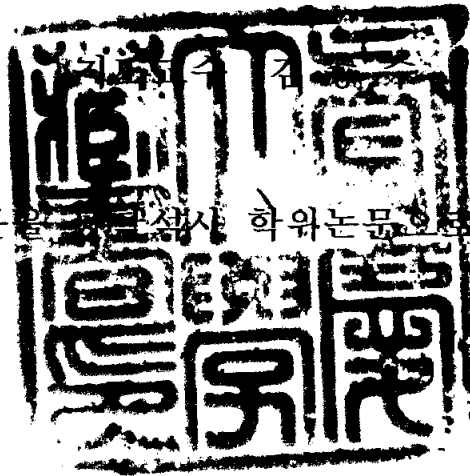


공학석사 학위논문

비루프 진동 세관형 히트파이프의 양단  
가열시 관내 유동 및 열전달 특성에  
관한 연구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2004년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

김 영 수

# 김영수의 공학 석사학위 논문을 인준함

2004年 2月

주 심 공학박사 김 영 수



위 원 공학박사 김 종 수



위 원 공학박사 김 은 필



# 목 차

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| ABSTRACT .....             | i   |
| Nomenclature .....         | iii |
| <br>                       |     |
| 1. 서론 .....                | 1   |
| 1.1 연구의 배경 .....           | 1   |
| 1.2 종래 연구 .....            | 4   |
| <br>                       |     |
| 2. 진동세관형 히트파이프 .....       | 5   |
| 2.1 진동 세관형 히트파이프의 원리 ..... | 5   |
| 2.2 작동 유체의 선정 .....        | 7   |
| <br>                       |     |
| 3. 실험장치 및 방법 .....         | 13  |
| 3.1 실험 장치 .....            | 13  |
| 3.2 실험 방법 .....            | 21  |
| <br>                       |     |
| 4. 실험 결과 및 고찰 .....        | 22  |

|                                         |    |
|-----------------------------------------|----|
| 4.1 내경 2mm 동관을 사용한 비루프 OCHP의 실험 .....   | 22 |
| 4.2 내경 2.8mm 동관을 사용한 비루프 OCHP의 실험 ..... | 36 |
| 5. 결론 .....                             | 56 |
| 참고 문헌 .....                             | 60 |

A Study of Heat Transfer Characteristics and Tube Inside  
Flow of Non-Looped Oscillating Capillary Tube Heat Pipe  
on the Heating Both Ends

Young-soo Kim

Department of Refrigeration Engineering,  
Graduate school,  
Pukyong National University

**ABSTRACT**

In this study, heat transfer characteristics and tube inside flow of non-looped OCHP(oscillating capillary tube heat pipe) under the condition of heating both ends was experienced. First test was to know the working possibility of the non-looped OCHP on the heating both ends. So, the non-looped OCHP with Urethan tube and copper tube was made to see the

inside flow. And another same size non-looped OCHP with copper tube was turned out to learn heat transfer characteristics. In the second test, three non-looped OCHP which has 60cm, 80cm and 160cm as channel length was applied. And their thermal characteristics were investigated.

Each test was conducted under the next conditions : Working fluid was Methnol, Charging ratios were 30%, 40% and 50%, inlet temperatures were 60°C, 70°C and 80°C, flow rate of water was 180kg/h.

First, we knew that working fluid of the non-looped OCHP was working well. And the OCHP with charged 40% was shown the highest temperature and efficient thermal conductivity. When it was charged 40% and water temperature was 80°C, the efficient thermal conductivity of the non-looped OCHP was about 38290 W/mK. And it was about 95 times higher than the thermal conductivity of pure copper.

Second, we knew the each non-looped OCHP with channel length 60, 80 and 160cm was well working by checking the temperatures of each part.

All of the OCHP had higher temperature distributions with charging 40% than 30% and 50%. And the OCHP with 160cm has shown the highest efficient thermal conductivity.

## *Nomenclature*

|       |                              |                                                     |
|-------|------------------------------|-----------------------------------------------------|
| $A$   | Area                         | $[\text{m}^2]$                                      |
| $C_p$ | Specific heat                | $[\text{KJ/kg}\cdot\text{K}]$                       |
| $m$   | Mass flow rate               | $[\text{kg/h}]$                                     |
| $Q$   | Heat transfer rate           | $[\text{W}]$                                        |
| $k$   | Thermal conductivity         | $[\text{W/m}\cdot\text{K}]$                         |
| $M_h$ | Merit number of heat pipe    | $[\text{kW/m}^2]$                                   |
| $M_t$ | Merit number of thermosyphon | $[\text{kWs}^{0.5}/\text{m}^2\cdot\text{C}^{0.75}]$ |
| $l$   | Length                       | $[\text{m}]$                                        |
| $D$   | Diameter                     | $[\text{m}]$                                        |
| $T$   | Temperatue                   | $[\text{C}]$                                        |

## *Greek symbols*

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

## *Subscripts*

cond Condensing part

eva     Evaporating part

i        Inlet

o        Outlet

w        Water

eff      Efficient

g        gas

l        liquid

# 1. 서 론

## 1.1 연구의 배경

오늘날 우리나라는 물론 전세계적으로 에너지 자원에 대한 부족과 환경보호에 대한 국제 협약으로 산업 구조의 개선과 변화가 요구되고 있으며 특히 비산유국이면서 에너지 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 우리나라의 경우, 에너지 사용량의 증가에 따른 에너지 절약의 필요성이 절실히 인식되고 있다. 이러한 이유에서 국내에서는 1990년대 초부터 열적 응답성이 뛰어난 히트파이프를 바닥 난방에 적용해 보려는 시도가 진행되었고, 최근에는 컴퓨터, 전자 통신장비 및 자동차 분야 등의 방열 및 냉각 기기로 히트파이프의 적용성이 매우 높게 평가되고 있다.

히트 파이프는 밀폐된 용기 내에서 작동 유체의 증발 및 응축을 연속적으로 행하여 잠열의 형태로서 열을 수송하는 열전달 기구(heat transfer device)이며, 그 대표적인 예로는 서머사이폰(thermosyphon), 워(wick)형 히트 파이프, 마이크로 히트 파이프(micro heat pipe) 및 드림 파이프(dream pipe) 등이 있으며, 그 각각이 이미 실용화되고 있다.

그러나, 서머사이폰은 응축된 액을 중력에 의해 증발부로 환원시켜야 하기 때문에 증발부(가열부)가 항상 응축부(냉각부) 아래에 있어야 하는 사용 조건에 제한이 있으며, 서머사이폰 및 워형 히트 파이프 모두, 앞서 언급한 설치

공간의 제약으로 인해 컴팩트화 측면에서 세관화가 요구되지만, 환경의 감소에 따른 열전달 한계가 있어 세관화가 어렵다. 물론 이러한 목적으로 마이크로 히트 파이프가 응용되고 있지만 제작이 어렵고, 이 또한 열수송량이 매우 작아서 대량의 열수송이 곤란하다.

이러한 요구에 부응되는 수송 기구로서, 진동 세관형 히트 파이프(Oscillating Capillary Tube Heat Pipe ; 이하 OCHP)에 대한 관심이 집중되고 있다. 진동 세관형 히트 파이프는 1987년 Akachi[1]에 의해 처음으로 제안되었으며, 이러한 진동 세관형 히트 파이프는 크게 루프형(Looped type) OCHP와 비루프형(Non looped type 또는 Closed-end) OCHP로 나뉜다.

OCHP는 긴 세관을 여러개의 U 턴(turn) 구조로 구성한 것으로, 열전달 메카니즘 측면에서 보면, 순환에 의한 열전달량은 기액의 진동에 의한 열전달에 비해 매우 작기 때문에 주된 열전달 기구는 기액 슬러그 유동의 증발 및 응축의 상변화에 의한 잠열 수송이다.

이러한 OCHP의 가장 큰 특징은 서펜타인(serpentine) 구조로 되어있으며 특히, 응축부에서 응축된 액을 증발부로 환류시키는 일을 사용하지 않는다. 또한, 그 형상은 매우 간단하고, 세관이기 때문에 유연성을 가지고 있으며, 고압에도 견딜 뿐만 아니라, 특히 일정 턴수 이상에서는 상부·수평·하부 가열 모드에서도 정상적인 작동이 가능하다. OCHP는 무엇보다도 저비용으로 제작이 가능하며, 제작공정도 매우 간단하다는 등의 장점을 가지고 있다.

현재까지는 주로 Loop-type OCHP가 많이 사용되는데, 이것은 전체가 하나

의 페루프로 형성된 구조로 내부의 작동유체가 어떤 한쪽 방향으로 계속해서 진행을 하므로 히트파이프 내부 작동유체의 유동이 전체적으로 균일하게 작동하는 장점이 있다. 그러나 페루프로 만들기 위해서 양쪽 끝단을 연결해야 하는 공정이 필요하므로 제작단가의 상승을 가져온다. 그에 반에 비루프형의 경우 작동유체의 봉입 후 간단히 용접에 의해 제작이 가능하다. 또한 제작 후에 형태의 자유로운 변형이 가능하므로, 운송 경비 역시 절감되리라 예상된다. 따라서 루프형 OCHP를 비루프형으로 대체할 경우 경제적 이익은 막대하리라 예상된다.

본 연구에서는 수평 가열 모드(경사각 : 0 degree)에서 비루프형 OCHP의 양끝단을 가열하였을 경우의 적동 가능여부와 OCHP 내부 작동 유체의 충전량에 따른 유동 특성 및 전열 특성을 파악하고, 채널의 길이가 각각 다른 세 가지의 비루프형 OCHP를 제작하여 그 성능 및 전열 특성을 파악하고자 한다.

## 1.2 종래 연구

비루프형 OCHP에 대한 연구는 유동 가시화를 통한 내부 이상 유동 양식에 관한 연구와 최대 전열량을 파악하기 위한 설계 및 운전 조건에 따른 열전달 특성에 관한 연구, 그리고 실험 결과를 기초로 한 해석적인 연구들이 보고되어지고 있다.

Achachi 등[1]은 사형 구조를 가진 진동형 히트 파이프가 핵비등으로부터 얻어진 구동력에 의한 자려 진동으로 웨이 없이도 작동 유체를 증발부에서 응축부로 이동시키며 열을 전달함을 알았다.

Srihajong 등[6]은 비루프 진동형 히트 파이프의 관내부 friction factor, 히트파이프 경사각과 열전달 성능과의 관계에 대해 연구하였으며, friction factor가 0.004, 경사각 50 degree에서 최대 열전달율을 나타낸다고 보고하였다.

Miyazaki 등[7]은 열유속 및 봉입량의 변화에 따른 열수송 성능과 압력 진동의 특성에 대한 연구에서 압력 진폭이 작을수록, 진동수가 클수록 최대의 열수송 능력을 나타낸다고 보고하였다.

Kim 등[8]은 증발부와 응축부 두 지점에 압력계를 설치하여, 내부 압력 진동과 열전달 특성 실험을 통해, 증발부와 응축부의 압력차, 압력 진동의 파형, 진동수 등과 열전달 성능과의 관계에 대하여 발표하였다.

## 2. 진동 세관형 히트 파이프

### 2.1 진동 세관형 히트 파이프의 원리

진동 세관형 히트 파이프는 워(wick)에 의한 증발부로의 작동액의 환원 없이, 유체의 진동에 의해 열을 수송하는 열전달 기구로, 그 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 되어있다.

기본적인 작동은 작동액 및 증기포의 불규칙적인 루프내 순환 또는 축방향 진동에 의한 것이며, 가열부에 주어진 열량만큼의 핵비등(nuclear boiling)을 일으키고, 핵비등에 의해 발생된 기포는 합쳐진 후 기액 슬러그류(slug flow)의 형태로 된다. 슬러그류는 압력파(pressure wave)를 발생시킴과 동시에 축방향 진동을 동반하는 유동으로 되어 순환하고, 증기의 기포가 대류열전달과 잠열수송을 한다.

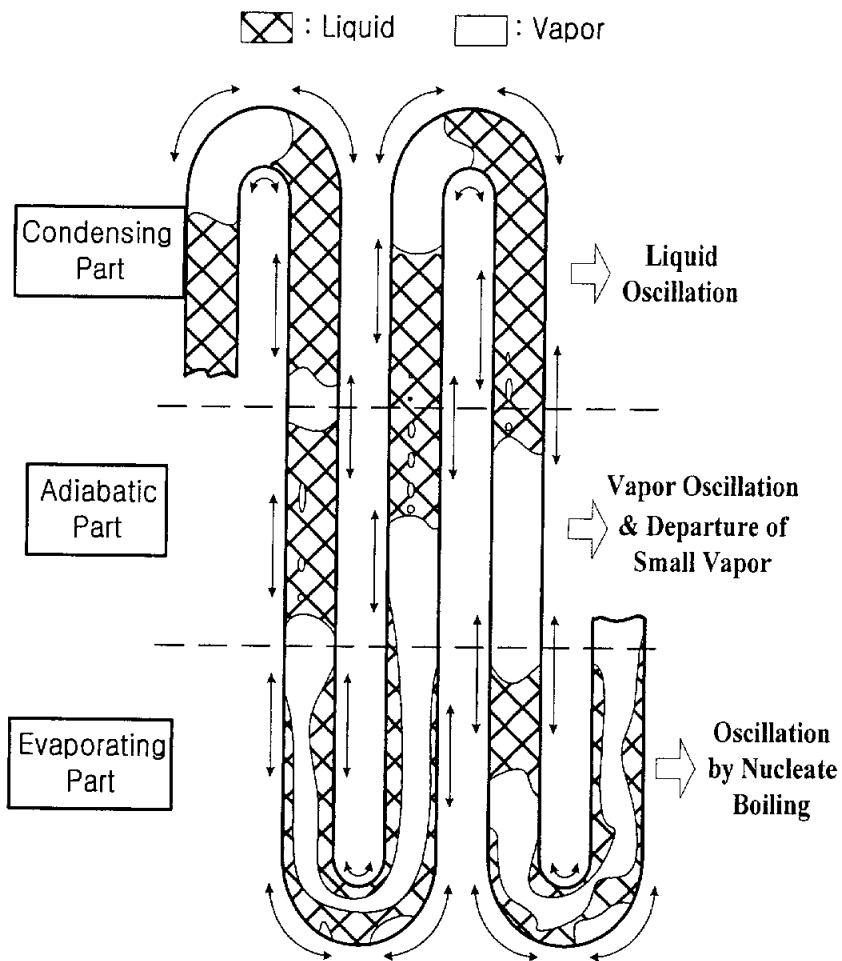


Fig. 2.1 Basic concept of Oscillating Capillary Heat Pipe

## 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 히트 파이프 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. 히트 파이프의 경우는 식 (2. 1)과 같으며,

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

써모사이폰의 경우는 식 (2. 2)과 같다.

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

그러나 기존의 Merit number는 워형 히트파이프나 써머사이폰의 경우에 적용이 가능하도록 각각 제시되어 있으며 진동 세관형 히트 파이프에 적용할 수 있는 기준이 아직까지는 명확하게 정립되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 저온용(150~750k)으로 사용되어지는 작동 유체 중에서 열적, 물리적으로 안정 상태에 있으며, 시험부의 재료인 스텐레스관과 알루미늄에 화학적 반응을 보이지 않으며, 환경 특히 오존층에 영향을 미치지 않는 Methnol을 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 작동 유체와 재료 용기와의 친화성을 나타낸 것이다.

