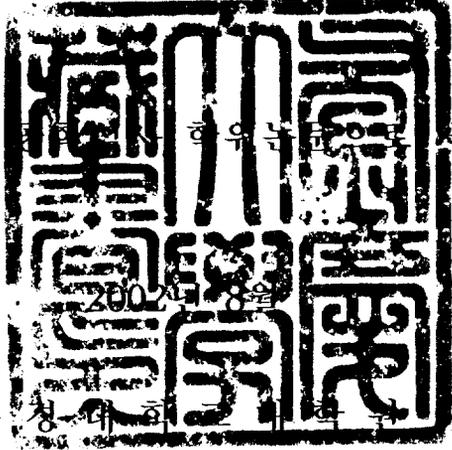
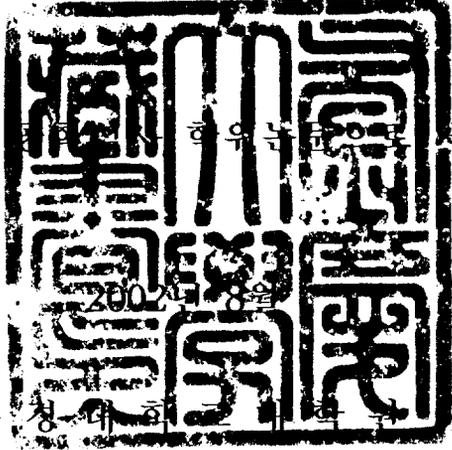


공학석사 학위논문

루프타입 진동형 히트 파이프의 열전달  
성능에 미치는 유동채널 수 및  
가열모드의 영향

지도교수 김 종 수

이 논문을 에 제출함

부 장 대학

냉동공조공학과

정 현 석

정 현 석의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 8월

주 심 공학박사 금 종 수 (인)

위 원 공학박사 김 은 필

위 원 공학박사 김 종 수



# 목 차

ABSTRACT .....	i
Nomenclature .....	iii
제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 종래의 연구 .....	2
1.2.1 실험 파라미터의 변화 .....	2
1.2.2 가열모드에 관한 연구 .....	2
1.2.3 OCHP의 작동원리 .....	5
제 2 장 실험 장치 및 방법 .....	7
2.1 실험 장치 .....	7
2.2 실험 방법 .....	14
2.2.1 온도 측정 .....	14
2.2.2 압력 측정 .....	14
2.2.3 가시화현상 관찰 .....	15
2.2.4 작동액의 붓입 .....	17
2.2.5 실험조건 .....	19
제 3 장 실험 결과 및 고찰 .....	20
3.1 열전달 특성 .....	20
3.1.1 20 채널에서의 열전달 특성 .....	21

3.1.2 50 채널에서의 열전달 특성 .....	23
3.2 압력 진동 특성 .....	26
3.2.1 20 채널에서의 압력진동특성 .....	26
3.2.1 FFT 분석 .....	30
3.2.3 50 채널에서의 압력특성 .....	37
제 4 장 결론 .....	42
참고문헌 .....	44

# **The influence of the flow-channel numbers and the heating mode on the heat transfer performance of loop type OCHP**

Hyun-Seok Jung

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering,  
Graduate school,  
Pukyong National University

## **ABSTRACT**

OCHP(Oscillating Capillary tube Heat Pipe) is a high heat transfer device. Its basic operation is due to irregular self-excited oscillation, vapor bubble slug and plug flow of working fluid and the oscillation to axial direction. OCHP has a lot of merits but on the other hand it has a lot of defects to be solved. Especially, the limitation of heat transfer performance according to heating mode(inclination angle) has to be overcome. Over the past few years, many studies have been focused on heating mode but most of them had a performance limitation.

In this paper, the comparative of heat transfer and pressure oscillation characteristics on two OCHPs with different flow-channel numbers and hydraulic diameter were investigated and also the effect of heating mode on OCHP was focused.

Two OCHPs devices had the serpentine structure and the flow-channel numbers were 20, 50 respectively. The experiments conditions were as follows : 20 channel - 40, 60(vol.%) · 90°, 50 channel - 50, 80(vol.%) · and inclination angle were changed from 90° to - 90° , input heat flux were changed from 0.3W/cm<sup>2</sup> to 1.5 W/cm<sup>2</sup> .

From the experimental results, the effective thermal conductivity on 20 channel was higher than that of 50 channel. But 20 channel's device wouldn't work exception bottom heat mode(90°). Whereas the heat transfer performance of 50 channel's device wasn't influenced by heating mode.

In case of pressure oscillation, regular frequency dominating inner two phase flow was observed in 20 channel but not in 50 channel because of the higher degree of freedom.

## Nomenclatures

A	Area	[m <sup>2</sup> ]
L	Looped	
l	Length	[m]
P	Pressure	[kPa]
q	Heat flux	[W/cm <sup>2</sup> ]
T	Temperature	[°C] or [K]

### *Greek symbols*

$\alpha$	Charging ratio of working fluid	[vol.%]
$\theta$	Inclination angle	[. ]
$\lambda_{eff}$	Effective thermal conductivity	[W/m · K]

### Subscripts

cond	Condensing section
eva	Evaporating section
l	Liquid

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구의 배경

20세기 후반에 발생한 석유에너지 파동은 세계 각국으로 하여금 에너지수급 문제를 국가적인 차원에서 바라보게 하였고 에너지를 절약하는 기술들에 관심을 가지게끔 하였다. 따라서 그 문제를 해결하기 위한 노력이 지속적이고 치열하게 진행되어 왔고 또 최근 들어 여러 기술장비의 발열밀도가 급격히 증가되고 있어 그에 따른 새로운 냉각 기술 및 전열촉진기술의 필요성이 대두되고 있는 현실이다.

진동 세관형 히트파이프는 세관의 가열부에서 발생하는 비등기포와 작동액의 기액 slug류가 냉각부에 이동하여 냉각부에서 응축하여 감소할 때 생기는 불안정유동에 기인하는 유체진동에 의해 열을 수송하는 히트파이프이다. 따라서 진동형 히트파이프는 작동액의 진동에 의한 현열 수송과 기포의 증발, 응축에 수반하는 잠열수송이 함께 되어 열을 수송하는 기구하고 말할 수 있다. 이 진동세관형 히트 파이프는 작동유체의 압력이 곧 구동력이 되기 때문에 내부에 워를 필요로 하지 않고 세관을 사용함으로써 고압에도 견딜 수 있으며 플렉시블하여 설치방법에 여유를 줄 수 있는 등 기존의 히트파이프와는 다른 특징을 가지고 있다[1-19]. 하지만 내부 작동유체의 진동특성이 매우 복잡하고 chaos적이기 때문에 아직 이론적 해명에 미치지 못한 것이 사실이며 특히 작동모드에 따른 성능의 감소는 반드시 해결되어야 할 과제이다[1-3, 7-22].

## 1.2 종래의 연구

### 1.2.1 실험 파라미터의 변화

OCHP는 1987년 Akachi에 의해 처음 개발된 이후 많은 연구자들이 여러 가지 실험파라미터를 변화시켜가면서 연구해오고 있다. OCHP에서 중요하게 작용하는 실험 파라미터로는 봉입량, 세관의 환경 및 재질, 작동유체의 선정, 채널 수, 경사각도, 가열량 등이며 이 모든 것들이 궁극적으로 OCHP의 전열성능을 영향을 미치고 있으므로 이에 따른 열전달 특성에 관한 연구와 이상유동의 진동특성 및 내부압력 진동특성에 관한 연구가 이루어지고 있다. 또한 내부유동을 가시화하여 이론적이며 해석적인 방법도 행해지고 있는 실정이다. 하지만 이처럼 전열성능과 관련된 실험 파라미터가 많고 내부진동특성 자체가 워낙 chaos적인 특징을 가지고 있기 때문에 OCHP에 대한 작동메카니즘에 관한 연구는 아직 많이 부족한 실정이다.

### 1.2.2 가열모드에 관한 연구

일반적인 히트파이프가 가지고 있는 몇 가지 작동한계, 즉 비산 한계(증기와 액의 자유 경계면에서 생기는 마찰에 의해 작동액의 증발부로의 귀환을 막는 현상)와 모세관 한계 등은 OCHP가 내부 구동력을 작동액의 증발에 따른 압력상승으로 삼고 있기 때문에 하부가열모드에서는 그다지 큰 문제가 되지 않으나 수평 및 상부가열모드에서는 성능에 영향을 큰 미치는 것으로 나타나 있다[4-6].

이에 관한 종래의 연구는 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Previous studies on the effect of OCHP's inclination

저자	작동유체	테스트 튜브	실험조건	결과
Nishio et al. (1997)	Water	Glass, I.D : 2.5mm 20 ch (looped)	$\alpha$ : 30~95 (vol.%) $\theta$ : 0~90°	경사각이 작아지면 작동하지 않음 ( $<30^\circ$ )
Izumi et al. (1998)	R-142b	Copper, I.D : 2mm 80 ch (non looped)	$\alpha$ : 50(vol.%) $\theta$ : -90, 0, 90°	B.H>H.H>T.H (T.H : 극도의 낮은 열전달율)
K. Gi et al. (1999)	R-141b	Copper, I.D : 2.0, 1.6, 1.0mm 80 ch (looped)	$\alpha$ : 40(vol.%) $\theta$ : -90~90° (30°간격)	2.0mm : 90℃에서만 작동 1.6mm : 작동안함
Maezawa et al. (1999)	R-142b Water	Copper, I.D : 2.0mm 80 ch	$\alpha$ : 40(vol.%) $\theta$ : -90, 0, 90°	가열모드에 상관없이 작동
Kim et al. (1999)	Ethanol	Brass I.D : 1.5mm 8 ch	$\alpha$ : 20~80(vol.%) $\theta$ : 30, 60, 90°	90°>60°>30°
Kim et al. (1999)	R-142b	Brass I.D : 1.5mm 20 ch	$\alpha$ : 20~80(vol.%) $\theta$ : 30, 60, 90°	90°>60°>30°

Nishio 등은 열유속 및 봉입량의 변화 및 작동모드에 따른 열수송 능력에 대한 연구에서 경사각이  $30^\circ$  이하로 되면 OCHP는 작동하지 않는다고 보고하였다[11-12, 19].

Izumi 등은 작동모드에 관한 연구에서 경사각과 유효열전도율은 비례한다고 보고하였으며 특히 Top Heating Mode에서는 극단적으로 낮은 전열성능을 나타낸다고 하였다[13-14, 21].

