

## 진공복사관식 집열기의 성능비교

천 원 기\* · 강 상 훈\*\*

### Study on the Optical Performance of Evacuated Solar Collectors

Won-Gee Chun\* and Sang-Hoon Kang\*\*

#### ABSTRACT

This thesis is to find the optimum way to increase the use of the currently widely vacuum tube solar collector through the analysis of its thermal efficiency and various types and features. The vacuum tube solar collector is divided into two classes depending on its design. One is equipped with a metal fin in a vacuum tube for collecting the solar heat, while the other uses an inner tube to collect the heat, in effect doubling the vacuum tube. Of course, both maximize the collection of solar heat but they differ in the way the heat is transferred to its point of use. In the first case, the collecting of the solar energy can derive the thermal analysis through the use of the theory of heat collection such as the flat-type collector's fin efficiency. The representative example of this is the type of vacuum tube with a heat pipe and attached.

**Key Words** : thermal efficiency, vacuum tube solar collector

#### 1. 서론

태양에너지는 대체에너지 그리고 청정에너지로서 향후 많은 개발과 이용이 필요한 분야이다. 현재 국내에서 사용되고 있는 평판형 집열기는 초기 투자 비용면에서 진공복사관식 태양열 집열기에 비해 저렴한 편이나, 겨울철에 난방수요와 온수사용이 증가하는 국내환경에는 맞지 않기 때문에 그 이용면에서는 미비한 실정이다.

본 연구에서 기존의 간접식 태양열 온수기, 직접식 태양열 온수기 그리고, 진공복사관식 태양열 집열기를 이용한 태양열 시스템을 비교하였다. 여기에 사용된 진공복사관식 태양열 집열기는 그 디자인에 따라 크게 2가지로 분류될 수 있는데 그 하나는 진공튜브 안에 태양열 집열을 위한 금속성의 핀(fin)이 부착된 장치를 설치한 것이고 다른 하나는 진공 튜브를 이중으로 제작하여 안쪽 튜브가 태양열의 집열을 피할 수 있도록 한 것이다.<sup>1)</sup> 물론, 전자나 후자 모두 태양열의 집열을 극대화하고 주위로의 열손실을 최소화하고자 고안된 공통점이 있으나 집열된 열은 그 형태에 따라 다양한 방법으로 이용부로 이동되게 된다. 전자의 경우, 태양에너지의 집열은 평판형 태양열 집열기의 핀효율(fin efficiency) 등 집열 이론을 그대로 적

\* 제주대학교 에너지공학과, 첨단기술연구소  
Faculty of Mechanical, Energy & Prod. Engineering Research  
Institute of Advanced Technology., Cheju Nat'l Univ

\*\* 제주대학교 대학원  
Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

용하여 열해석을 유도할 수 있으며 그 대표적인 case 가 진공관 안에 구리 편이 부착된 히이트 파이프가 삽입된 형태이다.<sup>2)</sup> 진공관식 태양열 온수 시스템의 특징은 기존의 평판형 집열기에서 최고 80°C 정도의 온수를 얻을 수 있는데 비해 진공관식 집열기의 경우 가압시 약 180°C까지 온도를 높일 수 있다.<sup>3)</sup> 즉, 가정용 온수 시스템뿐만 아니라 대량설치를 통해 산업 용으로도 이용이 가능하다는 것이다. 본 연구에서는 진공복사관식 태양열 집열기의 다양한 형태와 특징 그리고 그 열성능에 대한 분석을 통하여 향후 이의 효율적인 보급을 위한 최적안을 모색하고, 사용상의 문제점을 실험을 통해 보완하고자 함이다.

## 2. 이론적 고찰

진공관식 태양열 집열기는 집열 시스템의 대류에 의한 열손실을 진공 단열을 통하여 획기적으로 줄인 것으로 기존의 평판형 집열기에 비해 그 집열효율이 50% 이상까지 향상시킬 수 있도록 설계된 것이다. 진공관식 태양열 집열기는 특히 그 유형에 따라 정도의 차이는 있으나 작동 온도의 범위가 190°C까지 이론적으로 가능하며 이는 가압식으로 시스템을 운영할 수 있기 때문이다.<sup>4)</sup>

집열 효율과 집열 성능을 집열기에 따라 다소 차이가 나는데 그 이론적 산술치는 다음과 같은 가정 및 수식(equation)을 이용하여 체계적으로 구할 수 있다.