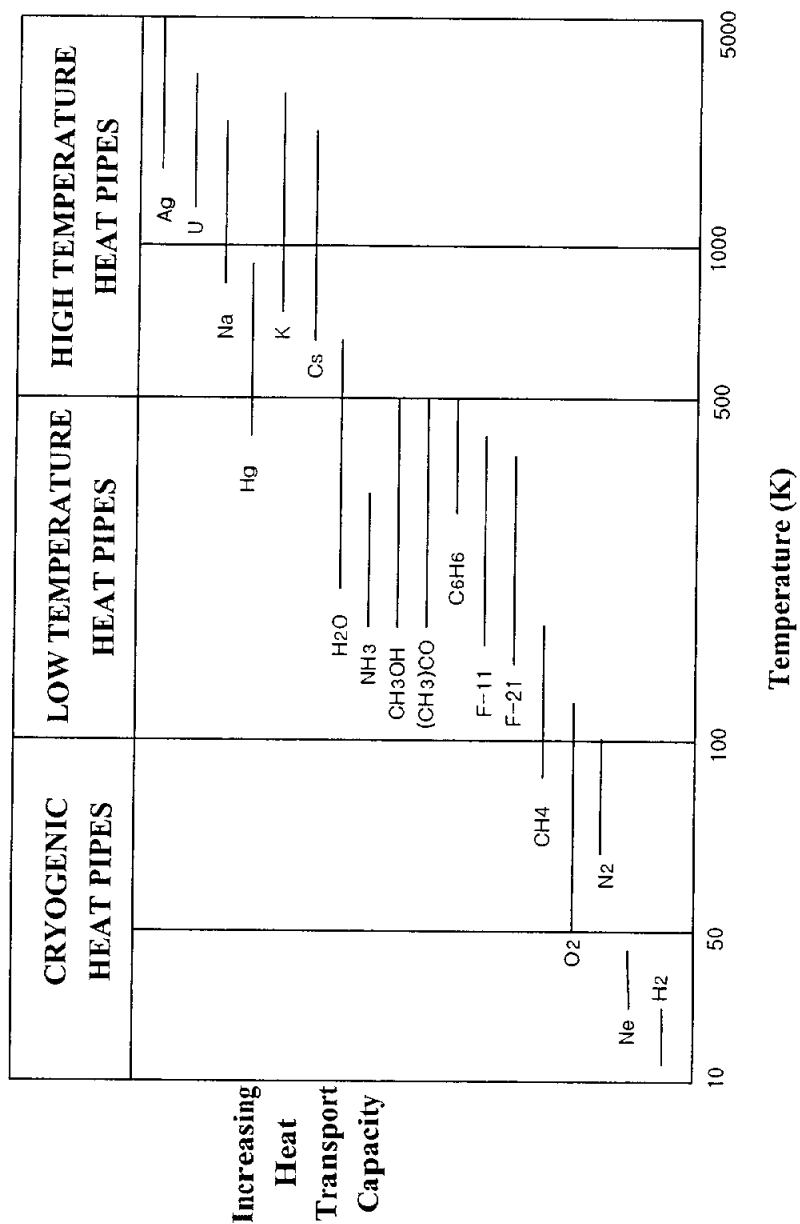


Fig. 2.2 Possible working temperature range of various  
heat pipe working fluid

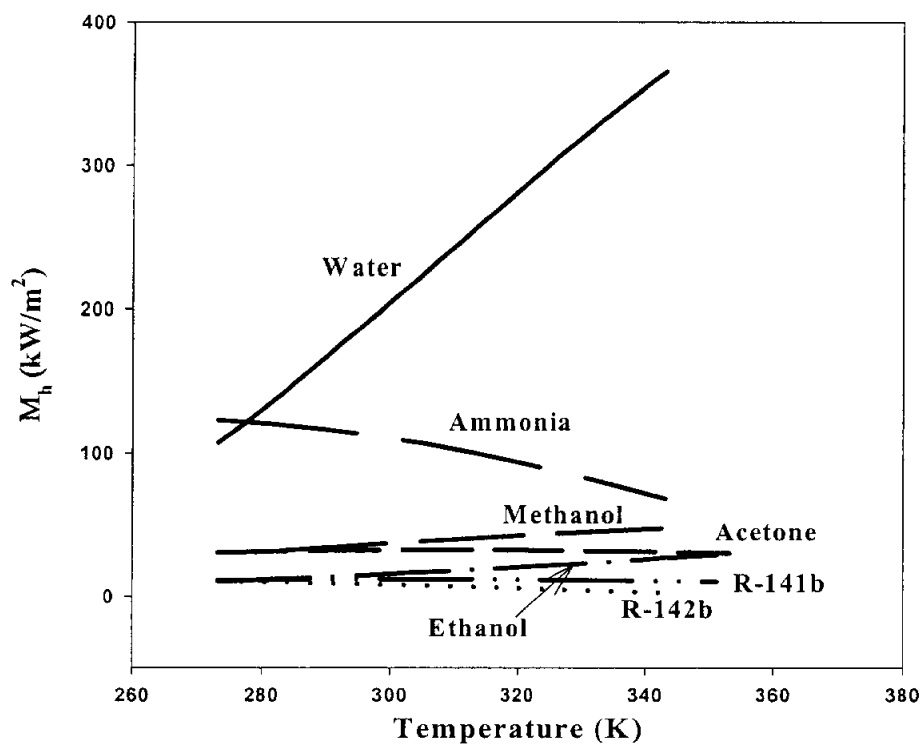


Fig. 2.3 Merit number of selected working fluids for heat pipe

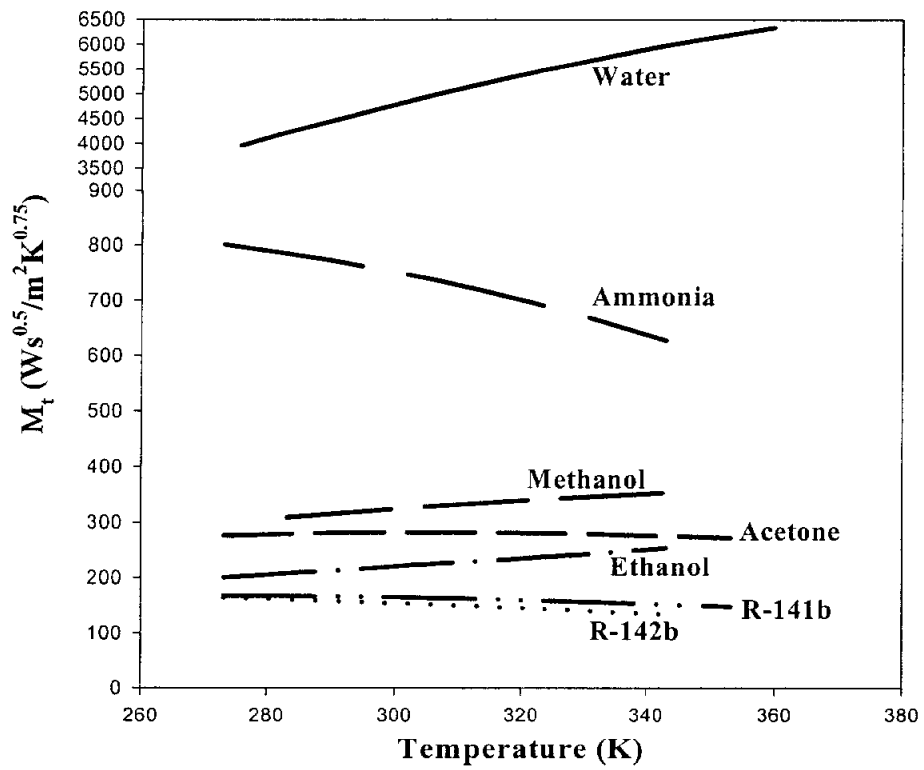


Fig. 2. 4 Merit number of selected working fluids for thermosyphon

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                      |                                                         |

### 3. 실험 장치 및 실험 방법

#### 3.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도를 Fig. 3.1에 나타내었다. 실험 장치는 진동 세관형 히트파이프, 항온조, 데이터 처리 시스템으로 구성되어 있으며, 유동 특성을 관찰하기 위하여 디지털 캠코더를 사용하여 촬영하였다.

열전달 및 유동 특성을 파악하기 위해 사용된 진동 세관형 히트파이프의 시험부는 흡이 파진 길이 85cm의 수배관에 외경 3.0mm, 내경 2.0mm인 동관을 Fig. 3.2 (b)와 같이 각각의 사행 채널의 폭을 3cm로 되게 한 28채널의 비루프형 OCHP이다. 수배관의 흡에 삽입후 납으로 용접한 것과 Fig. 3.2 (a)와 같이 동일한 동관과 외경 4mm, 내경 2mm인 우레탄 관을 함께 사용한 것의 두 가지를 제작하였다. 또한 채널의 길이 변화에 따른 진동 세관형 히트파이프의 전열 성능을 알아보기 위하여 Fig. 3.3과 같이 길이 170cm인 수배관에 채널 길이를 60cm, 80cm, 160cm의 3가지로 하여, 외경 4.0mm, 내경 2.8mm인 동관으로 34채널로 제작하였다.

진동 세관형 히트파이프는 작동 유체를 작동 유체를 충전하기에 앞서, 내부를 Photo 3.2의 로터리 펌프(RP)와 디퓨저 펌프(DP)로 이루어진 고진공 시스템으로  $5.0 \times 10^{-5}$  torr까지 진공 시켰고, 작동 유체의 정확한 충전을 위하여 Photo 3.3과 같은 10ml 충전 실린더(HGC-10, Taiatsu) 및 90ml 충전 실린더(HGC-96, Taiatsu)를 사용하였으며, 작동 유체로는 순도 99.9 %의 Methanol

을 사용하여, 히트파이프 내부 체적의 30~50 %(Vol.)로 충전하였다.

순환온수의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 항온조를 사용하였으며, 온도 측정 장치로는 Yokogawa 사의 DR-230 Hybrid Recorder를 사용하였다. 또한 온도 센서로는 T-type 열전대를 사용하였다.

또한, 히트 파이프 내부의 유동 촬영을 위하여 Sony사의 DCR-VX2000 캠 코더를 사용하였다.

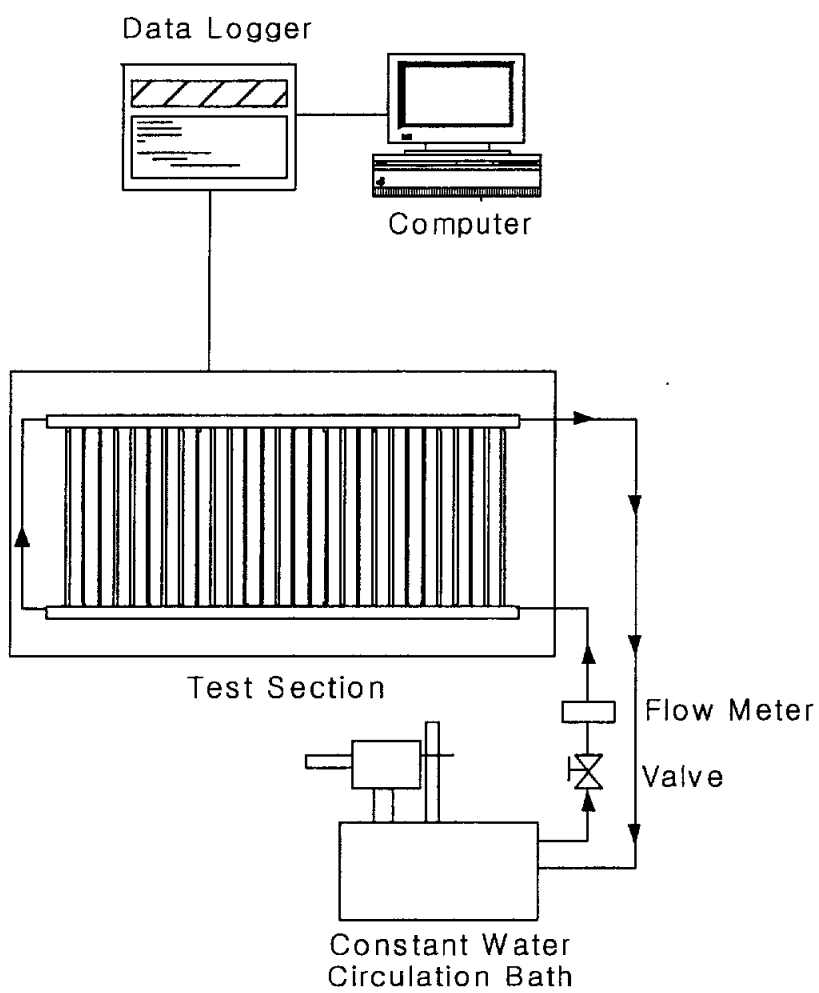
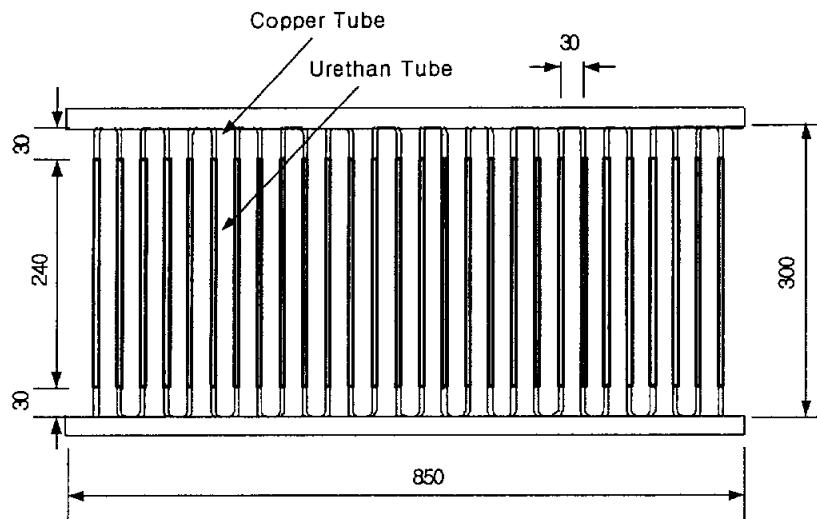
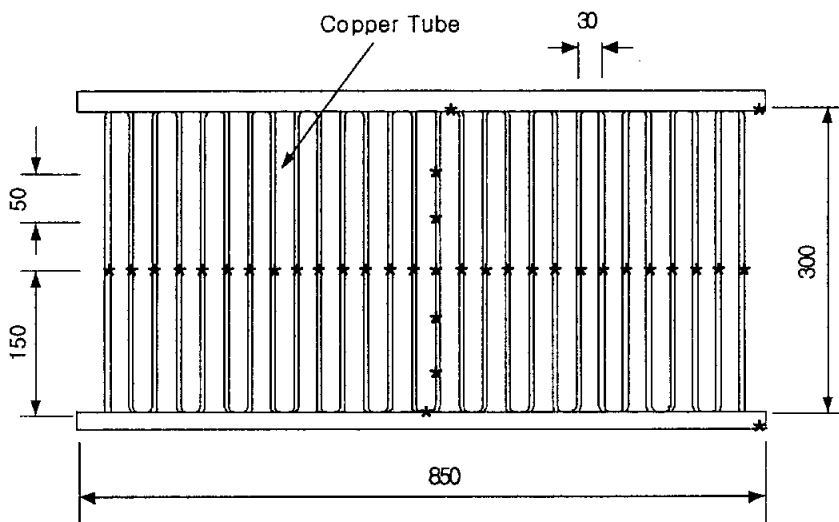


Fig. 3.1 Schematic diagram of experimental apparatus



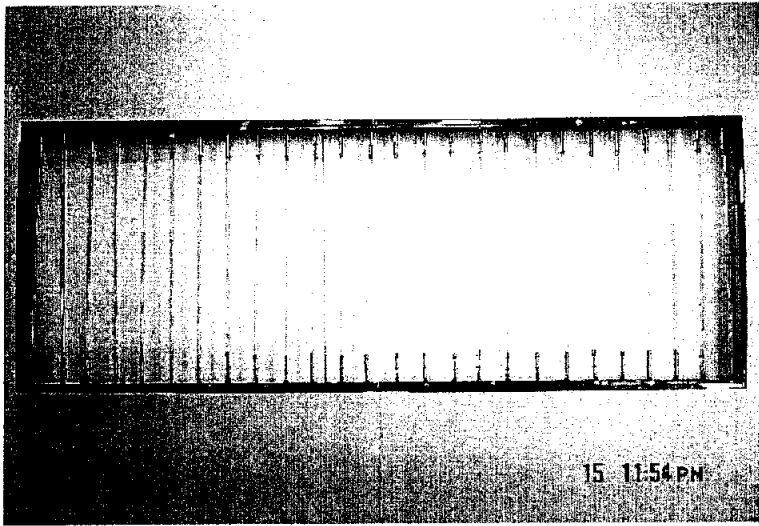
(a) Copper & Urethan tube(ID : 2mm)



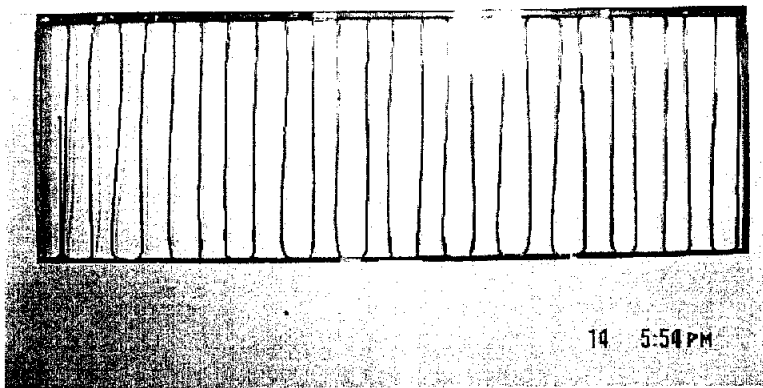
\* Temperature Measurement

(b) Copper tube(ID : 2mm)

