

[논문] 한국태양에너지학회 논문집  
*Journal of the Korean Solar Energy Society*  
Vol. 21, No. 4, 2001

## 진공복사관식 집열기의 성능실측 및 최적화 연구

천원기\*, 강상훈\*, 김기홍\*\*, 이용국\*\*, 장래웅\*\*

\* 제주대학교 에너지공학과

\*\* 포항산업과학연구원

## Study on the Optical Performance of Evacuated Solar Collectors

Won-Gee Chun<sup>\*</sup>, Sang-Hoon Kang<sup>\*</sup>,  
Ki-Hong Kim<sup>\*\*</sup>, Yong-Kuk Lee<sup>\*\*</sup>, Rae-Woong Chang<sup>\*\*</sup>

\* *Che-ju National University*

\*\* *Research Institute of Industrial Science & Technology*

### Abstract

This work has been carried out to find the ideal operating conditions for solar vacuum tube collectors which are widely used at present. Various types of solar collectors including a flat plate one were experimentally tested and examined to determine their thermal efficiencies and operating characteristics. Generally, solar vacuum tubes can be classified into two groups according to their design features. Of these, one is characterized by the insertion of a metallic device (such as a finned heat pipe) in an evacuated glass tube for the collection and transportation of solar energy. The other utilizes double glass tubes where the smaller one is contained inside the bigger one and soldered to each other after the small gap between them is evacuated. Both of these solar collectors are designed to minimize convection heat losses by removing the air which is in direct contact with the absorber surface. The performance of the former type can be readily analyzed by

applying the relevant correlations developed for flat plate solar collectors. This has been demonstrated in the present study for the case of a solar collector where a heat pipe is inserted in an evacuated tube.

Key words : vacuum tube collector, double glass tube, convection heat losses

## 1. 서 론

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 진공튜브안에 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. 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 적용하여 열해석을 유도할 수 있으며 그 대표적인 case가 진공관 안에 구리 핀이 부착된 히이트 파이프가 삽입된 형태이다. 진공관식 태양열 온수 시스템의 특징은 기존의 평판형 집열기에서 최고 80°C 정도의 온수를 얻을 수 있는데 비해 진공관식 집열기의 경우 가압시 약 180°C까

지 온도를 높일 수 있다. 즉, 가정용 온수 시스템 뿐만 아니라 대량설치를 통해 산업용으로도 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.

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.

$$Q_w = A_c [I_t \tau a - U_L (\bar{t}_p - t_a)] \quad (1)$$

여기서

- $Q_w$  : 집열 에너지(kcal/hr)
- $A_c$  : 집열 면적( $m^2$ )
- $I_t$  : 집열면 일사량(kcal/hr ·  $m^2$ )
- $\tau$  : 투명 덮개 투과율
- $a$  : 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  $I_t \tau a$  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.

### 2.2 집열 성능

태양열 가용 집열량(Useful Energy Gain)  $Q_w$  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  $5^\circ C$  내지  $10^\circ C$  가 높고, 공기 식의 경우는  $20^\circ C$  내지  $30^\circ C$  높다.

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

- $t_i$  : 집열기 입구의 열 매체 온도 ( $^\circ C$ )
- $F_R$  : 집열 효율 수정 계수

식 (2)를 태양열 집열 효율식으로 표시하면 다음과 같다.

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

여기서  $\eta$ 는 실제로 유용한 태양 집열량을 집열면에 조사되는 총열량으로 나눈 값으로 집열기의 효율을 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  $(t_i - t_a)/I_t$  의 조건에 따라 변하는 일차식으로 나타낼 수 있으며 기울기가  $-F_R U_L$  이고, 수직축인 효율축의  $F_R (\tau a)$  를 지나는 직선 그래프로서 그림 1에 도식화 하였다.