### 2.1 열 효율 이론

안정된 상태하에서 어떤 주어진 시간 동안에 태양열 집열기가 취득한 에너지는, 흡수판에서 흡수한 에너지와 주위로 손실된 에너지와의 차이이다. 이와 같은 관계를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q_u = A_c [I_r \tau \alpha - U_L (\bar{t}_p - t_a)] \quad (1)$$

여기서

$Q_u$  : 집열 에너지(kcal/hr)

$A_c$  : 집열면 면적( $m^2$ )

$I_r$  : 집열면 일사량(kcal/hr ·  $m^2$ )

$\tau$  : 투명 덮개 투과율

$\alpha$  : 흡수판 흡수율

$U_L$  : 열 손실 계수(kcal/hr ·  $m^2 \cdot ^\circ C$ )

$\bar{t}_p$  : 흡수판 표면의 평균 온도( $^\circ C$ )

$t_a$  : 외기 온도( $^\circ C$ )

집열판의 성능을 크게하려면 위의 식 (1)에서  $I_r \tau \alpha$  값을 최대한으로 크게 하고,  $U_L (\bar{t}_p - t_a)$  값을 최소로 줄일 수 있도록 설계하고, 가동 조건도 적절히 선택하면 된다.

이와 같이 집열기의 성능은 태양열의 흡수량과 집열기로부터의 열 손실 등 두 가지 요소에 의해 좌우된다.

#### ① 흡수열

태양열을 흡수할 수 있는 양은 다음과 같은 요소에 의해 결정된다.

(a) 경사진 집열판에 입사되는 입사 광선의 양 : 경사각에 따라 변한다.

(b) 흡열판 표면의 광선 흡수율( $\alpha$ ) : 집열기 전체의 효율은 이 흡수율에 의해서 많이 좌우되며, 금속 산화물과 대부분의 흑색 페인트는, 그 흡수율이 95% 가량이다. 가장 혼한 흡열 표면은 내열 페인트를 칠한 후 열처리를 하는 것이다.

(c) 유리 덮개판의 광선 투과율( $\tau$ ) : 유리의 광선 투과율은 유리의 질과 입사 광선이 유리 표면에 도달할 때에 표면과 이루는 각도에 의해 달라진다. 보통 유리 한 장이 반사시키는 양은 직사 광선의 약 8% 정도이다. 유리 속의 불순물 특히 철분은 광선을 흡수하므로 철분이 적은 유리를 사용하면 광선을 거의 다 투과시킬 수 있다.

#### ② 열 손실

집열기의 열 손실은 다음과 같은 요소에 의해서 결정된다.

(a) 유리 덮개판의 수 : 대류와 복사에 의한 열 손실을 줄이기 위해 하나 또는 두 겹의 유리와 같은 투명한 덮개판을 금속 흡열판 위에 놓게 된다. 즉, 흡열판과 유리 사이의 공기를 가두어 덤으로써 대류에 의한 열전달을 막아 전체 열 손실 계수( $U_L$ )를 적게 할 수 있다. 특히 유리는 흡열판으로부터 방사되는

장파장의 열 복사를 막을 수 있다.

(b) 집열기 아랫면 및 옆면의 단열 : 집열기의 아랫면과 옆면으로부터 많은 열을 잃게되므로 단열을 철저히 해야 한다.

(c) 흡열판의 평균 온도 : 식 (1)에서 보면 흡열판의 온도와 외기 온도와 차이가 적을수록 열 손실도 적어짐을 알 수 있다. 그러나 주위 공기의 온도는 조절할 수 없으므로 흡열판의 평균 온도를 조절해야 한다. 이 흡열판의 온도는 집열기의 설계 및 그 작동방법에 관계된다. 가장 중요한 요소는 집열기를 흐르는 전열 매체의 유속, 유체의 종류, 집열기로 들어올 때의 전열 매체의 온도, 흡열판의 열전도도 등이다.