Fig. 3.2 Schematic diagram of test section

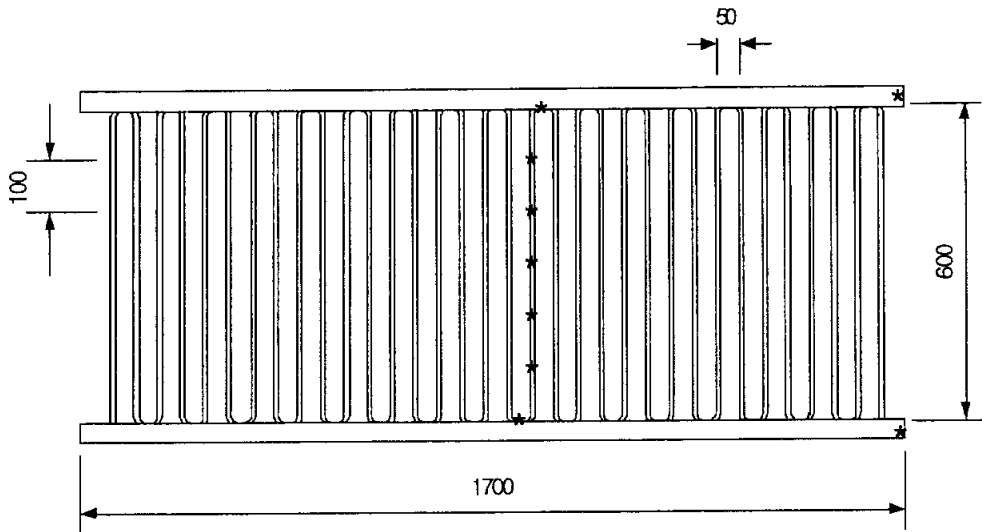


(a) Copper & Urethan tube(ID : 2mm)

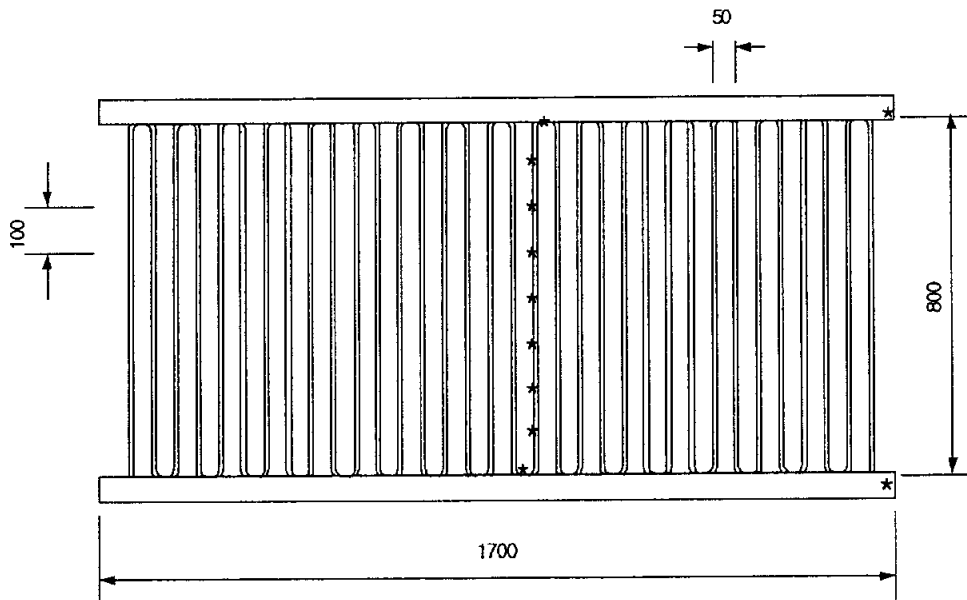


(b) Copper tube(ID : 2.0mm, OD : 3.0mm)

Photo 3.1 Photograph of test section

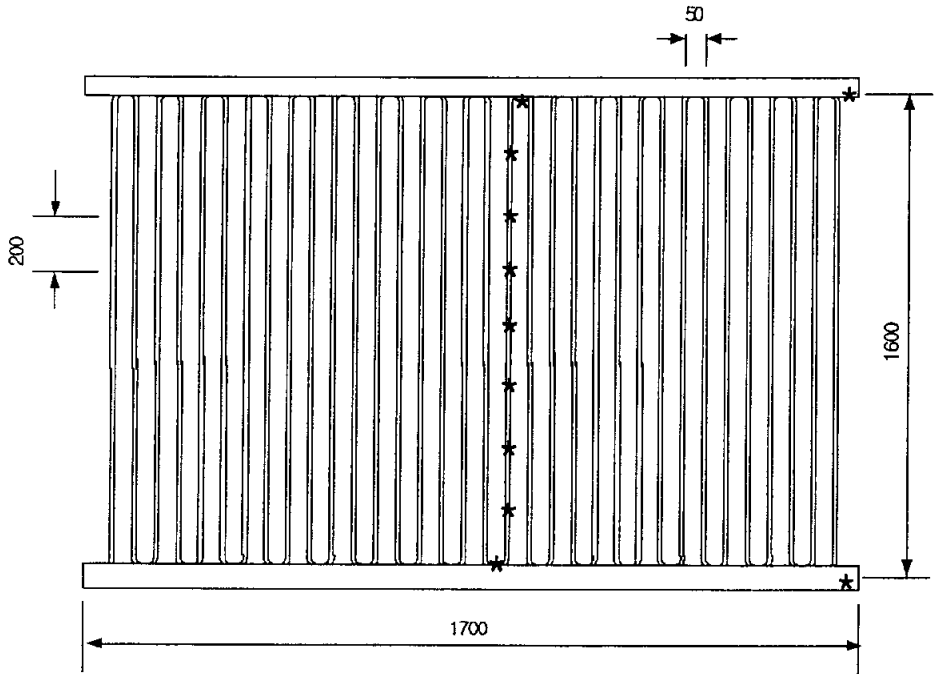


(a) Length : 60cm Copper tube(ID : 2.8mm, OD : 4.0mm)



\* Temperature Measurement

(b) Length : 80cm Copper tube(ID : 2.8mm, OD : 4.0mm)



\* Temperature Measurement

(c) Length : 160cm Copper tube(ID : 2.8mm, OD : 4.0mm)

Fig. 3.3 Schematic diagram of test section

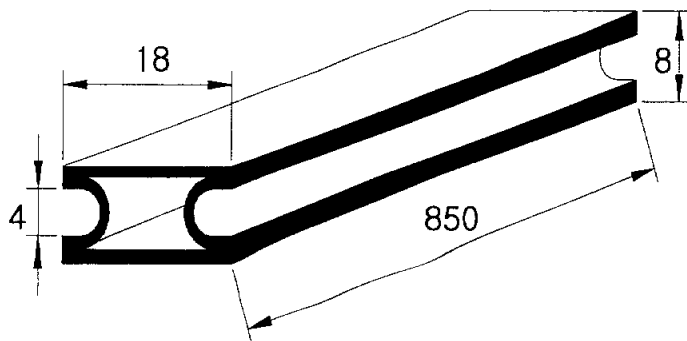


Fig. 3.4 Schematic diagram of hot water pipe line

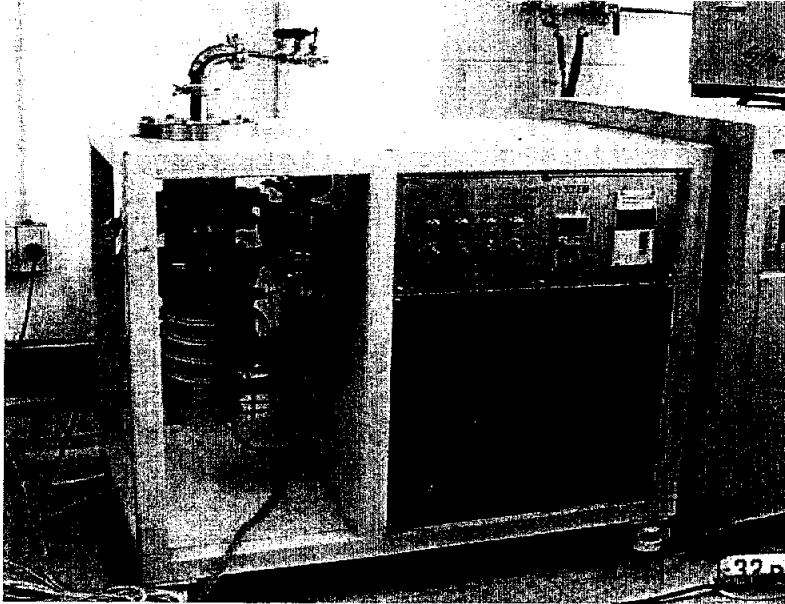


Photo. 3.2 Photograph of high vacuum system

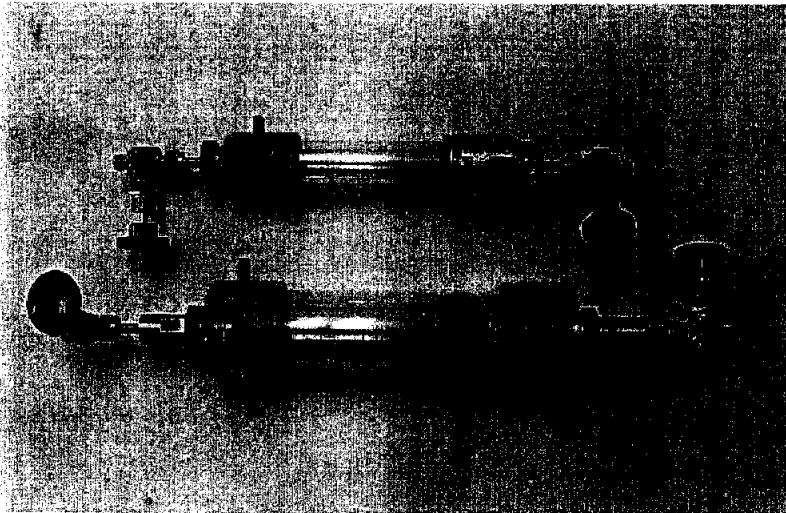


Photo. 3.3 Photograph of charging cylinder

### 3.2 실험 방법

비루프형 OCHP의 작동 유체로 Merit Num. 등을 통해 실험 조건을 가장 만족시키는 Methanol로 선정하였고, OCHP 내부의 작동 유체 충전량에 대한 영향을 알아보기 위해 30%, 40%, 50%(Vol.)로 충전량을 변화시켰으며, 항온 순환 수조를 이용하여 온수 온도를 60℃, 70℃, 80℃하였고, 유량은 180kg/h로 유지시켰다. Fig. 3.2, Fig. 3.3에서와 같이 온수의 입, 출구 온도를 측정하기 위해 각각의 시험부의 입, 출구 측에 T-type 열전대를 1개씩 부착하였고, 또한 채널의 축방향으로의 온도 분포를 측정하기 위해 OCHP의 표면에도 T-type 열전대를 부착하였다. 특히 내경 2mm 동관을 사용한 OCHP의 경우 Fig.3.2 (b)에서와 나타낸 것과 같이 각각의 채널의 온도 분포를 측정하기 위해 채널의 중앙(응축부)에 각각 T-type 열전대를 부착하였다. 시험부의 하단부는 외부로의 열손실을 막기 위해 단열재로 충분히 단열하였으며, 수배관의 상단부는 에어로플렉스(열전도율 0.036 W/mK at 20℃)를 사용하여 단열하였다. 열전대로부터 얻어진 데이터의 처리는 YOKOGAWA사의 DR230 계측 시스템과 컴퓨터를 이용하여 처리하였다. Fig. 3.1 (a)의 시험부의 경우 동일한 조건에서 실험을 하였으나, 우레탄 관을 사용하여, 실제 히트파이프의 성능과는 다소 상이할 것으로 판단되어 열전대를 사용한 온도의 측정은 수행하지 않았으며, Sony사의 DCR-VX2000 캠코더를 사용하여 유동 변화를 촬영하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 내경 2mm 동관을 사용한 OCHP의 실험

비루프형 OCHP의 유동 현상을 알아보기 위해 Fig. 3.1 (a)에서 나타낸 시험부를 사용하여 충전량과 온수온도를 변화시켜 실험한 결과 Photo. 4.1에서와 같이 비루프형 OCHP의 중앙부분에서는 우레탄 튜브 내의 작동 유체는 각 채널의 양끝단(증발부) 사이를 매우 빠르게 왕복 순환하는 것으로 나타났다. 그러나, 양쪽 가장자리에서는 Photo. 4.2에서와 같이 중앙 부분에 비해 매우 느린 유동을 보였으며, 최외곽의 튜브 내에서는 액의 정체가 나타났다. 이로써 양끝단을 가열한 경우에도 비루프 OCHP의 특성상 중앙 부분은 매우 원활하게 작동하나 가장자리 부분은 원활히 작동하지 않음을 알 수 있었다.

비루프형 OCHP의 구배가 없는(0 degree) 상태에서 양끝단을 가열한 경우, OCHP의 내부 봉입량(30%, 40%, 50%) 및 온수 온도(60℃, 70℃, 80℃)에 따른 전열 특성을 알아보기 위해 온수를 180 kg/h로 일정하게 유지시킨 상태에서 OCHP의 증발부로부터 응축부까지의 각각의 온도 측정 지점의 시간에 따른 온도변화를 Fig. 4.1 ~ Fig. 4.3에 나타내었고, 각각의 조건에서 측정 지점의 평균 온도를 Fig. 4.4에 나타내었다. 순환수 온도를 60℃로 하였을 경우 (Fig. 4.1), Methanol을 40% 봉입한 OCHP의 경우, 온도 분포는 대부분 55℃ ~ 60℃ 사이로 각각의 지점에서 온도 변화가 크지 않았다. 그러나 30%와

50%의 경우에는 온도변화의 폭이 40%에 비해 컸으며, 온도의 분포도 약 50℃ ~ 65℃ 까지로 40%에 비해 다소 낮게 나타났다. 순환수 온도를 70℃, 80℃로 하였을 때에는 대체로 각각의 지점에서 온도 변화의 폭이 크지 않았다.;

또한 Fig. 4.4에서와 같이 증발부(0cm, 30cm 지점)에서 응축부(15cm 지점)로 갈 수록 온도가 감소하였으며, 40%를 충전한 경우 온도의 구배가 적었고, 온도의 분포 또한 30%, 50%를 충전한 OCHP에 비해 높게 나타났다.

비루프형 OCHP 전체의 온도 분포를 알아 보기 위해 28개 채널 각각의 응축부(15cm 지점)의 온도를 측정한 것을 Fig. 4.4 ~Fig. 4.6에 나타내었다. 30%를 차징한 경우 대체로 16번째 채널 이후로 급격한 온도의 감소를 나타내고 있으며, 50%를 차징한 것 또한 30%보다는 높으나 16번째 채널 이후로 온도의 감소를 나타내고 있다. 40%를 차징한 OCHP의 경우 3번째 채널에서 24번째 채널까지 거의 균일하고 높은 온도 분포를 나타내고 있다.

일반적으로 진동형 히트파이프의 성능을 나타내는 지수로 유효열전도율을 사용한다. 유효열전도율은 열전달에서 고체의 열전도율에 상응하는 물성치이다. 진동 세관형 히트파이프는 내부 작동 유체의 현열 및 잠열 수송과 자체 재질을 통한 열전도에 의해 열전달이 일어나지만 열전도에 의한 열전달은 작동 유체에 의한 열전달을 모두 작동유체에 의해 일어난다고 가정하고 고체에서의 전도도의 개념을 도입한 것이 유효 열전도율이다.

유효 열전도율을 계산하는 식은 (4.1)과 같다.

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

$l$  : 증발부와 응축부 사이의 평균 거리

$Q$  : 증발부에서 응축부로 전달되는 열량

$A_c$  : 작동 유체가 흐르는 유로 단면적의 합

$T_{eva} - T_{cond}$  : 증발부와 응축부의 온도차

또한, 식 (4.1)의  $Q$ 는 다음의 식 (4.2)로 계산하여 구할 수 있다.