태양열 집열기의 성능은 일반적으로 실험에 의하여 구하며, 태양열 집열기를 통과하는 열 전달

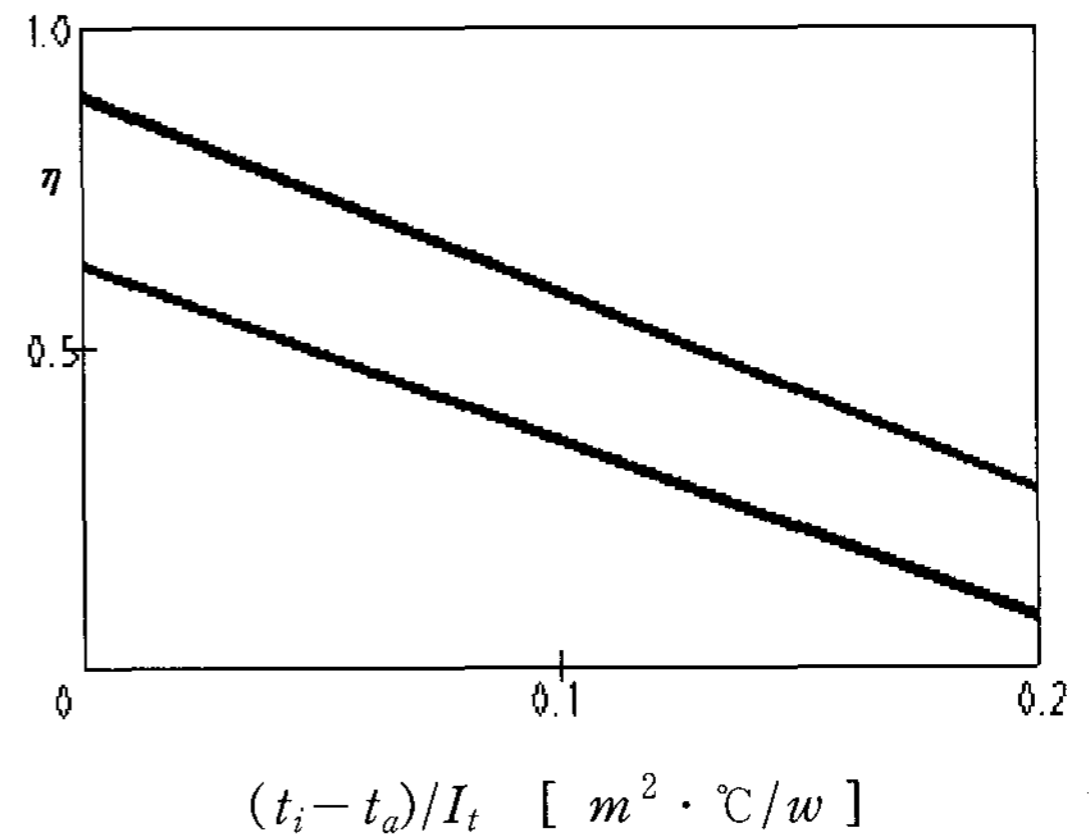


Fig. 1. Graph of collector performance

매체의 유량과, 집열기 입출구의 온도차를 측정하면 된다.

$$Q_w = AGC_p(t_i - t_o) \quad (4)$$

- A : 집열 면적
- G : 집열 매체의 유량
- C<sub>p</sub> : 열 매체의 비열
- t<sub>i</sub> : 집열기 입구의 온도
- t<sub>o</sub> : 집열기 출구의 온도

식 (3)의 집열기 효율은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta &= Q_w / AI_t \quad (5) \\ &= GC_p(t_i - t_o) / I_t \\ &= F_R \tau \alpha - F_R U_L(t_i - t_o) / I_t \\ &= F_R \tau \alpha - F_R U_L(t_i - t_a) / I_t \end{aligned}$$

그림 1에서 (t<sub>i</sub> - t<sub>a</sub>) / I<sub>t</sub> 의 조건에 의한 집열 효율 그래프의 기울기와, 효율축 값에 영향을 미치는 집열기의 주요 요소는, 투명 덮개의 수효와 흡열판의 특성 등이다. 어떤 경우에는 태양열 집

열기의 성능 시험 결과로서 집열 효율 그래프가 집열기 내의 열 매체 평균 온도나, 집열기 출구의 열 매체 온도에서 외기 온도를 뺀 값을 집열 면 일사량으로 나눈 값으로서 표시하기도 한다.

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

### 3. 실험 및 고찰

실험 장치는 직접식 평판형 집열기의 경우는 자연 대류식으로 구성하였고, 진공복사관식 집열기의 경우는 두가지 모두 강제대류식으로 구성하였다. 아래 그림 2는 이러한 강제대류방식으로 구성된 시스템의 모식도이고, 부동액을 사용하지 않고 집열기에서 데워진 물을 직접 축열조로 보내 저장하는 방법으로 실험하였다. 시스템을 제어하기 위해 사용된 차온 제어기는 써미스터를 이용하는 것으로써, 써미스터를 집열기 헤더의 outlet에 또 다른 써미스터는 축열조 하부에서 작동 유체가 집열기로 들어가는 곳에 각각 설치하

