

공학석사 학위논문

진동 세관형 히트파이프를 이용한  
태양열 집열기 개발에 관한 실험적 연구

지도교수 : 김 중 수

이 논문을 공학 석사 학위논문으로 제출함



2005年 2月

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 태 훈

# 김태훈의 공학 석사학위 논문을 인준함

2005年 2月

|   |   |      |       |
|---|---|------|-------|
| 주 | 심 | 공학박사 | 최 광 환 |
| 위 | 원 | 공학박사 | 윤 정 인 |
| 위 | 원 | 공학박사 | 김 종 수 |



# 목 차

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| ABSTRACT .....             | iii |
| Nomenclature .....         | v   |
| 1. 서론 .....                | 1   |
| 1.1 연구목적 및 배경 .....        | 1   |
| 2. 진동세관형 히트파이프 .....       | 3   |
| 2.1 진동 세관형 히트파이프의 원리 ..... | 3   |
| 2.2 작동 유체의선정 .....         | 5   |
| 3. 실험장치 및 방법 .....         | 10  |
| 3.1 실험 장치 I .....          | 10  |
| 3.2 실험 방법 I .....          | 17  |
| 3.3 실험 장치 II .....         | 20  |
| 3.4 실험 방법 II .....         | 26  |
| 4. 실험 결과 및 고찰 .....        | 27  |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 4.1 히트파이프의 충전률과 경사각에 의한 온도분포 실험 ..... | 27 |
| 4.2 집열기의 온도변화 특성과 효율 .....            | 41 |
| 5. 결론 .....                           | 50 |
| 참고 문헌 .....                           | 52 |
| 감사의 글 .....                           | 54 |

# Experimental Study on Development of Solar Collector using Oscillating Heat Pipe

**Tae-Hoon Kim**

*Department of Refrigeration Engineering,  
Graduate school,  
Pukyong National University*

## **Abstract**

Recently solar energy is representative in the technology development and spread of alternative energy. Specially in condition of solar collectors, they have had very various shape.

Two experiments were performed on this study. One was investigating the best charging ratio and inclination angle of heat pipe for solar collector.

Another was investigating temperature variation characteristics and collection efficiency of solar collector on the basis of the first experiment conclusion.

The first experimental condition was that charging ratio was 15%, 20%, 40% and inclination angle was horizontal, 30, 45, 60, perpendicular. As a result of the first experiment, charging ratio 20% heat pipe was shown the most uniform temperature distribution and also its heat transfer performance has been the best in inclination angle 45.

We made the solar collector which heat pipe was adhered to. And its inclination angle was 45. Solar collector was all 5 types. Among them, 4 types were that the respective length and pitch of heat pipe were 250mm:50mm, 250mm:100mm, 300mm:50mm, 300mm:100mm. The other type was used commonly collection plate.

We choose sunny days for sufficient radiation. According to variation of time, inlet and outlet temperature of collector was rising. But their temperature difference was maintained regularly. As a result of experiment, efficiency of type used commonly collection plate collector was 15.9%, types which heat pipe was adhered to had 17.1~27% efficiency.

## ***Nomenclature***

|       |                      |                           |
|-------|----------------------|---------------------------|
| $G_T$ | Solar Radiation      | [kcal/m <sup>2</sup> · h] |
| $A$   | Area                 | [m <sup>2</sup> ]         |
| $Q$   | Heat transfer rate   | [kcal/h]                  |
| $c_p$ | Specific Heat        | [kcal/kg · °C]            |
| $k$   | Thermal conductivity | [kcal/m · h · K]          |
| $T$   | Temperature          | [°C]                      |

## ***Greek symbols***

|           |                      |   |
|-----------|----------------------|---|
| $\Phi$    | Figure of merit      | [kg/K <sup>3/4</sup> s <sup>5/2</sup> ] |
| $\rho$    | Density              | [kg/m <sup>3</sup> ]                    |
| $\mu$     | Viscosity            | [Ns/m <sup>2</sup> ]                    |
| $\lambda$ | Thermal conductivity | [W/mK]                                  |
| $\eta$    | Efficiency           | [%]                                     |

### ***Subscripts***

cond Condenser

eva Evaporator

ochp Oscillating Capillary Heat pipe

max Maximun

a Atmosphere

w Water in storage tank

## 제 1 장 서론

### 1. 연구목적 및 배경

최근 국제적으로 유가 상승추세에 대응하기 위하여 연료의 안정적인 확보 대책 및 온실가스(CO<sub>2</sub>) 배출 규제에 관련된 환경 문제 대두로 인해 대체 에너지 기술 개발과 보급, 확산에 관한 중요성이 강조되고 있는 실정이다.

특히 우리나라의 경우 소득수준 향상과 더불어 석유, 가스, 전기 등의 고급 에너지 소비가 급증하고 있으며, 이에 따른 에너지 수급의 해외 의존도가 점차 증가하고 있는 추세에 있다. 2002년 산업자원부의 통계에 따르면 국내 소비 에너지 사용량의 97.2% 이상이 수입에 의존하고 있는 실정이다. 또한 지구 환경문제와 관련된 지구 온난화 원인 중 화석연료 사용에 따른 이산화탄소의 영향이 55% 이상을 차지하고 있음을 주지하여야 한다.

이러한 문제 해결의 일환으로 세계 각국에서는 에너지 절약 기술과 대체 에너지 개발을 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 이러한 문제해결을 위해 대체 에너지에 대한 관심이 극히 고조되고 있는데, 대체 에너지 중 태양 에너지의 경우 그 양과 질적인 면에서 무한하며, 무공해인 에너지원일 뿐만 아니라 비교적 적은 연구개발 비용과 짧은 개발 기간에 실용화가 가능한 분야 중의 하

나이다. 그러나 기존의 화력, 원자력 발전등에 비하여 발전 단가가 높고, 집열기의 제작공정의 까다로움으로 인해 초기투자금액이 높아 이용 분야가 인공위성 또는 외딴 지역등으로 한정되어있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 태양열 집열기의 효율성 향상과 초기 시설 투자 비용 절감, 다양한 설계 조건을 충족 시킬 수 있는 초열전도 소자인 진동세관형 히트파이프의 적용가능성과 이를 이용한 태양열 집열기를 개발하여 그 전열성능을 평가하고자 한다.

기존의 평판형 태양열 집열기의 경우는 열매체가 흐르는 열매체 도관은 흡열관의 열전도에 의해서만 열을 받아 열매체에 열을 전달하므로 열전달이 발생하는 영역은 열매체 도관과 흡열관의 접촉부분만 해당됨으로써 집열기에 입사되는 태양열을 효과적으로 이용할 수 없다. 따라서 열매체 도관이 흡열관으로부터 받는 열전도량을 높이기 위해 열매체 도관의 숫자를 늘려 적정량의 흡열관과 열매체 도관의 열접촉 면적을 확보하여야 하였다. 그로인해 도관내의 열매체의 압력손실이 증가하고, 열회수 효율이 감소하며, 강제순환식의 경우 펌프동력도 증가하게 되는 문제가 있다.

따라서 본 연구에서는 진동세관형 히트파이프의 태양열 집열기의 제작에 필요한 히트파이프의 최적 설계 기초 자료와 진동세관형 히트파이프를 적용한 태양열 집열기의 온도변화 특성을 파악하고, 집열기의 효율 등을 실험적으로 평가하여 보고자 한다.

## 제 2 장 진동 세관형 히트파이프

### 2.1 진동 세관형 히트파이프의 원리

진동 세관형 히트 파이프는 워(wick)에 의한 증발부로의 작동액 환원 없이, 유체의 진동에 의해 열을 수송하는 열전달 기구로, 구조는 Fig. 2.1에 나타낸 것과 같이, 간단히 세관을 사행(serpentine)시킨 밀폐 구조로서, 진공 상태로 만든 후 임의의 비율로 작동 유체를 충전시킨 매우 단순한 구조로 되어 있다.

기본적인 작동은 작동액 및 증기포의 불규칙적인 루프내 순환 또는 축방향 진동에 의한 것이며, 가열부에 주어진 열량만큼의 핵비등을 일으키고, 핵비등에 의해 발생된 기포는 합쳐진 후 기액 슬러그류의 형태로 된다. 슬러그류는 압력파를 발생시킴과 동시에 축방향 진동을 동반하는 유동으로 되어 순환하고, 증기의 기포가 대류열전달과 잠열수송을 통해 열 수송이 이루어진다.

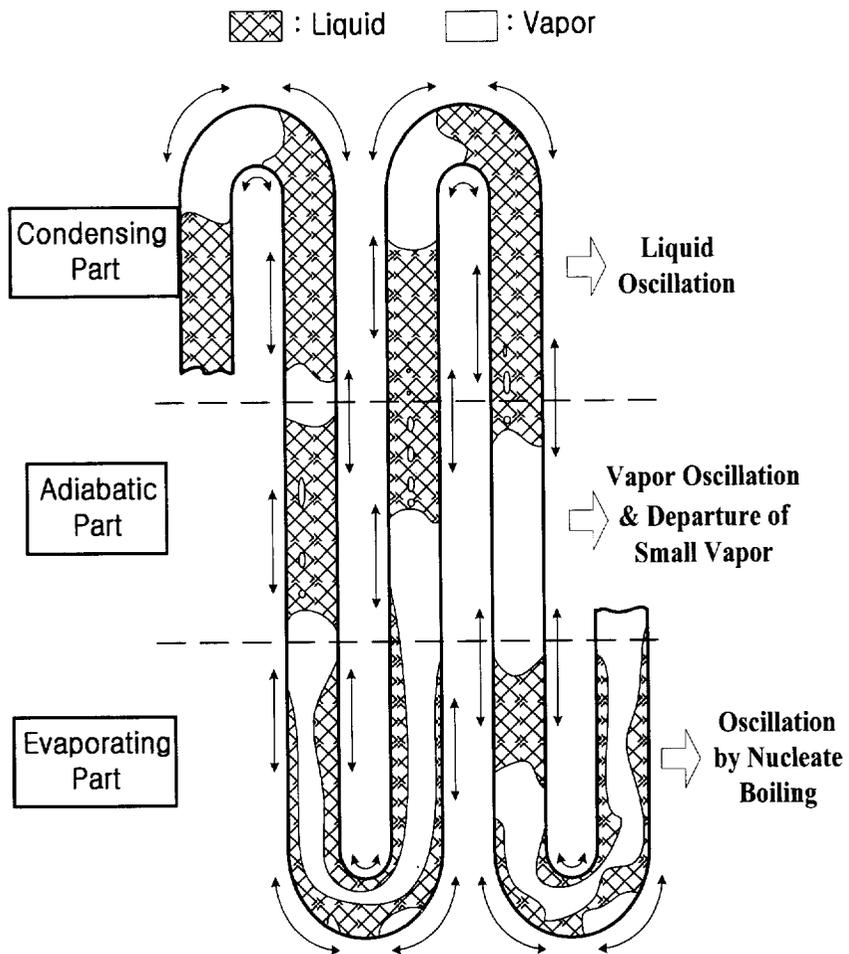


Fig. 2.1 Basic concept of Oscillating Capillary Heat Pipe

## 2.2 작동유체의 선정

히트파이프의 근본적인 작동 요소가 작동유체의 증발과 응축이기 때문에 적절한 작동유체의 선정은 히트파이프의 설계 및 제조에 있어 가장 중요한 요소이다. 작동유체의 선정시 고려해야 될 사항에는 작동온도 범위, 증기압, 증발잠열 및 점성 계수 등과 같은 작동유체의 열·물리적 물성과 관 재료와의 상용성, 안정성 및 독성이 있다. 또한 작동 유체의 온도 범위는 고체와 액체 그리고, 기체가 공존하는 삼중점(Triple point)과 임계점(critical point)사이이며, 기-액 상변화 선도의 포화곡선을 따라서 증발과 응축을 반복하므로 작동유체의 작동 온도에 따라 내부의 압력이 결정되어진다.

Table 2.1은 히트 파이프에 적용되는 여러 가지 작동유체의 적용 온도 범위를 나타낸 것이며, 극저온용(273K 미만), 저온용(273~500K) 그리고 고온용(500~3000K)으로 분류되어지고 있다. 극저온용으로는 헬륨, 아르곤 등이 대표적인 작동유체이며, 저온용으로는 물과 프레온계 냉매를 비롯한 많은 종류의 작동유체가 있다. 또한, 고온용으로는 나트륨, 칼륨, 리튬 등과 같은 액체 금속이 사용된다. 하지만 이러한 온도 범위는 매우 넓기 때문에 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서 이러한 작동 온도에 따른 열수송 성능에 미치는 작동유체 열물성의 영향을 알 필요가 있다. 그러므로 히트파이프의 정확한 설계를 위해, 작동 유체의 열물성을 통해서 열수송 성능을 예측할 수 있는 평가지수인 Merit Number가 있으며, Merit Number의 값이 클수록 열수송 성능이

우수하다는 것을 의미한다. 히트파이프의 경우는 식 (2. 1)과 같으며,

$$M_h = \frac{\rho_l \sigma h_{lg}}{\mu_l} \quad (2. 1)$$

썬머사이폰의 경우는 식 (2. 2)과 같다.