## 2.2 집열 성능

태양열 가용 집열량(useful energy gain)  $Q_u$ 를 구하려면 집열기의 설계 조건은 물론 일사량, 흡열판의 평균 온도 및 외기 온도 등을 알아야 한다. 이 중에서 흡열판의 평균 온도를 제외하고는 쉽게 구할 수 있으나, 흡열판의 평균 온도는 전열 매체의 공급 온도 및 단위 시간당 흐르는 유량에 의해 변화되기 때문에, 편의상 흡열판 평균 온도 대신 쉽게 알 수 있는 집열기 입구 온도로 바꾸고, 집열 효율 수정 계수  $F_R$ 을 사용하며 식 (1)을 식 (2)로 표현될 수 있다. 태양열 시스템에서 유체의 온도는 쉽게 측정될 수 있으며, 액체식 집열기의 흡열판 온도는 집열기 입구의 유체 온도보다 5°C내지 10°C가 높고, 공기 식의 경우는 20°C내지 30°C 높다.

$$Q_u = F_R A_c [I_t \tau a - U_L (t_i - t_o)] \quad (2)$$

$t_i$  : 집열기 입구의 열 매체 온도 (°C)

$F_R$  : 집열 효율 수정 계수

식 (2)를 태양열 집열 효율식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_t A_c} = F_R \tau a - F_R U_L \frac{(t_i - t_o)}{I_t} \quad (3)$$

여기서  $\eta$ 는 실제로 유용한 태양 집열량을 집열면에 조사되는 총열량으로 나눈 값으로 집열기의 효율

을 말한다.

전열 매체의 유속을 일정하게 유지하면서 작동하는 태양열 집열기에서  $A_c F_R \tau a$  및  $U_L$  등은 거의 항상 일정하므로, 상수로 가정한다면 집열 효율  $\eta$ 는  $(t_i - t_o)/I_t$ 의 조건에 따라 변하는 일차식으로 나타낼 수 있으며 기울기가  $-F_R U_L$ 이고, 수직축인 효율 축의  $F_R(\tau a)$ 를 지나는 직선 그래프로써 Fig. 1에 도식화 하였다.

태양열 집열기의 성능은 일반적으로 실험에 의하여 구하며, 태양열 집열기를 통과하는 열 전달 매체의 유량과, 집열기 입출구의 온도차를 측정하면 된다.

$$Q_u = A G C_p (t_i - t_o) \quad (4)$$

$A$  : 집열 면적

$G$  : 집열 매체의 유량

$C_p$  : 열 매체의 비열

$t_i$  : 집열기 입구의 온도

$t_o$  : 집열기 출구의 온도

식 (3)의 집열기 효율은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= Q_u / A I_t \\ &= G C_p (t_i - t_o) / I_t \\ &= F_R \tau a - F_R U_L (t_i - t_o) / I_t \\ &= F_R \tau a - F_R U_L (t_i - t_o) / I_t \end{aligned} \quad (5)$$

Fig. 1에서  $(t_i - t_o)/I_t$ 의 조건에 의한 집열 효율 그

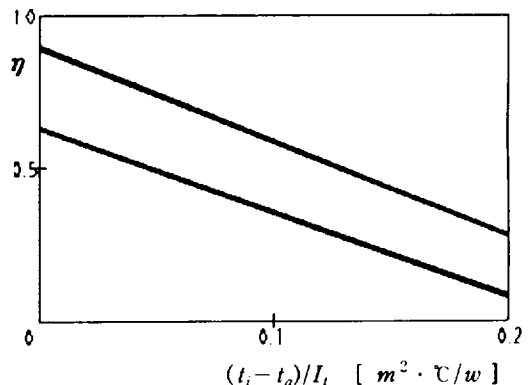


Fig. 1. Graph of collector performance.

래프의 기울기와, 효율측 값에 영향을 미치는 집열기의 주요 요소는, 투명 덮개의 수효와 흡열판의 특성 등이다. 어떤 경우에는 태양열 집열기의 성능 시험 결과로서 집열 효율 그래프가 집열기 내의 열 매체 평균 온도나, 집열기 출구의 열 매체 온도에서 외기 온도를 빼 값을 집열면 일사량으로 나눈 값으로서 표시하기도 한다.