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_{w,i} - T_{w,o}) \quad (4.2)$$

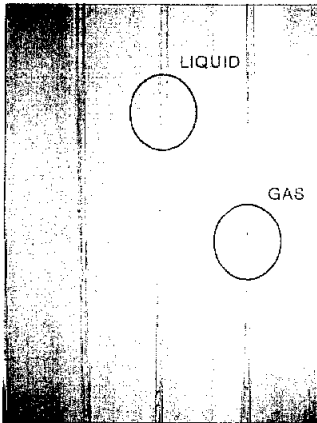
$m$  : 순환 수조의 유량

$c_p$  : 물의 비열

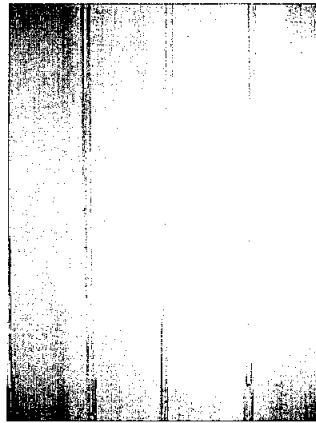
$T_{w,i} - T_{w,o}$  : 시험부 입, 출구의 온도차

(단, 수배관 사각관은 충분히 단열을 하였으므로 수배관으로의 열손실은 없는 것으로 한다.)

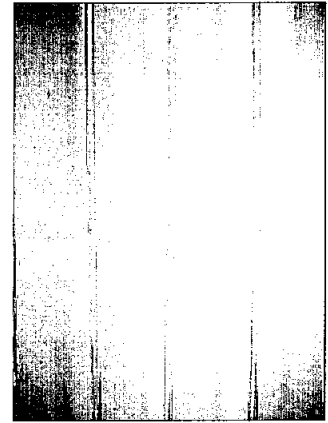
Fig. 4.8에 나타난 것과 같이 유효열전도율은 순환 수온이 높을 수록 높게 나타났으며, 40%를 충전한 OCHP가 30%, 50% 보다 훨씬 높은 유효열전도율을 나타냈다. Methanol 충전량 40%, 순환 수온 80℃에서 유효열전도율은 약 38290 W/mK 으로 나타났다.



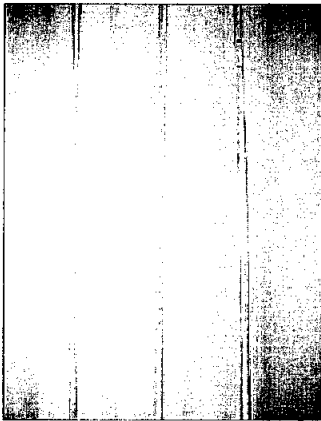
(a) 0 (sec)



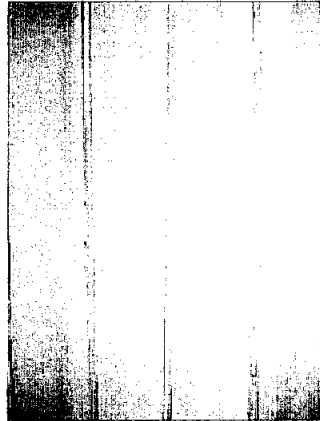
(b) 1/30 sec



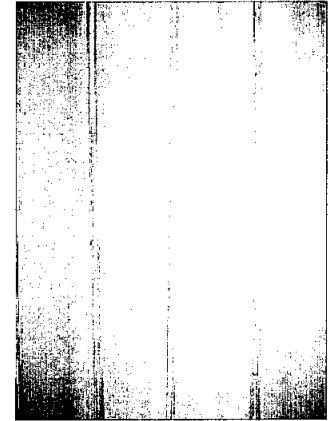
(c) 2/30 (sec)



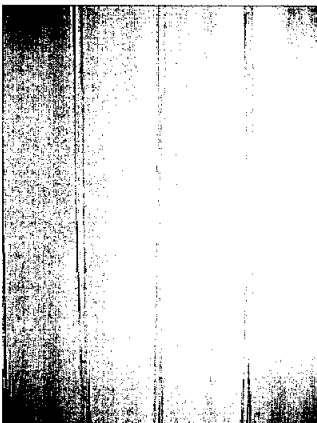
(d) 3/30 (sec)



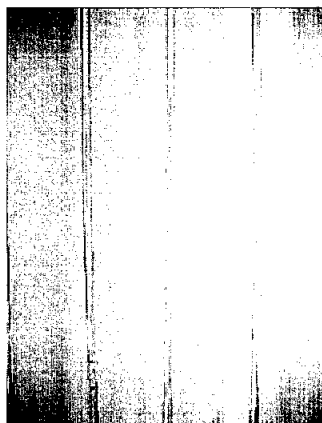
(e) 4/30 sec



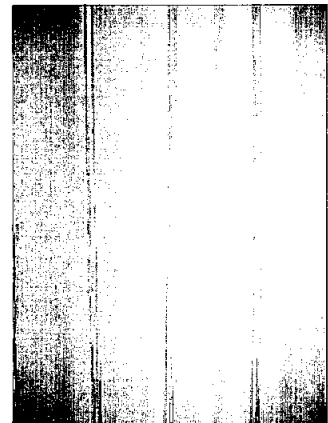
(f) 5/30 (sec)



(g) 6/30 (sec)

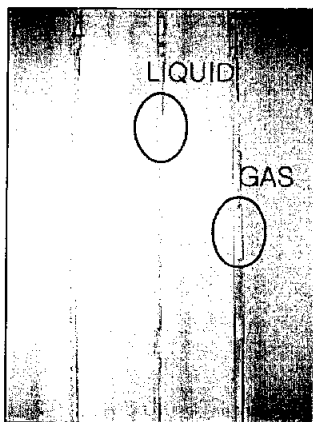


(h) 7/30 sec

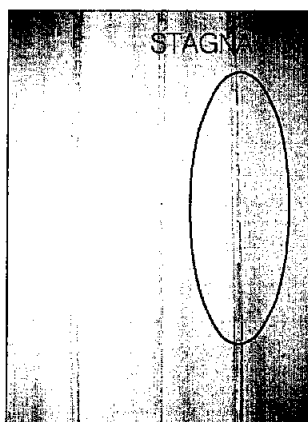


(i) 8/30 (sec)

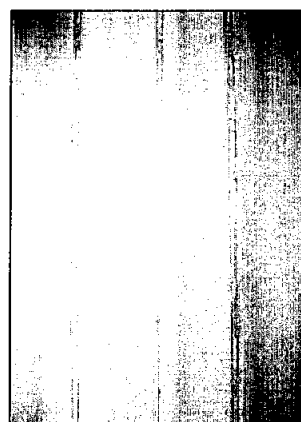
Photo. 4.1 Movement of working fluid inside the OCHP (Middle Part)



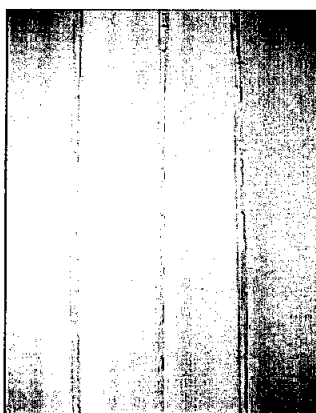
(a) 0/30 (sec)



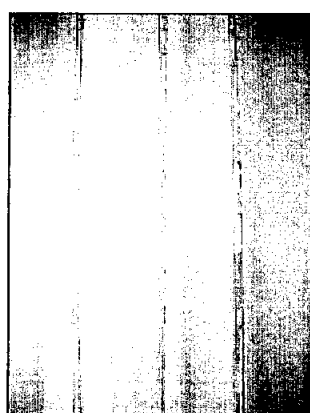
(b) 1/30 (sec)



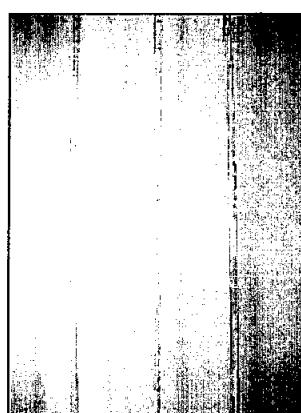
(c) 2/30 (sec)



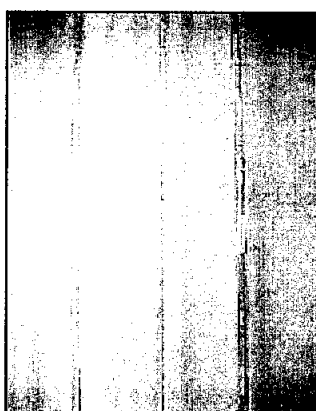
(d) 3/30 (sec)



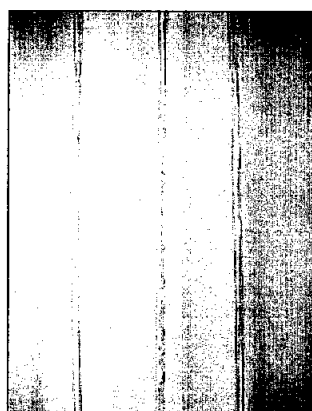
(e) 4/30 (sec)



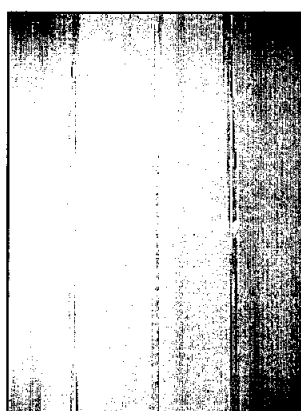
(f) 5/30 (sec)



(g) 6/30 (sec)

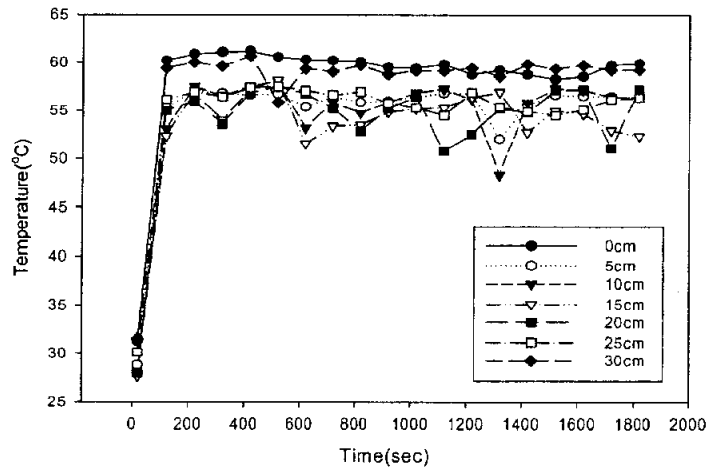


(h) 7/30 (sec)

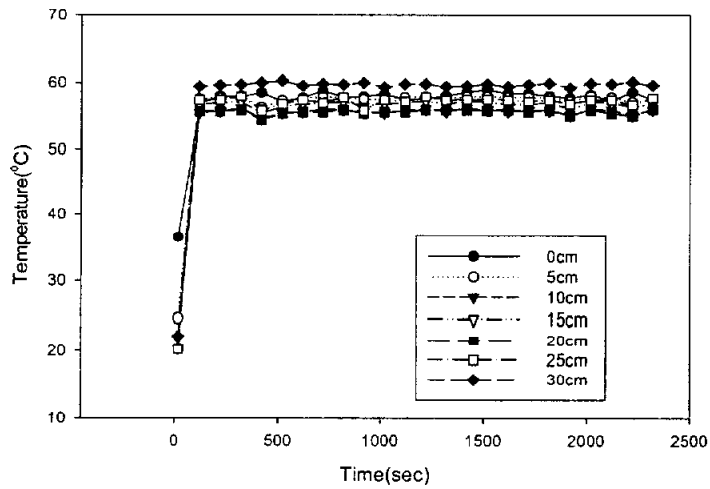


(i) 8/30 (sec)

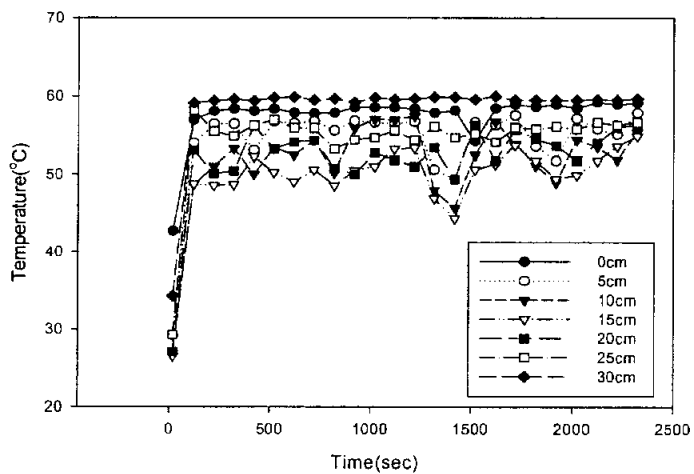
Photo. 4.2 Movement of working fluid inside the OCHP (Edge Part)



(a) Charging ratio : 30%



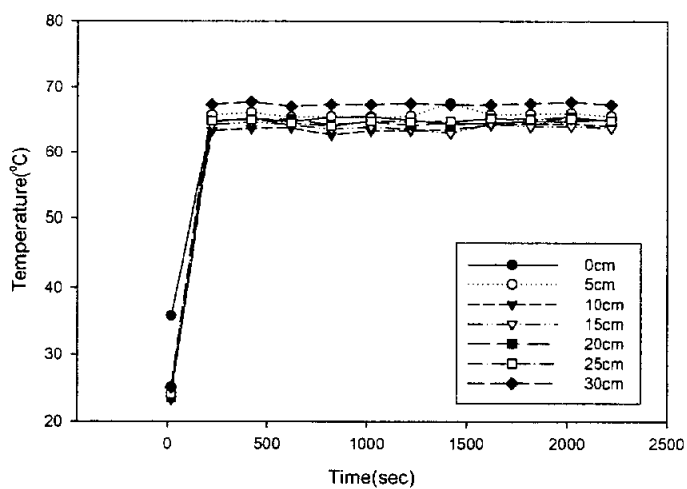
(b) Charging ratio : 40%



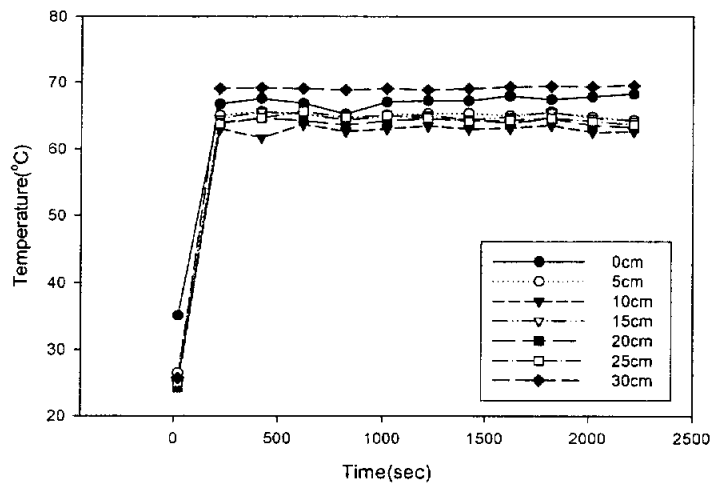
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.1 Variation of surface temperature of OCHP with time I

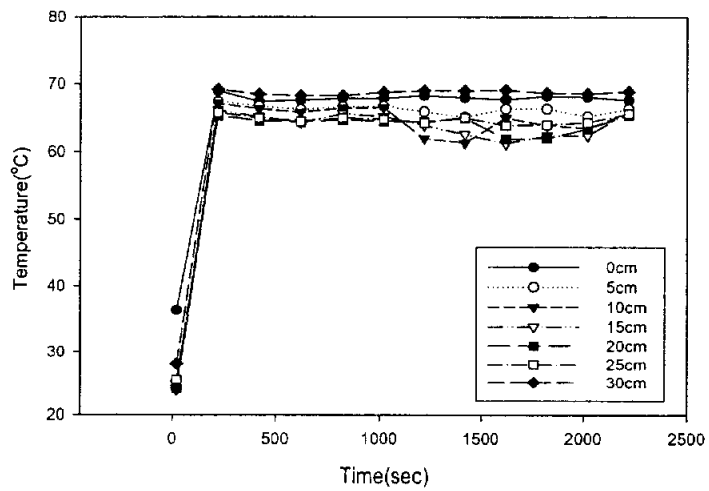
(Inlet temperature : 60°C)