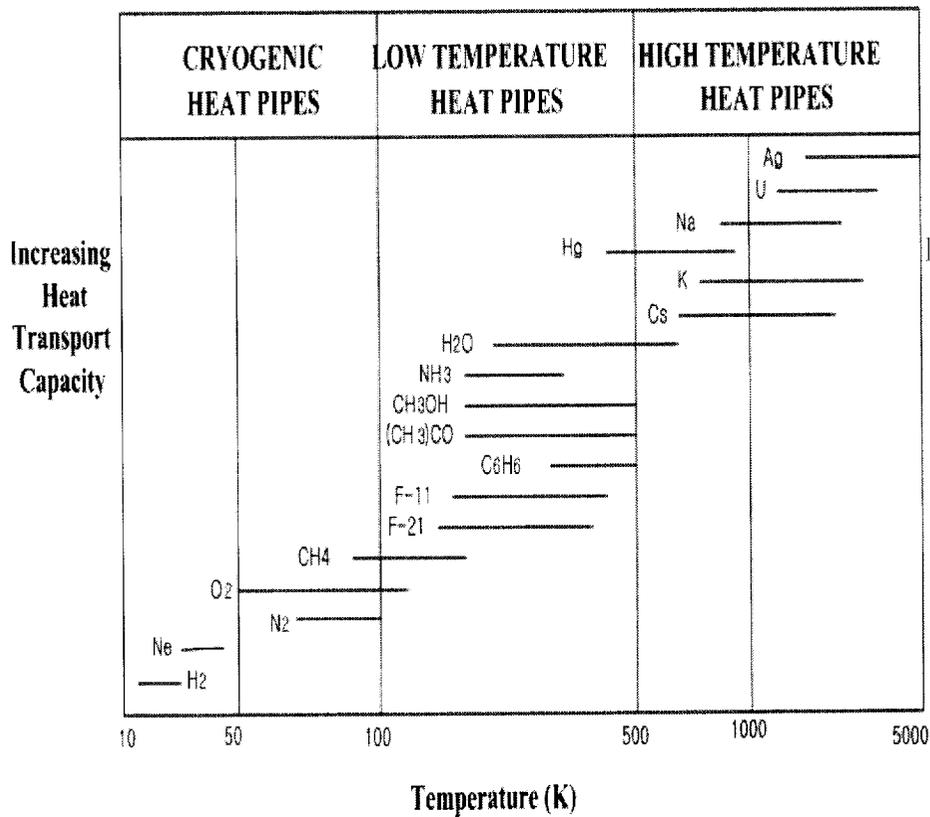
$$M_t = \left( \frac{(kc)^3 (\rho_l)^2 h_{lg}}{\mu_l} \right)^{1/4} \quad (2. 2)$$

그러나 기존의 Merit number는 워형 히트파이프나 썬머사이폰의 경우에 적용이 가능하도록 각각 제시되어 있으며 진동 세관형 히트파이프에 적용할 수 있는 기준이 아직까지는 명확하게 정립되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 저온용(150~750K)으로 사용되어지는 작동 유체 중에서 열적, 물리적으로 안정상태에 있으며, 시험부의 재료인 스텐레스와 알루미늄에 화학적 반응을 보이지 않는 R-141b, R-134a와 Methanol을 작동 유체로 선택하였다. 물의 경우는 적용 온도범위에 비해 비점(boiling point)이 매우 높기 때문에 적용 대상에서 제외하였다.

Fig. 2.2~2.3는 각 작동 유체에 대한 평가 지수를 나타낸 것이다.

Table 2.2는 각 작동 유체와 재료 용기와의 친화성을 나타낸 것이다

Table. 2.1 Possible working temperature range of various heat pipe fluids



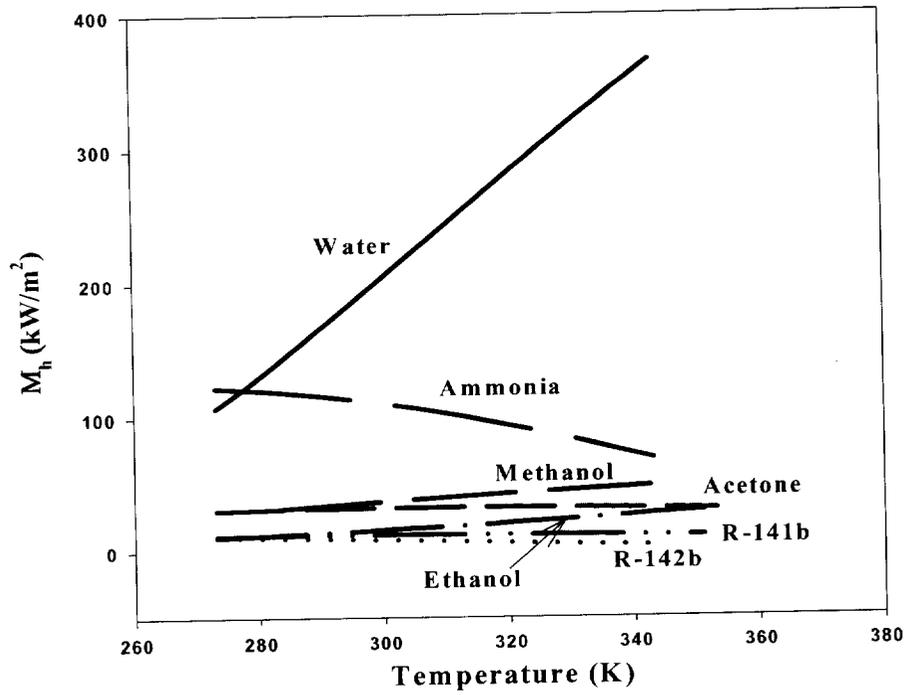


Fig. 2.2 Merit number of selected working fluids for heat pipe

Table 2.2 Working fluid & container material suitability

|          | Recommended  | Not Recommended   |
|----------|--|---|
| Ammonia  | Aluminum<br>Carbon Steel<br>Nickel<br>Stainless Steel    | Copper  |
| Acetone  | Copper<br>Silica<br>Aluminum<br>Stainless Steel          |   |
| Methanol | Copper<br>Stainless Steel<br>Silica<br>Nickel            | Aluminum  |
| Water    | Copper<br>Monel<br>347 Stainless Steel<br>Refrasil fiber | Aluminum<br>Silica<br>Inconel<br>Nickel<br>Carbon Steel |
| Thermex  | Copper<br>Silica<br>Stainless Steel                      |   |

## 제 3 장 실험 장치 및 방법

본 연구에서는 히트파이프의 태양열 집열기에 적용가능한 최적 경사각과 충전율을 알아보기 위한 실험(I)과 실험 I 결과를 토대로한 집열기를 제작하여 온도 변화 특성을 파악하고, 집열기의 효율을 구한 실험(II)을 수행하였다.

### 3.1 실험 장치 I

본 연구에 사용하기 위하여 제작된 OCHP는 Fig. 3. 1 과 같이 양옆에 외경 4.0mm, 내경 2.8mm인 OCHP의 증발부가 삽입되어 전열 면적을 넓힐 수 있도록 홈이 파진 사각형의 수배관용 동관을 제작하여, 그 홈에 양쪽 각각 피치가 50mm, 길이가 300mm인 17턴(34단)의 OCHP를 제작하여 사각형 수배관의 홈에 삽입 후, 납으로 용접하였다. OCHP는 작동 유체를 충전하기에 앞서, 내부를 로터리 펌프(RP)와 디퓨즈 펌프(DP)로 이루어진 고진공 시스템으로  $5.0 \times 10^{-5}$  torr까지 진공시켰고, 작동액의 충전에는 냉매충전 실린더를 사용하여 작동유체 선정에 있어 MeritNum. 등을 통해 실험 조건을 가장 만족시키는 Methanol을 봉입하였다.

그러나 본 실험에 사용된 히트파이프는 일반적으로 수평모드 일때 그 작동이 우수하지만, 집열기에 적용하기 위해서는 경사각에 따른 그 성능이 입증

되어야한다. 즉, 히트파이프 전체적으로 작동액의 진동과 순환이 이루어져, 온도가 고르게 분포하는데 대해서 실험을 통하여 알아보아야 한다. 그러므로 본 실험에서는 히트파이프의 경사각에 따른 성능을 조사하기 위하여 각각 냉매 차징을 40%와 20%, 15%로 구분하고, 설치 경사각도도 수평, 30°, 45°, 60°, 수직으로 변화시키며 수행하여 보았다.

실험장치는 OCHP를 중심으로 구성되며, 세부적으로 열원부, 계측부, 제어부, 시험부로 구성되었다. 열원부로는 300~353K의 열원을 공급하기 위하여 항온조(HMT-300-CBN-28-30)가 사용되었으며, 계측부는 다점의 온도를 측정하기 위하여 Hybrid Recorder(yokogawa, DR-230)와 이것과 인터페이스를 위한 PC로 구성되어있다. 또한 제어부는 원활한 유량을 공급하기 위한 순환 펌프와 유량 측정을 위한 체적식 유량계를 사용하였으며, 시험부는 OCHP와 그 경사각 조절을 위한 받침대로 구성되어졌다. Fig. 3. 2 은 실험 장치의 계략도이다.

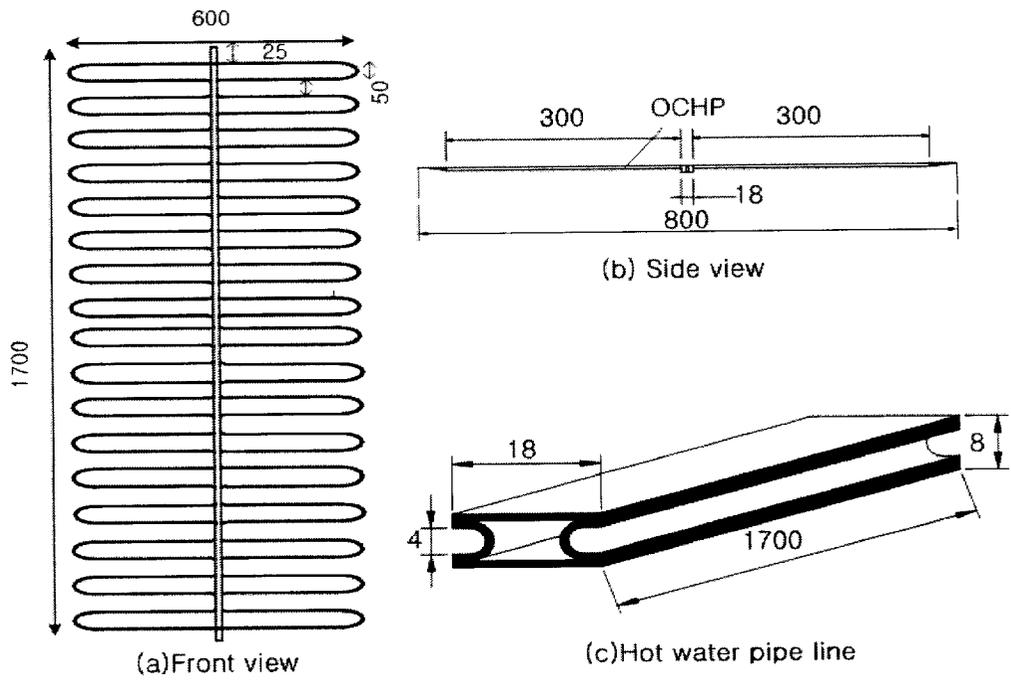
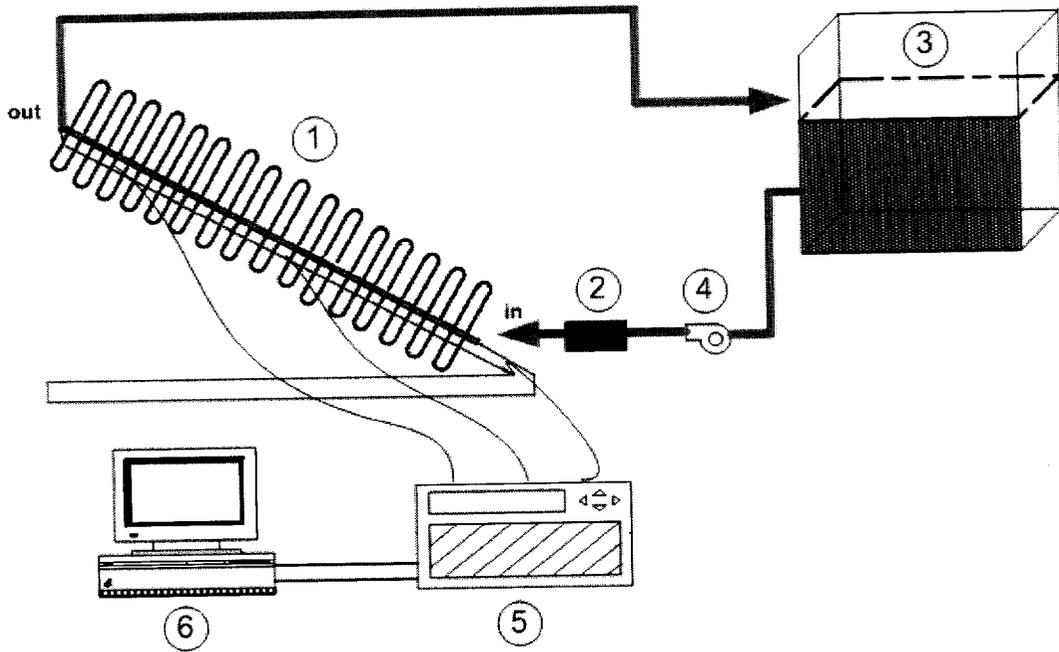


Fig. 3. 1 Schematic diagram of OCHP



- ① Test section
- ② Flow meter
- ③ Constant Temperature Water-tank
- ④ Circulation Pump
- ⑤ Data acquisition system
- ⑥ Computer