Table 1에서 보듯이 다른 연구자들의 경우에도 가열모드와 상관없이 OCHP가 성능을 유기하고 있는 연구결과는 거의 전무한 실정이며 Maezawa의 연구에서는 가열모드와 상관없이 작동을 한다고 보고하였으나 그 성능의 차이는 급격히 차이를 보이는 것으로 나타난다[7-9].

### 1.2.3 OCHP의 작동 원리

OCHP는 내경 5mm 이하의 긴 세관을 사행구조로 구성하여 내부 작동액의 증발과 응축에 잠열수송과 작동액의 진동에 의한 현열 수송이 동시에 이루어져서 열을 빠르게 전달하는 열전달 기구이다[7-22]. OCHP 내부를 진공시킨 후 작동액을 봉입하면 작동액은 중력에 의해 하부에 고이게 되지만 증발부에 열을 가하게 되면 비등에 의해 연속적인 증기포가 발생, 성장하여 빠른 속도로 응축부쪽으로 이동하는 현상이 반복된다. 이때에는 Fig.1에 보이는 것과 같이 액 슬러그와 증기 플러그가 진동하면서 세관내부에 불규칙적으로 배열되게 된다.

한 채널에서 작동액의 지속적인 비등을 발생시킬만한 열량이 계속적으로 가해진다면 압력 상승으로 인해 인접한 채널에도 영향을 미치게 되어 사행구조의 특징상 순식간에 전 채널로 그 힘이 가해지게 되어 작동액의 축방향 진동 및 인근 채널로의 순환이 이루어지게 되는 것이다. 즉 작동액의 비등에 의한 채널간의 압력 차가 자체 구동력으로 작용하며 힘이 없이도 증발부로의 액을 귀환시킬 수 있도록 하는 것이다.

현재까지 밝혀진 이론들에 따르면 이러한 진동특성에 대해 상세하게 검토되고 있으나 현상이 워낙 복잡하고 chaos적인 특징을 나타내고 있기 때문에 아직 이론적 해명에는 이르지 못하고 있는 실정이다.

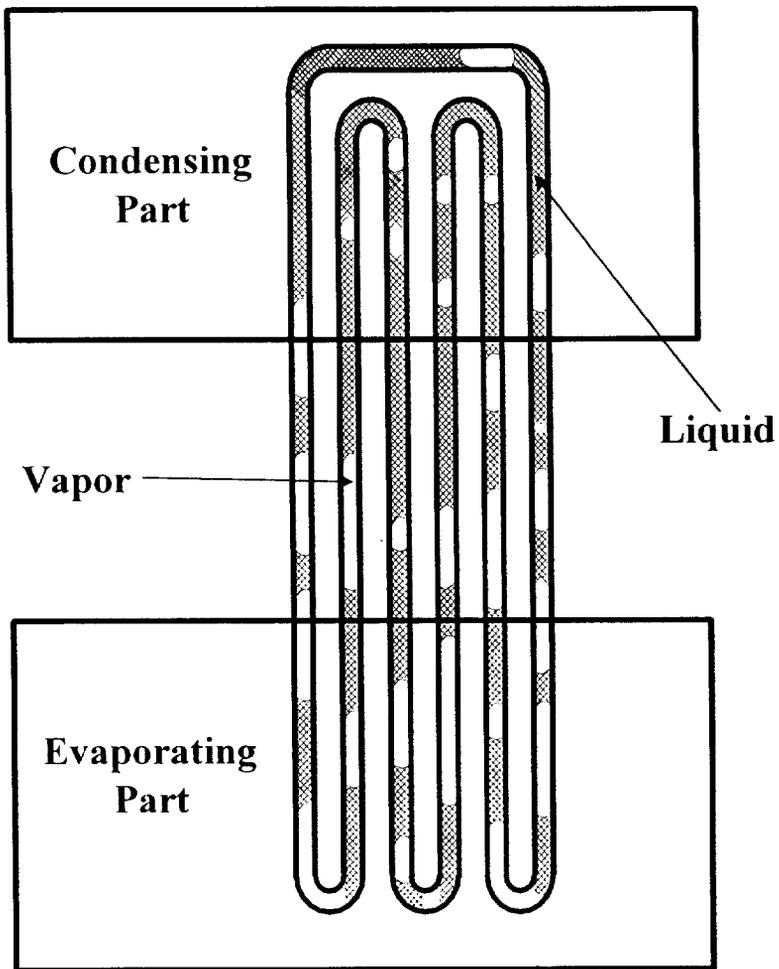


Fig. 1 Basic operating principle of OCHP.

## 제 2 장 실험 장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험 장치의 개략도 및 실험 장치의 사진을 나타내었다. 실험장치는 크게 냉각·가열시스템, 데이터 처리 시스템, 가시화시스템으로 구성되어 있다.

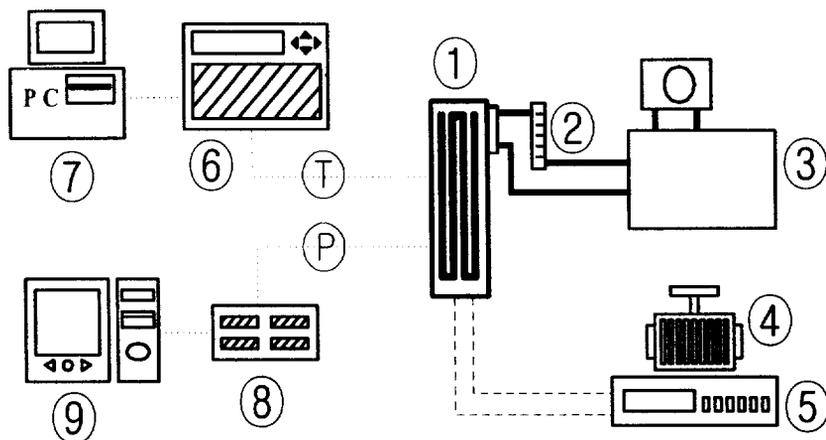
냉각·가열시스템에 있어서, 실험부의 가열은 증발부에 부착되어 있는 평판 히터(20 ch : 150W, 50ch : 250W)의 입열량을 슬라이더스와 디지털 파워 미터로 제어하여 공급하였으며, 냉각은 순환 항온조를 이용한 수냉각 방식으로 체적식 유량계를 거쳐 순환되도록 구성하였다.

데이터 처리 시스템은 온도 측정 시스템과 압력측정 시스템으로 구성된다. 측정된 온도와 압력은 각각 ⑥의 데이터로그와 ⑦의 컴퓨터를 이용하여 처리하였다.

가시화 시스템은 제원이 서로 다른 2개의 실험부와 8mm video camera 및 digital video creator로 구성되어 있으며 각 실험부는 내부 작동액의 유동을 관찰할 수 있도록 황동판으로 base plate를, 아크릴로 window plate를 구성하고 황동판 표면에 홈을 파서 생성시킨 채널을 서펜타인 구조를 갖도록 제작하였다. 각 실험부의 base plate의 유로 사양은 다음과 같다.

20ch : length : 220mm, width : 1.5mm, depth : 1.5mm

50ch : length : 223.5mm, width : 1.0mm, depth : 1.5mm



- |   |  |   |  |
|---|--|---|--|
| ① | Test section                           | ⑥ | Temperature acquisition system<br>(DR-230) |
| ② | Flow meter                             | ⑦ | Computer                                   |
| ③ | Cold & hot water<br>circulation system | ⑧ | Pressure acquisition system<br>(DAS-1800)  |
| ④ | Electric voltage regulator             | ⑨ | Computer                                   |
| ⑤ | Digital power meter                    | P | Pressure sensor                            |
|   |  | T | Temperature sensor                         |

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

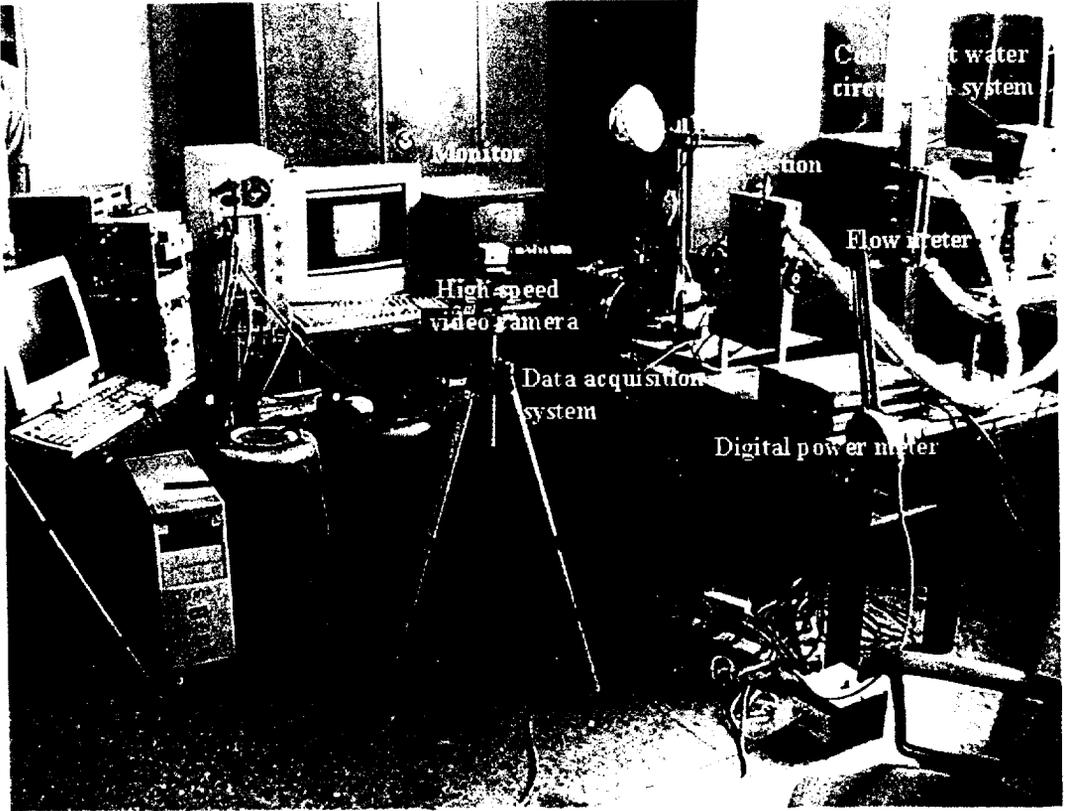


Photo. 1 Photograph of experimental apparatus.

