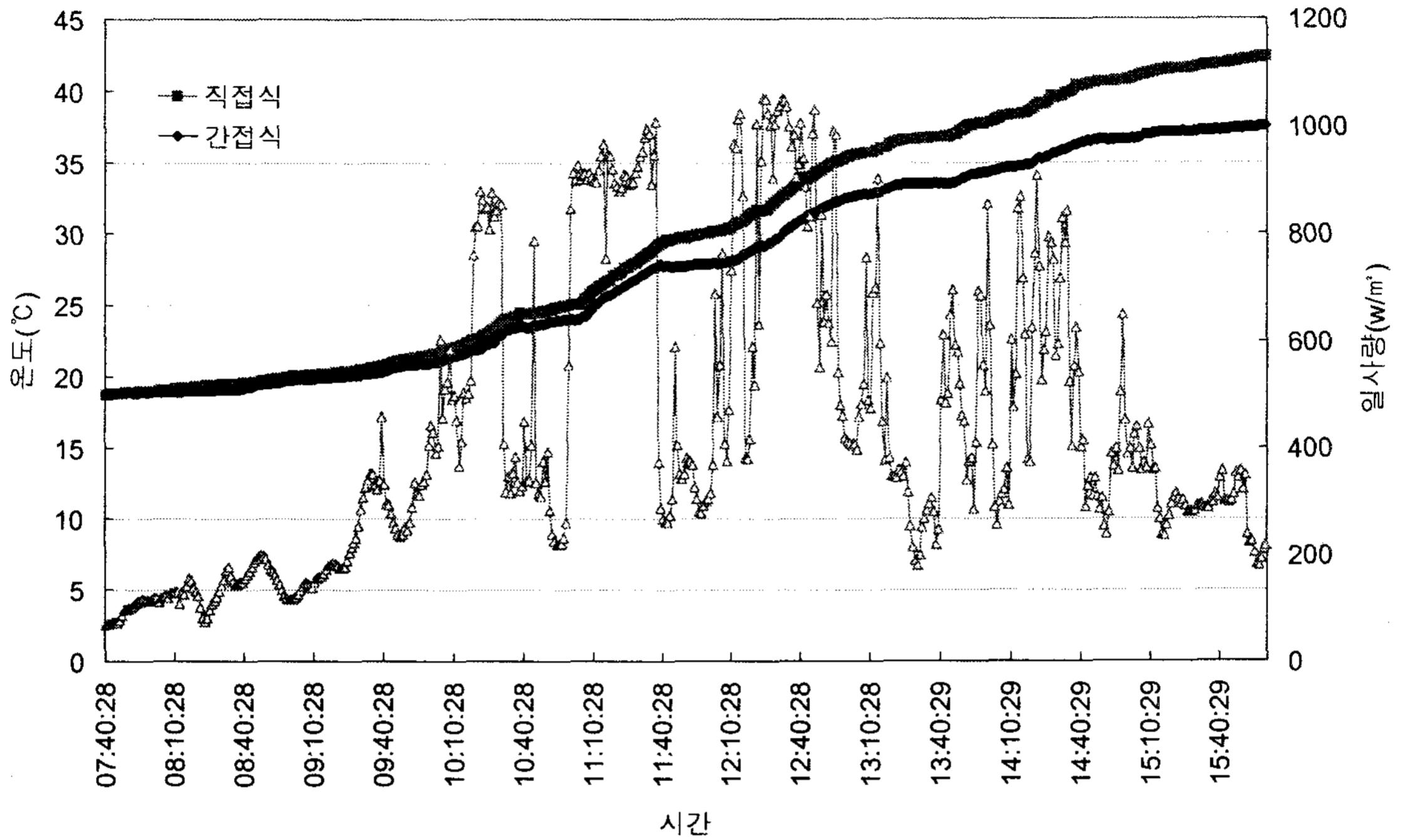


Fig. 9. Comparative performance data of the present direct system with an indirect system tested in parallel.