Fig. 3. 2 Schematic diagram of experimental apparatus I

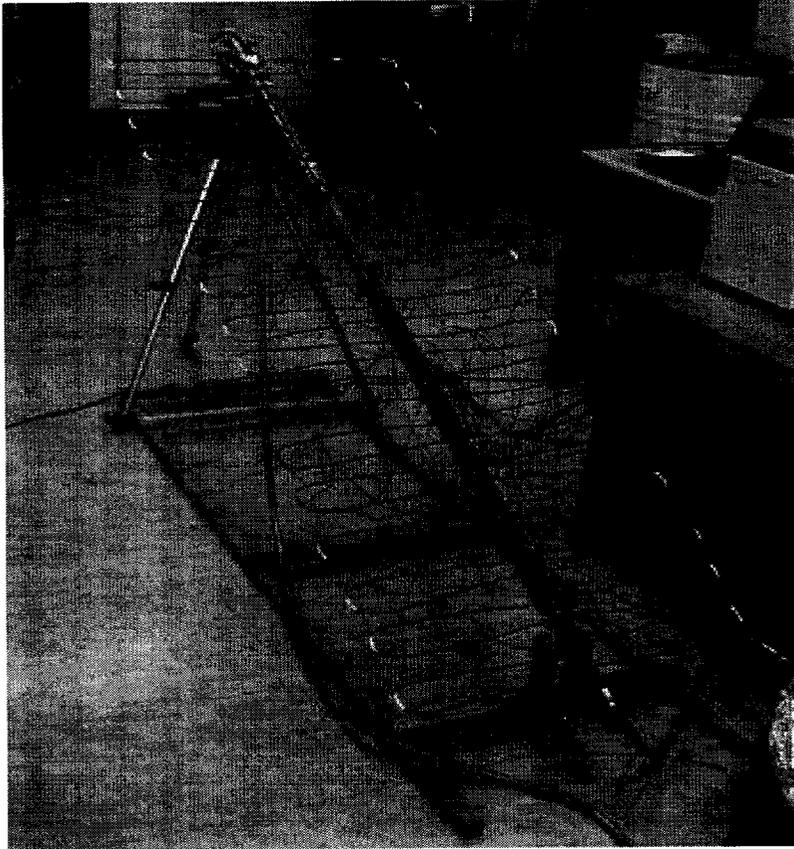


Photo. 3.1 Photograph of test section I

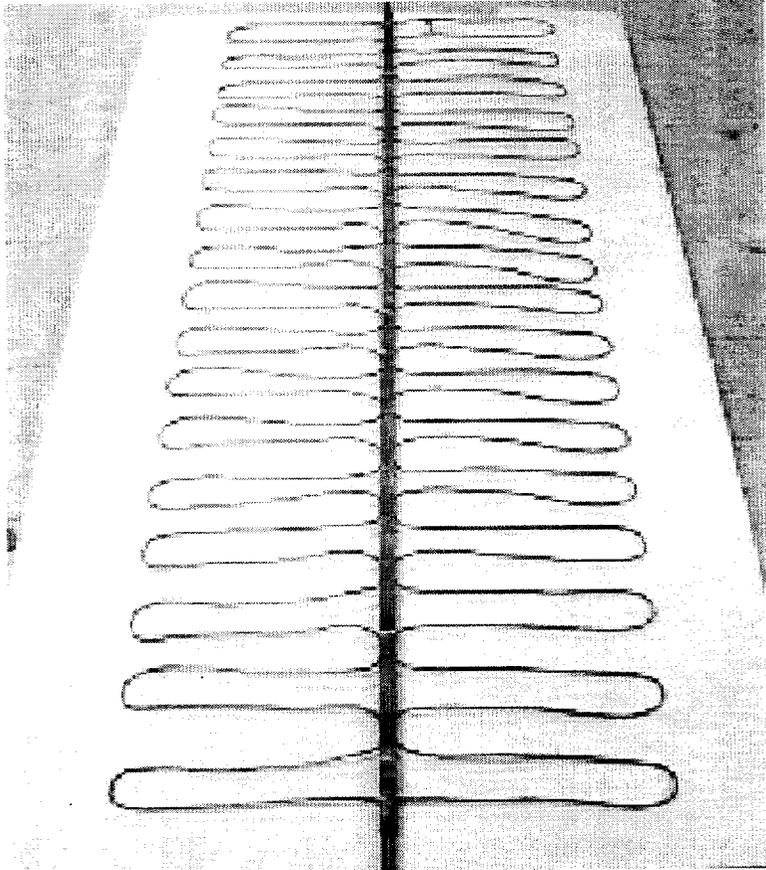


Photo. 3.2 Photograph of OCHP

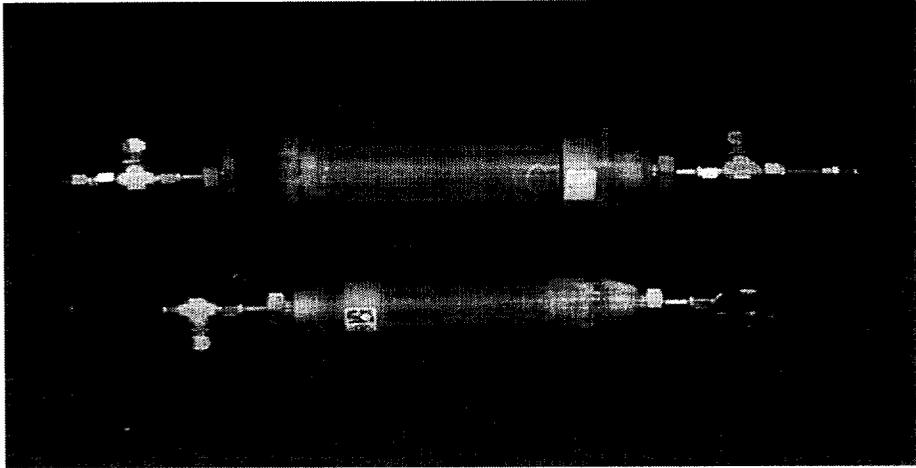


Photo. 3.3 Photograph of charging cylinder

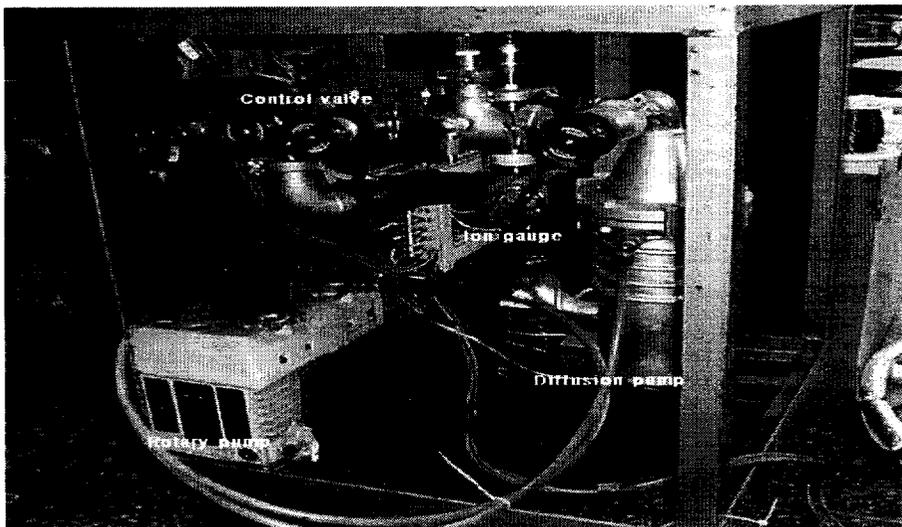


Photo. 3.4 Photograph of high vacuum system.

## 3.2 실험 방법 I

### 3.2.1 온도 측정

가열에 필요한 충분한 온도를 얻기 위하여 항온조(3KW)를 실험에 사용하였다. OCHP의 성능과 온도분포를 알기위해 T형 열전대를 상부(TOP)에 8점, 중간지점(MID)에 8점, 하부(BOT)에 8점을 각각 히트파이프의 응축부와 증발부, 수배관의 입구와 출구에 각각 부착하였다. 여기서 TOP은 히트파이프가 경사각이 주어질 때 위로 올라가는 쪽이며, BOT은 그 반대쪽인 아래부분을 의미한다. 즉, 물이 아래에서 위로 흐르게됨으로, 입구쪽이 BOT, 출구쪽이 TOP이 되고, 그 중간지점이 MID가 되는 것이다. 그리고 실내온도를 측정하기 위하여 열전대를 실내공기에 노출시켜 그 온도를 측정하였다.

이렇게 부착된 열전대는 직접 데이터로그(yokogawa, DR-230)와 연결되어 매 20초 간격으로 10시간 측정하여 PC에 모든 측정값을 받아 프로그램 상에서 평균온도를 구하여 처리하도록 하였다. 본 실험에 사용된 열전대는 항온조에서 표준온도계로 보정하였으며, 온도측정에서의 편차는 보정값에서  $\pm 0.2K$  정도로 나타났다. Fig. 3.3은 히트파이프에서의 열전대 부착점을 나타낸 것이다.

### 3.2.2 유량 측정

항온조에서 경사각에 따라 일정한 유량을 공급하기 위하여 체적식 유량계를 이용하였으며, OCHP의 입구로 들어가는 부분은 일정한 온수를 공급하기 위하여 순환펌프를 연결하였다. 유량은  $5\text{ l/min}$ 으로 일정하게 하였다.

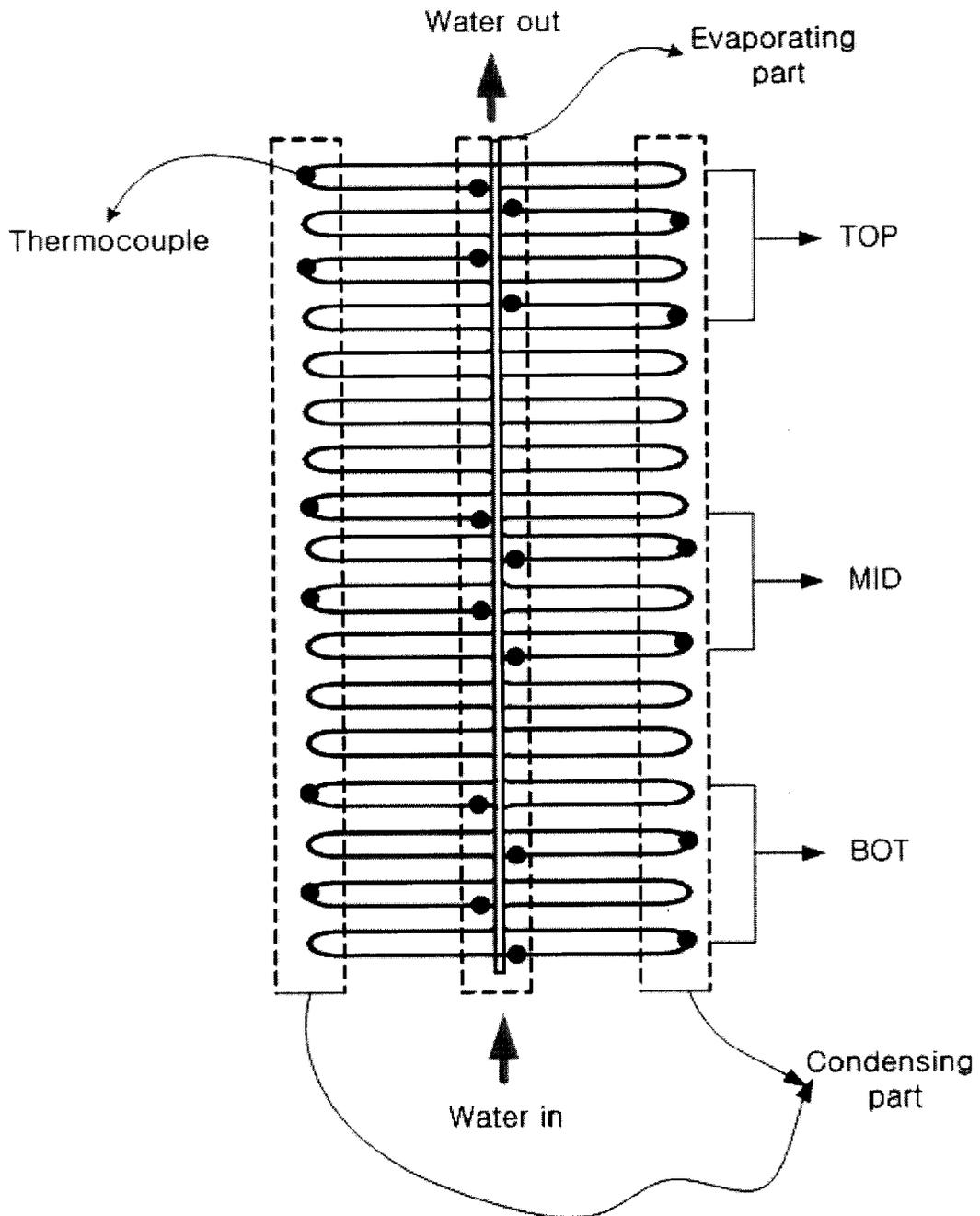


Fig. 3. 3 Schematic diagram of test section I

### 3.3 실험 장치 II

본 연구에 사용된 태양열 집열기와 실험장치의 개략적인 구성은 Fig. 3.4 에 나타내었다. 태양열 집열기내의 흡열판의 재질은 구리이며, 두께는 0.2mm이다. 집열매체로는 물을 사용하였다. 히트파이프가 부착되는 집열매체 도관으로는 실험 I 에 사용된 수배관 동관이며, photo. 3.6, 3.7과 같이 외경4.0mm, 내경 2.8mm인 OCHP를 삽입하고, 흡열판에 납용접으로 부착하였다. 그리고 기존의 집열기에 들어가는 집열매체 도관의 외경은 8mm, 내경은 5mm인 동관이다. 흡열판은 무광 흑색 도료를 코팅하여 빛의 반사를 최대한 줄이려고 하였다.