즉,  $(\frac{t_i - t_o}{2} - t_a)/I_t$  나  $(t_i - t_o)/I_t$  의 조건에 의한 집열 효율 성장과 매우 비슷하게 나타난다. 그러나 이 그래프가 기울기나 효율측 값은 다르게 나타난다.

### 3. 실험 및 고찰

실험 장치는 직접식 평판형 집열기의 경우는 자연 대류식으로 구성하였고, 진공복사관식 집열기의 경우는 두가지 모두 강제대류식으로 구성하였다. 아래 Fig. 2는 이러한 강제대류방식으로 구성된 시스템의 모식도이고, 부동액을 사용하지 않고 집열기에서 데워진 물을 직접 축열조로 보내 저장하는 방법으로 실험하였다.<sup>5)</sup> 시스템을 제어하기 위해 사용된 차온 제어기는 써미스터를 이용하는 것으로써, 써미스터를 집열기 헤더의 outlet에 또 다른 써미스터는 축열조 하부에서 작동 유체가 집열기로 들어가는 곳에 각각 설치하여 두 써미스터간의 온도차가 12°C 이상일 경우 펌프를 작동시켜 집열기내의 데워진 작동유체를 축열

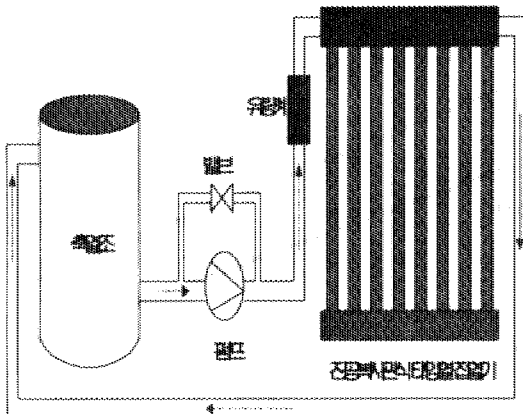


Fig. 2. Schematic of system for experiment.

조로 밀어내고, 그 온도차가 4°C 이하로 떨어지게 되면 펌프를 정지시키도록 설정하였다. 온도 측정을 위한 열전대(thermocouple)는 T타입을 이용하였고, 설치하는 집열기 입구, 출구, 축열조의 상부, 중간, 하부 그리고 대기온도를 모니터링 할 수 있도록 각각 설치하였고, 일사량계를 설치하여 실험하는 동안에 집열기가 받는 태양 에너지의 양을 측정하였다. 자료 획득 시스템(HYDRA: Data Aquisition System)을 이용하여 매 2분마다 자료를 수집, 기록하였다. 열전대의 설치에 앞서서 측정예러를 줄이기 위해 열전대의 보정작업이 이루어졌다. 삼일될 모든 열전대는 데이터 수집 장치에 연결하고 항온조를 이용하여 0°C와 80°C까지의 범위에서 이루어진 열전대를 사용하였다. 보정된 열전대는 ±0.5°C 이내의 오차범위로 모두 보정하였다.

Fig. 3과 Fig. 4 그리고 Fig. 5는 이번 실험에 사용된 직접식 평판형 집열기, 이중관 형태의 파이프를 이용한 집열기(SEIDO 2)와 All glass evacuated tube 형(이중유리관)집열기를 이용하여 구성된 시스템의 사진이다. SEIDO 2의 경우 집열기를 80cm정도 지면에서 울린 상태에서 수평으로 배열하였으며, 내부에 흡열판을 기울임으로서 태양과의 입사각을 조정하였다.<sup>6)</sup> 집열기 개당 집열 면적이 0.175m<sup>2</sup> 이고, 축열조 용량은 m<sup>3</sup> 당 72 l로 설정되어 있다. 이 실험에 이용된 집열기의 개수가 8개이므로 총 집열 면적은 1.4m<sup>2</sup>