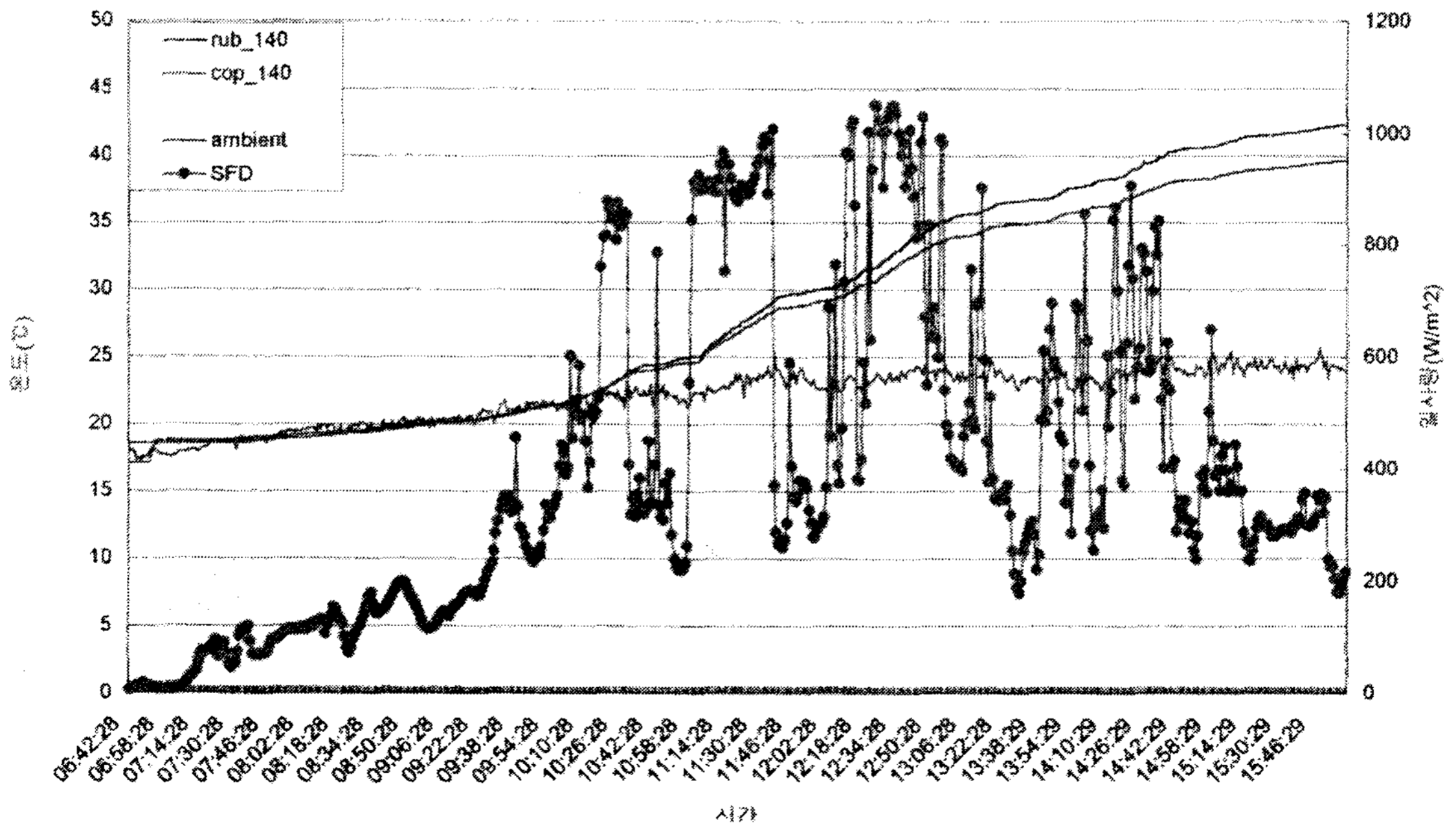


Fig. 10. Comparative performance test for different type of pressure absorbing

열기 내의 하강관에서의 역부압이 상존하더라도 간접식의 열매체와 별도의 열교환기의 사용에 따른 열적 저항이 존재하지 않아 비교적 양호한 시스템 효율을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

그림 9은 본 고안의 직접식 시스템과 한 간접식 시스템과의 옥외 실험 결과를 나타내고 있는데 그림에서와 같이 직접식이 전시간대에 걸쳐 빠른 열응답성과 보다 뛰어난 열성능을 보여 주고 있다. 이는 위에서도 언급된 열매체와 별도의 열교환기의 제거에 따른 열적 저항의 감소에 기인한다고 볼 수 있으며 다시 한 번 본 시스템의 열적 성능의 우수함을 확인하여 주고 있다.