또한 실험에 사용된 OCHP는 실험 I 의 결과에 따라 작동유체로는 Methanol 을 봉입하고, 충전률은 20%(Vol.)로 하였다. 그리고 OCHP의 크기는 피치가 50mm와 100mm, 길이가 300mm인 17턴(34단)으로 제작한 것과 피치와 턴수는 동일하게 하여 길이가 250mm인 4가지를 제작하였다. 그러므로 실험조건은 히트파이프의 피치와 길이가 각각 250mm:50mm(A), 250mm:100mm(B), 300mm:50mm(C), 300mm:100mm(D)와 기존의 열매체 도관을 부착된 흡열판(E)까지 총 5가지이다. 그리고 흡열판의 집열 면적은 A와 B의 경우 300mm×1800mm이고, C와 D의 경우350mm×1800mm 가 되며, 기존의 것은 300mm×1780mm이다. 위의 내용을 간단히 Table. 3.1에 나타내었다.

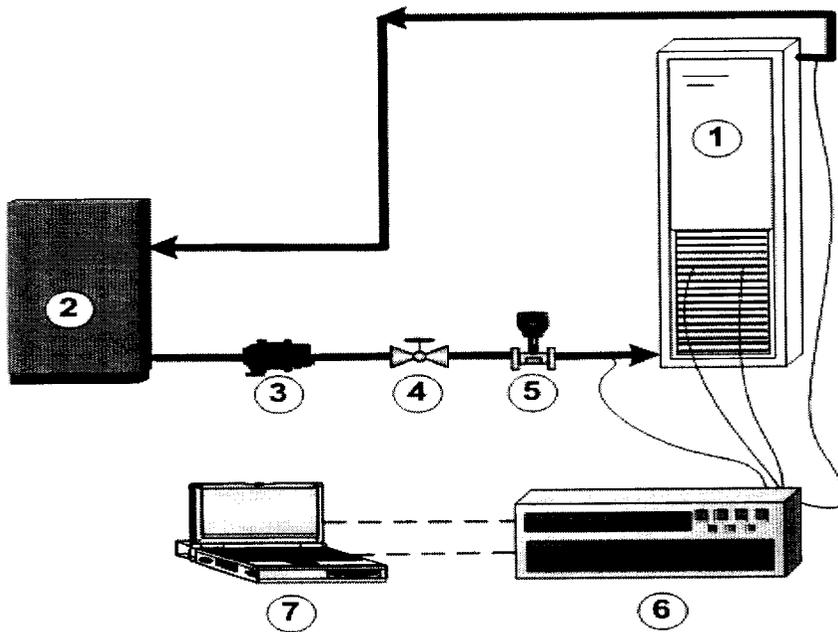
본 연구에 사용하기 위하여 제작된 태양열 집열기의 케이스는 photo. 3.5에

나타나듯이 집열기는 알미늄으로서 크기가 450mm×1910mm×120mm로 직접 제작하였으며, 태양광을 받는 부분은 유리가 아닌 투명 아크릴을 이용하여 제작하였다. 또한 집열기 내부는 가장 밑바닥을 유리섬유 단열재로 단열하고, 다시 그 위에 토이론을 얹어 이중 단열하여 흡열판을 설치하였다. 집열기는 정남향으로 설치하였으며 경사각은 실험 I 의 결과와 집열기의 설치 경사각을 고려하여, 히트파이프의 최적 설치 경사각인 45도로 하였다. 그리고 일사량은 집열기의 설치각도와 동일하게 하였다.

실험의 전체 시스템은 Fig. 3.4과 같이는 집열기를 중심으로 시험부, 계측부, 제어부로 구성되며, 집열매체인 물은 강제 대류식으로 순환된다. 계측부는 다점의 온도를 측정하기 위한 Hybrid Recorder(yokogawa, DR-230)와 시간에 따른 일사량을 측정하기 위한 High Precision Pyranometer(EKO, MS-801)와 이와 인터페이스를 위한 PC로 구성되어있다. 또한 제어부는 원활한 유량을 공급하기 위한 순환 펌프와 유량 측정과 조절을 위한 체적식 유량계와 유량 조절밸브가 있고, 시험부는 집열기와 저장 탱크로 구성되어져 있다.

Table 3.1 Specification of each experimental condition.

| Type | heat pipe length<br>(mm) | heat pipe pitch<br>(mm) | 집열면적<br>(m <sup>2</sup> ) |
|------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|
| A    | 250mm                    | 50mm                    | 0.54                      |
| B    | 250mm                    | 100mm                   | 0.54                      |
| C    | 300mm                    | 50mm                    | 0.63                      |
| D    | 300mm                    | 100mm                   | 0.63                      |
| E    | .                        | .                       | 0.534                     |



- ① Solar Collector
- ② Storage Tank
- ③ Circulation Pump
- ④ Valve
- ⑤ Flow meter
- ⑥ Data acquisition system
- ⑦ Computer

Fig. 3. 4 Schematic diagram of experimental apparatus II

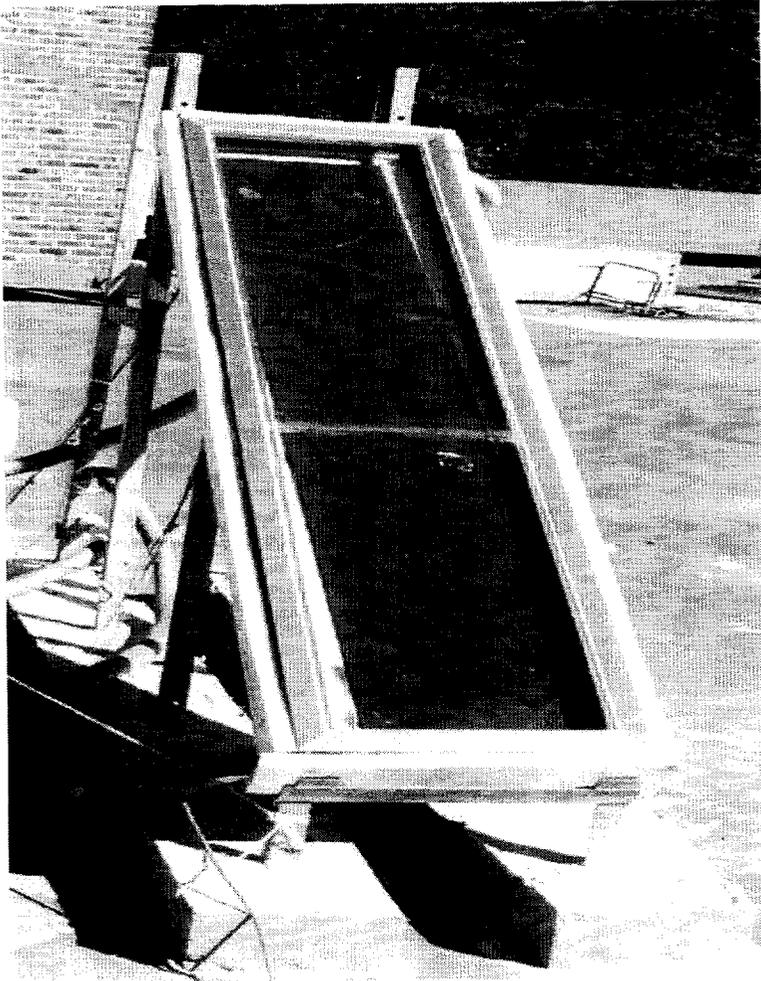


Photo. 3.5 Photograph of Solar Collector

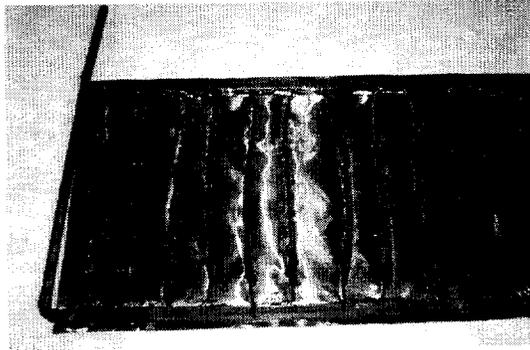


Photo. 3.6 photograph of collection plate (A, C)

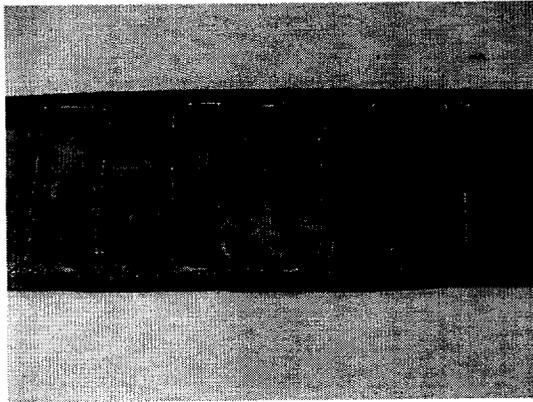


Photo. 3.7 photograph of collection plate (B, D)

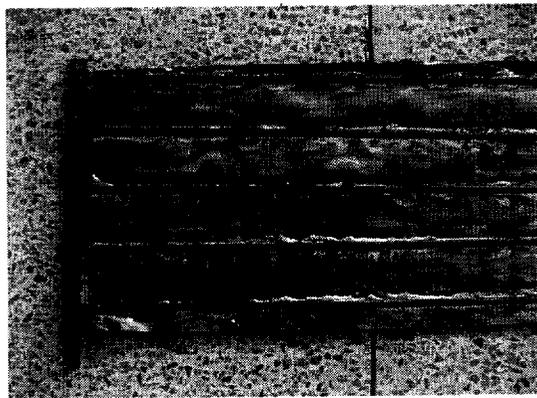


Photo. 3.8 photograph of collection plate (Existing collector)

### 3.4 실험 방법 II

시스템의 온도를 측정하기 위해 T형 열전대를 이용하였으며, 측정점은 집열매체 도관의 입출구에 2점, 흡열판에 8점, 집열기 내부 온도 측정을 위한 2점, 그리고 외기온도와 저장탱크 각각에 1점씩 모두 14점이다.

측정은 10월과 11월에 걸쳐 지속되었으며, 일반적으로 일정 일사량 이상의 조건에서 실험하기 위하여 맑은 날씨를 택하여 실험시간은 10시부터 16시까지 데이터를 2분간격으로 저장하여 30분동안의 평균으로 표시하였다.

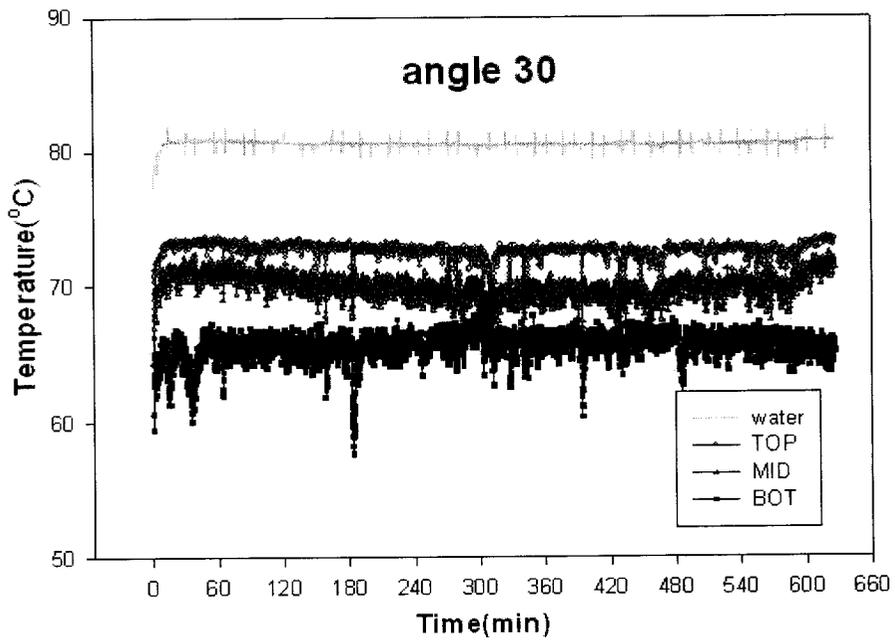
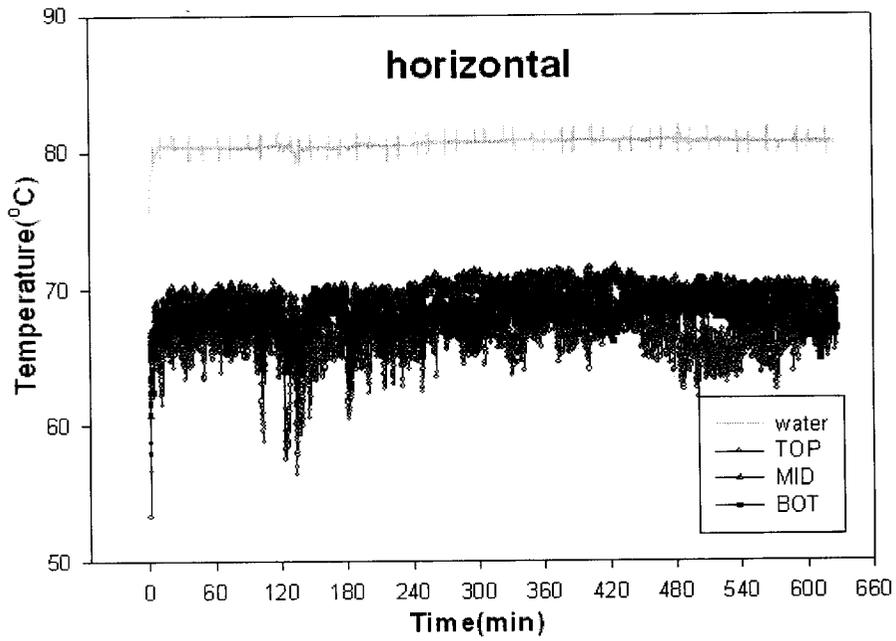
실험은 집열기내의 히트파이프의 길이와 피치(250mm:100mm, 250mm:50mm, 300mm:100mm, 300mm:50mm)에 따른 집열기의 온도 변화 특성과 효율에 초점을 두어 히트파이프의 최적 설계 조건을 찾는 것이다. 그리고 히트파이프가 부착되지 않은 흡열판과의 비교를 통해 히트파이프의 성능이 흡열판에 얼마나 성능을 미치는지도 알아보아야 한다. 모든 실험조건에 대해 열매체 유입 유량은 2.0kg/min로 일정하게 하였다.