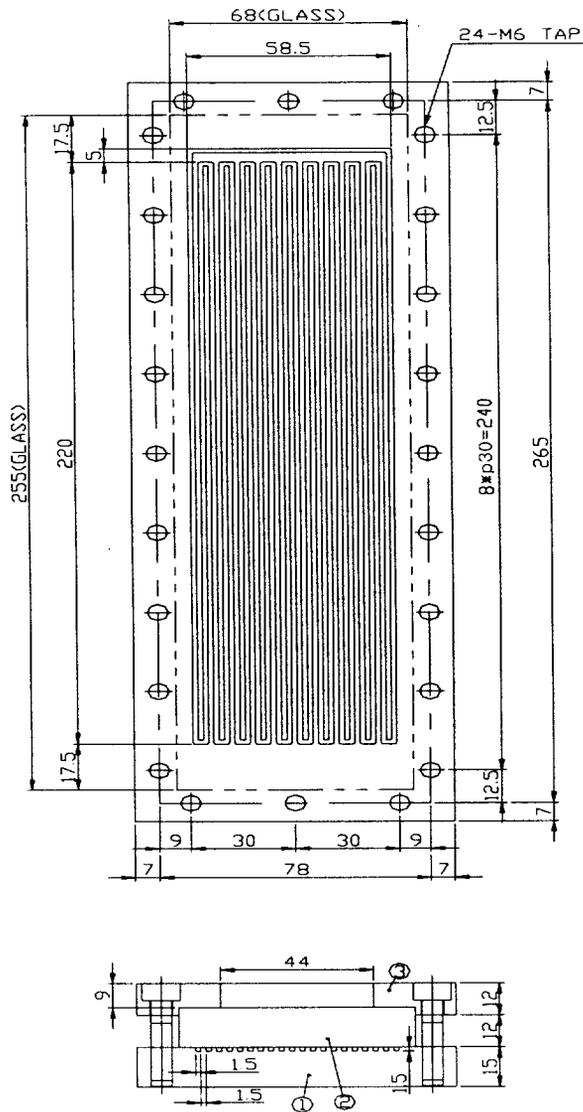


Fig. 3 Specification of looped test section with 20 channels.

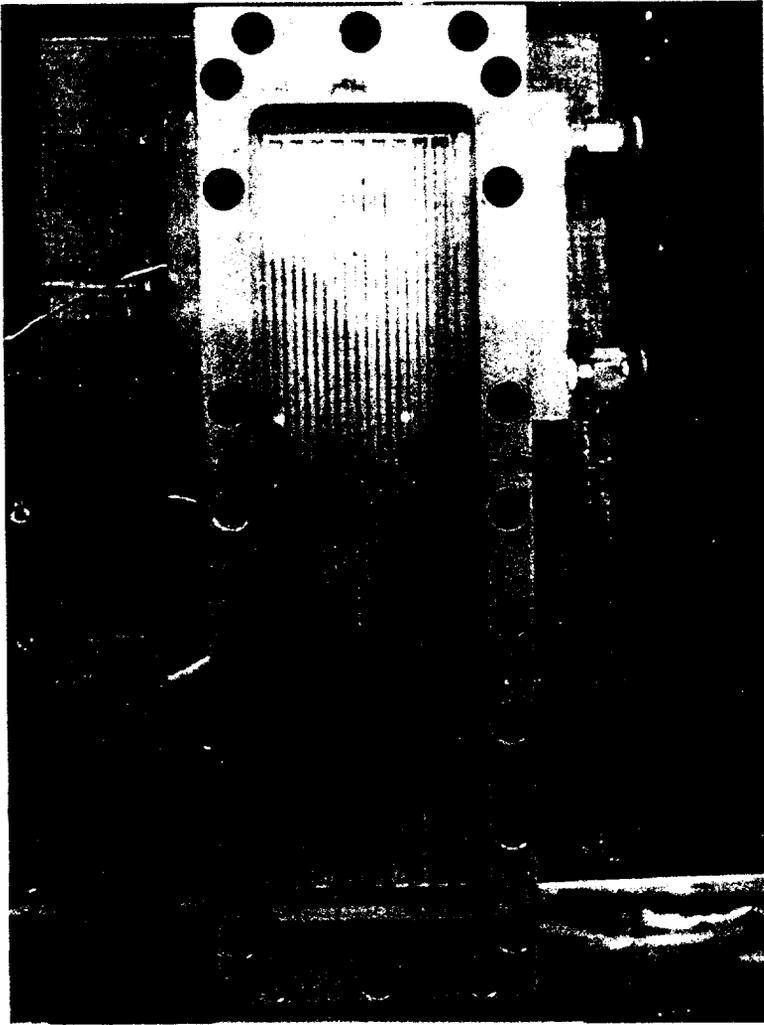


Photo. 2 Photograph of test section for visualization.

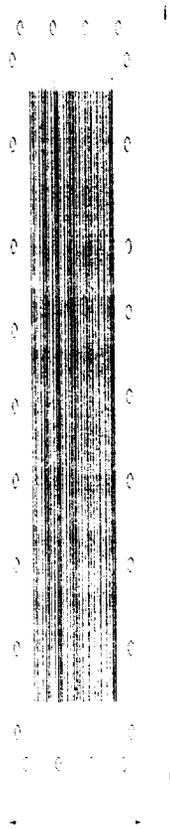


Fig. 4 Specification of looped test section with 50 channels.

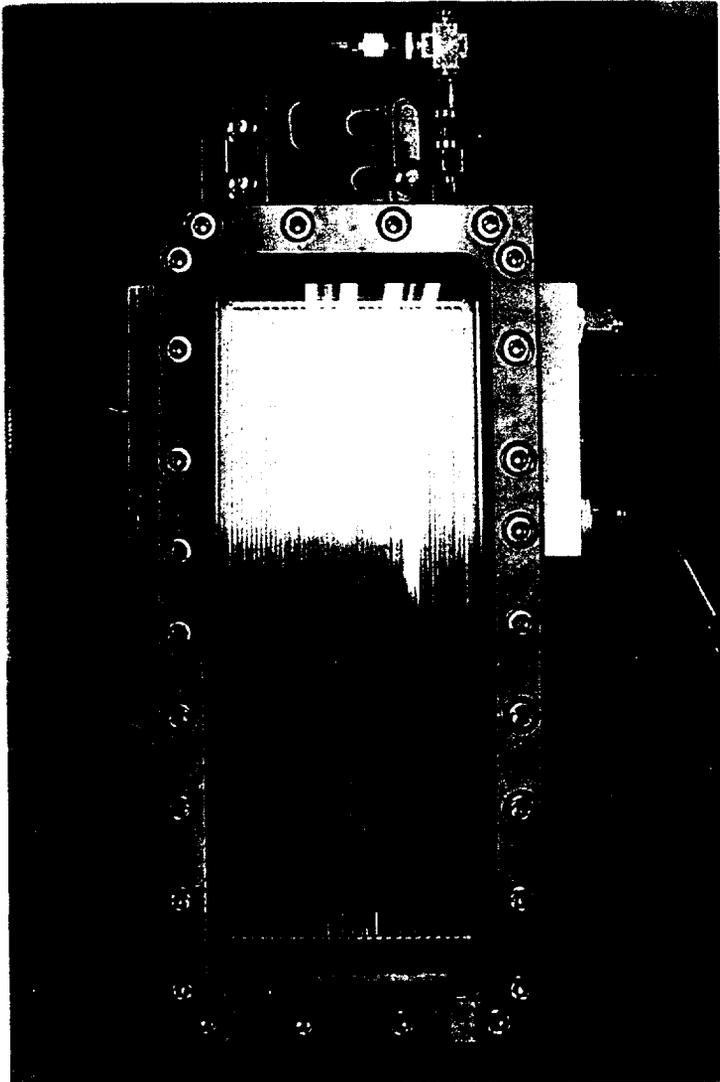


Photo. 3 Photograph of test section for visualization.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 온도 측정

시험부의 전열면 표면 온도를 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 채널 바닥에서 1 mm 아래를 가로질러 시험부의 중앙까지 직경 1.1 mm의 구멍을 뚫어 직경 1.0 mm의 피복된 T type thermocouple(편차 :  $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ )을 각각 증발부, 단열부 및 응축부에 각각 1개씩 삽입한 후 밀봉하였으며, 가공된 구멍과 열전대 사이의 틈에 열전도성이 좋은 실리콘 컴파운드를 주입하여 시험부와 열전대 사이의 접촉 저항을 최소화하였다. 증발부와 응축부에 설치된 열전대 사이의 거리는 146 mm (149.2mm)이며, 그 중앙 지점에 단열부의 열전대를 설치하였다. 또한, 응축부의 냉각수 온도를 측정하기 위해 입·출구에 2개의 피복 열전대를 설치하였다.

온도 측정은 데이터 로그(DR-230, Yokogawa.co)에 의해 이루어졌으며, RS-232C 통신에 의하여 PC로 측정값을 실시간으로 받아 들였다. 모든 측정은 정상상태에서 2초 간격으로 150~200개의 데이터를 측정하여 사용하였다.

### 2.2.2 압력 측정

시험부내 포화 압력을 측정하기 위해 Fig. 6과 같이 시험부의 사각 유로에 직경 1.0mm (0.6mm)의 압력공을 뚫고 압력 센서(PDCR-961 : Druck, HD9408T : Delta Ohm)를 증발부 및 응축부에 각각 1개씩을 설치하여, 안정화 상태에서 Keithley사의 데이터 로그 DAS-1800을 이용하여 초당 50개씩 500개의 데이터를 받아 압력 측정에 이용하였다. 압력 센서의 측정 범위는  $0\sim 10(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 이

고, 측정 오차는  $\pm 0.2\%$ 이다.

### 2.2.3 가시화현상 관찰

OCHP 내부 작동유체의 자세한 관찰을 위해서 400 frames/sec의 고속도 비디오 카메라(HAS-200R, Ryokosha Co.)와 8mm camcorder를 사용하였다. 고속도 비디오 카메라로 촬영한 내부 유동현상에 대해서는 프레임 속도를 실제 작동시보다 줄임으로써 증발부 및 응축부에서 발생하는 비등·응축현상 및 한 채널 내부의 축방향 진동을 자세히 관찰하고 다시 8mm camcorder로 실시간 유동현상을 관찰하였다. 고속도 비디오 카메라를 사용시 셔터 속도는 1/2000 초로 하였다.