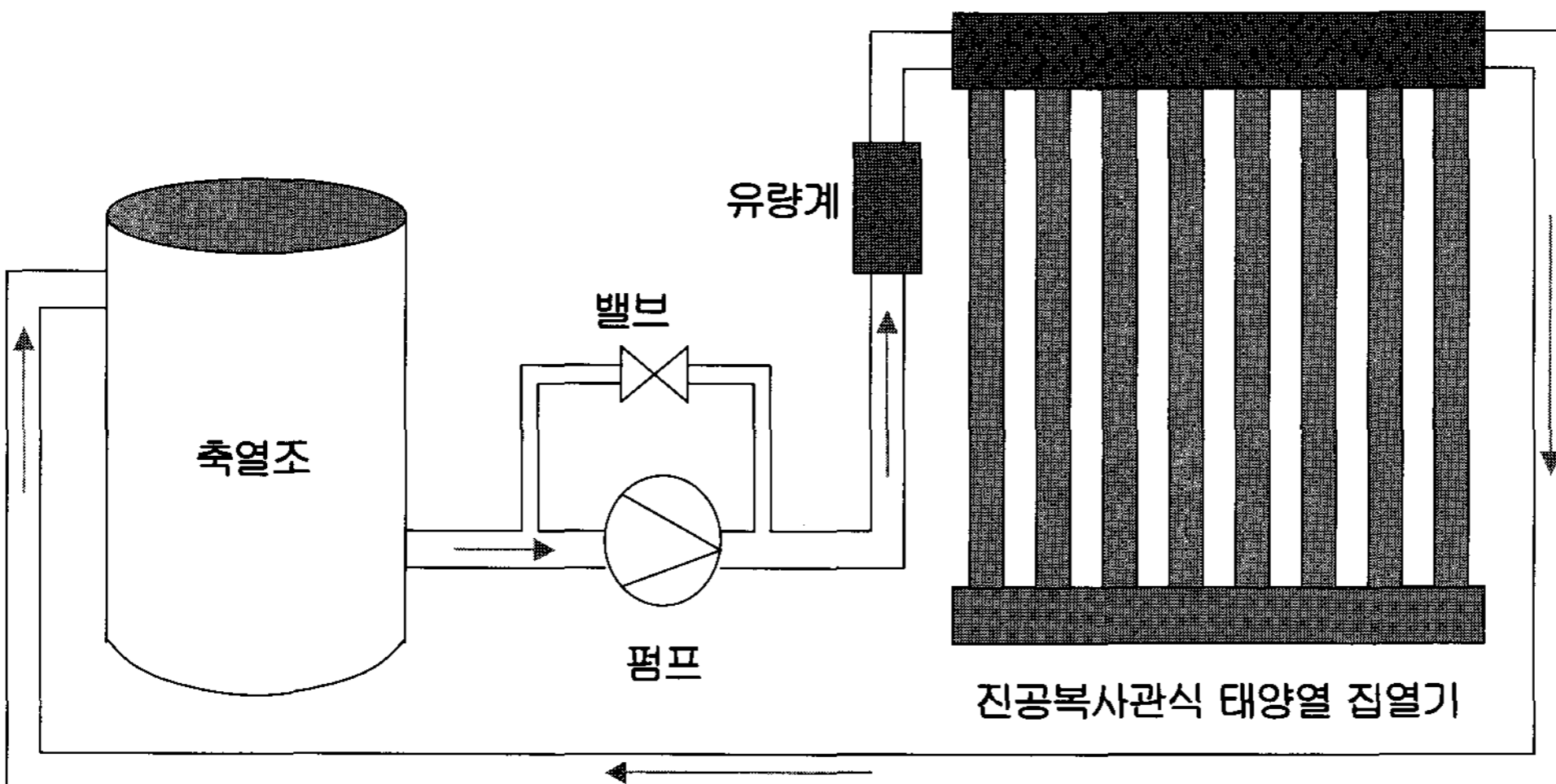


Fig. 2. Schematic of system for experiment

여 두 씨미스터간의 온도차가 12°C 이상일 경우 펌프를 작동시켜 집열기내의 데워진 작동유체를 축열조로 밀어내고, 그 온도차가 4°C 이하로 떨어지게 되면 펌프를 정지시키도록 설정하였다.

온도 측정을 위한 열전대(thermocouple)는 T 타입을 이용하였고, 설치는 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 Acquisition System)을 이용하여 매 2분마다 자료를 수집, 기록하였다. 열전대의 설치에 앞서서 측정에러를 줄이기 위해 열전대의 보정작업이 이루어졌다. 삽입될 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.

그림 3, 4와 5는 이번 실험에 사용된 직접식 평판형 집열기, 이중관 형태의 파이프를 이용한 집열기(SEIDO 2)와 All glass evacuated tube형(이중유리관)집열기를 이용하여 구성된 시스템의

사진이다. SEIDO 2의 경우 집열기를 80cm정도 지면에서 올린 상태에서 수평으로 배열하였으며, 내부에 흡열판을 기울임으로서 태양과의 입사각을 조정하였다. 집열기 개당 집열 면적이 0.175m<sup>2</sup> 이고, 축열조 용량은 m<sup>2</sup> 당 72ℓ로 설정되어 있다. 이 실험에 이용된 집열기의 개수가 8개이므