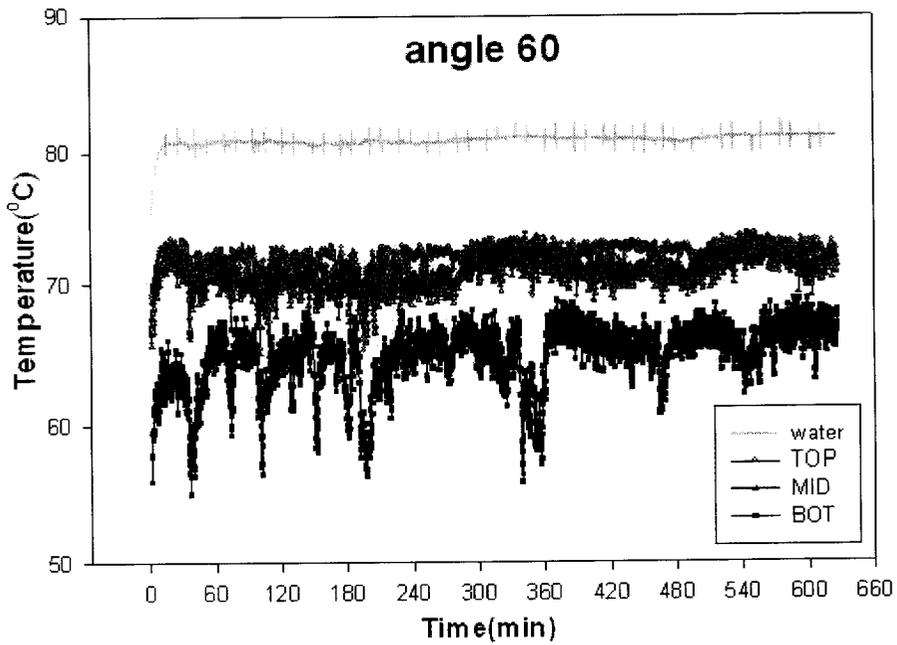
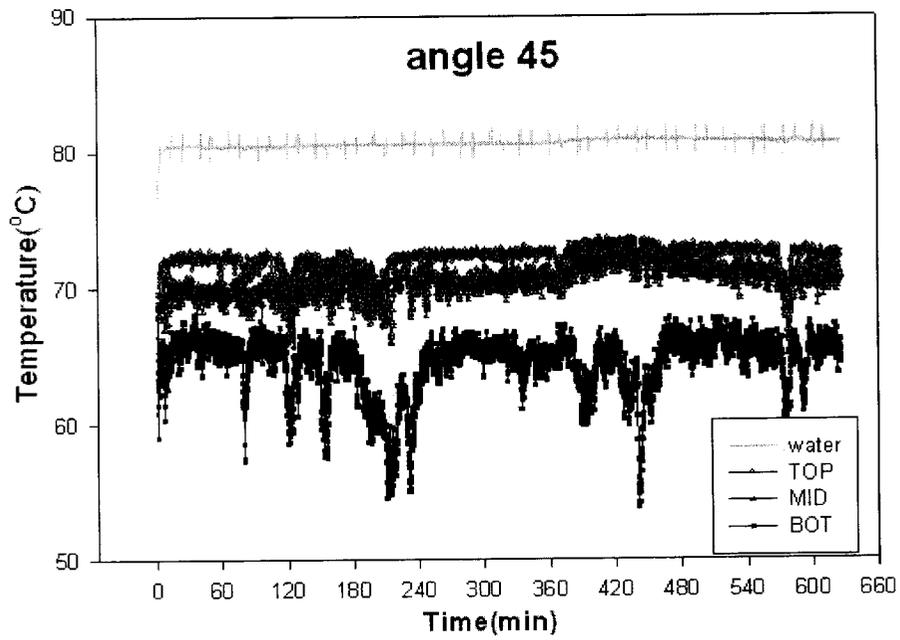
## 제 4 장 실험결과 및 고찰

### 4.1 히트파이프의 충전률과 경사각에 의한 온도분포 실험

#### 4.1.1 충전률 40%에서의 경사각에 따른 온도분포

동일한 조건에서 OCHP는 조밀한 간격에서 수평모드일 경우 거의 균일한 온도분포를 나타내지만, Fig. 4.1에서 보듯이 충전율 40%인 경우 경사각에 따라 각 측정점의 온도가 고르게 분포하지 못함을 보이고 있다. 특히 하부(BOT)의 온도가 가장 많은 차이를 보이고 있다. 이는 작동액의 과다로 증기 발생량이 줄어들어 관내에 액이 차지하는 비중이 커져서 응축부의 전열면적이 줄어들고, 관마찰 계수가 커지게 된다. 이로인해 중력에 의하여 히트파이프 내부 작동액 및 증기포의 불규칙적인 루프내 순환과 축방향 진동이 제대로 이루어지지 못하고 있기 때문에 일어나는 현상으로 보여진다. 그러나 특이하게도 수직모드의 경우에는 측정 초기에는 하부(BOT)의 온도가 현저히 낮더니 시간이 지남에 따라 상부(TOP)와 중간지점(MID)온도로 상승하여 유지되고 있다. Fig. 4.1은 충전율 40%에서 각도변화에 따른 히트파이프의 온도분포를 나타낸 그래프이다.





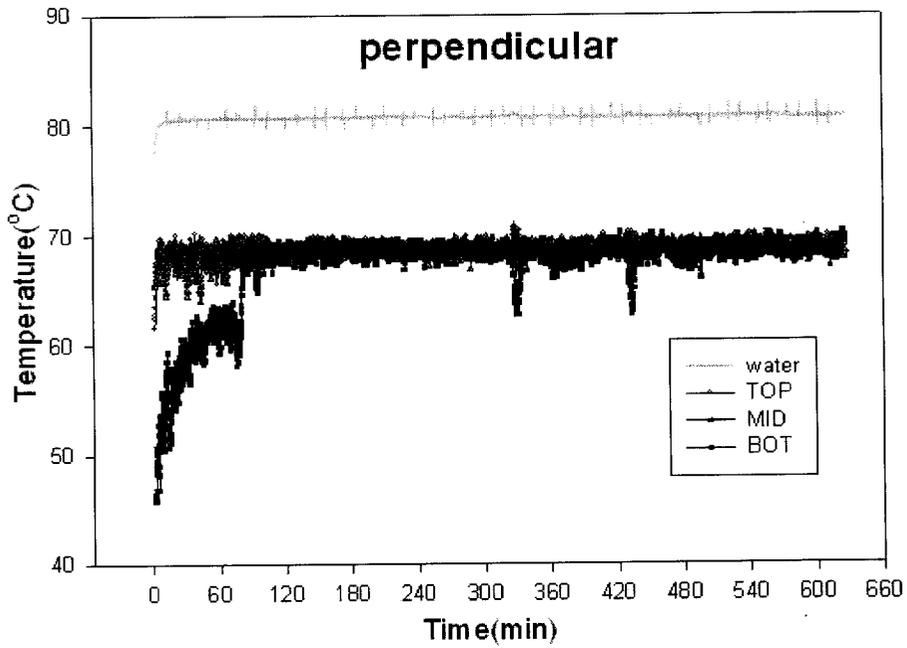
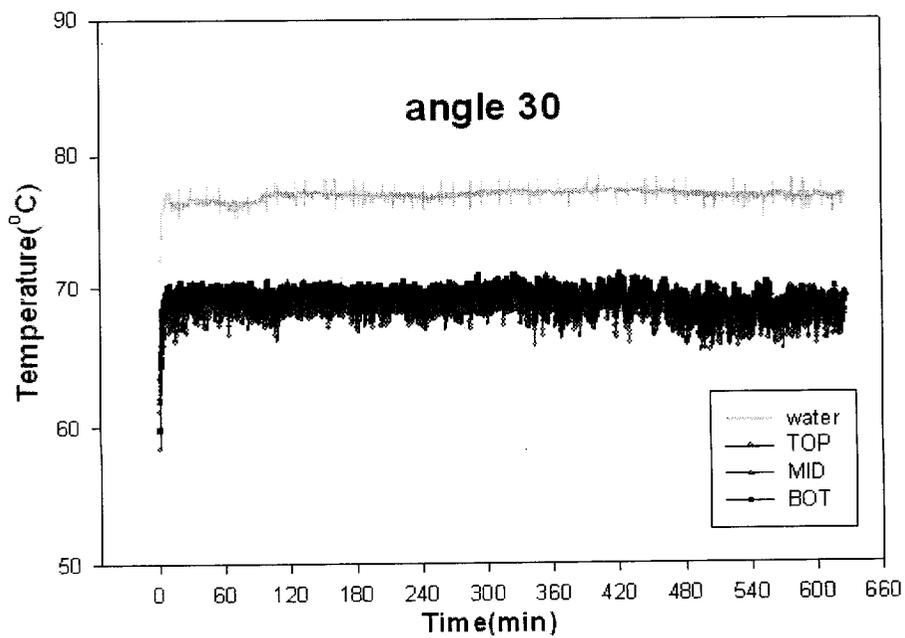
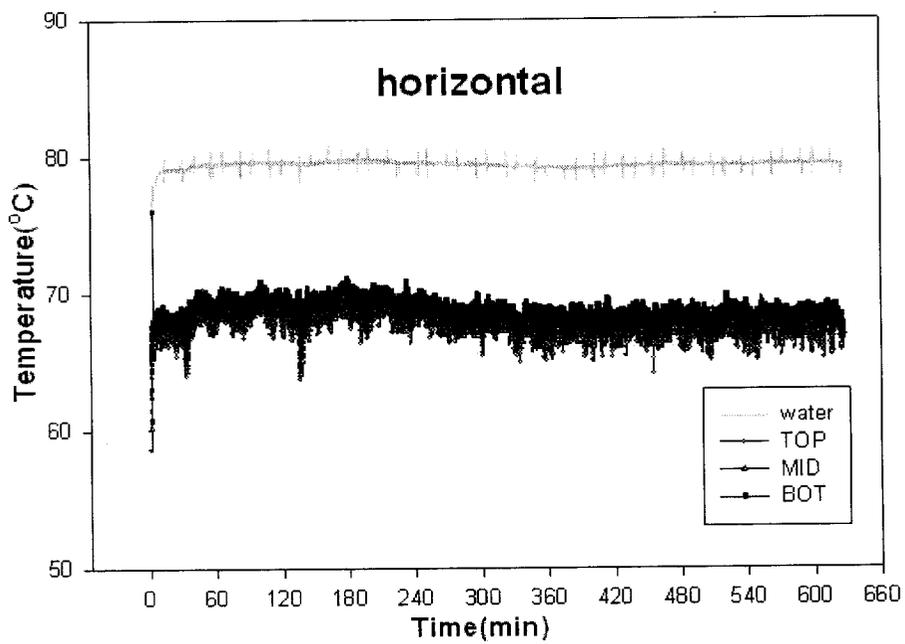