(a) Charging ratio : 30%



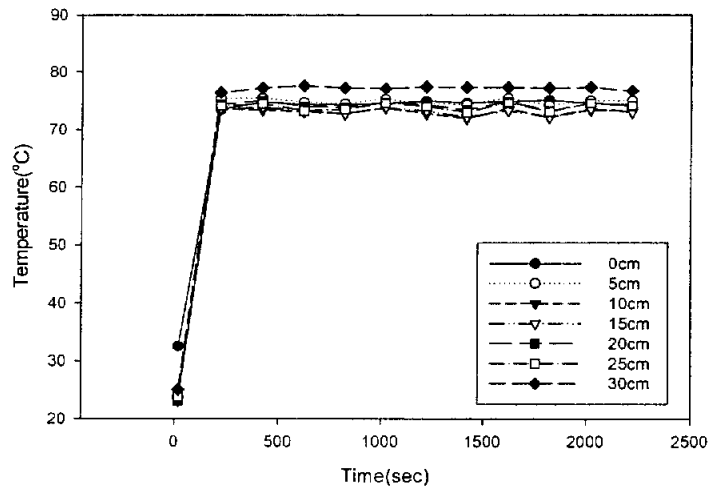
(b) Charging ratio : 40%



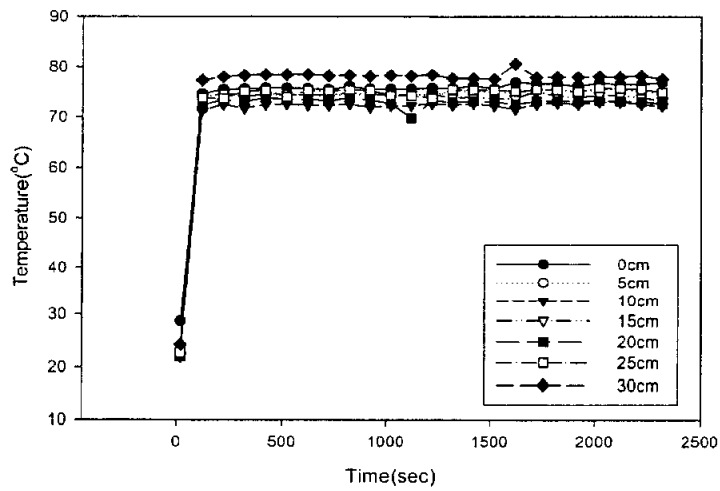
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.2 Variation of surface temperature of OCHP with time

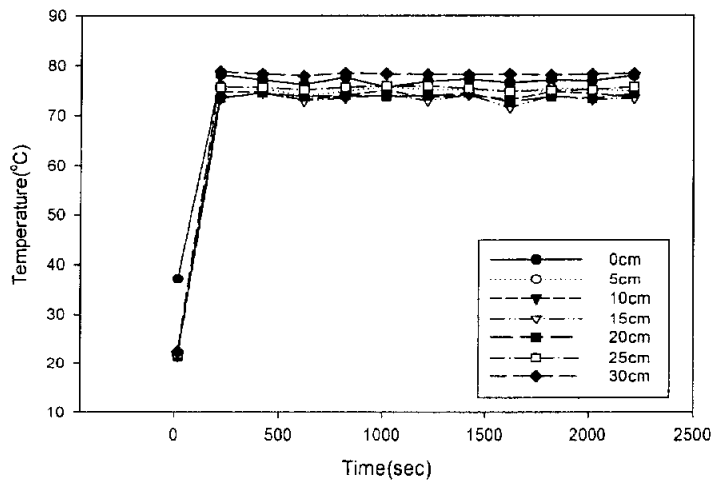
(Inlet temperature : 70°C)



(a) Charging ratio : 30%



(b) Charging ratio : 40%



(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.3 Variation of surface temperature of OCHP with time  
(Inlet temperature : 80°C)

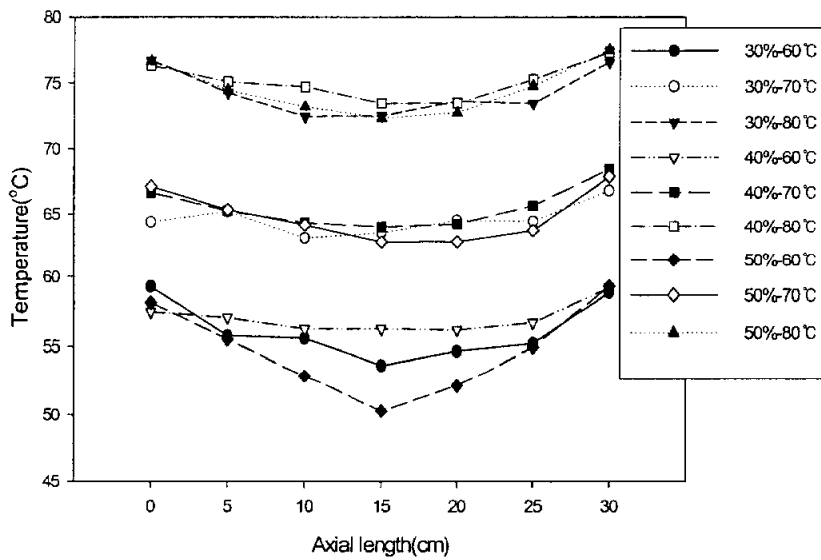


Fig. 4.4 Mean temperature of OCHP surface according to each condition

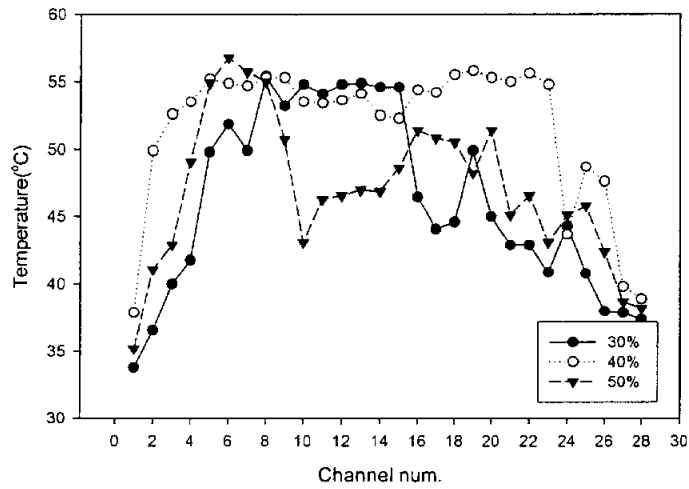


Fig. 4.5 Surface mean temperature of the middle of each channel

(Inlet temperature : 60°C)

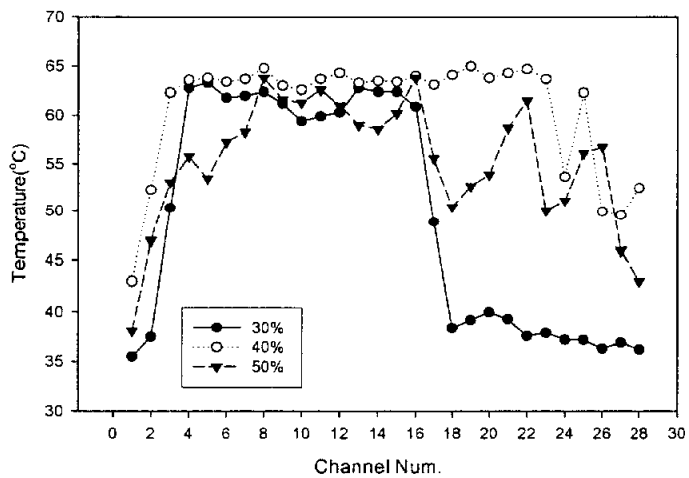


Fig. 4.6 Surface mean temperature of the middle of each channel

(Inlet temperature : 70°C)

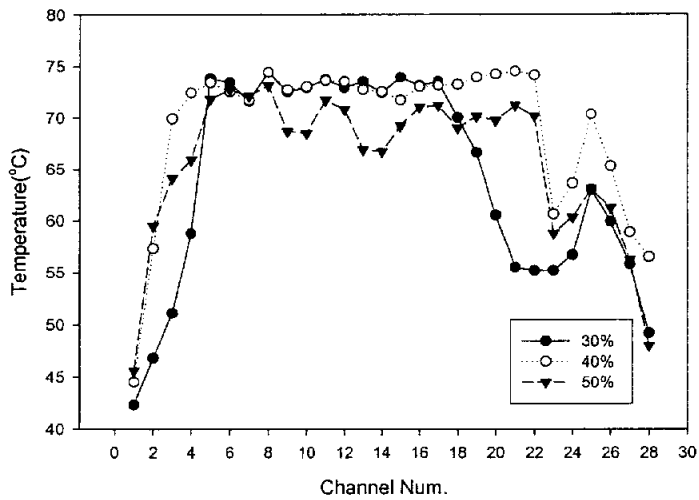


Fig. 4.7 Surface mean temperature of the middle of each channel

(Inlet temperature : 80°C)

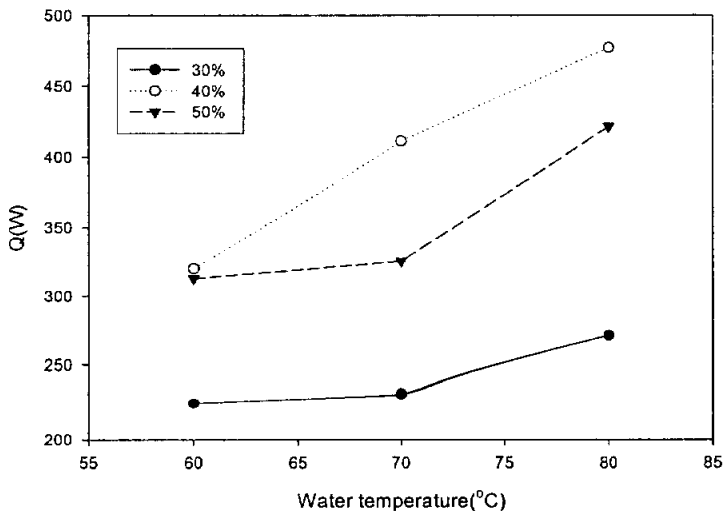


Fig. 4.8 Variation of heat transfer rate according to charging ratio

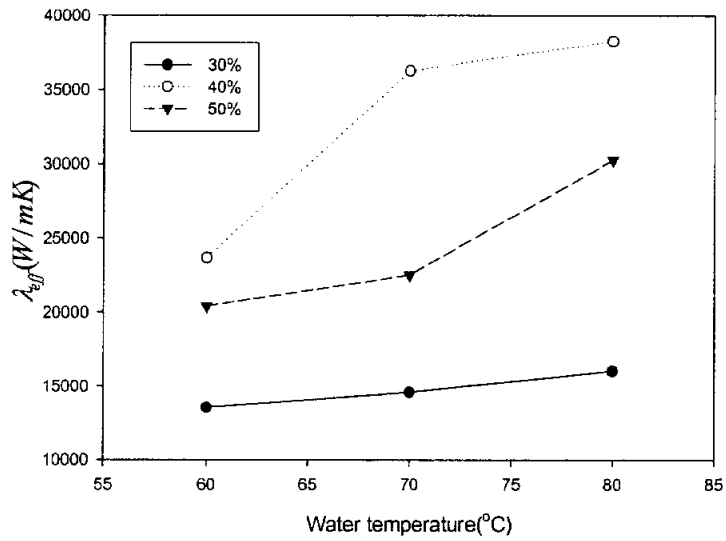
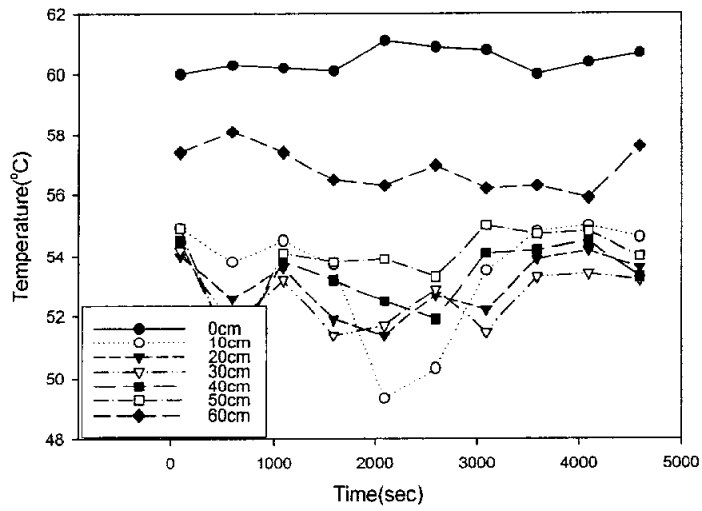


Fig. 4.9 Variation of efficient thermal conductivity according to charging ratio

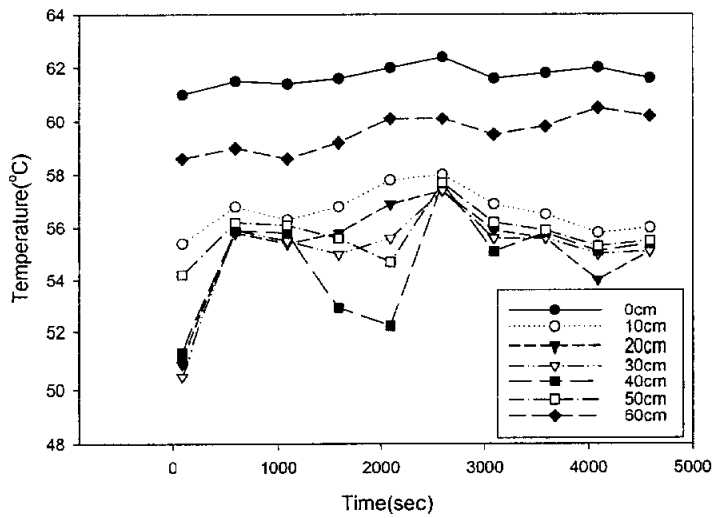
## 4.2 내경 2.8mm 동관을 사용한 OCHP의 실험

비루프 OCHP의 양끝단을 가열하였을 경우, 채널의 길이 변화에 따른 OCHP의 작동 여부와 전열 특성을 파악하기 위하여 Fig. 3.3에 나타낸 것과 같이 채널의 길이를 각각 60cm, 80cm, 160cm로 하여 제작하였다. 각각의 시험부에 사용된 동관은 내경 2.8mm이며, 앞선 실험에서와 같이 내부 봉입량(30%, 40%, 50%) 및 온수 온도(60℃, 70℃, 80℃)에 따른 성능을 알아보기 위해 온수를 180 kg/h로 일정하게 유지시킨 상태에서 OCHP의 증발부로부터 응축부까지의 각각의 온도 측정 지점의 시간에 따른 온도변화와 채널의 길이 방향의 온도 변화를 Fig. 4.10 ~ Fig. 4.22에 나타내었다. Fig. 4.14, Fig. 4.18, Fig. 4.22에서 나타내는 것과 같이 Methanol을 40% 충전한 OCHP가 60cm, 80cm, 160cm 모두에서 30%, 50%를 충전한 경우보다 온도 분포가 높게 나타났다. 또한 채널의 길이를 60cm, 80cm, 160cm로 제작한 각각의 비루프형 OCHP는 매우 잘 작동하고 있음을 알 수 있었다. 또한 기존의 루프형 OCHP와의 비교 그래프를 Fig. 4.13에 나타내었다. 루프형의 경우 응축부에서 증발부까지의 채널의 길이가 35cm인 OCHP이므로, 본 실험에서는 채널의 길이가 60cm인 비루프 OCHP와 비교를 하였다. 비교 결과 원활히 작동하는 중앙 부분에서는 루프형과 비루프형의 온도 분포는 거의 비슷하게 나타났다. 따라서 가장자리 부분을 제외한 부분에서는 루프형과 비루프형의 열전달율은 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. Fig. 4.23에 각각의 OCHP의 작동 유체 충전율에 대

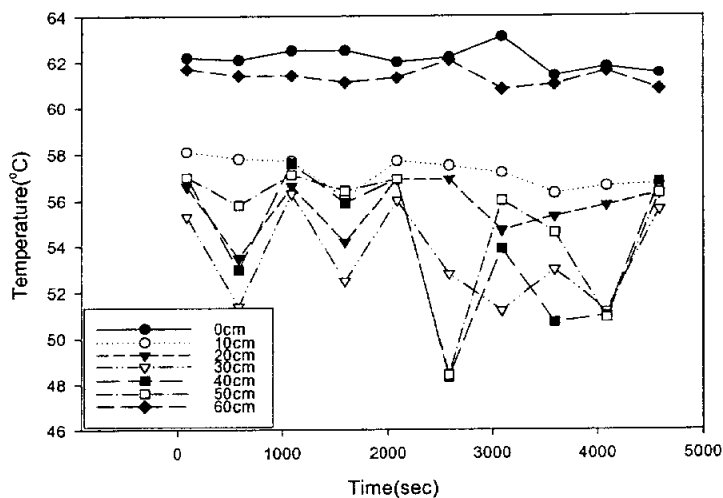
한 유효열전도율을 나타내었다. 3가지 시험부 모두에서 40%를 충전한 경우가 가장 높은 유효열전도율을 보이고 있으며, 특히 채널 길이를 160cm로 제작한 OCHP의 경우 월등히 높은 유효열전도율을 나타낸다. 이는 식 (4.1)의 유효열전도율 계산식에서 나타내는 것과 같이 160cm 채널의 경우 응축부까지의 길이가 80cm로 다른 OCHP에 비해 월등히 크나, 응축부의 온도 구배는 그에 비해 작기 때문인 것으로 생각된다.