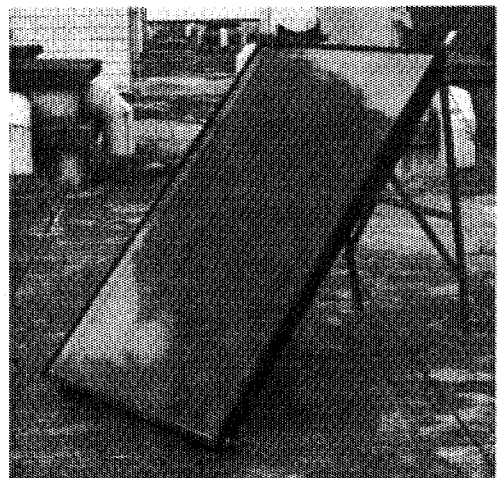


Fig. 3. Photograph of flat plate collector.

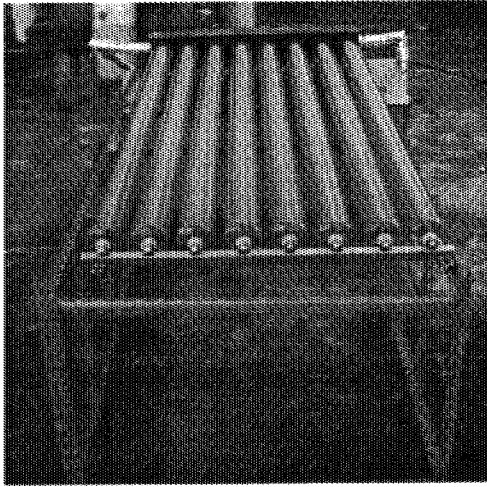


Fig. 4. Photograph of SEIDO 2.

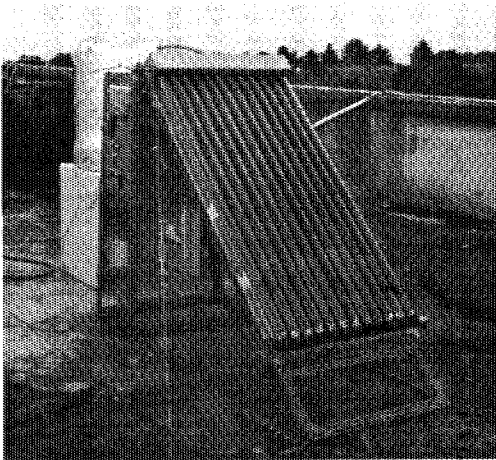


Fig. 5. Photograph of all glass tube.

이고, 축열조 용량은 약 100 l이다. 이중유리관형 집열기의 경우 표면과의 경사각이 40°이고, 집열기의 집열 면적은 1.2m<sup>2</sup>이다. 축열조 용량은 100 l로 동일하게 하였다. 이번 실험에서는 유량을 분당 2 l, 3 l, 4 l, 5 l로 높이면서 실험을 실시하여 얻어진 데이터를 분석하여 최적 유량이 3 l임을 알 수 있었다. 이를 이용하여 다시 실험하여 얻어진 데이터를 일사량에 따른 변화와 직접식 평판형 집열기와 비교하기 위해 All Glass Evacuated tube와 SEIDO 2를 동시에 가동시켜 그 성능을 비교하였다.

#### 4. 결론

All Glass Evacuated Tube 구조의 진공 복사관식 태양열 집열기는 히이트 파이프형 집열기에 비해 성능과 경제적인 측면에서도 우수하지만, 실험 결과에서도 알 수 있듯이 유량이 저속으로 유동해야 우수한 성능을 발휘하게 되므로 겨울철의 동파 문제와 태양열에 의해 가열된 집열 튜브 내에 물이 갑자기 유입될 경우 열응력에 의해 집열 튜브가 파손되는 열쇼크 현상이 발생하는 문제점을 갖고 있다. 반면, SEIDO 2의 경우 전반적으로 All Glass 구조의 진공관식 집열기에 비해 성능면에서는 떨어지지만, 겨울철 동파에 대한 저항력이 우수하고 안정적이라는 장점도 있다. 하지만, 제작상에 있어서 유리와 금속을 접합하고 진공을 유지해야 하기 때문에 열응력에 의해 시간이 지남에 따라서 유리와 금속 접합면에 균열이 생겨 진공이 빠지는 경우가 대부분이다.