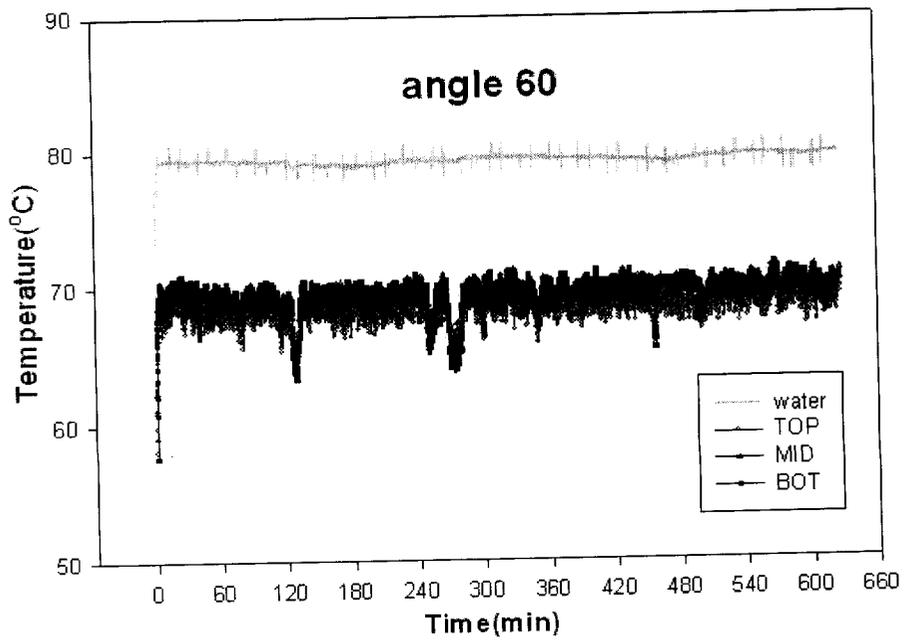
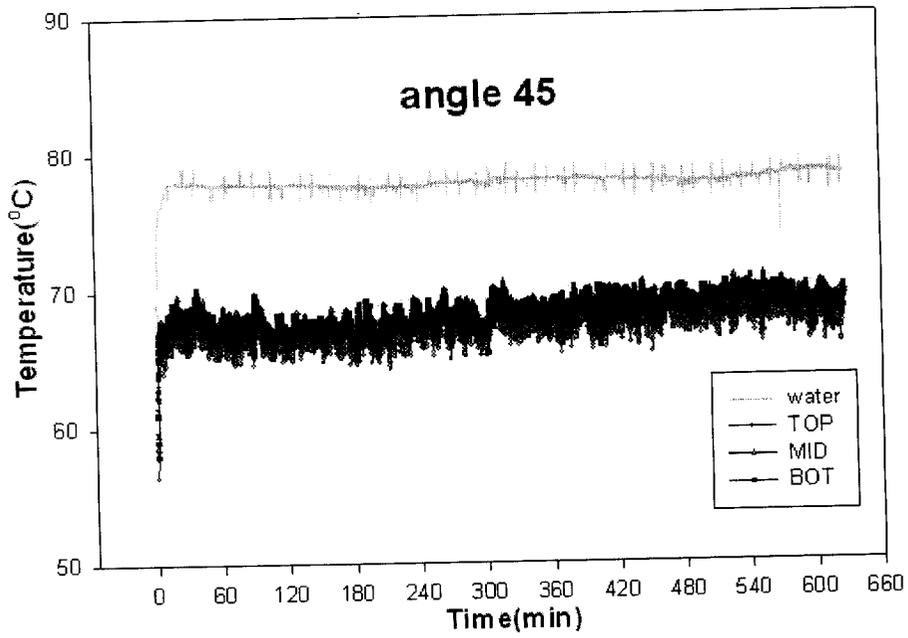
Fig. 4.1 Temperature profile with respect to time at charging ratio(40%)

#### 4.1.2 충전율 20%에서의 경사각에 따른 온도분포

충진율 20%인 경우는 충전율 40%인 경우 보다 동일 조건에서 전체적으로 온도분포가 고르게 되어 열전달이 잘 일어나는 것으로 나타났다. 그래프에서 나타나듯이 TOP, MID, BOT의 세 온도곡선이 모두 겹쳐서 일정하게 유지되고 있다. 이는 충전율 20%가 충전율 40%보다 작동액의 질량이 작으므로 중력의 영향을 덜 받기 때문인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 4.2은 충전율 20%에 대해서 경사각변화에 따른 히트파이프의 온도분포를 나타낸 그래프이다.





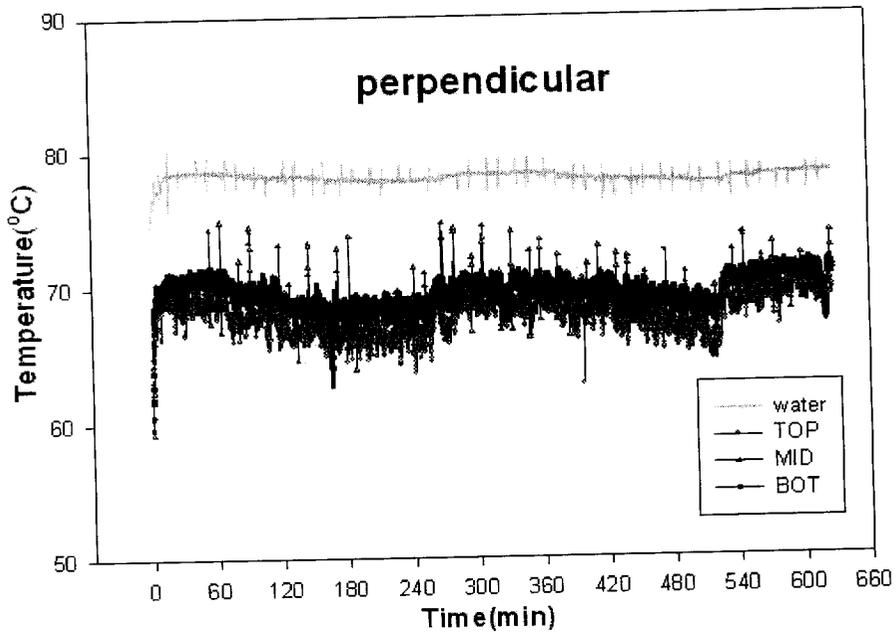
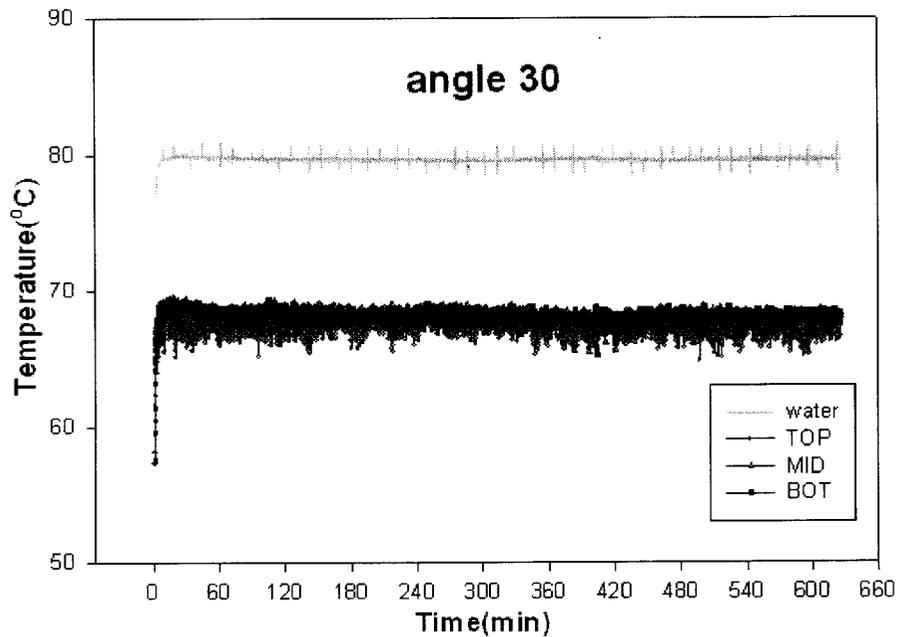
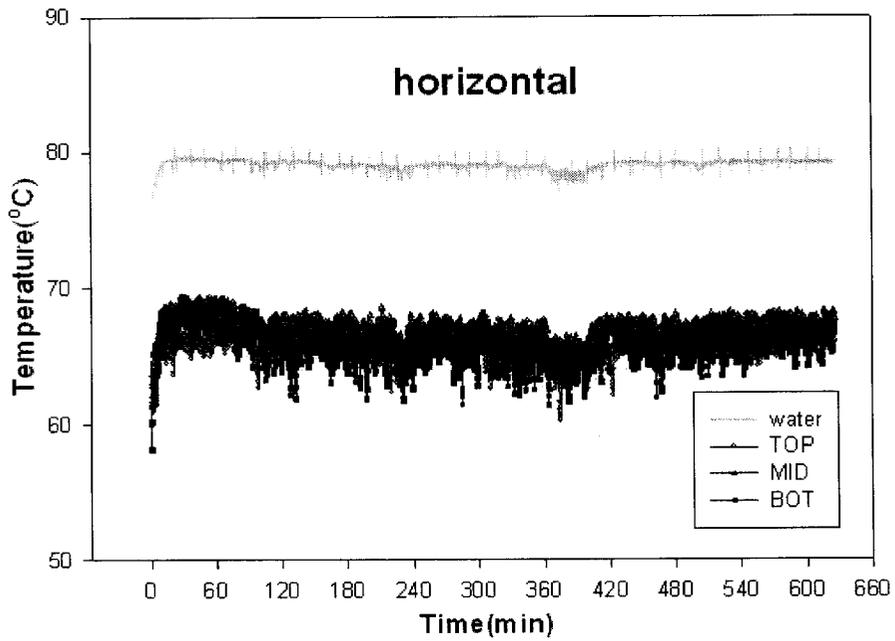


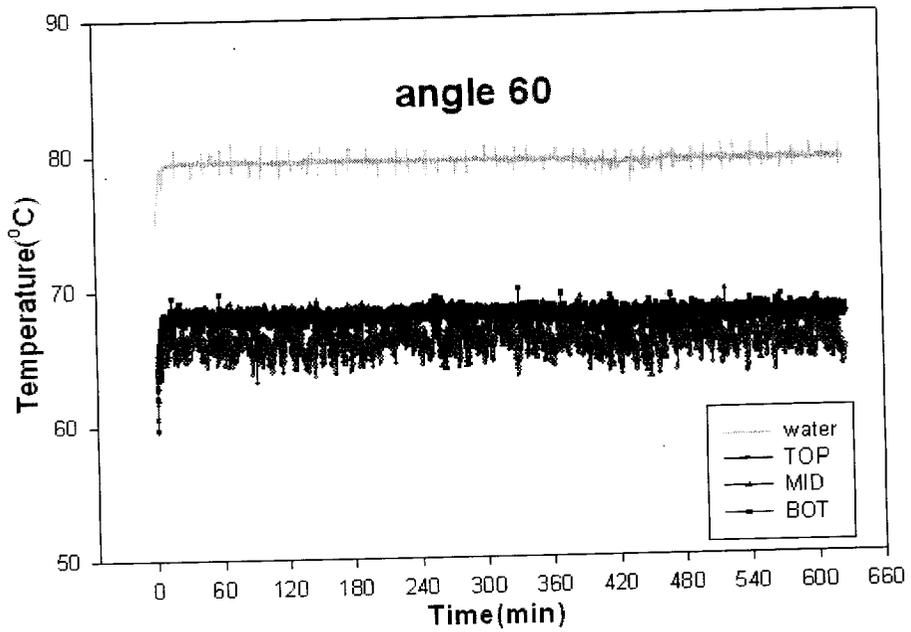
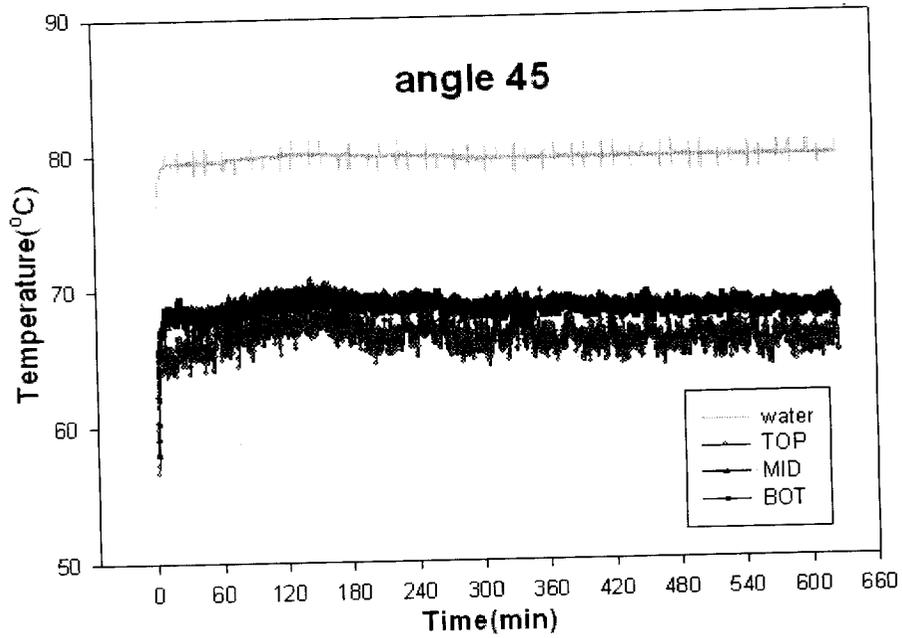
Fig. 4.2 Temperature profile with respect to time at charging ratio(20%

### 4.1.3 충전율 15%에서의 경사각에 따른 온도분포

충진율이 15%일 때는 충전율이 40%일 때보다 전체적으로 온도분포는 고르지만, 충전율 20%와 비교해서는 경사도가 높아질수록 충전율 40%와는 반대로 상부(TOP)의 온도가 하부(BOT)와 중간부분(MID)의 온도보다 낮아지고 있음을 보이고 있다. 이는 루프내의 작동액이 히트파이프 내부 부피에 비해 충전율이 작아 전체적으로 고르게 퍼지지 못함을 나타낸다. 즉, 40%보다는 루프내의 작동액과 기포가 순환이 잘되지만, 20%보다는 충전율의 부족으로 전체적인 온도분포가 고르지 못하다는 것이다. 이는 작동액의 과소로 증기발생량이 줄어들고, 이로 인해 열전달량이 감소하게 된다. 그리고 낮은 온도에서 작동액이 쉽게 과열되어 드라이 아웃이 발생하게 되어 성능저하를 가져오게 된 것으로 파악된다.

Fig. 4.3은 충전율 15%에서의 경사각에 따른 온도분포특성을 나타낸 그래프이다.