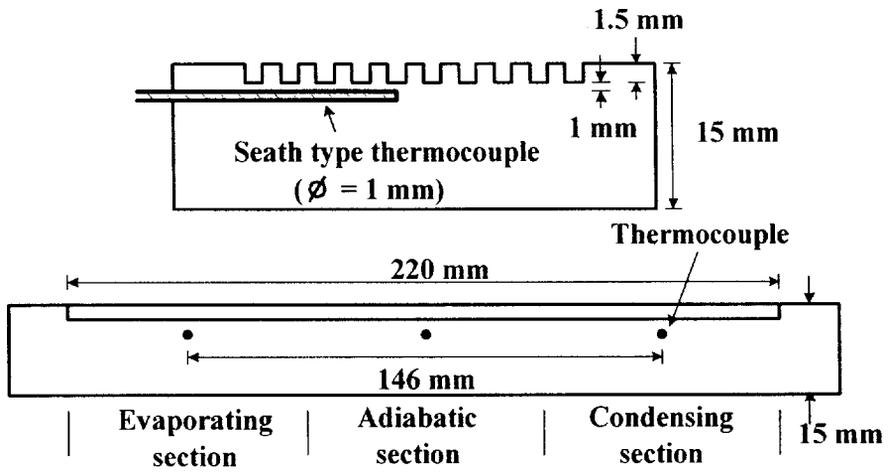


Fig. 5 Location of thermocouples.

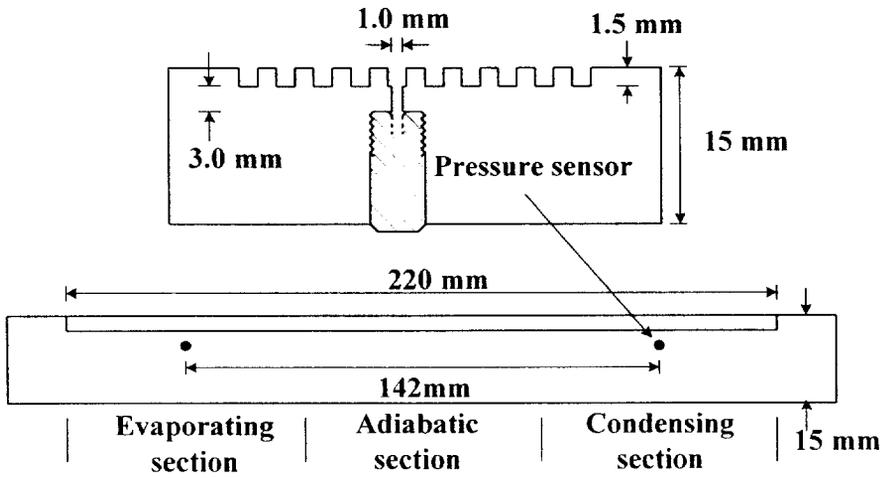


Fig. 6 Location of pressure sensor.

## 2.2.4 작동액의 봉입

본 실험에서는 특수하게 제작된 시험부에 작동액을 봉입하기 위하여 로터리 및 확산 펌프로 구성된 고진공 시스템(Photo. 4)을 사용하여 시험부를  $1 \times 10^{-5}$  torr까지 진공시켰다. 또한, 작동 유체의 정확한 봉입을 위하여 97ml 및 10ml의 충전 실린더(Photo. 3, HPG-10, 96, Taiatsu)를 사용하였으며, 작동 유체로는 냉매 R-142b을 사용하였다.

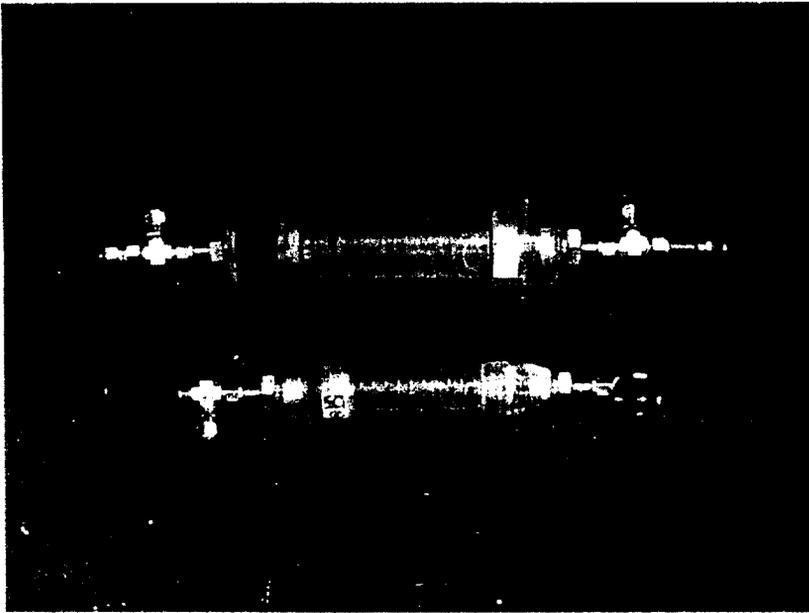


Photo. 4 Charging cylinder

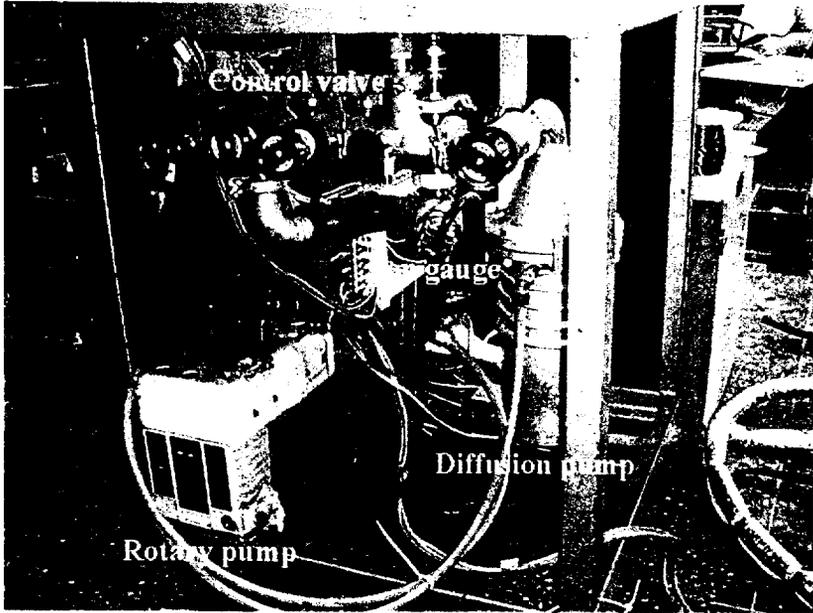


Photo. 5 High vacuum system.

## 2.2.5 실험 조건

본 실험에 적용된 실험 조건은 Table 2와 같다. 실험부에 봉입한 작동유체의 선정과 봉입량은 본 연구실에서 수행해왔던 기존의 연구결과를 참고로 하여 가장 뛰어난 성능을 나타낸 R-142b (50vol.%)로 하였으며 입열유속은 각각의 장치의 열용량을 감안하여 동일한 열유속을 가질 수 있도록 하였다. 그리고 히트파이프의 작동각도의 변화 또한 동일한 각도로써 실험을 시도하였으나 20 ch의 경우 45°이하의 각도에서 작동이 중지되어 이하의 각도에서 실험이 이루어지지 못하였다.

Table. 2 Test conditions

Specifications		20 ch (L)	50 ch (L)
Working fluid		R-142b	
Charge ratio (vol.%)	$\alpha$	40, 60	50, 80
Input heat flux (W/cm <sup>2</sup> )	$q$	0.3, 0.6, 0.9, 1.2	0.3, 0.6, 0.9, 1.2, (1.5)
Inclination angle (. )	$\theta$	90	90, 45, 0, -45, -90

## 제 3 장 실험 결과 및 고찰

### 3.1 열전달 특성

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

물질의 고유 물성치인 열전도도는 온도에 대한 함수로서 결정되지만 OCHP에서의 유효열전도율은 함수관계가 훨씬 복잡하다. 즉 용기의 재질, 작동유체의 종류 및 봉입량, 경사각도, 진공도 등에 따라 달라지게 되는 것이다.

유효열전도율을 계산하는 식은 다음과 같다.

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

$l$	증발부와 응축부 사이의 평균 거리
$Q$	증발부에서 응축부로 전달되는 열량
$A_c$	작동유체가 흐르는 유로 단면적의 합
$T_{eva}, T_{con}$	증발부, 응축부 온도

### 3.1.1 20채널에서의 열전달 특성

Fig. 7은 20 채널을 가진 실험부에서 입열유속에 증가에 따른 유효 열전도율의 변화를 나타낸 것이다.

본 연구실에서 실시하였던 기존의 연구결과에서 봉입량 40(vol.%), 60(vol.%) 사이에서 OCHP의 성능이 가장 좋았기 때문에 같은 봉입량으로 실험을 하였다. 열유속 조건이  $0.9\text{W}/\text{cm}^2$  이하에서는 특히 낮은 값을 나타내고 있는데 이는 작동유체의 비등에 충분하지 않은 조건인 것으로 보여지며 실험 도중 관찰에 의해 내부 작동액의 진동이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

봉입량이 40(vol.%)에서 유효 열전도율의 값이 더 높게 나타났으며 그 값은 동물의 열전도도인  $400\text{W}/\text{cm}^2$ 의 약 60배 정도로 나타났다. 봉입량에 상관없이, 특히 뛰어난 성능을 나타내는 최적 열유속 조건은 나타나지 않았으나 작동 온도범위가 전체적으로 폭넓게 나타나는 것을 알 수 있으며, 실험에서는 한계 열유속 범위가 나타나지는 않았다.

하지만 봉입량에 상관없이 모두 45도 이하의 각도에서는 작동하지 않았다. 즉, 90°각도에서 작동시 활발히 비등, 응축을 반복하다가 경사각을 주게 되면 활발하던 내부유동이 그대로 멈추어버리고 따라서 OCHP의 증발부에 축열 현상만이 일어날 뿐 열전달 기능을 상실하는 것을 확인할 수 있었다. 45도 각도에서는 축열 도중 몇몇 채널에서 비등현상을 볼 수 있었으나 인접채널에 영향을 미치지 못하는 못하거나 순간적인 발생으로 그쳐 내부구동력으로서 작용하지 않았고 그 이하의 각도에서는 거의 비등현상이 발생하지 않았다.