(a) Charging ratio : 30%

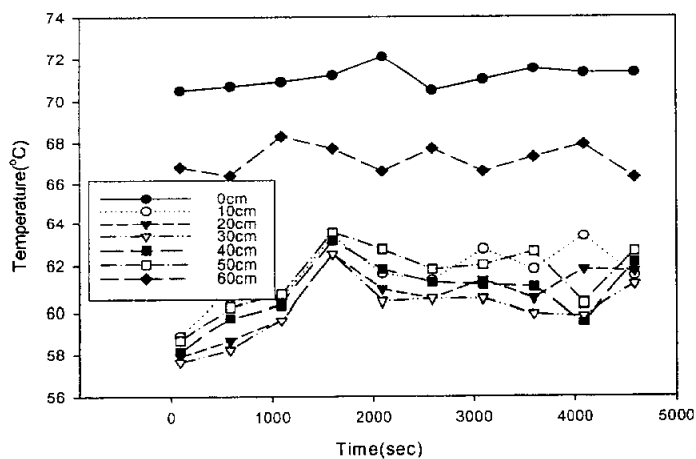


(b) Charging ratio : 40%

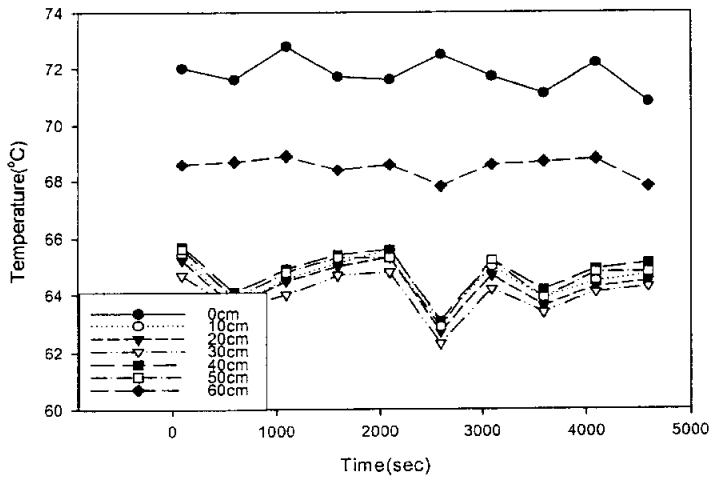


(c) Charging ratio : 50%

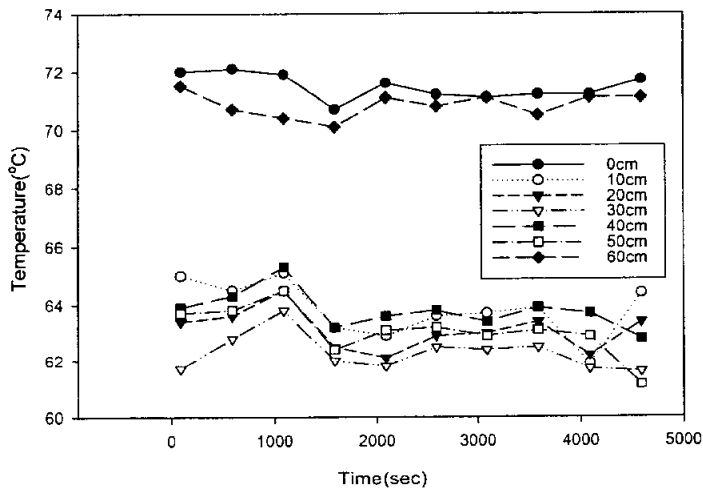
Fig. 4.10 Variation of surface temperature of OCHP with time |  
(Inlet temperature : 60°C, Axial length : 60cm)



(a) Charging ratio : 30%



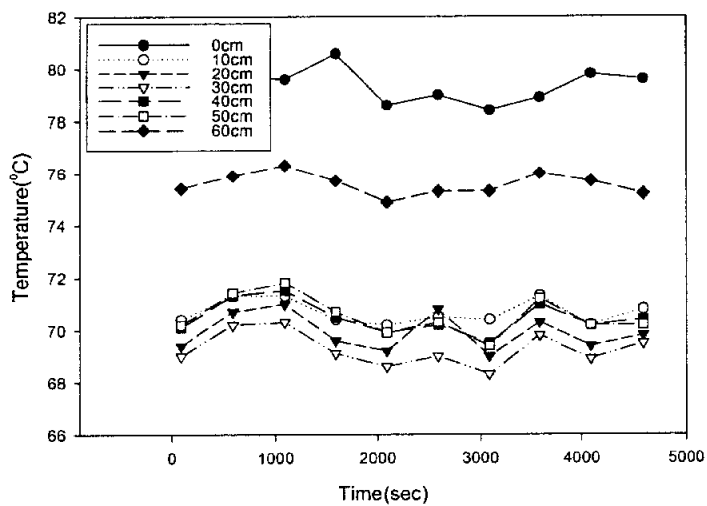
(b) Charging ratio : 40%



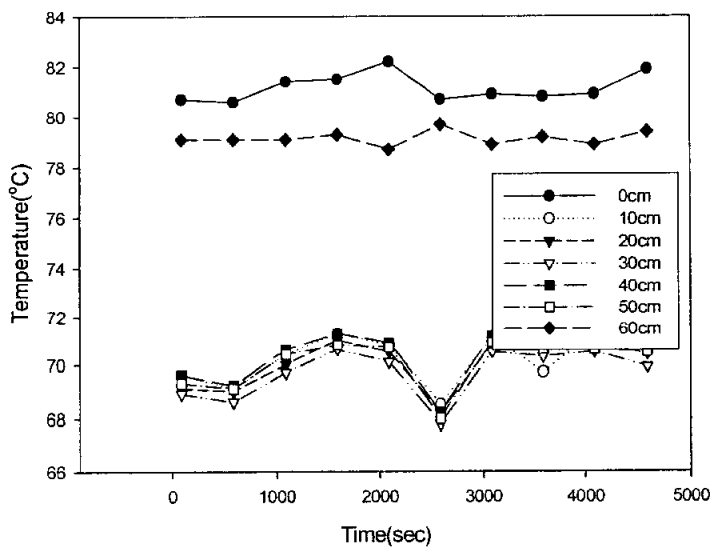
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.11 Variation of surface temperature of OCHP with time |

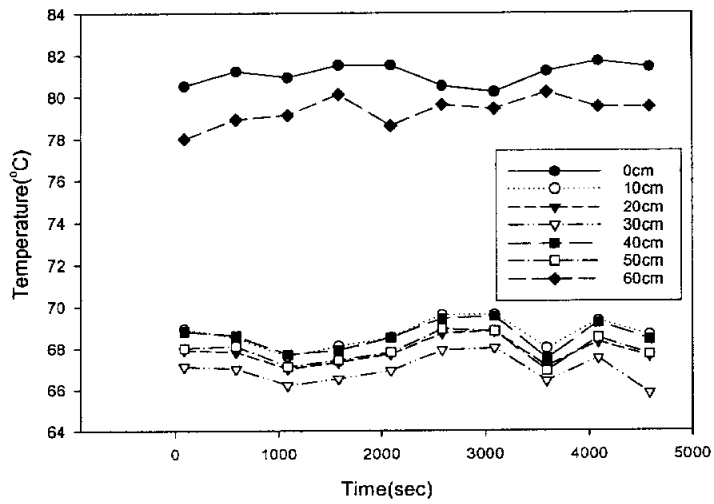
(Inlet temperature : 70°C, Axial length : 60cm)



(a) Charging ratio : 30%



(b) Charging ratio : 40%



(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.12 Variation of surface temperature of OCHP with time  
(Inlet temperature : 80°C, Axial length : 60cm)

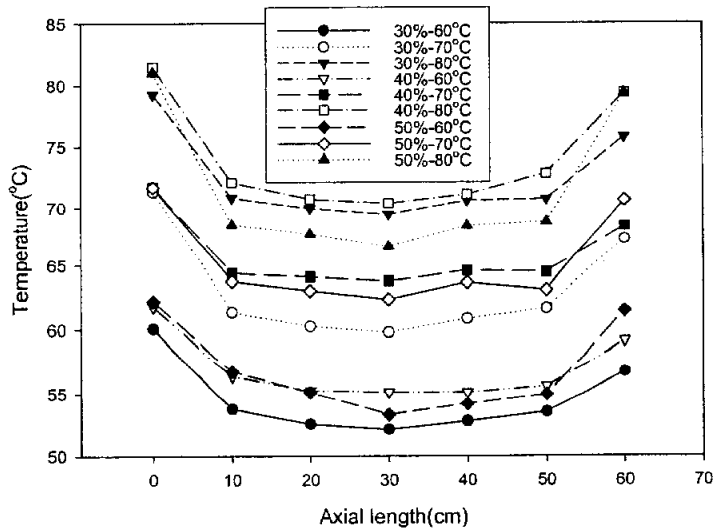
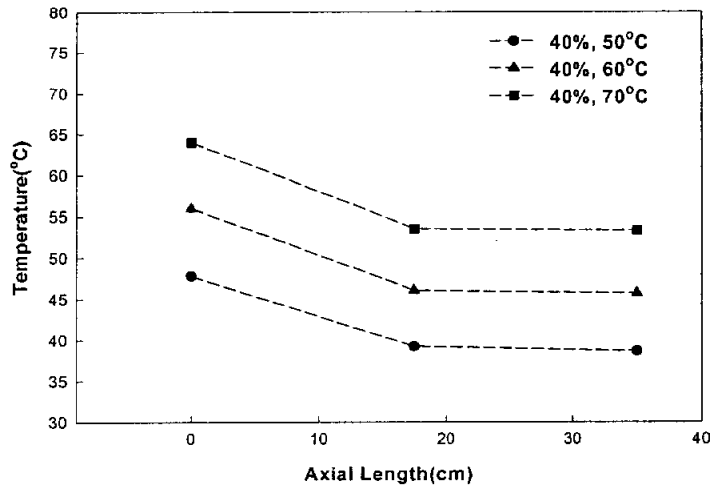
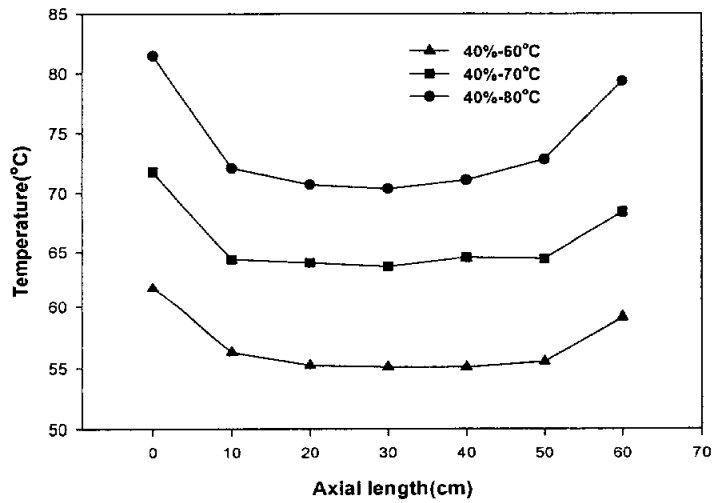


Fig. 4.13 Mean temperature of OCHP surface according to each condition  
(Axial length : 60cm)

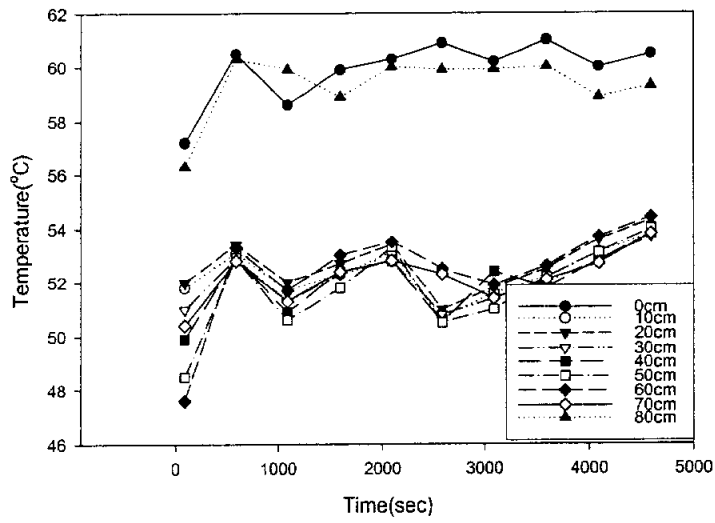


(a) Looped type OCHP

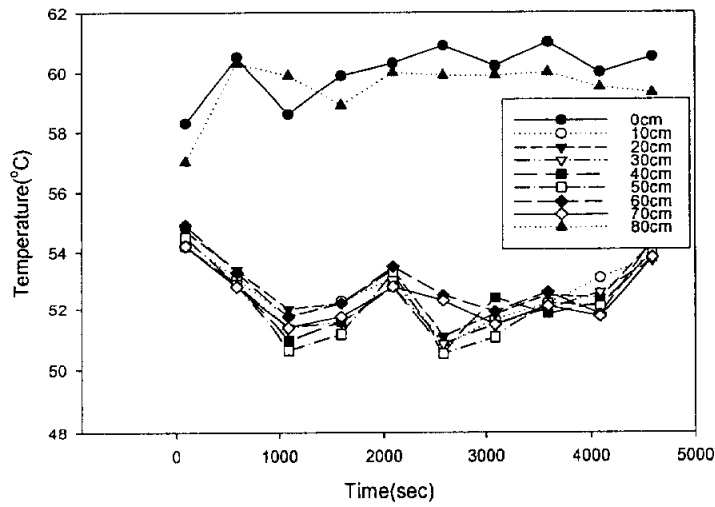


(b) Non-looped type OCHP (60cm)

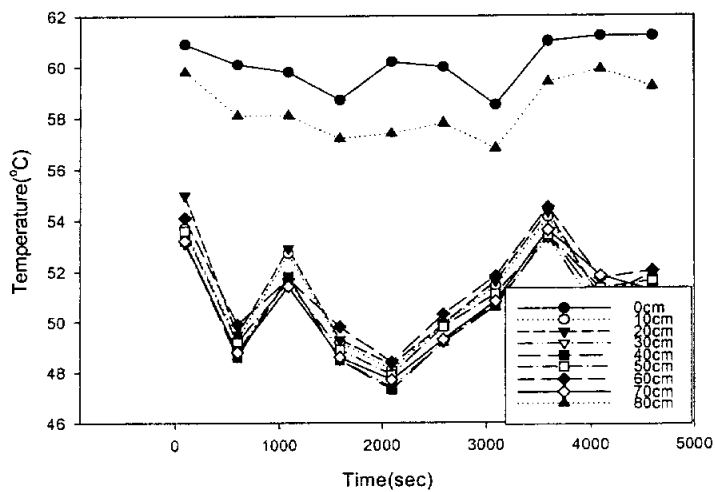
Fig. 4.14 Variation of wall temperature of each OCHP



(a) Charging ratio : 30%



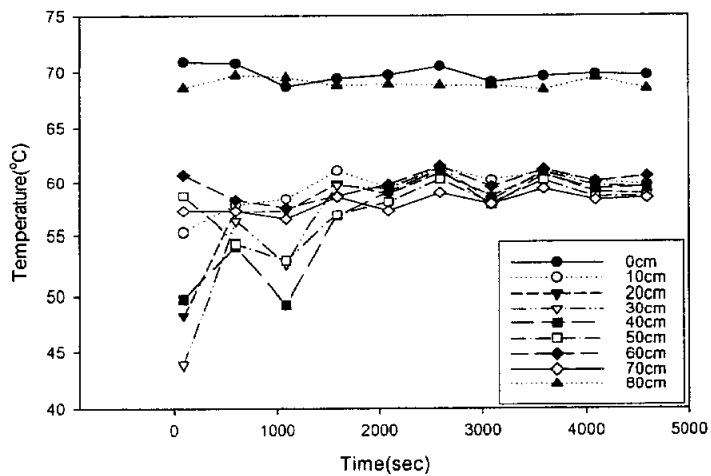
(b) Charging ratio : 40%



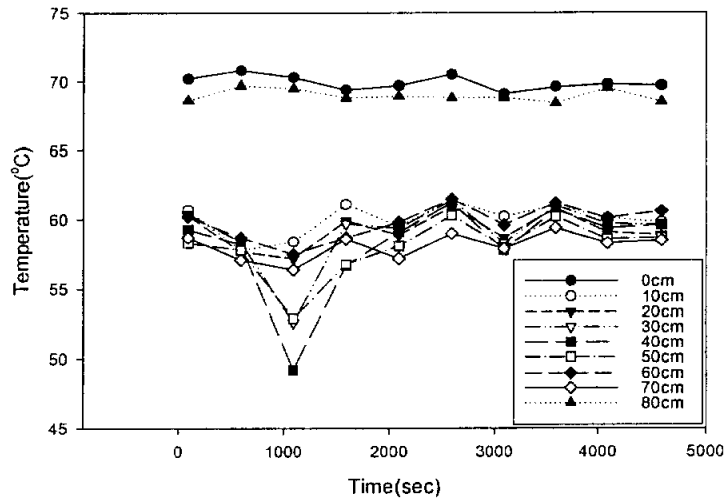
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.15 Variation of surface temperature of OCHP with time I