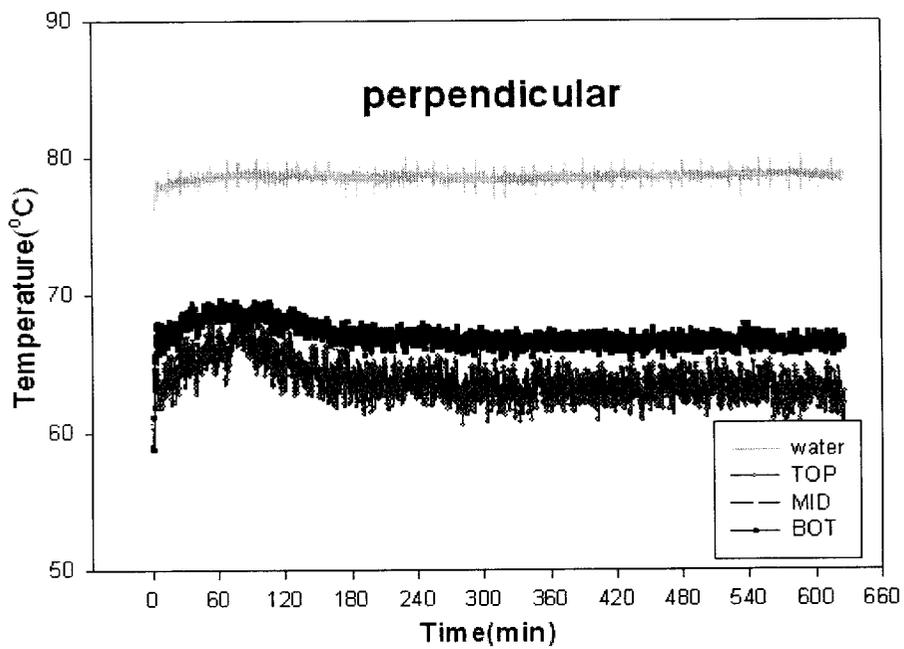


Fig. 4.3 Temperature profile with respect to time at charging ratio(15%)

#### 4.1.4 유효열전도율

일반적으로 진동세관형 히트파이프의 성능을 나타내는 지수로 유효 열전도율을 사용한다. 유효열전도율이라는 것은 열전달에서 고체의 열전도율에 상응하는 물성치이다. 진동세관형 히트파이프는 내부 작동유체의 현열 및 잠열 수송과 자체 재질을 통한 열전도에 의해 열전달이 일어나지만 열전도에 의한 열전달은 작동유체에 의한 열전달에 비해 아주 미미하다. 따라서 진동 세관형 히트파이프를 통한 열전달을 모두 작동유체에 의해 일어난다고 가정하고 고체에서의 전도도의 개념을 도입한 것이 유효 열전도율이다.

물질의 고유 물성치인 열전도도는 온도에 대한 함수로서 결정되지만 진동세관형 히트파이프에서의 유효 열전도율은 함수 관계가 훨씬 복잡하다. 즉, 용기의 재질, 작동유체의 종류 및 봉입량, 경사각도, 진공도 등에 따라 달라지게 된다.

유효 열전도율을 계산하는 식은 (4.1) 다음과 같다.

$$\lambda_{eff} = \frac{l \cdot Q_h}{A_c \cdot \{T_{eva} - T_{cond}\}} \quad (4.1)$$

$l$  : 증발부와 응축부사이의 평균 거리

$Q_h$  : 히트파이프 방출 열량

$A_c$  : 작동유체가 흐르는 유로 단면적의 합

$T_{eva} - T_{cond}$  : 증발부, 응축부 온도

그 결과로 Fig. 4.4의 유효열전도율을 나타낸 그래프에서 보듯이 충전율 20%가 40%와 15%보다 각 경사각에서 우수한 성능을 나타내고 있다. 특히 충전율 20%, 설치 경사각 45도에서 가장 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 충전율 20%와 40%, 15%의 유효열전도율은 각각 969 kW/mK, 404 kW/mK, 241 kW/mK로 나타났다.

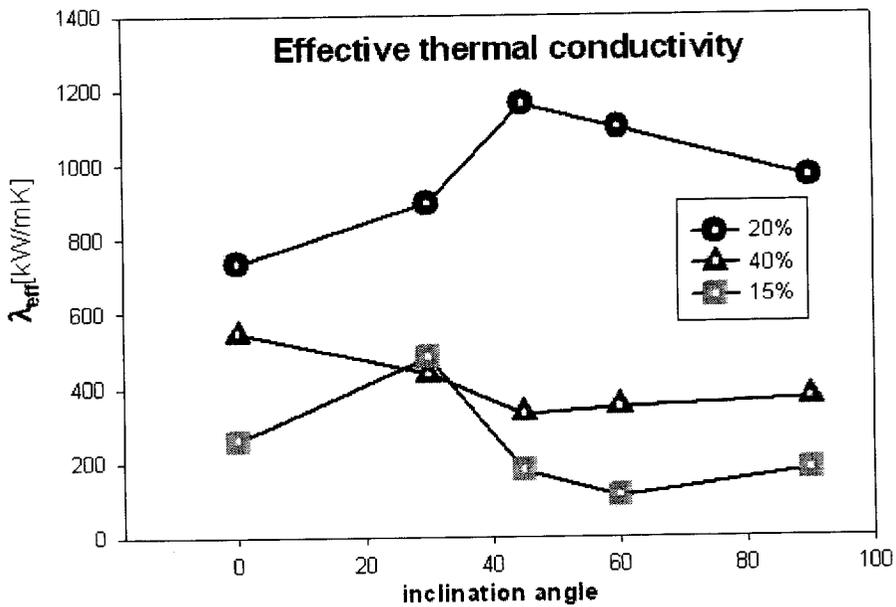


Fig. 4.4 Influence of charging ratio on effective thermal conductivity

## 4.2 집열기의 온도변화 특성과 효율

앞서 설명되었듯이 집열기는 흡열판에 부착되는 히트파이프의 피치와 길이에 대해서 4가지 타입과 히트파이프가 부착되지 않은 1가지 타입까지 모두 5가지의 형태이다. Fig. 4.5은 각각의 집열기의 입출구 온도와 일사량, 저장탱크 내의 물의 온도, 외기 온도 변화를 나타낸 것이다. 대체적으로 일사량 분포는 포물선의 형태를 보이고 있으며, 집열기 입출구 온도는 시간변화에 따라 같은 상승 곡선을 그리면서 그 차이는 일정하게 유지하고 있으며, 대기온도 또한 시간의 변화에 큰 차이를 나타내지 않고 있다.

Table. 4.1와 Table. 4.2는 각 실험 조건에 대한 집열효율과 저장탱크의 실험 시작시 온도와 실험종료 때의 온도차, 집열면적, 하루 평균 일사량, 저장조의 회수열량(Q) 그리고 히트파이프를 부착한 집열판의 효율 상승율을 나타낸 것이다. 실험결과 히트파이프의 길이와 피치가 집열기 효율에 상당한 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 같은 길이의 히트파이프를 비교할 경우 피치가 작은 조건이 더 좋은 결과를 보이며, 같은 피치의 히트파이프를 비교할 경우 길이가 긴 조건이 좋은 결과를 보이고 있다. 그러므로 길이와 피치에 있어서 가장 유리한 실험 조건 C의 경우가 집열효율이 27%로 가장 좋게 나타났으며, 그 다음으로 D의 경우가 23.1%, 그리고 A, B, E의 순으로 각각 21.6%, 17.1%, 15.9%로 나타났다. 즉, 기존의 열매체 도관방식을 이용한 집열기보다 히트파이프가 부착된 집열기의 효율들이 더 좋게 나와 그 적용성의 타당성을 뒷받침 해주고 있다.

집열 효율은 식 (4.2)와 (4.3)으로부터 구할수 있다.