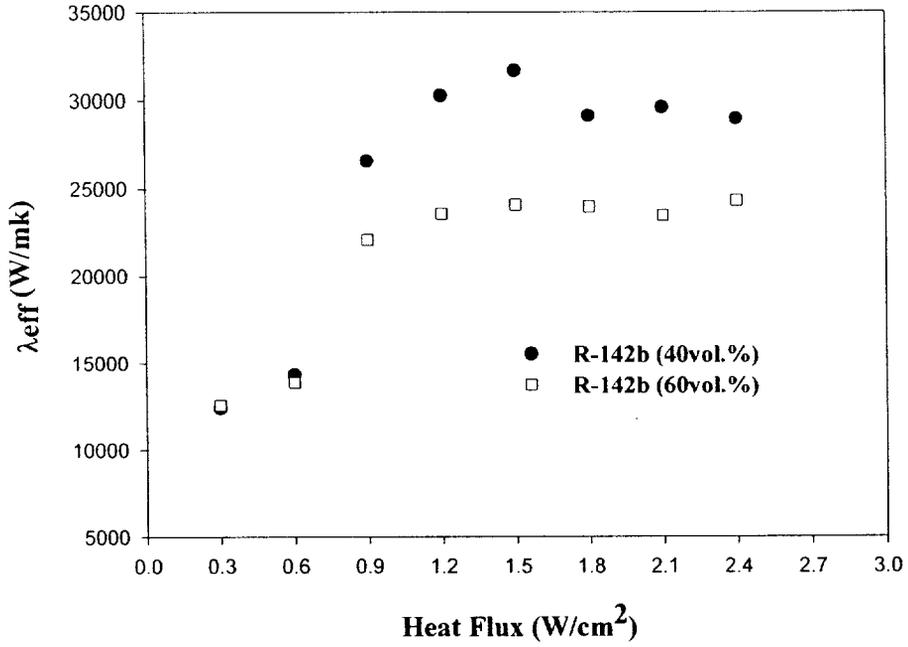


Fig. 7 Variation of effective thermal conductivity according to input heat flux with 20 ch (40vol.%, 60vol.%)

### 3.2.2 50채널에서의 열전달 특성

Fig. 8~9은 50채널에서의 열유속에 따른 유효열전도율의 변화를 나타낸 것이다. 20 채널의 실험부와 비교하였을 때 유효열전도율의 값은 조금 작았지만 경사각도의 변화에 관계없이 OCHP가 작동하는 것을 확인할 수 있었다. 20 채널과 달리 50채널에서의 이러한 현상은 증발부에서 발생하는 핵비등의 압력 파가 서로 보완, 증폭 또는 합쳐져서 내부 작동유체의 순환 및 축방향 진동의 자유도가 증가하는 것에 기인하는 것으로 여겨진다.

또한 그림을 살펴보면 경사각도에 따라 전열성능의 변화에 한가지 특이한 점을 발견할 수 있다. 한계 열유속 범위를 확인할 수는 없었지만 낮은 열유속에서 높은 열유속으로 갈수록 전열성능의 역전현상이 나타남을 알 수 있다. 즉, 상부가열모드의 최적 열유속 범위는 하부가열모드의 범위보다 더 높은 곳에서 나타남을 의미한다. 이는 상부가열의 경우 응축부에서 작동유체가 증발하므로 작동유체의 비등에 필요한 열량이 전달되기 위해선 하부가열모드보다 더 높은 열유속이 필요함을 의미한다.

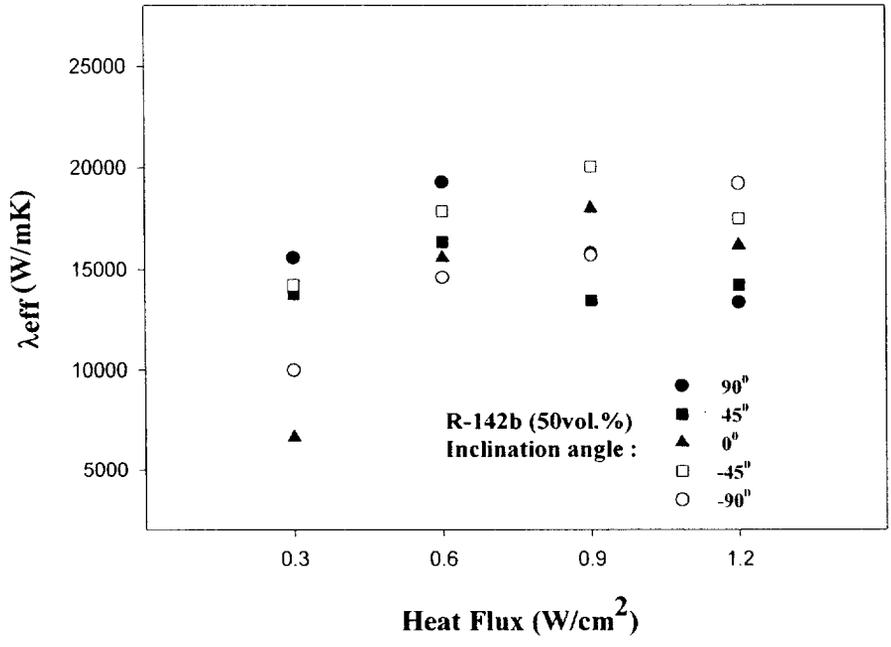


Fig. 8 Variation of effective thermal conductivity according to inclination angle with 50ch (50vol.%)

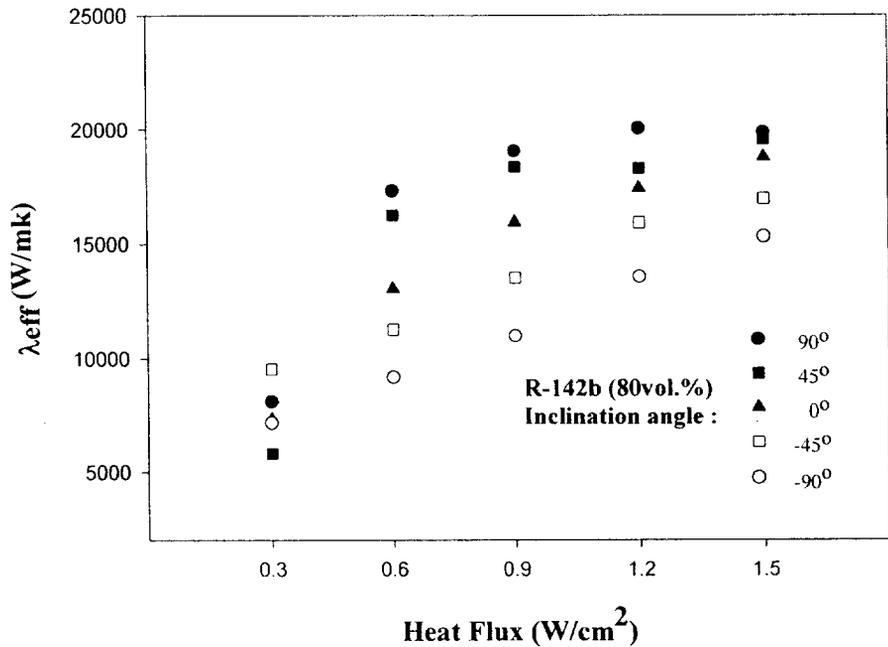


Fig. 9 Variation of effective thermal conductivity according to inclination angle with 50ch (80vol.%)

### 3.2 압력 진동 특성

OCHP는 내부 작동유체의 루프내 순환 및 축방향 진동에 의한 현열 수송과 동시에 발생하는 비등·응축에 의한 잠열수송을 하는 기구로써 그 작동유체의 핵비등에 따른 압력파를 구동력으로 한다. OCHP 구조가 사행구조이기 때문에 때로는 다수의 채널에서 동시에 핵비등이 발생하며 이에 따른 압력파는 저항이 적은 인접채널로 전파되며 서로를 상쇄하기도 하며 증폭되기도 하며 진동이 활발하게 되는 것이다. 그러므로 히트파이프 내부의 압력변동은 열수송 성능과 깊은 상관 관계를 가진다고 말할 수 있다. 본 장에서는 OCHP의 시간에 따른 내부 압력진동을 측정 및 분석하여 열전달 성능과의 상호관계에 대해 나타내고 있다. OCHP는 아주 간단한 형상에 비해 작동시 내부 압력의 진동이 매우 복잡한 형태로 발생하고 있기 때문에 FFT(Fast Fourier Transform)기법을 사용하여 분석을 시도하였다.

#### 3.2.1 20 채널에서의 압력 진동 특성

Fig. 10~11는 작동유체 R-142b를 20 채널의 실험부에 40 및 60(vol.%) 봉입하여 실험하였을 때, 입열유속의 변화에 따른 증발부의 압력변동을 나타낸 것이다. 20 채널에서는 봉입량에 관계없이 상부가열모드에서만 작동하였기 때문에 하부가열모드인 90°조건만 나타내었다. 입열량이 증가함에 따라 히트파이프 내부의 포화 압력은 증가함을 알 수가 있다. 입열량이 작을 때에는 증발부의 일부 채널에서만 핵비등이 발생하게 되고 곧 응축되기 때문에 비등시 발생하는 압력이 인접채널에 영향을 미치지 못한다. 하지만 입열량이 증가함에 따라 전 채널에 걸쳐 내부 작동유체의 비등 및 응축이 점차적으로 활기를 띠

게 되므로 포화압력이 상승함과 동시에 내부 작동유체의 축방향 진동과 루프 내 순환을 지배하는 압력 정현파가 발생한다.

40(vol.%) 봉입시, 열유속  $0.9 \text{ W/cm}^2$ 의 조건부터 작동유체의 비등이 더 많은 채널로 확장되기 시작하여  $1.2, 1.5 \text{ W/cm}^2$ 에서는 파형이 아주 안정화되어 정현파로 나타나는 것을 알 수 있다.  $1.8 \text{ W/cm}^2$ 이상의 열유속에서는 다시 파형이 파괴되기 시작하는데 이는 일부채널에서의 dry-out 현상에 의한 것으로 dry-out이 발생하는 채널이 많아질수록 OCHP의 열수송 능력은 떨어지게 된다. 실제로 앞의 유효열전도율 그래프를 살펴보면 정현파가 유지되는  $1.5 \text{ W/cm}^2$ 의 열유속에서 유효열전도율이 최대 값을 나타내고 그 이상에서는 점차 감소되는 것을 확인할 수 있다.