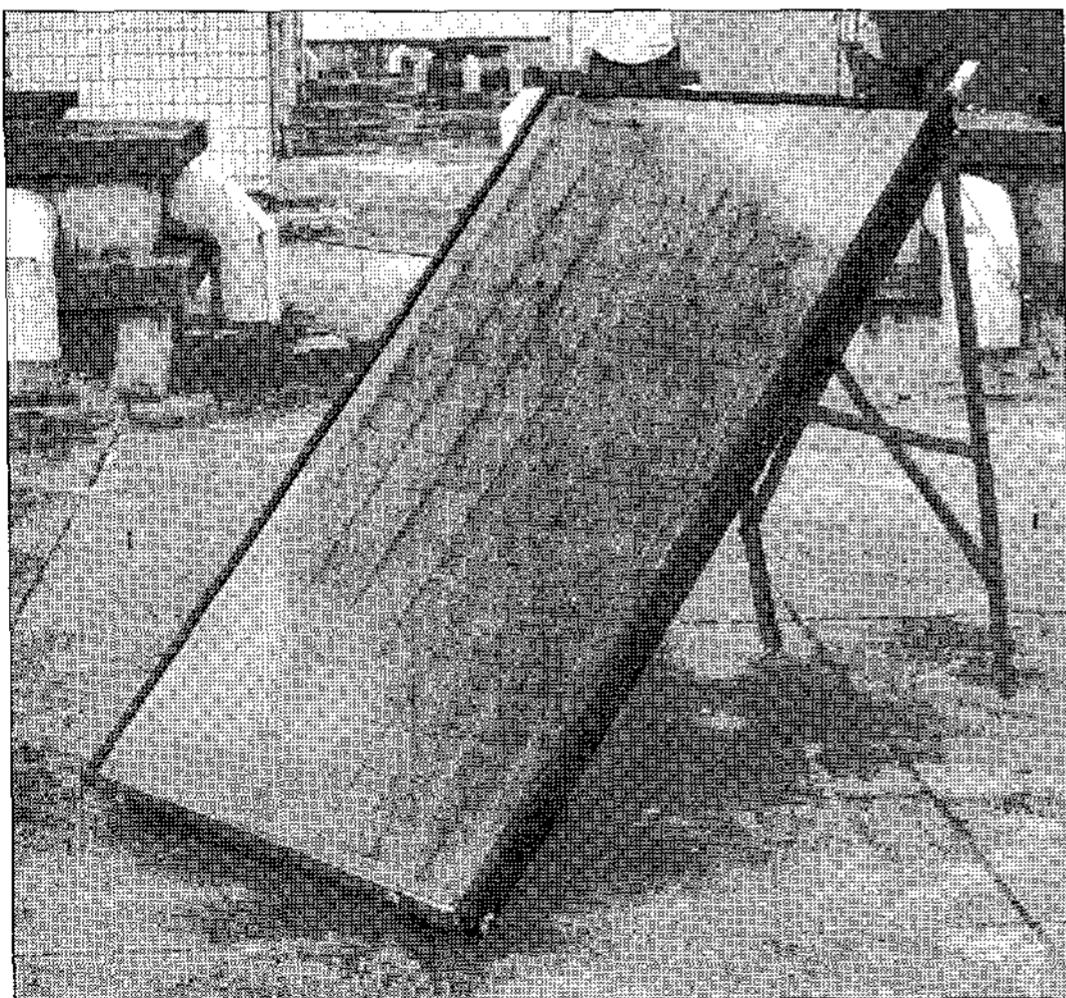


Fig. 3. Photograph of the direct flat plate collector

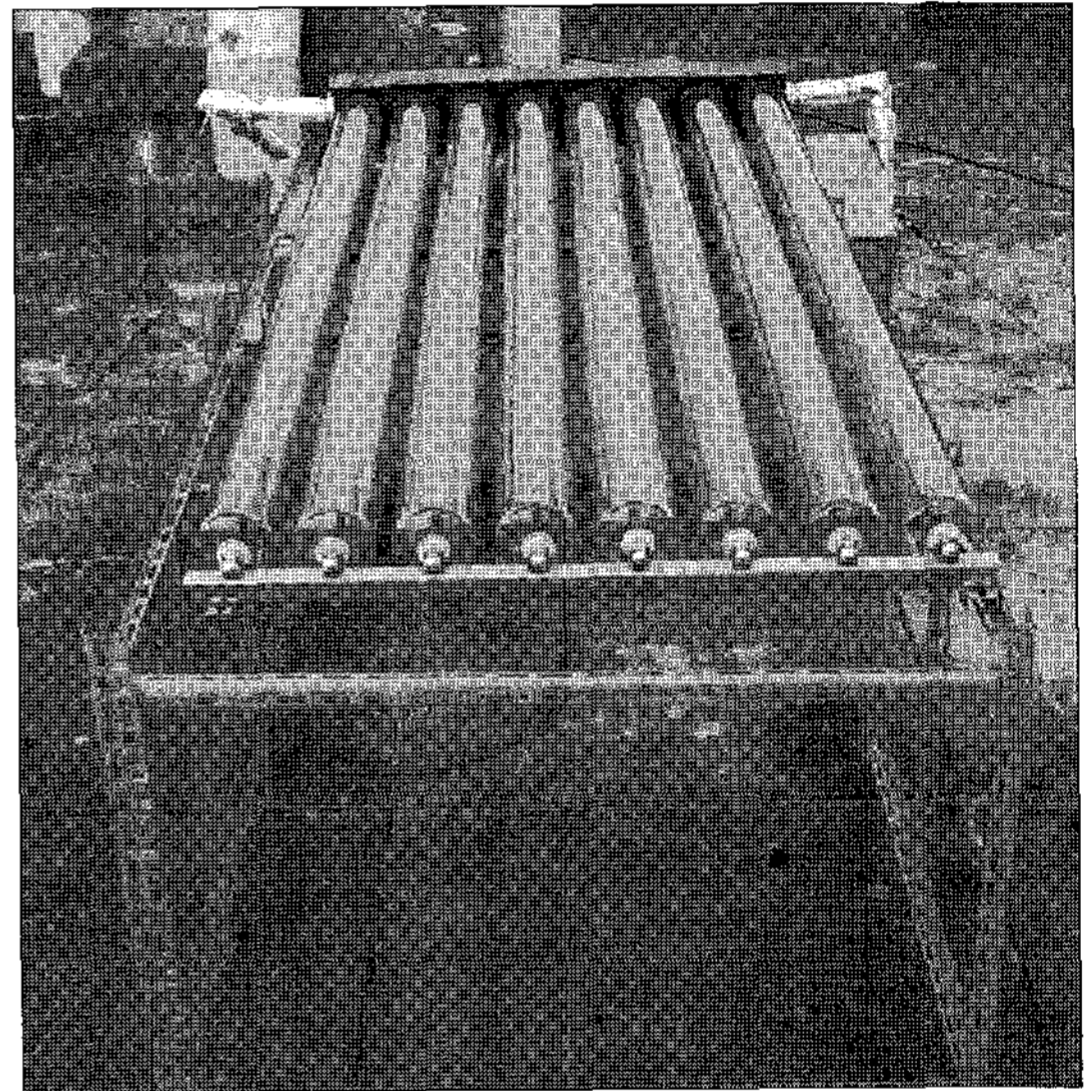


Fig. 4. Photograph of the installed SEIDO 2

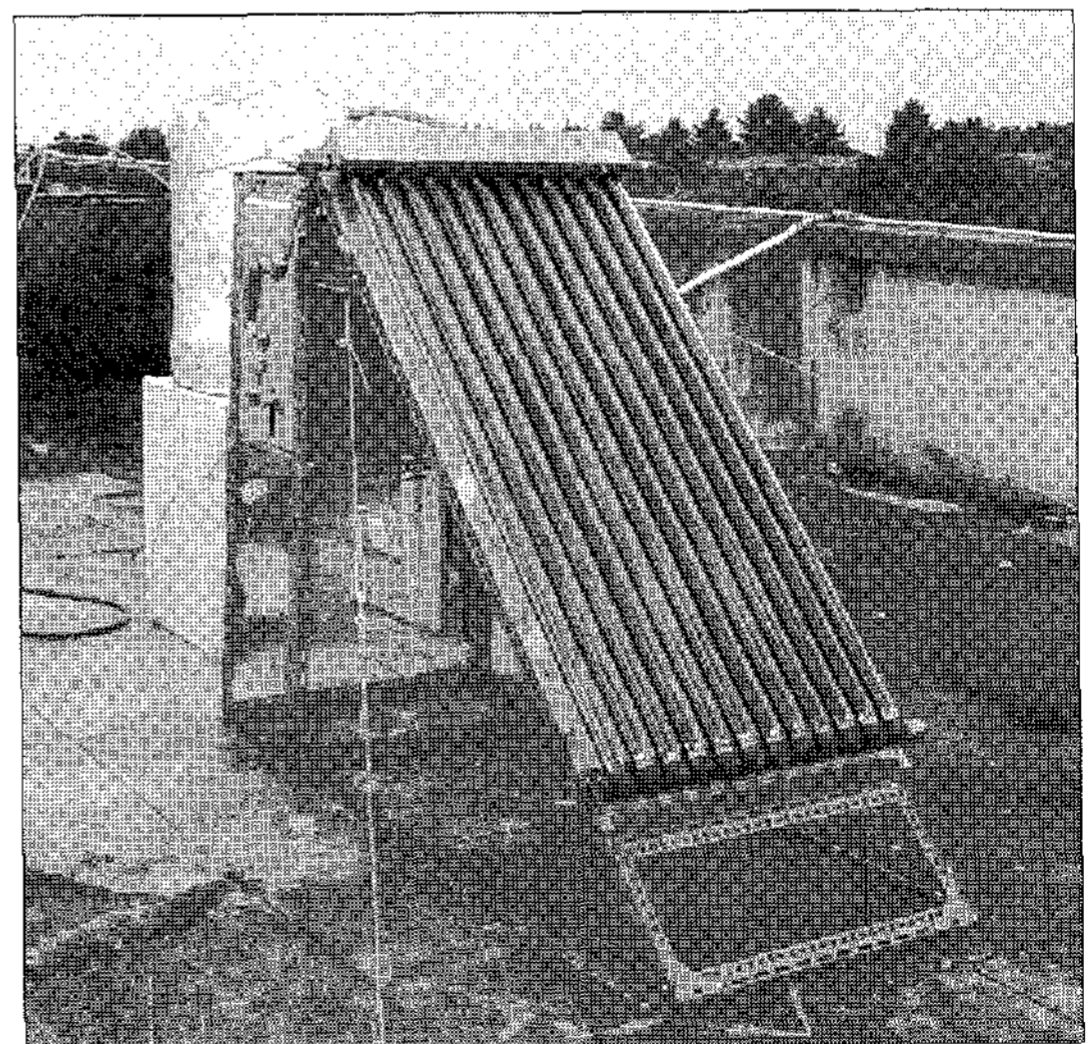


Fig. 5. Photograph of the installed all glass evacuated tube

로 총 집열 면적은  $1.4m^2$  이고, 축열조 용량은 약 120 l 이다. 하지만, 이번 실험에서는 240 l 용량의 축열조를 사용하였다. 이중유리관형 집열기의 경우 지면과의 경사각이  $40^\circ$  이고, 집열기의 집열 면적은  $1.2m^2$ 이다. 축열조 용량은 100 l 로 하였다. 이번 실험에서는 유량을 분당 2 l, 3 l, 4 l, 5 l 로 높이면서 실험을 실시하여 얻어진 데이터를 분석하여 최적 유량이 3 l 임을 알 수 있었다. 이를 이용하여 다시 실험하여 얻어진 데이터를 일사량에 따른 변화와 직접식 평판형 집열

기와 비교하기 위해 All glass evacuated tube와 SEIDO 2를 동시에 가동시켜 그 성능을 비교하였다.

아래의 표 1은 12월인 동절기에 측정한 데이터를 정리한 것으로 누적 일사량이 약 133kW였다. 여기에 언급하지는 못하였으나 10월에 측정된 데이터와 이번 실험에 측정된 데이터를 분석한 결과 All glass evacuated tube가 가장 우수한 성능을 나타내었다. 그림 6~그림 9는 실험 결과를 도식화한 그래프이다.