Table 1. Results of experiment

구분	시수온도 (°C)	최종온도 (°C)	온도차 (°C)	집열용량 (l)	효율 (%)
All glass evacuated tube	21.43	39.03	17.6	100	52.56
SEIDO 2	20.32	35.97	13.65	110	32.85
직접식 평판형 집열기	20.11	34.21	14.1	75	23.8

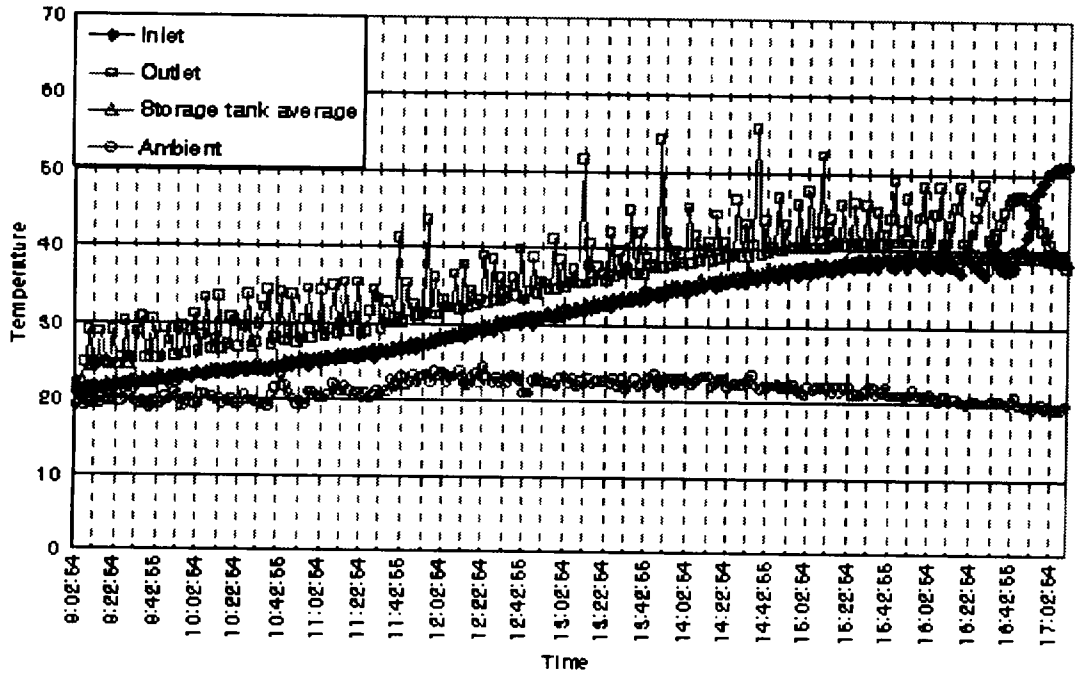


Fig. 6. Results of the all glass evacuated tube.