60(vol.%) 봉입시에는 열유속  $0.9 \text{ W/cm}^2$ 조건부터 일정한 정현파가 발생함을 알 수 있다. 이는 동일 열유속 조건이라도 봉입량이 많아졌기 때문에 OCHP내부의 압력이 전체적으로 상승했기 때문이라고 볼 수 있다. 40(vol.%)에서와 달리  $1.5 \text{ W/cm}^2$  이상의 열유속 조건에서도 정현파의 모습이 보여지고 있다. 봉입된 작동 유체량이 많아 졌기 때문에 실험시 적용되었던 열유속 범위 내에서 dry-out 현상이 발생하지 않았기 때문으로 해석되며 이는 OCHP 설계시 열유속 범위에 따라 적용되어질 수 있음을 의미한다. 봉입량 40(vol.%)의 경우와 비교했을 때 열수송능력은 조금 낮게 나왔으나 40(vol.%)일 때는  $1.5 \text{ W/cm}^2$  이후 점차 그 능력이 감소됨을 나타내고 있으나 60(vol.%)의 경우는 계속해서 열수송 능력이 증가함을 보이고 있으므로 실험조건보다 더 높은 열유속 조건이 형성된다면 열수송 능력에 있어 역전 현상이 나타날 것으로 보여진다.

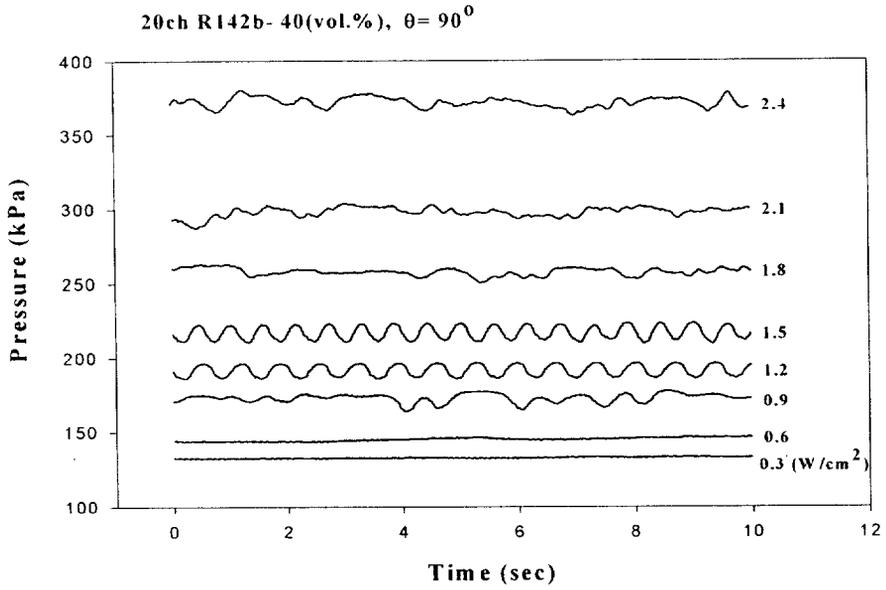


Fig. 10 Pressure oscillation of working fluid according to input heat flux with 20 ch [40(vol.%,  $\theta=90^\circ$ )]

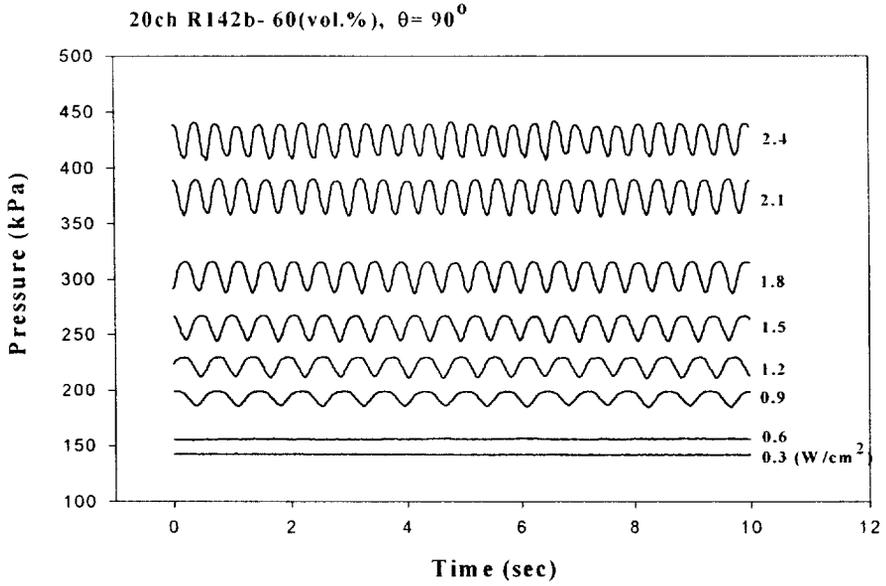
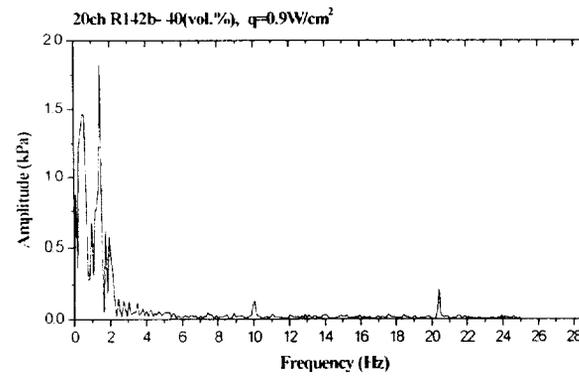
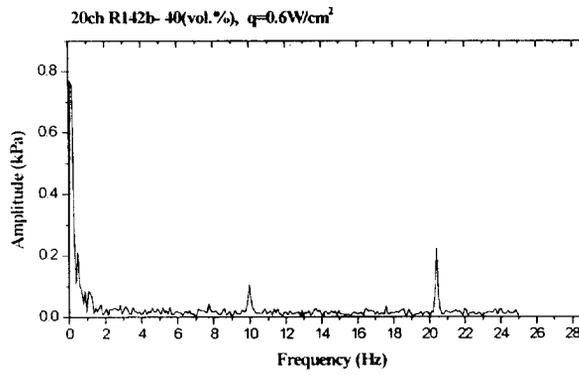
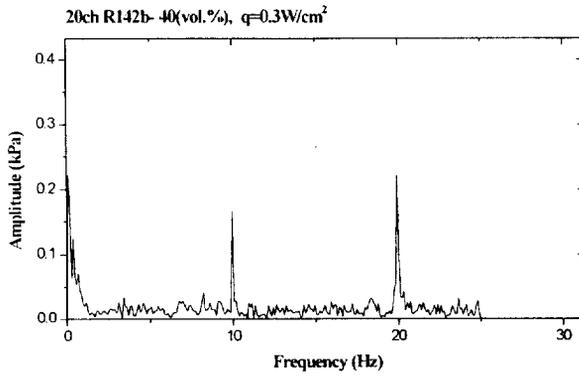


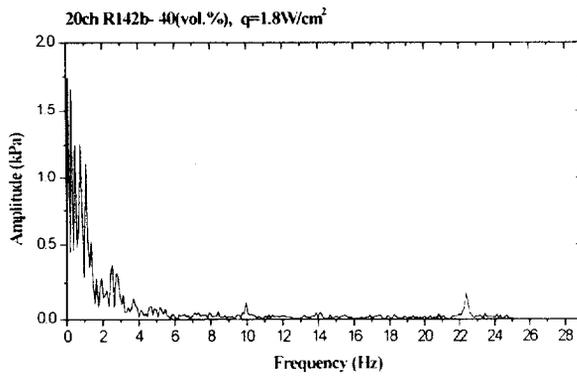
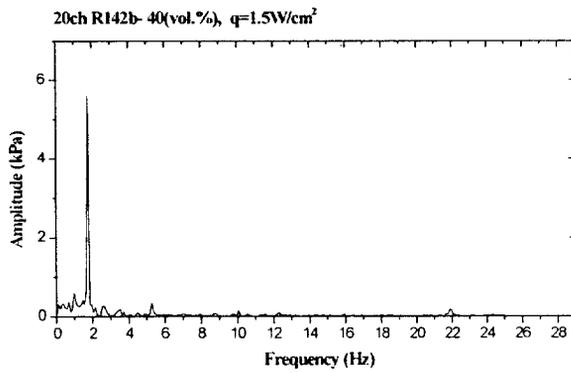
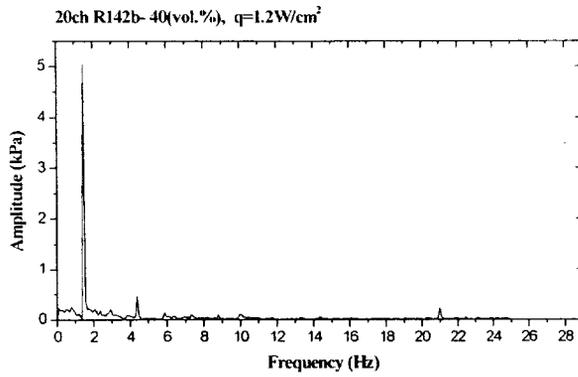
Fig. 11 Pressure oscillation of working fluid according to input heat flux with 20 ch [60(vol.%),  $\theta=90^\circ$ ]

### 3.2.1 압력 진동 특성의 FFT 분석

Fig 10~11에 나타나 있는 시간축에 따른 압력파형은 OCHP 내부의 압력 진동을 총괄적으로 나타내는 것이다. 하지만 실제로는 복잡한 형태의 진동이 발생하고 있기 때문에 총괄적인 값만으로는 적절한 진단이 어렵다. 즉, 진동의 전체 주파수 성분의 벡터합인 이 시간영역에서 표현되는 총괄적 진폭이 같다고 해도 진동파형에 포함되어 있는 주파수 성분을 판단할 수가 없는 것이다. FFT는 변수변환의 일종으로 시간축을 주파수 축으로 변환시키는 방법이다. OCHP 작동을 지배하고 있는 압력파를 분해함으로써 어느 정도의 진동수가 어느 정도의 세기로서 포함되어 있는가를 확인할 수 있다.