$$\eta = \frac{Q}{IA} \quad (4.2)$$

$$Q = m \cdot C \cdot \Delta T \quad (4.3)$$

$\eta$  : 집열효율

$I$  : 집열면 일사강도

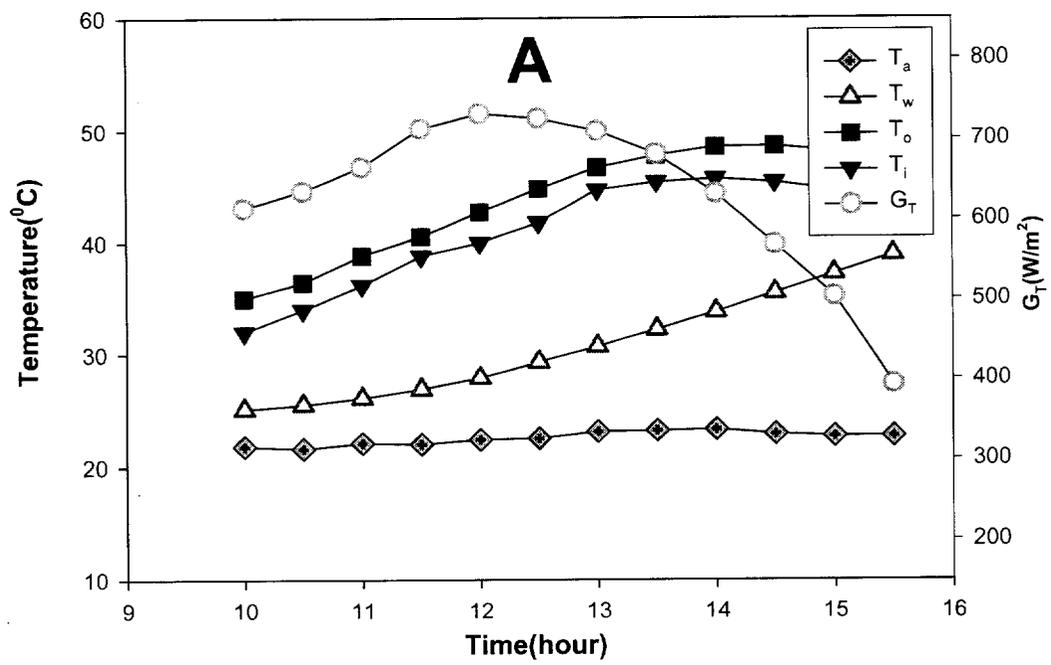
$A$  : 집열 면적

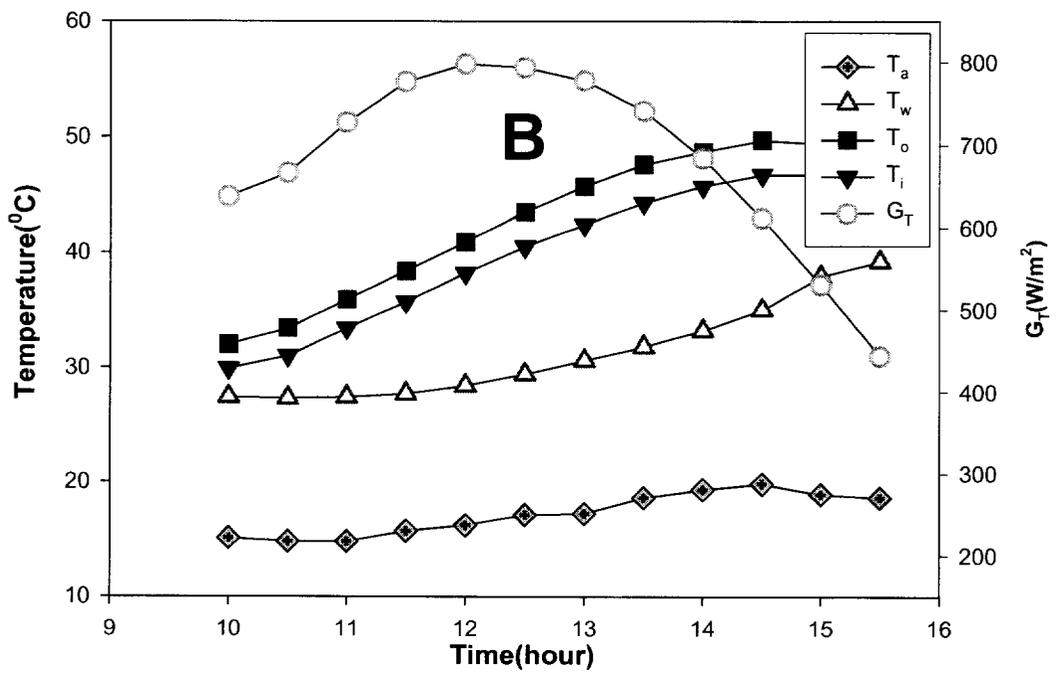
$Q$  : 집열량

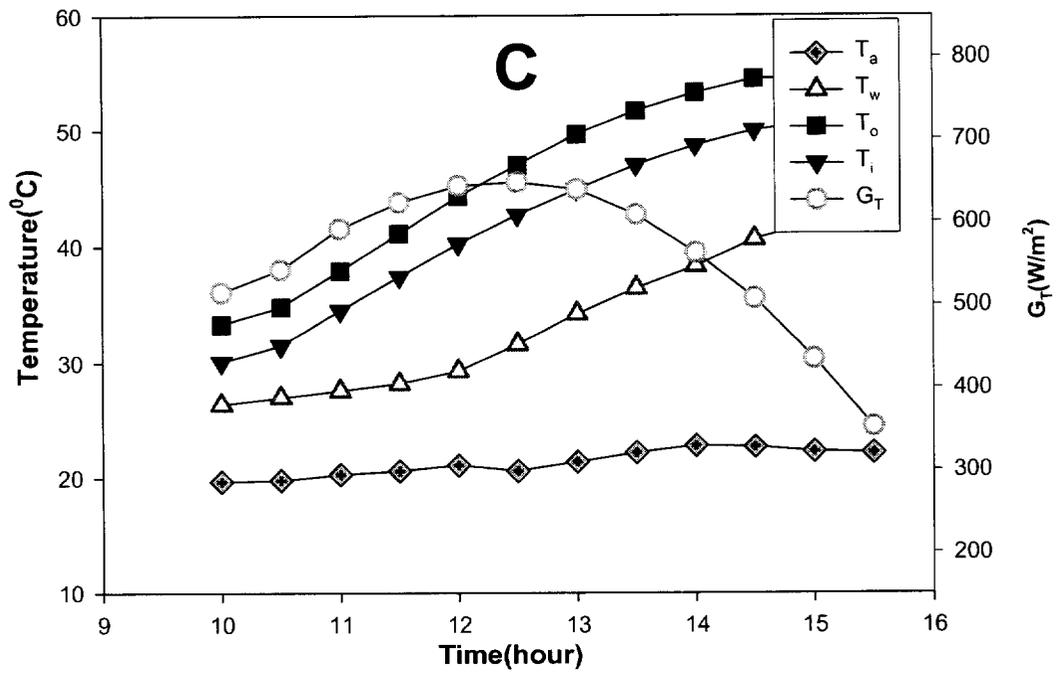
$m$  : 집열매체 저장 용량

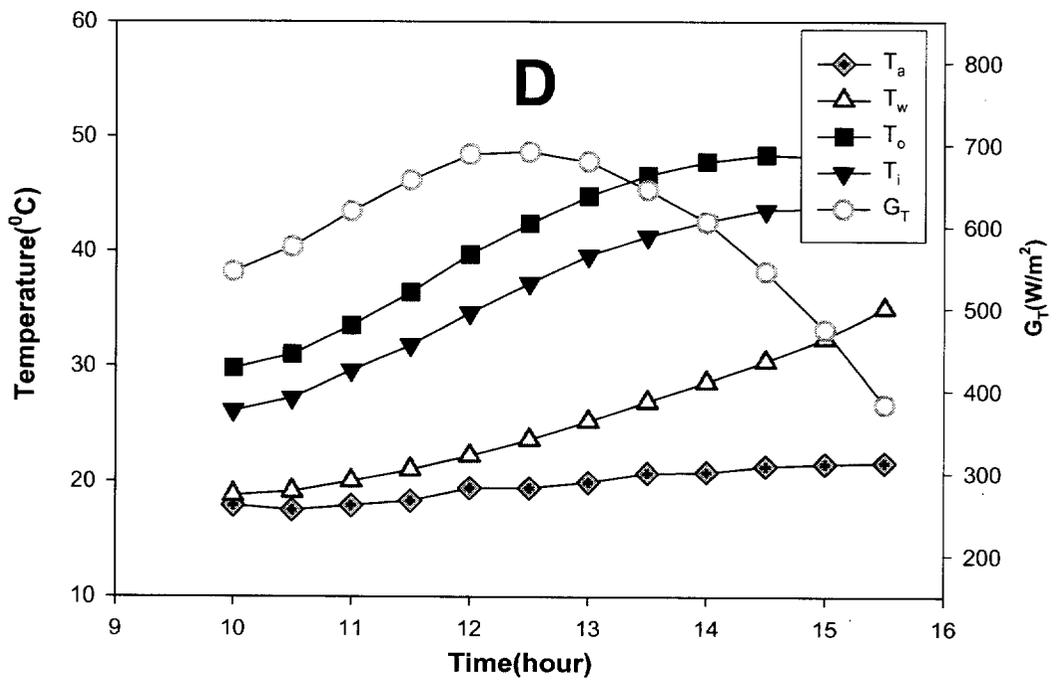
$C$  : 집열매체 정압 비열

$T$  : 저장탱크 온도









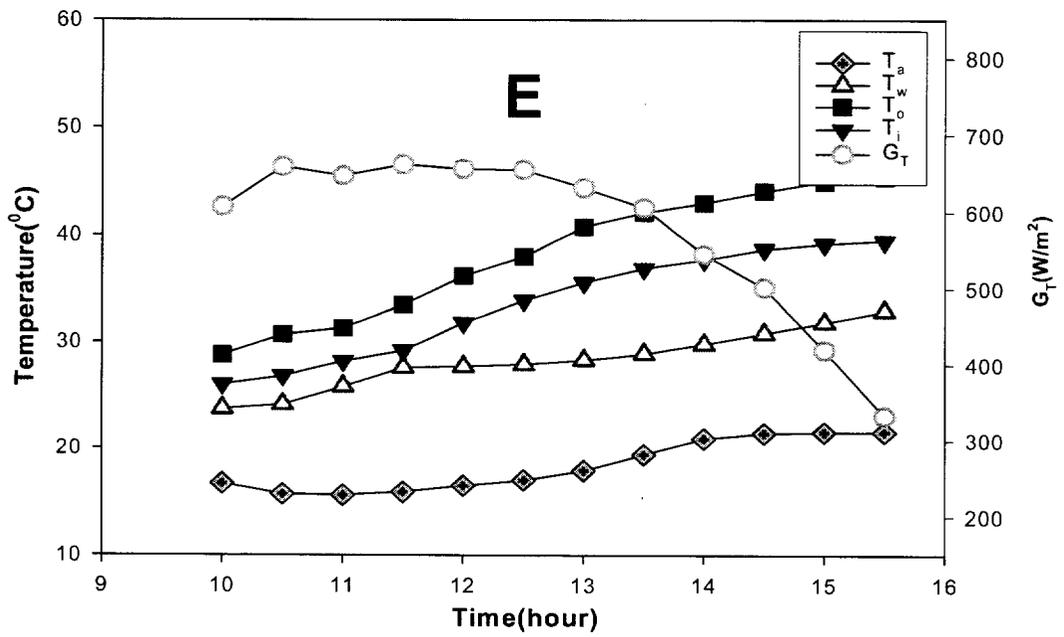


Fig. 4.5 Temperature and radiation profile with respect to time

Table 4.1 collection efficiency of each experimental condition

| heat pipe | Storage tank<br>$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ | Collection<br>Area<br>( $\text{m}^2$ ) | Solar<br>insolation<br>( $\text{W}/\text{m}^2$ ) |
|-----------|--|--|--|
| A         | 13.8   | 0.54                                   | 630.5  |
| B         | 11.8   | 0.54                                   | 682.1  |
| C         | 14.1   | 0.63                                   | 555.4  |
| D         | 16.2   | 0.63                                   | 592  |
| E         | 9.2 $^{\circ}\text{C}$                       | 0.53                                   | 576.7  |

Table 4.2 collection efficiency of each experimental condition

| heat pipe | Q<br>(W) | Collection<br>Efficiency<br>(%) | Efficiency<br>Ascension<br>(%) |
|-----------|----------|---------------------------------|--------------------------------|
| A         | 652      | 21.6                            | 35                             |
| B         | 558      | 17.1                            | 7                              |
| C         | 667      | 27                              | 69                             |
| D         | 766      | 23.1                            | 45                             |
| E         | 435      | 15.9                            | .                              |

## 제 5 장 결론

진동 세관형 히트 파이프를 이용한 태양열 집열기의 적용에 따른 열전달 특성에 대한 기초 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) OCHP를 이용한 태양열 집열기의 적용에 있어서 설치 경사각에 따른 히트파이프의 전체적인 온도분포는 충전율 20%(Vol.)가 충전율 40%와 15%보다 온도분포가 고르게 나타났다.

(2) 각각의 충전율에 따른 유효열전도율에 있어서도 20%가 다른 충전 조건에 비해서 2.4~4배 정도 크게 나왔으며, 설치 경사각에 있어서도 45도에서 가장 우수한 성능을 보이고 있다.

(3) 일사량의 변화에 따라 저장탱크의 온도와 집열기의 출입구 온도는 상승하지만, 출입구 온도차는 커다란 변화없이 거의 일정하게 유지한다.

(4) 집열효율에 있어서 히트파이프의 피치와 길이에 따라 비교하였을 때, 같은 길이의 경우 피치가 좁은 것이 효율이 더 좋게 나타나며, 피치가 동일할 경우 그 길이가 긴 것이 효율이 더 좋게 나타났다.

(5) 기존의 열매체 도관을 부착한 집열기의 효율이 15.9%인 것과 비교할 때, 히트파이프가 부착된 집열기의 경우는 21.6%~27%로 그 성능이 우수하게 나타남을 알수 있다.

(6) 히트파이프의 집열판의 부착에 있어서 열을 수배관으로 효과적으로 전달하기 위해서 용접과 집열기의 제작 기술, 그리고 흡열판의 코팅기술 등 기술적인 해결책도 찾아야 할 것으로 보인다.

## 참고문헌

- (1) 곽희열, 2003, 진공관형 태양열 집열기술, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 2, No. 1, pp. 24~31
- (2) Kim, J. H., Kim, S. S., Choi, B. S., Hong, Hiki, 2003, Verification Experiment for 6kW Water Heating System, Proceedings of the SAREK 2002 Summer Annual Conference, pp. 170-175
- (3) Ji, M. K., Lee, Y. H., Shin, J. H., Jeong, H. M., Chung, H. S., 2002, Study on the Performance of Evacuated Glass Tubes solar collector with Heat Pipe, Proceedings of the SAREK 2002 Summer Annual Conference, Vol. 1, pp. 58-63
- (4) Jo, D. K., Choi, I. S., 1998, A Study on the optimal Installation Angle of Solar Absorber Plates in Korea, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 18, No. 2, pp. 69-89
- (5) Ko, S. B., 2002, Study on performance of under-floor heating system using oscillating capillary tube heat pipe, Master thesis of Pukyong National University, pp. 26-44
- (6) Lee, W. H., 2000, Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, Doctor thesis of Pukyong National University, pp.18-29
- (7) Ha, S. J., 2003, Development of Micro Cooling System for Telecommunication system using Oscillating Heat pipe, Master thesis of Pukyong National University, pp. 41-44
- (8) Frank P. Incropera, David P. Dewitt, 1999, Fundamental of Heat and Mass Transfer 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp. 180-185

- (9) Im, Y. B., 2003, Study on heat transfer characteristics of heat exchanger using oscillating heat pipe for low temperature waste heat recovery, Master thesis of Pukyong National University, pp. 20-23
- (10) Kang, C. H., Bae, C. H., Hong, J. K. and Suh, J. S., 2004, An Experimental Study on Thermal Performance of Heat Pipe Type Solar Collector using a Glass Concentric Evacuated Tube, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 846-851
- (11) Shin, J. H., Bae, C. H., Jeong, H. M., Chung, H. S., 1999, Structure and fundamental theory of Evacuated Glass Tube Solar Collector, J. Ins. Marine Industry 12, pp. 59-64
- (12) Ji, M. K., Lee, Y. H., Shin, J. H., Jeong, H. M., Chung, H. S., 2002, Study on the performance of Evacuated Glass Tubes Solar collector with Heat Pipe, Proceedings of the SAREK 2002 Summer Annual Conference, pp. 58-63
- (13) Kim, J. H., Kim, S. S., Choi, B. S., Hong, H. K., 2003, Verification Experiment for 6kW Solar Water Heating System, Proceedings of the SAREK 2003 Winter Annual Conference, pp. 170-175
- (14) 지명국, 공태우, 배철환, 정효민, 정한식, 2000, 평판형 태양열 집열기의 각도에 따른 집열성능 연구, 대한기계학회 2000년도 춘계학술대회 논문집 B, pp. 316-321
- (15) Kim, C. J., 1992, A Study on Application of a Heat Pipe to an Evacuated Glass Tube Solar Collector, Solar Energy Vol. 12, No. 2, pp. 9-17

## 감사의 글

본 논문이 결실을 맺기까지 연구자로서의 자세와 연구에 대한 아낌없는 조언과 따뜻한 격려로 지도해 주신 김종수 교수님의 은혜에 깊은 감사를 드립니다. 그리고, 본 논문을 지도해 주시고 유익한 조언을 아낌없이 해주신 최광환 교수님, 김영수 교수님, 오후규 교수님, 김은필 교수님, 금종수 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 본 논문이 완성되기까지 같이 고민하며 어려움을 해결해 주시고 격려의 말을 아끼지 않았던 용빈이 형과, 수정이 누나에게도 감사를 드립니다. 학부때 3년동안 총대를 맡아 설치고 다녀서 과에서 많은 사람들과 알게된 것이 가장 큰 도움이 아니었나 생각합니다. 대학원에 들어와서 정말 후회없는 생활을 하지 못한 것이 정말 아쉽고, 나 스스로에게 커다란 만족감을 주지 못하는 것이 너무 아쉽습니다.

그래도 그나마 실험실 중에 가장 사람이 많고 활발한 곳이라 재미있게 지낸 것 같고, 인간적이시고, 노래도 멋지게 잘불러 주시던 멋쟁이신 우리 교수님 밑에서 2년을 보냈다는 것이 저를 타일러 주는 듯 합니다.

바쁘다는 핑계로 동기인 기택이와 내수에게 신경많이 못 써줘서 정말 미안하고, 태진이랑 상조한테도 마찬가지로 그 마음이 안타깝다. 그리고 내가 데리고 온 우석이는 걱정많이 했는데 정말 실험실 생활 잘하고 있고, 성호는 이제 앞으로 시작하는데 잘 해낼꺼라 믿는다. 그리고 동환이도 빨리 실험실 적응해

서 좋은 논문써내길 바란다. 그리고 용빈이 형은 노력도 많이 하시고, 머리도 좋으시니까 분명 좋은 논문 나오시리라 믿어 의심치 않습니다.

암튼 제가 이 논문을 마무리하는데 있어 가장 많은 지원과 신뢰를 해주신 부모님께 고개숙여 감사의 말을 드리고 싶습니다. 매일 새벽일찍 일어나 고생하시는 부모님께 앞으로는 이런 짐을 절대 지게 하지않겠습니다.

끝으로 부모님만큼 내가 사랑하는 정혜에게도 항상 옆에서 지켜주고 도와준 믿음과 사랑에 대한 감사의 말을 전하고 싶습니다.