Fig. 10은 직접식 시스템의 헤더 디자인에 따른 일조 시간대의 열성능을 나타내고 있다. 이 그림에서 보는 바와같이 헤더를 신축성 있는 재질로 제작한 시스템의 성능이 구리헤더 내에 감압 튜브를 삽입한 경우보다 양호한 성능을 나타내고 있다. 이는 구리를 재질로 사용하는 경우 헤더 내의 물이 태양열에 의하여 더 빨리 데워지면서 역부압을 형성해 원활한 물의 순환을 억제하는 효과가 더 크게 나타나기 때문이다. 그러나 헤더를 고무 등 탄력성 있는 재질로 제작할 경우 시스템을 대기압하의 조건에서 사용할 수는 있으나, 가압식으로 사용하기에는 내구성에 문제가 발생할 수 있다.

결빙 실험의 경우 시스템은 예측한 대로 집열기로부터 축열조로의 자연회수가 이루어지는 것으로 나타났으며 집열기의 어떤 부위도 파손되거나 변형되지 않아 본 고안의 직접식 시스템이 동절기의 혹한 속에서도 별도의 유지관리를 위한 장치나 인위적인 작동이 필요 없음을 입증하였다.

한편, 현재의 시스템에 약간의 변형을 피하여 결빙시의 자연회수와 집열기 동결 상태를 조사하였는데 집열기와 축열조를 연결하는 파이프(하강관 혹은 상승관)의 축열조측 연결 부위는 그 기하학적 형상에 따라 상당히 결빙시의 시스템 작동에 영향을 줄 수 있음을 목격하였다. 즉, 이 부

위는 몇 경우에 있어 집열기에서 축열조로의 자연 회수가 진행되는 동안 먼저 결빙되어 자연 회수가 정지되는 현상이 초래되었는데 이는 현 시스템의 크기나 형태를 변화시킬 때 이에 따른 집열기와 축열조의 연결 메카니즘 등에 대한 중요한 설계 단서를 제공하였다고 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 감압 튜브 혹은 팽창 헤더 등을 이용한 직접식 태양열 온수기의 설계, 작동 원리 그리고 그 열적 성능에 대하여 이론적 및 실험적인 연구 진행 결과를 소개하고 있으며 다음과 같은 결론을 제시하고 있다:

- 1) 직접식 태양열 온수기는 간접식에 비해 그 열적 저항이 적어 하강관의 역부압 발생에도 불구하고 상당히 우수한 열적 성능을 나타낼 수 있다.
- 2) 직접식 태양열 온수기의 집열기 설계시 동절기 집열기 내부의 결빙에 대한 고려가 반드시 이루어져야 하며, 이 때 신속한 해빙에 대한 고려도 동시에 설계에 반영되어야 한다.
- 3) 집열기 내의 물의 결빙시 축열조로의 물의 자연 회수는 배관망의 구조에 따라 상당히 영향을 받으며, 특히 축열조측 연결 부위의 설계는 시스템의 순방향 작동 뿐아니라 내구성과도 직결된다고 할 수 있다.
- 4) 집열기 내 물의 결빙시 헤더는 물의 부피 팽창에 따른 영향을 직접적으로 받게 되는데 감압 튜브나 팽창 헤더의 설치는 이를 크게 완화시킬 수 있다.
- 5) 모듈라 방식의 시스템 설계는 시스템 운영의 탄력성 및 시스템의 확장성 측면에서 상당히 유리한 조건을 제공할 수 있다.
- 6) 상기의 여러 고무적인 연구 결과에도 불구하고 시스템의 실용화를 위해서는 이를 뒷받침할 수

있는 보급 체계가 구축되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 제주대학교 산업기술연구소와 (주) 신우 GE와의 산학협동연구과제로 수행되었으며 관련 제위께 깊은 사의를 표한다.

참 고 문 헌

1. 천 원기, 김 형택, "비동파 직접식 온수 급탕 시스템의 열성능에 관한 연구", 한국태양에너지학회 논문집, 18권 4호(1998).
2. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Domestic Water Heating Systems", ASHRAE, Atlanta, GA(1985).
3. ANSI/ASHRAE93, "Method of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors"(1993).
4. Wongee Chun and Yong Heack Kang, Hee Youl Kwak, and Young Soo Lee," An Experimental Study of the Utilization of Heat Pipes for Solar Water Heaters", Applied Thermal Engineering, Vol. 19 (1999).
5. E. Mathioulakis, K. Voropoulos and V. Belessiotis, "Assesment of Uncertainty in Solar Collector Modelling and Testing," Solar Energy Vo. 64, No. 5(1999).