Table 1. Results of experiment

구 분	시수온도(°C)	최종온도(°C)	온도차(°C)	집열용량(ℓ)	효율(%)
All glass evacuated tube	2.75	18.95	16.2	100	42.42
SEIDO 2	2.61	11.87	9.26	240	49.88
직접식 평판형 집열기	2.40	23.54	21.14	70	33.21

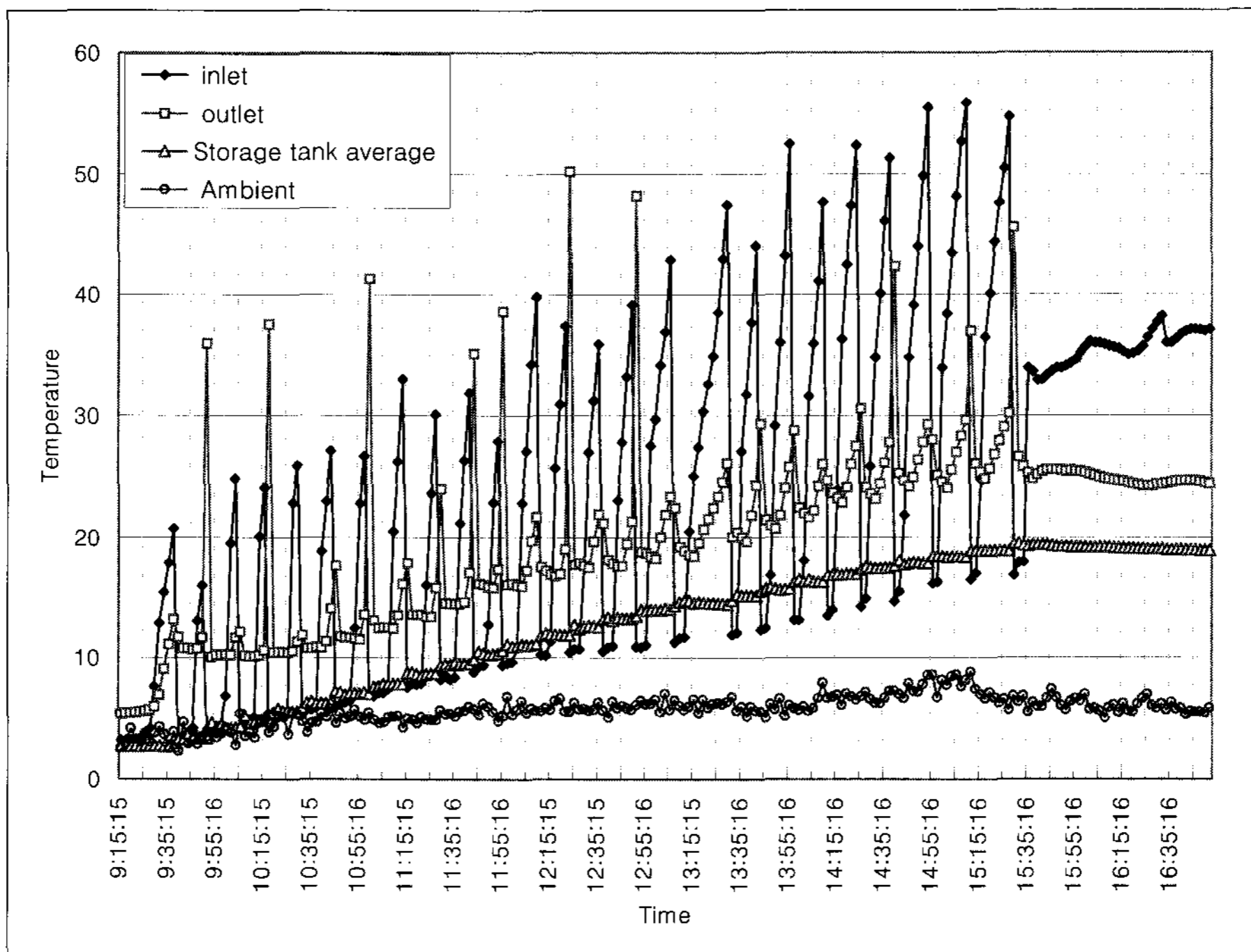


Fig. 6. Test results of the all glass evacuated tube

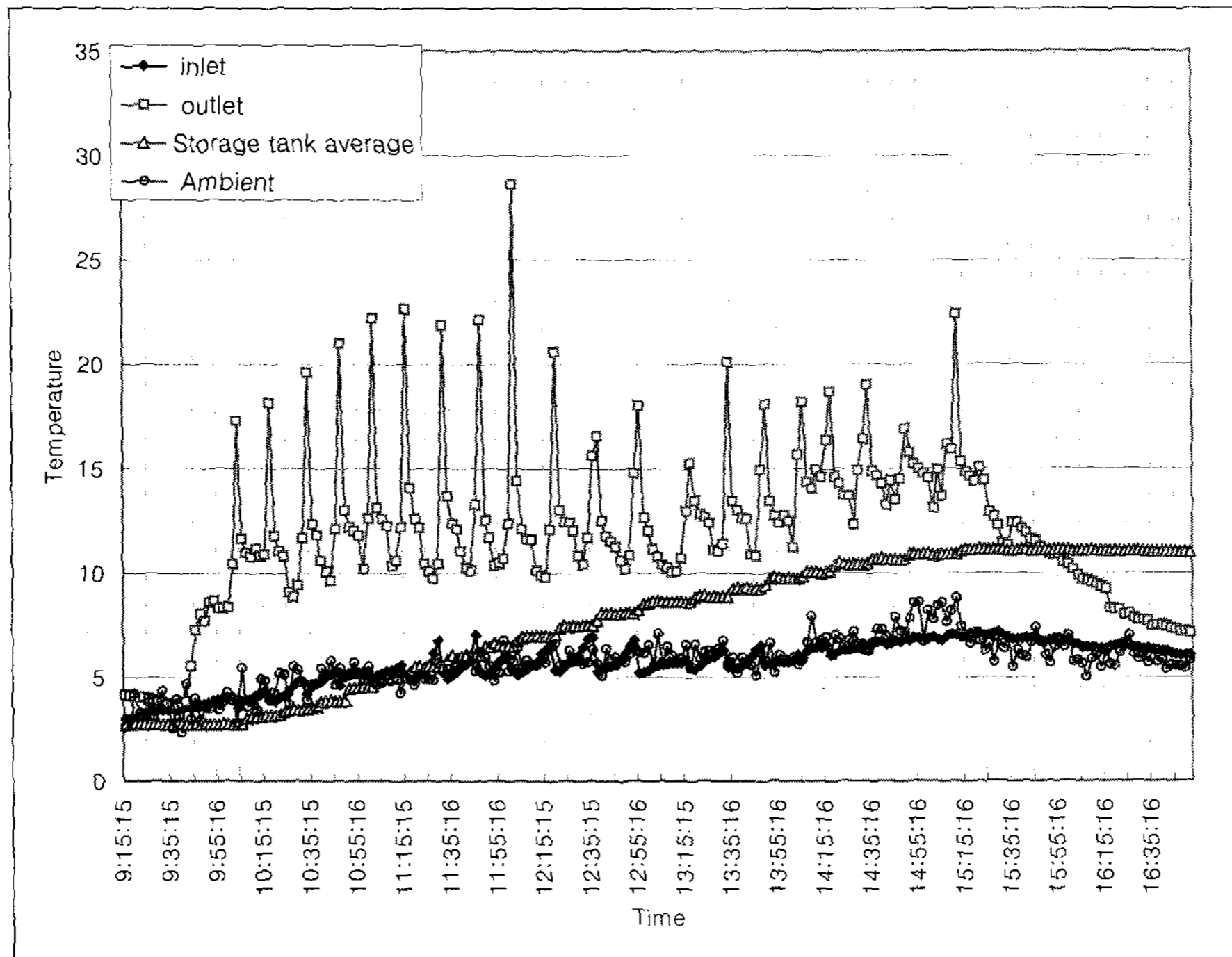


Fig. 7. Test results of SEIDO 2

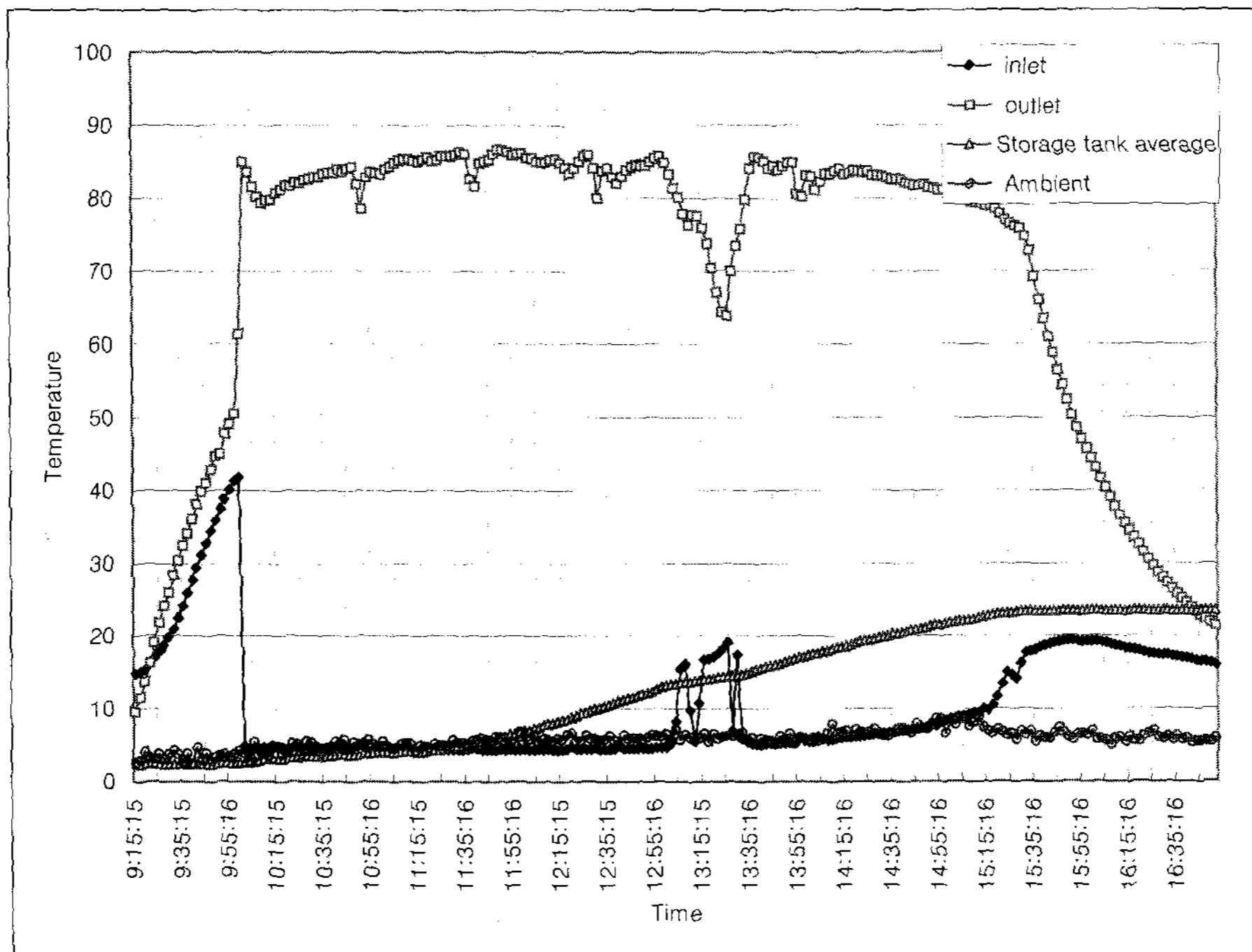