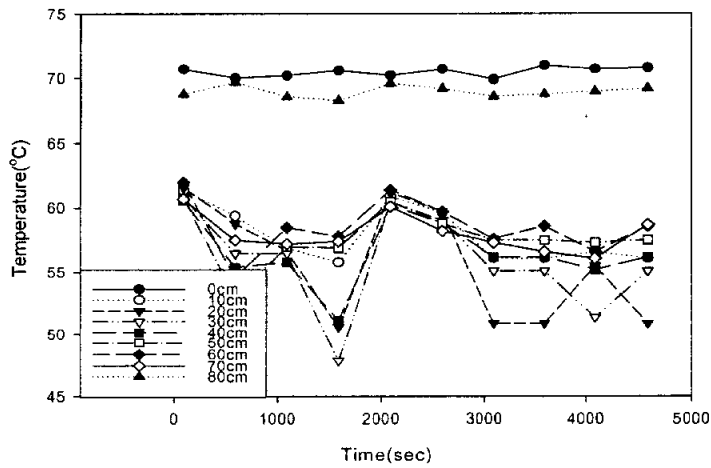
(Inlet temperature : 60°C, , Axial length : 80cm)



(a) Charging ratio : 30%



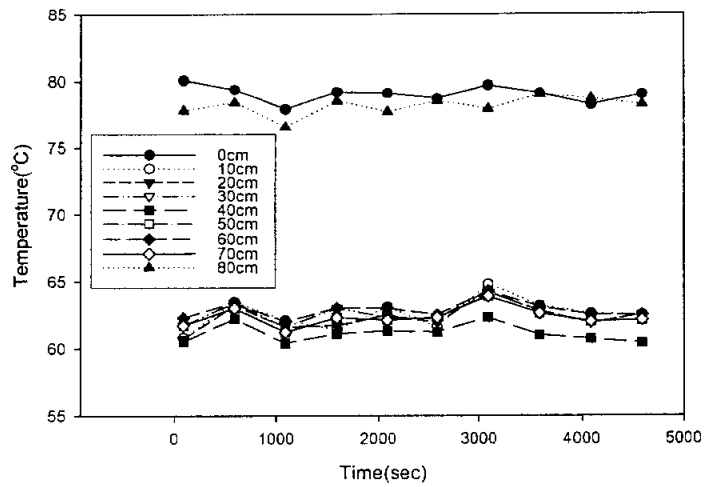
(b) Charging ratio : 40%



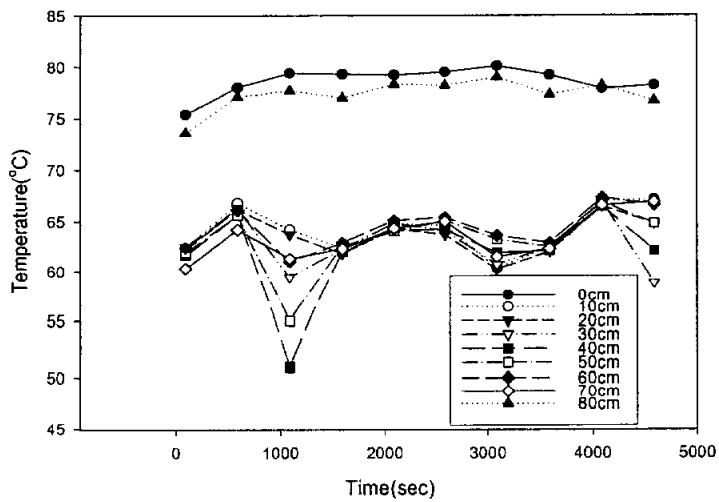
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.16 Variation of surface temperature of OCHP with time

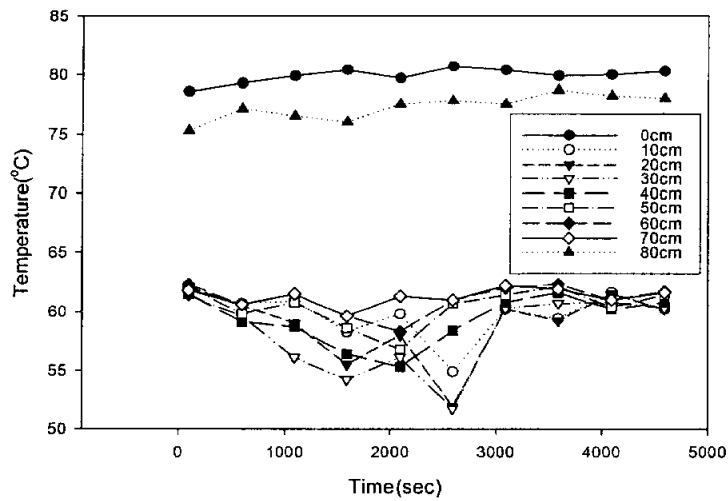
(Inlet temperature : 70°C, Axial length : 80cm)



(a) Charging ratio : 30%



(b) Charging ratio : 40%



(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.17 Variation of surface temperature of OCHP with time |

(Inlet temperature :  $80^{\circ}\text{C}$ , Axial length : 80cm)

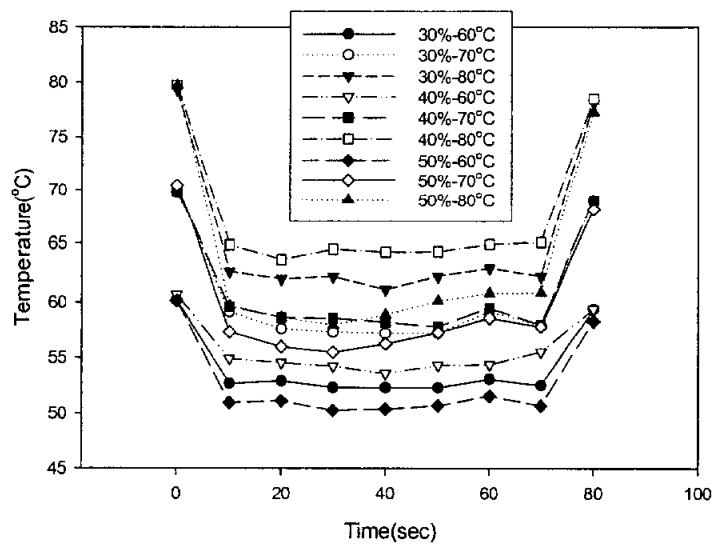
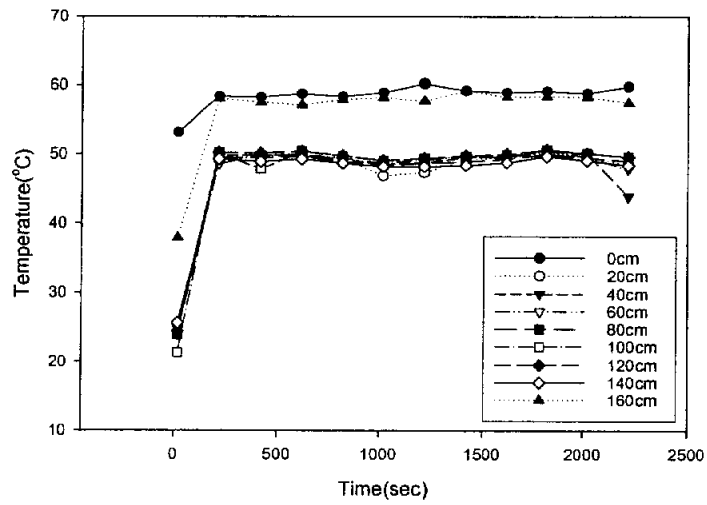
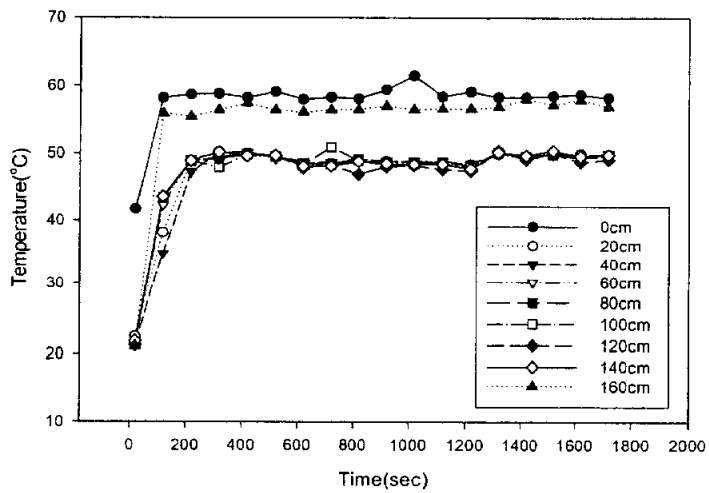


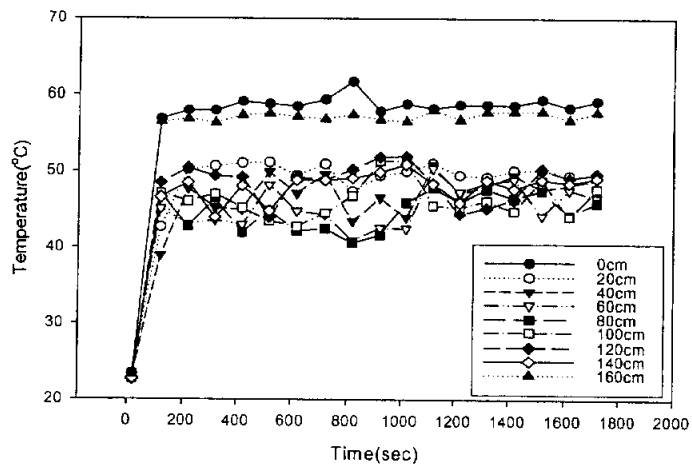
Fig. 4.18 Mean temperature of OCHP surface according to each condition



(a) Charging ratio : 30%



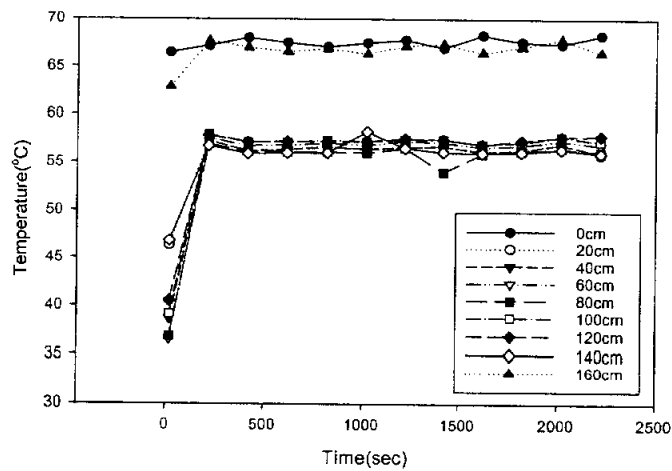
(b) Charging ratio : 40%



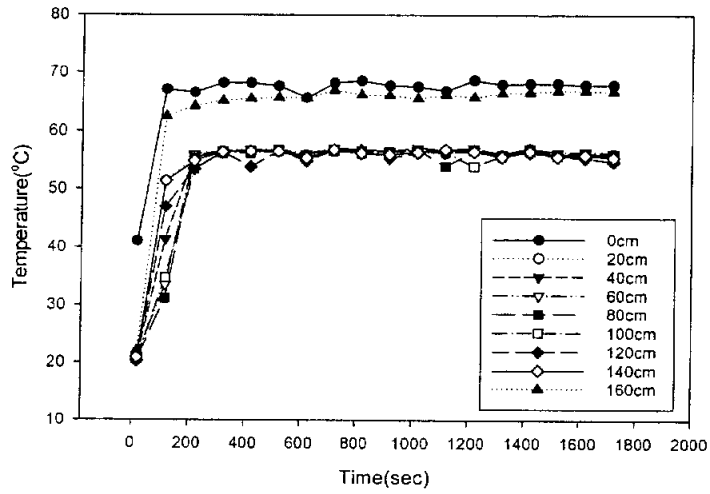
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.19 Variation of surface temperature of OCHP with time |

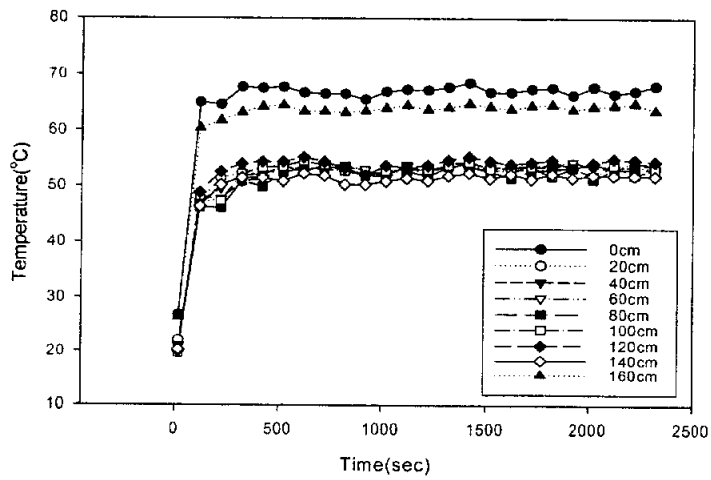
(Inlet temperature : 60°C, Axial length : 160cm)



(a) Charging ratio : 30%



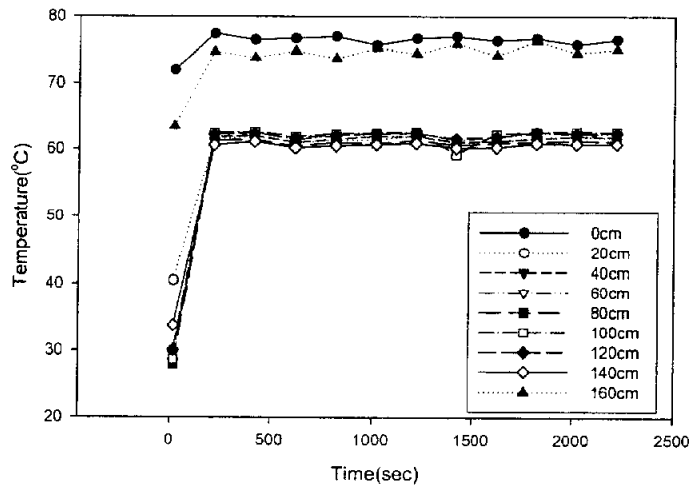
(b) Charging ratio : 40%



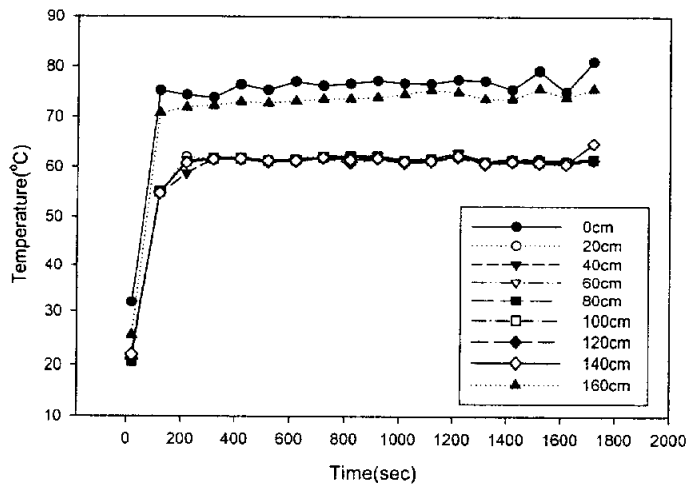
(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.20 Variation of surface temperature of OCHP with time