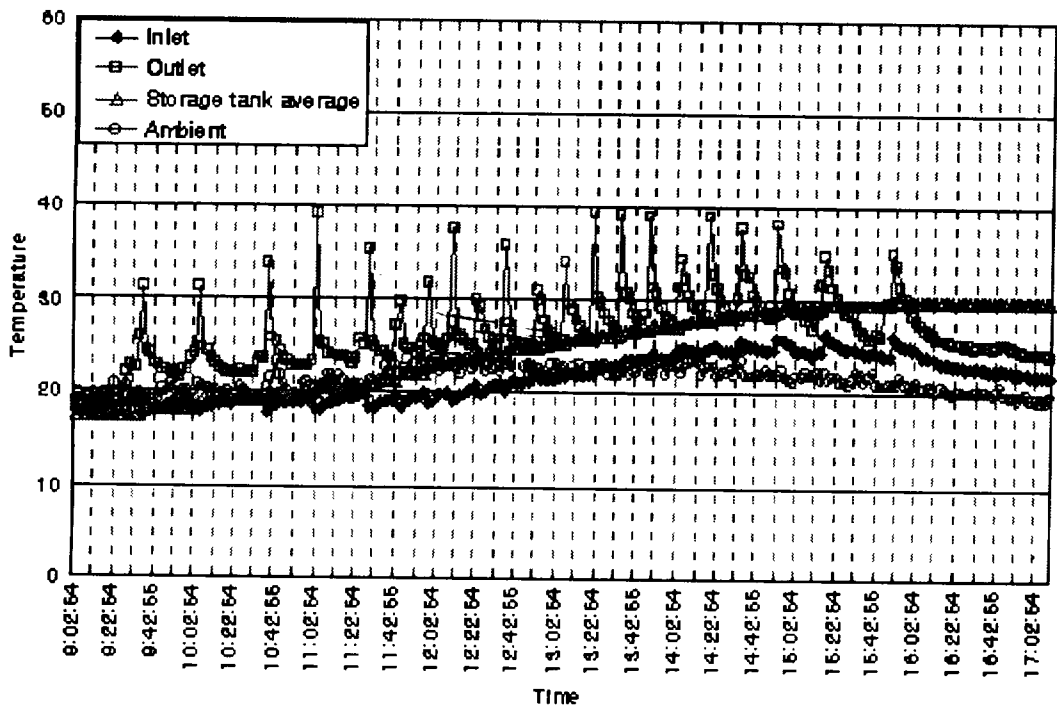


Fig. 7. Results of the SEIDO 2.

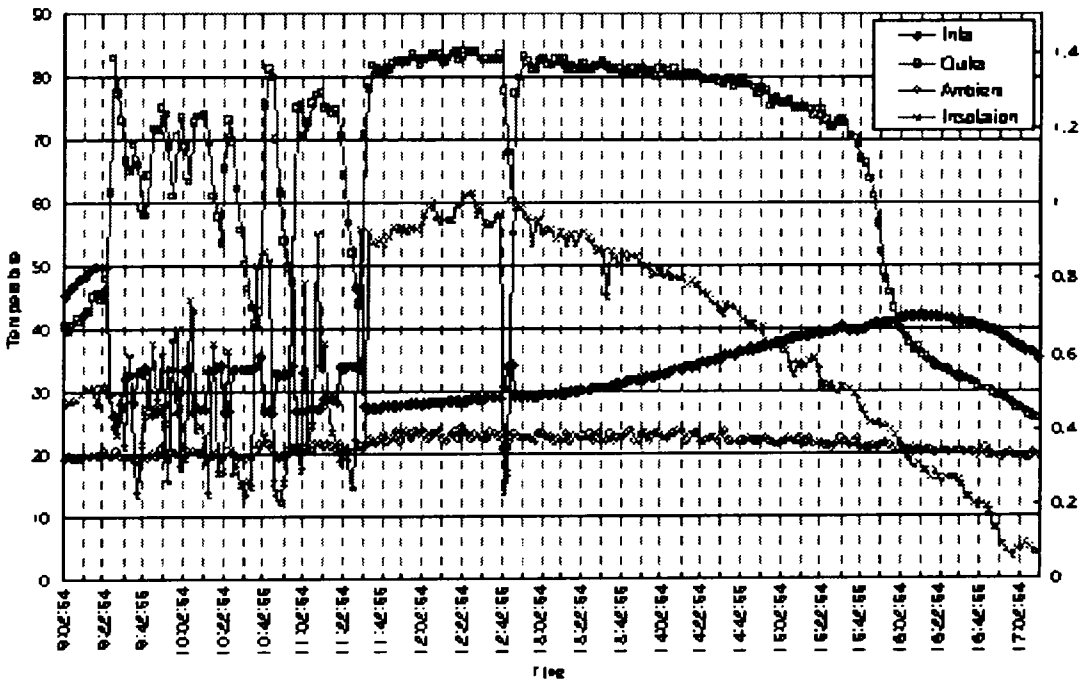


Fig. 8. Results of the direct flat plate collector.