Fig. 8. Test results of the direct flat plate collector

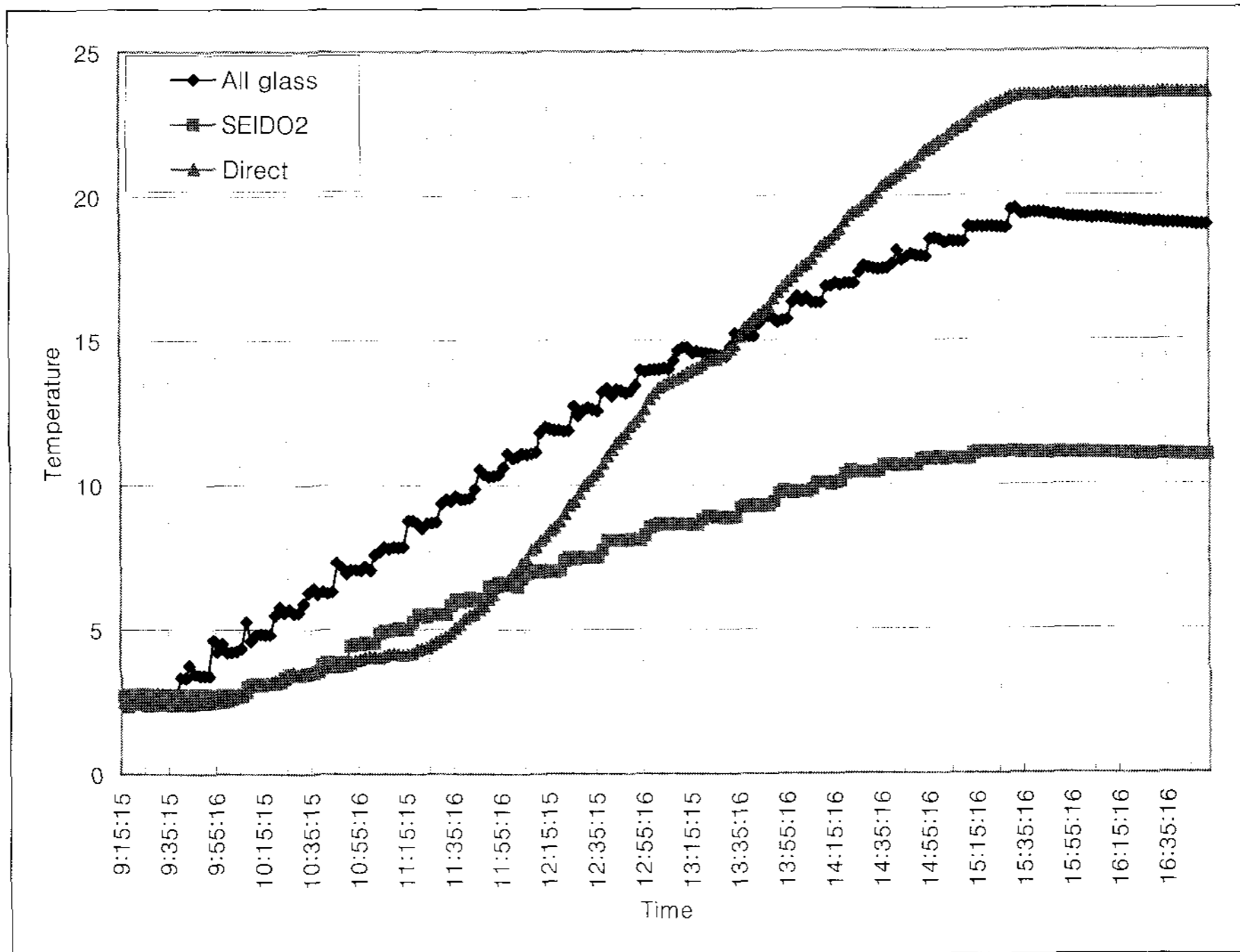


Fig. 9. Storage tank average temperature

#### 4. 결 론

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 발생하였다.

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.

#### 참 고 문 헌

1. 천원기, "진공복사관식 태양열 집열기의 최적 모델 개발 연구", 포항산업과학연구소, 2001.
2. HE ZINIAN, GE HONGCHUAN, JIANG FULIN and LI WEI, "A Comparison of Optical Performance between Evacuated



- Collector Tubes with Flat and Semicylindric Absorbers”, *Solar Energy*, Vol. 60(2), pp. 115~116, 1997.
3. Hawlader M. N. A and Qijeysundera N.E., “Solar Collector Testing”, *Renewable Energy Review Journal*, Vol. 9, pp. 11~25, 1987.
4. Wu Jinfa, Zou Huaisong, Zhang Jian and Fang Jun, “Experiments of All-Glass Evacuated Tubular Collect with U-Tube and Al Fin Manifold and Embodiment”, *ISES 1997 Solar World Congress*, Vol. 2, pp. 79~84, 1997.