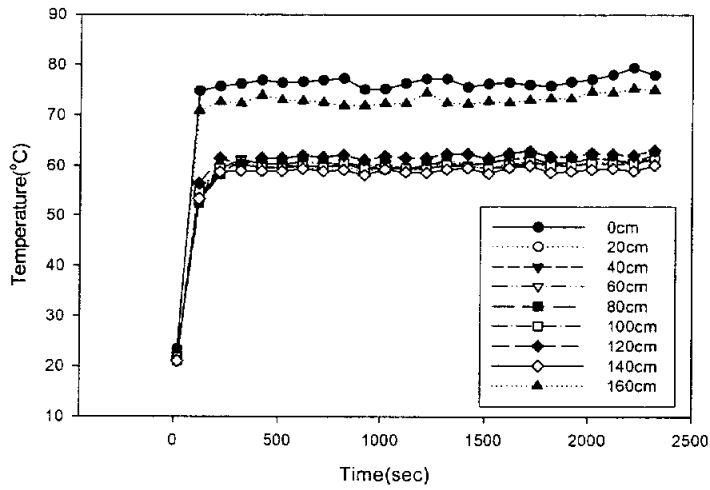
(Inlet temperature : 70°C, Axial length : 160cm)



(a) Charging ratio : 30%



(b) Charging ratio : 40%



(c) Charging ratio : 50%

Fig. 4.21 Variation of surface temperature of OCHP with time I

(Inlet temperature : 80°C, Axial length : 160cm)

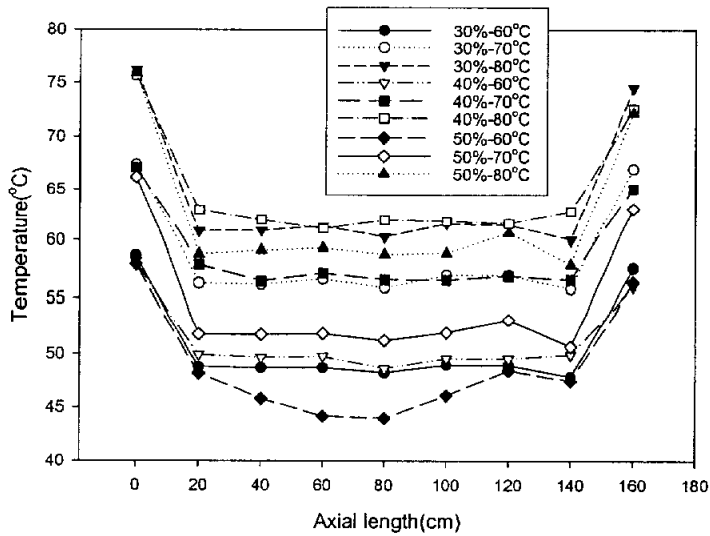
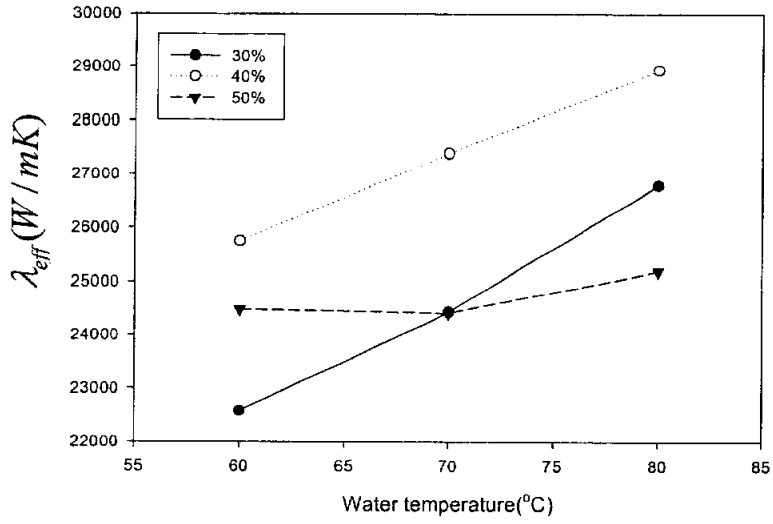
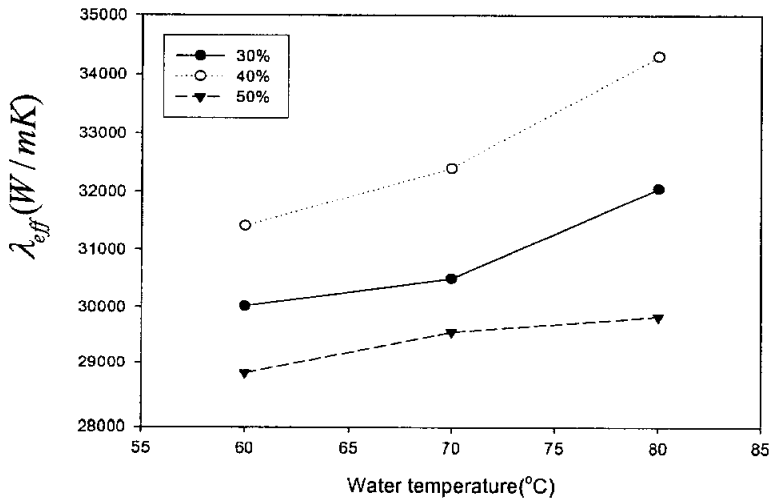


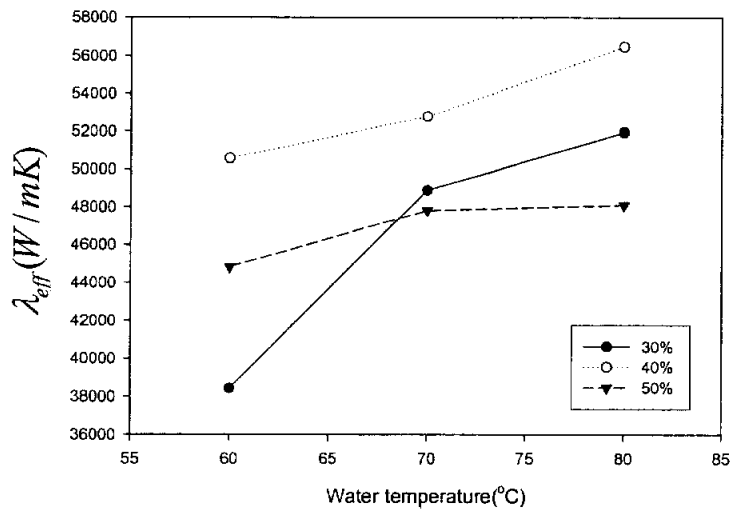
Fig. 4.22 Mean temperature of OCHP surface according to each condition



(a) 60cm Non-looped type OCHP



(b) 80cm Non-looped type OCHP



(c) 160cm Non-looped type OCHP

Fig. 4.23 Variation of efficient thermal conductivity according to charging ratio

## 5. 결 론

본 논문에서는 전자 기기의 냉각이나 냉각이나, 폐열 회수 등에 이용되어 왔으며, 최근들어 바닥 난방 시스템에도 적용되고 있는 진동 세관형 히트파이프를 비루프형으로 제작하여 양끝단을 가열하였을 경우의 유동 특성과 전열 성능을 파악해 보기 위해, 동일한 크기로 비루프형 OCHP로 내경 2mm 동관과 우레탄 튜브를 사용한 것과 동관만을 사용한 두 가지와 채널의 길이 변화에 대한 열전달 특성 파악을 위해 내경 2.8mm 동관을 사용해 채널 길이를 60cm, 80cm, 160cm로 하여 제작한 세 가지 비루프형 OCHP로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 비루프형 OCHP의 작동 가능성과 내부 유동 특성을 파악하기 위해 우레탄관과 동관을 사용한 시험부의 실험결과 작동 유체는 OCHP의 중앙 부분은 양쪽 끝단의 증발부 사이를 매우 빠르게 왕복 순환하는 것으로 나타났으나, 양쪽 가장자리 부분은 비루프형의 특성상 다소 느린 유동을 보임을 알 수 있었다.

2. 내경 2mm 동관으로 제작한 비루프형 OCHP는 메탄올을 40% 충전한 경우 각 채널의 응축부 온도 분포 30%, 50%를 충전한 것에 비해 균일하게 나타났고, 각 채널의 길이 방향의 온도 분포도 또한 높게 나타났다.

3. 내경 2mm 동관으로 제작한 비루프형 OCHP에서 열량(Q)은 메탄올을 40% 충전한 경우에 각각의 순환수 온도에서 가장 높게 나타났고, 유효열전도율 또한 충전율 40%에서 가장 높게 나타났고, 항온 수조로 80℃의 온수를 순환 시킨 상태에서 약 38290 W/mK에 이르렀다.

4. 채널의 길이를 60cm, 80cm, 160cm로 하여 내경 2.8mm 동관으로 제작한 비루프형 OCHP의 경우에도 각각의 비루프형 OCHP는 원활히 작동함을 나타냈고, 메탄올 40%를 충전한 경우 30%, 50%에 비해 높은 축방향 온도분포를 보였다.

5. 루프형과의 비교 결과 중앙 부분(middle part)에서는 각각의 OCHP에서 온도 분포가 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 양쪽 가장자리 부분을 제외하면 각각의 OCHP의 유효열전도율은 큰 차가 없으리라 생각되며, 채널의 수가 많아질수록 전체 루프형과의 차는 줄어들 것이라 생각된다.

6. 채널의 길이 60cm, 80cm, 160cm인 비루프 OCHP의 유효열전도율을 각각의 OCHP에서 메탄올을 40% 충전했을때 가장 높았고, 세 가지 중에는 온도 분포가 가장 낮은 채널의 길이 160cm인 것이 가장 높은 값을 나타냈는데, 이는 채널의 길이를 160cm로 한 경우, 증발부에서 응축부까지의 거리  $l$ 이 각각의 채널의 응축부의 평균 온도 감소에 비해 월등히 크기 때문이라 생각된다.

이상의 실험 결과에서와 같이 비루프형 OCHP의 양끝단을 가열시, OCHP는 원활히 작동하였고, 또한 채널의 길이를 60cm, 80cm, 160cm로 증가시킨 경우에도 작동함을 알 수 있었다. 또한 루프형과의 비교에서도 가장부분을 제외하고는 큰 차이를 보이지 않았다. 제작 공정이 까다롭고, 제작 단가가 높은 루프형 OCHP를 비루프형 OCHP로 대체하여 사용하게 되면 저렴한 제작 단가, flexibility, 설치 및 운송 등 여러 면에서 충분히 경쟁력을 가지리라 예상된다. 각각의 비루프형 OCHP의 성능 평가를 Table. 5.1에 나타내었다.

Table. 5.1 Estimation of Non-Looped Type OCHP

|       |     | 30% | 40% | 50% |
|-------|-----|-----|-----|-----|
| 30cm  | 60℃ | ○   | ◎   | ○   |
|       | 70℃ | ●   | ◎   | ○   |
|       | 80℃ | ○   | ◎   | ◎   |
| 60cm  | 60℃ | ○   | ◎   | ○   |
|       | 70℃ | ○   | ◎   | ○   |
|       | 80℃ | ●   | ◎   | ○   |
| 80cm  | 60℃ | ●   | ◎   | ○   |
|       | 70℃ | ○   | ◎   | ○   |
|       | 80℃ | ○   | ◎   | ○   |
| 160cm | 60℃ | ●   | ○   | ●   |
|       | 70℃ | ●   | ○   | ●   |
|       | 80℃ | ○   | ○   | ○   |

◎ : 높음, ○ : 보통, ● : 낮음

## 참고 문헌

- (1) H. Akachi, "Looped Capillary Tube Heat Pipe", Proceedings of 71th General meeting Conference of JSME, Vol. 3, No. 940-10, pp. 606~611, 1994
- (2) Wook-Hyun Lee, "Study on Heat Transfer and Flow Characteristics of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe", Doctor thesis of Pukyung National University, 2000
- (3) Soo-Jung. Ha, "Development of micro Cooling system for Telecommunication system using Oscillating Heat Pipe", Master thesis of Pukyung National University, 2003
- (4) A. Faghri, Heat pipe science and technology, Taylor & Francis Wasington, DC, pp. 21~22, 625~671, 1995
- (5) U.H. Kurzweg and Ling de Zhao, Heat Transfer by High-frequency Oscillations : A New Hydrodynamic technique for achieving large effective thermal conductivities, Phiys. Fluid, Vol. 27, No. 11, pp. 2624~2627, 1994

- (6) N. Srihajong, "Internal Flow Patterns of a Closed-End Oscillating Heat Pipe at Normal Operating Condition : Effect of Internal Friction", Proceeding of the 7th International Heat Pipe Symposium, Jeju, pp. 253 ~ 259, 2003
- (7) Y. Miyazaki and H. Akachi, "Heat Transfer Characteristics of Looped Capillary Heat Pipe", Proceeding of the 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, pp. 378 ~ 383, 1996
- (8) J. S. Kim, H. S. Jung, "The Study on Pressure Oscillation and Heat Transfer Characteristic of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, Proceeding of Thermal Engineering Autumn Conference of KSME, pp. 142 ~ 148, 2000
- (9) 영남대학교 공과대학 부설 공업연구소, "히트파이프를 이용한 난방 시스템의 평가", 1991
- (10) T. U. Heo, "Study on the development of waste heat recovery system for steel making industry using oscillating capillary tube heat pipe", Master thesis of Pukyung National University, 2002

(11) S. B. Ko, "Study on performance of under-floor heating system using oscillating capillary tube heat pipe", Master thesis of Pukyung National University, 2002

(12) Incropera & Dewitt, "Introduction to heat transfer", pp. 727 ~738, 1996

(13) YUNUS A. CENGEL, "Heat transfer", McGrow-Hill, pp. 570 ~620

(14) P. Charoensawan, "Effects of Evaporator Lengths, Number of Turns and Working Fluids on Internal Flow Patterns of a Vertical Closed-Loop Oscillating Heat Pipe", Proceeding of the 7th International Heat Pipe Symposium, Jeju, pp. 260 ~267, 2003

(15) 김철주 외, "온돌 난방용 히트 파이프", 한국 설비기술협회지 통권 182호, pp. 78 ~89, 1999

## 감사의 글

지난 2년을 뒤돌아 보면 정말 짧았지만, 또 한편으로는 정말 뜻깊은 오래도록 가슴에 남을 시간들이었다고 생각합니다. 어떤 일을 끝내면 항상 그렇듯 ‘좀더 잘할 수 있었는데...’, 하는 아쉬움이 많이 남습니다. 하지만 여러분들과 함께 생활하고 호흡할 수 있었기에 지난 2년은 저에게 너무나도 소중한 시간이었습니다.

부족한 저를 제자로 받아주시고 항상 변함없는 지도와 격려, 그리고 사랑을 아끼지 않으셨던 김종수 교수님의 깊은 은혜에 고개 숙여 감사 드립니다. 그리고 논문 심사를 위해 애써 주시고 학문적인 조언을 주셨던 오후규 교수님, 김영수 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

실험실의 선배로서 그리고 인생의 선배로서 많은 것들을 가르쳐 주셨던, 김주원 선배님, 김정훈 선배님 감사드립니다.

항상 카리스마 넘치던 현석형, 술도 자주 사주시고 고민도 많이 들어주시던 태운형, 이제는 친누나처럼 정이 많이 들어버린 수정누나, 항상 노력하는 자세를 보여주시는 용빈형, 항상 축구, 탁구, 테니스를 함께 했던 원호형, 조용하지만 소리없이 강한 성호형, 다재다능하던 성복이, 모두들 정말 감사합니다.

친구로서 그리고 실험실 동료로서 2년동안 항상 함께한 재홍이, 상훈이, 멀리서보면 정말 사이클 선수같은 태훈이, 작업이면 작업, 요리면 요리, 정말 손

제주 좋은 기택이, 항상 바쁘다고, 그리고 여자친구 없다고 투덜대는 내수, 항상 배고프다고 하는 태진이, 실험실에서 가장 유쾌한 상조, 실험실의 김래원 성호, 선배들 눈치보라 비위맞추라 고생이지만 항상 웃음을 잃지 않던 센스있는 우석이, 그리고 기쁠때나 힘들때나 항상 함께 했던 경미, 그 외 여러 친구들 모두 정말 감사합니다.

마지막으로 오늘날 저를 이 자리에 있게 해주시고, 부족한 저를 항상 믿어주시고 책임감과 성실함을 몸소 보여주신 아버님, 어머님, 그리고 동생들 정말 감사합니다. 이제 조금이나마 그 은혜를 갚아 나가겠습니다.