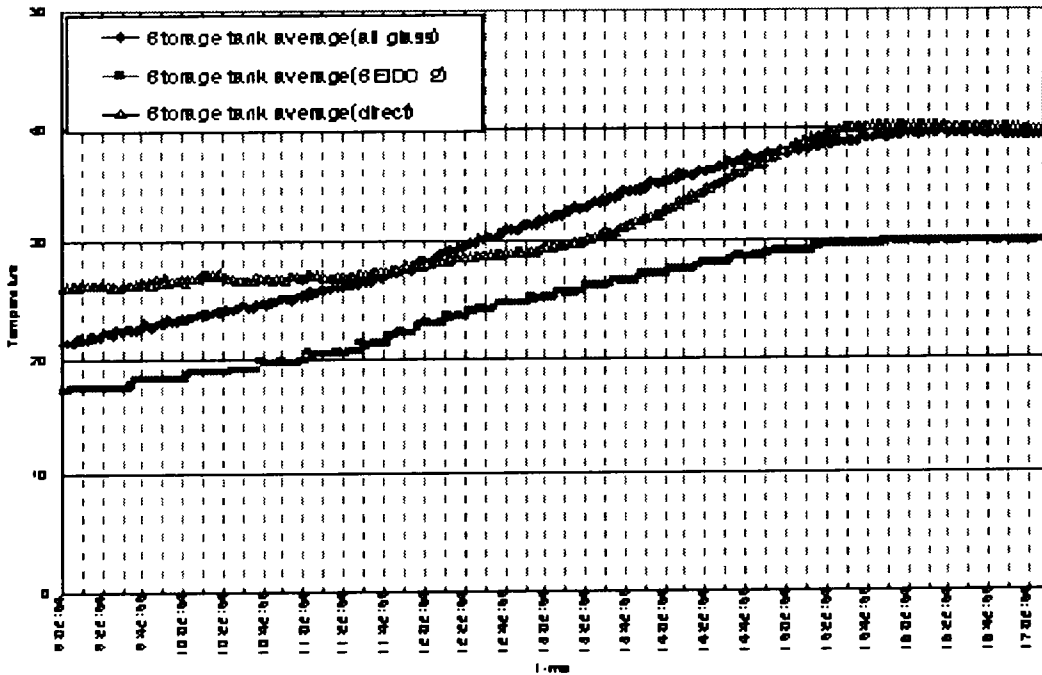


Fig. 9. Average temperature.

현재 가장 많이 사용되는 평판형 태양열 집열기는 외관 뿐아니라 효율적인 측면과 온도 활용 범위 등 여러 가지 면에서 진공복사관식 태양열 집열기에 비해 뒤떨어진다. 본 실험에서는 행하지 못하였으나 겨울철 실험을 통하여 All Glass Evacuated Tube 형 집열기의 열쇼크 문제와 동파문제를 보완 한다면 히이트 파이프식 진공복사관식 집열기에 비해 국내 태양열 이용분야에서 폭 넓게 활용될 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 1) Ghoneim A. A., Fisch N., Ammar A. S. A. and Hahne E., 1994. Investigation of Evacuated Tube Collectors. *Solar Energy*. Vol.16. pp.16~23.
- 2) G. Oliveti and N. Arcuri. 1996. Solar Radiation Utilisability Method In Heat Pipe Panels. *Solar Energy*. Vol.57. pp.346~349.
- 3) HE ZINIAN, GE HONGCHUAN, JIANG FULIN and LI WEI. 1997. A Comparison of Optical Performance between Evacuated Collector Tubes with Flat and Semicylindric Absorbers. *Solar Energy*. Vol.60(2). pp.115~116.
- 4) Hawlader M. N. A and Qijeysundera N.E., 1987. Solar Collector Testing. *Renewable Energy Review Journal*. Vol.9. pp.11~25.
- 5) 강용혁, 1999. 태양열 온수 급탕 시스템 성능 표준화. 한국에너지기술연구소, KIER-991423.
- 6) Wu Jinfa, Zou Huaisong, Zhang Jian and Fang Jun. 1997. Experiments of All-Glass Evacuated Tubular Collector with U-Tube and Al Fin Manifold and Embodiment. *ISES 1997 Solar World Congress*. Vol.2. pp.79~84.