Fig 12~13은 20 채널 실험부의 봉입량 40(vol.%), 60(vol.%)에서 나타난 압력진동을 FFT를 사용하여 나타낸 것이다. 열유속이 작을 때에는 넓은 대역에서 낮은 진폭을 가지는 주파수 나타나다가 작동유체의 핵비등이 활발히 발생하는 열유속에 접어들면서부터 파형을 지배하는 단 한 개의 주파수가 나타남을 알 수 있다. 이때부터는 열유속이 증가할수록 진폭과 주파수가 동시에 증가함을 확인할 수 있으며, dry-out이 발생하기 시작하는 고열유속에서는 진폭은 다시 줄어들지만 주파수대역은 더 넓게, 많은 수의 정현파의 중첩으로 나타난다. 저열유속과 유사하지만 내부의 압력이 전체적으로 상승함으로 인해 작동유체가 과열되어 압력진폭은 더 큼을 알 수 있다. 40, 60(vol.%) 모두 열전달 성능이 가장 뛰어난 열유속에서는 진동을 지배하는 주파수가 단 한 개로 나타나며 그 진폭 또한 가장 큰 것을 확인할 수 있다.





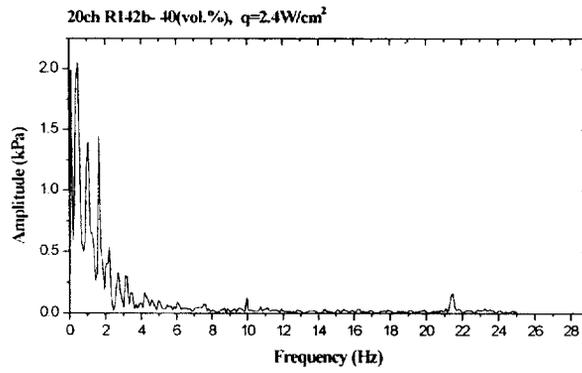
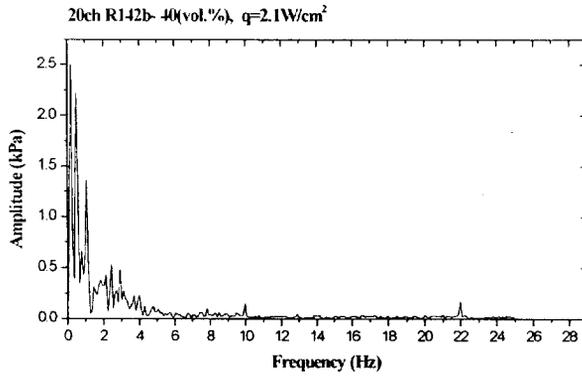
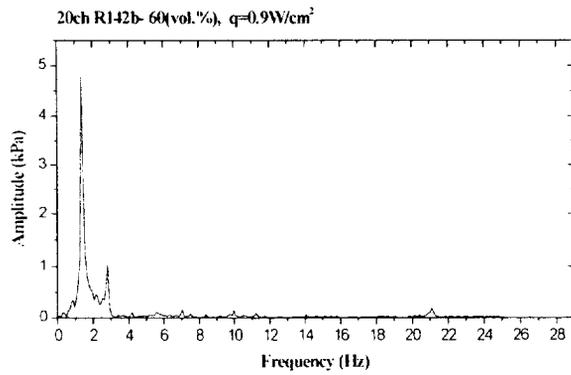
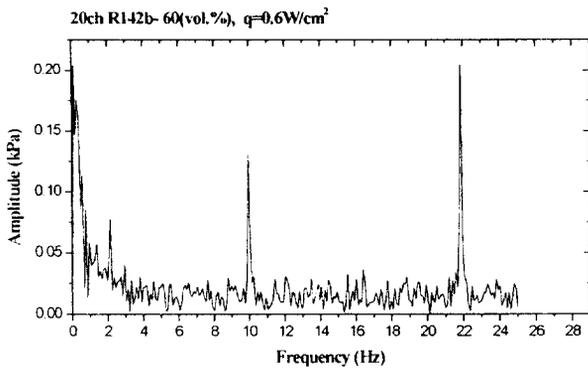
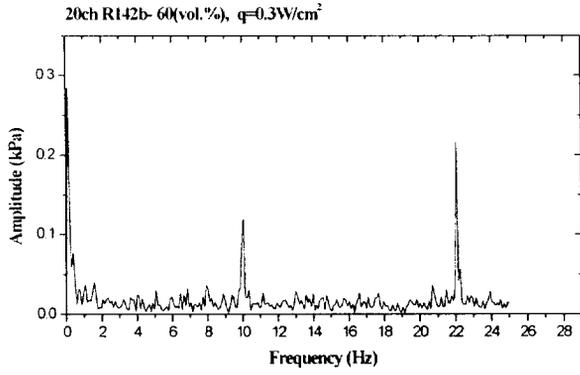
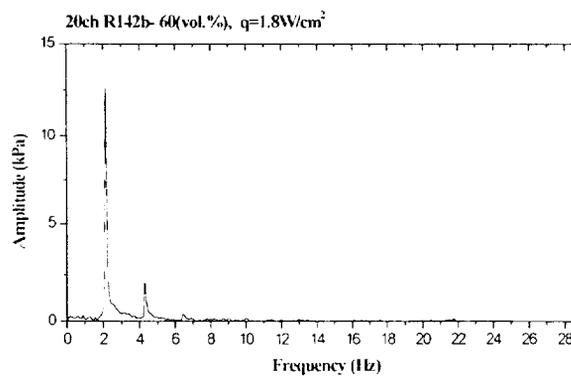
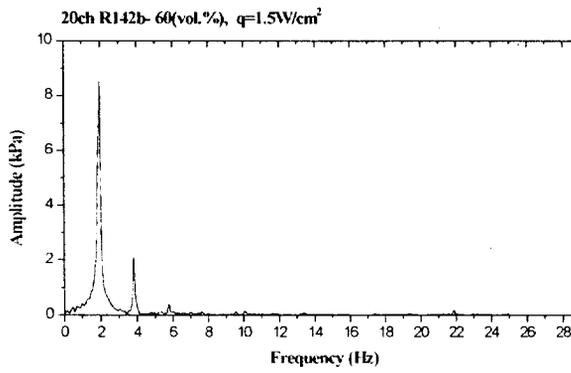
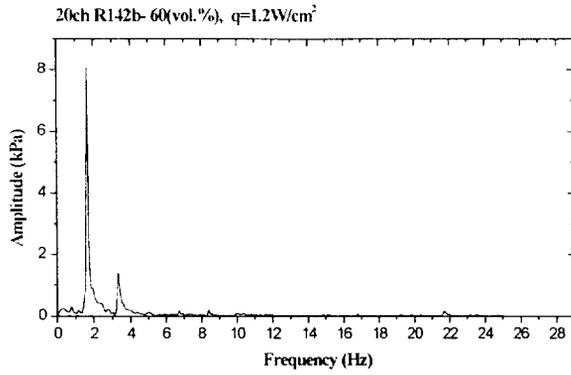


Fig. 12 Frequency of pressure oscillation by FFT [40(vol.%),  $\theta=90^\circ$ ]





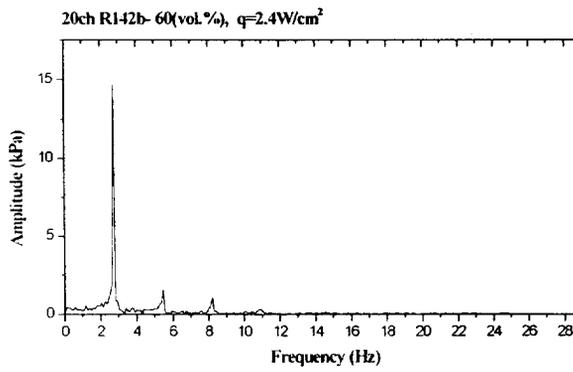
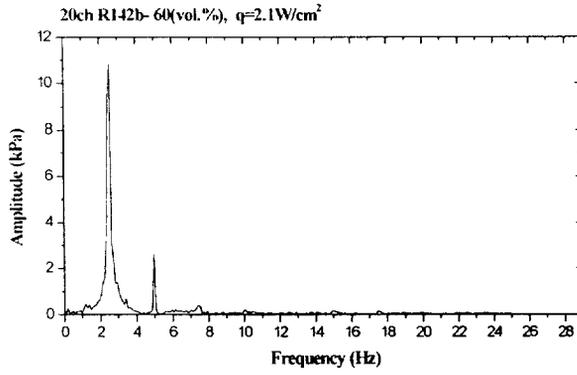


Fig. 13 Frequency of pressure oscillation by FFT [60(vol.%),  $\theta=90^\circ$ ]

### 3.2.3 50채널에서의 압력특성

Fig. 14~17는 50채널 실험부의 각 실험조건에서 입열유속의 변화에 따른 증발부의 압력변동을 나타낸 것이다. 경사각도의 변화에 따라 약간의 차이는 있지만 유형이 비슷하므로 하부가열모드( $90^\circ$ )와 상부가열모드( $-90^\circ$ )의 경우만을 나타내었다.

50채널에서의 압력특성은 20 채널의 그것과 비교했을 때 차이점이 많다. 즉, 채널 수가 많기 때문에 핵비등에 의한 압력진동의 자유도가 상승하게 되므로 20 채널에서보다 많은 압력파가 서로 보완 또는 증폭 소멸하게 되는 현상을 관찰할 수 있게 된다. 따라서 FFT 분석을 통해서도 50채널 전체를 지배하는 하나의 정현파형을 찾아볼 수 없었다.

작동유체의 봉입량에 관계없이 같은 열유속 조건일 경우, 상부가열모드의 압력이 하부가열모드에 비해 높게 나타났다. 이러한 현상은 상부가열모드시의 작동액은 응축부인 하부에 고여 있기 때문에 이 작동액에 핵비등을 발생시키기 위한 열이 관벽을 통해서 전도되어야 함을 의미한다.

50ch R142b- 50(vol.%),  $\theta=90^{\circ}$

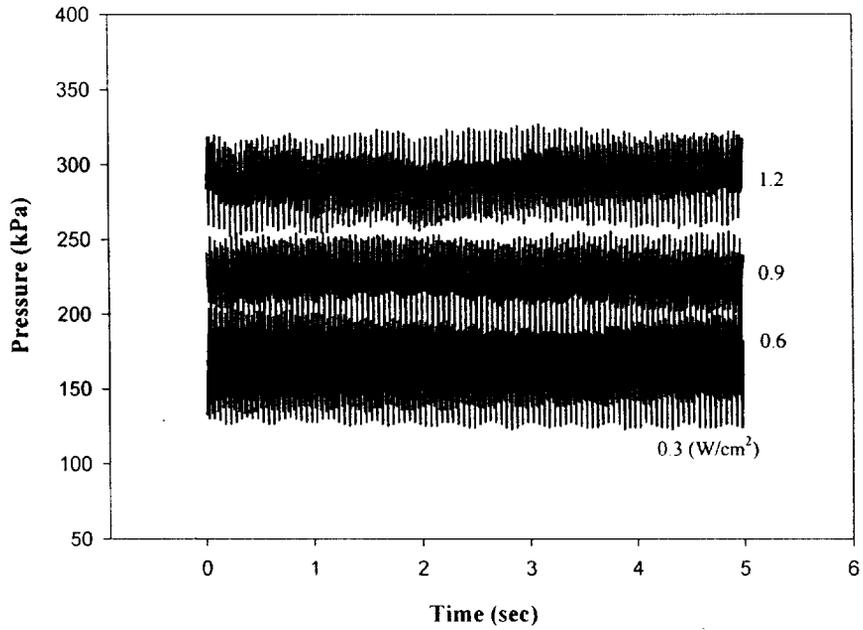


Fig. 14 Pressure oscillation of working fluid according to input heat flux with 50ch [50(vol.%),  $\theta=90^{\circ}$ ]

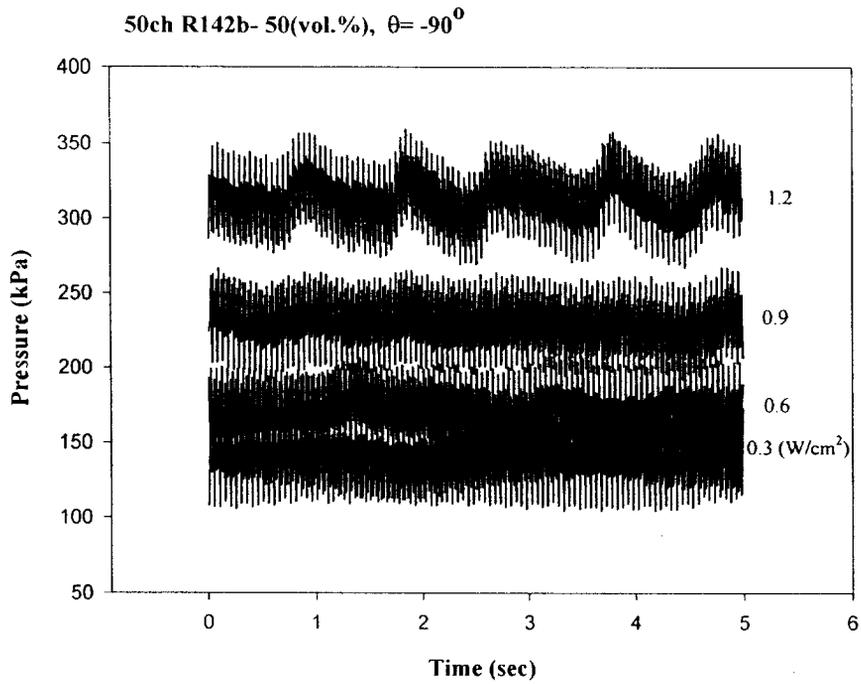


Fig. 15 Pressure oscillation of working fluid according to input heat flux with 50ch [50(vol.%),  $\theta = -90^\circ$ ]

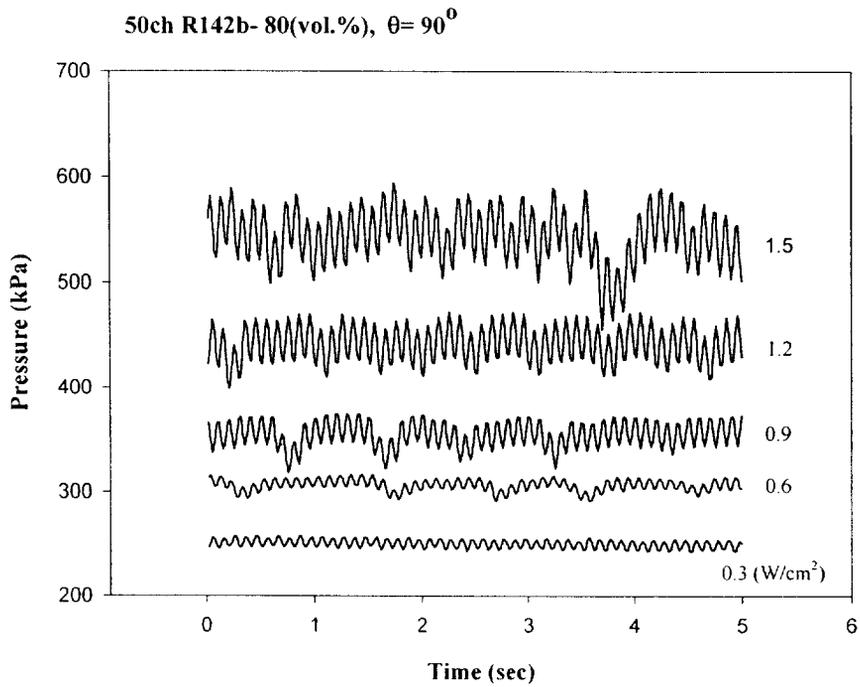


Fig. 16 Pressure oscillation of working fluid according to input heat flux with 50ch [80(vol. %),  $\theta=90^\circ$ ]

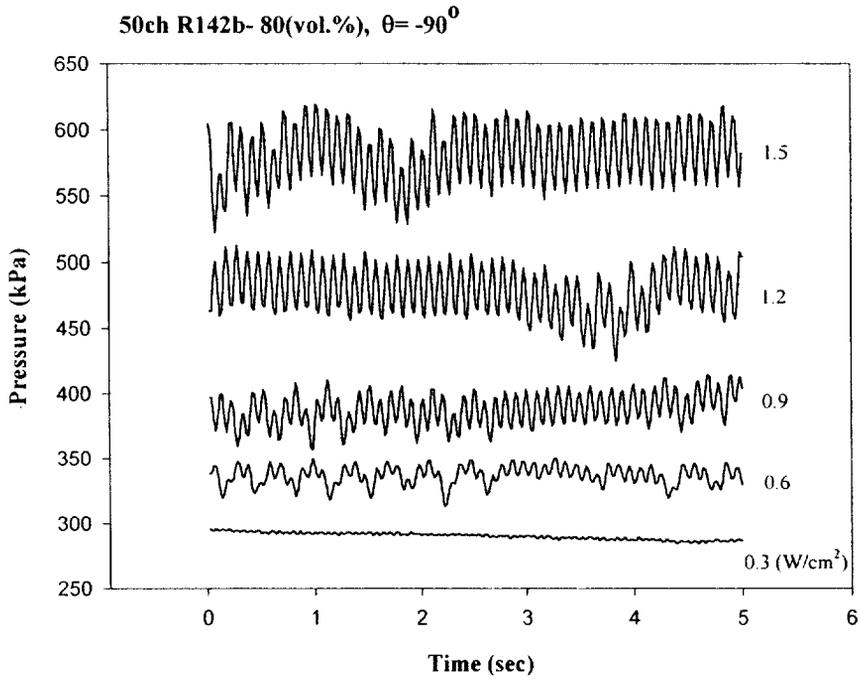


Fig. 17 Pressure oscillation of working fluid according to input heat flux with 50ch [80(vol.%),  $\theta = -90^\circ$ ]

## 제 4 장 결 론

본 논문에서는 전자 기기의 냉각이나, 폐열 회수 등, 에너지 절약적인 측면에서 그 활용도가 매우 높은 진동 세관형 히트 파이프(Oscillating Capillary tube Heat Pipe : OCHP)를 서로 다른 유동 채널과 작동모드를 변화시키면서 내부 압력 진동과 열전달 특성을 비교, 분석하여 고효율 OCHP의 실현을 위한 기초적인 자료로 삼고자 하였다.

1. 유효열전도율은 20채널이 약  $32,000\text{W}/\text{cm}^2$ 으로 50채널의  $20,000\text{W}/\text{cm}^2$ 보다 더 높게 나타났다. 이는 20채널에서 내부 작동유체의 축방향 진동과 전체 루프순환이 동시에 발생하기 때문이다. 하지만 20채널의 OCHP는 상부가열모드(작동각도 :  $90^\circ$ )에서만 작동한 반면 50채널의 OCHP는 가열모드에 상관없이 열을 효과적으로 수송하였다. 이는 채널의 수가 많아지고 수력직경이 작아져서 상부 가열 모드에서도 작동할 수 있도록 기액 슬러그류의 진동 자유도가 높아졌기 때문이다.

2. 동일 채널 수 일 경우 봉입량이 많아질수록 더 높은 열유속일 때 최대 열수송 능력을 보였으며, 가열모드에 상관없이 작동하는 50채널의 경우에는 높은 열유속으로 옮겨갈수록 상부가열모드의 성능이 하부가열모드의 성능보다 뛰어난 것으로 나타났다. 상부가열모드가 더 높은 열유속 조건에서 최적의 열수송 능력을 가지는 것은 작동유체의 핵비등을 발생시키기 위한 열이 관벽을 통해서 전도되어야 하기 때문으로 하부가열모드에서 드라이아웃이 발생하더라도 상부가열모드로 전환시 실제로 증발하는 작동액이 상대적으로 낮은 온도의 응축부에 존재하므로 더 많은 작동액이 존재할 수 있게 되기 때문이다.

3. 적절한 열유속 범위내에서는 작동유체의 내부 순환을 지배하는 압력 파형이 정현파의 형상을 나타내고 열유속의 증가에 따라 약1.3Hz에서 2.3Hz로 주파수도 증가하였다. 그러나 채널 수의 증가로 인해 작동유체의 진동자유도가 증가할 시에는 유동이 복잡하게 발생하기 때문에 압력진동만으로는 OCHP의 성능을 평가할 수는 없다.

## 참고문헌

- [1] 赤地久輝, 루프形蛇行細管히트파이프, 日本機械學會第71期通常總會講演會講演論文集, Vol. 3, No. 940-10, pp. 606-611, 1994.
- [2] H. Akachi, F. Polasek and P. Stulc, Pulsating Heat Pipes, Proceedings of 5th Int. Heat Pipe Symposium, Melbourne, pp. 208-217, 1996.
- [3] 魏 啓陽, 和泉智水, 前澤三郎, 赤地久輝, 루프形振動히트파이프의 伝熱特性, 第35回日本伝熱シンポジウム講演論文集, Vol. 2, pp. 519-520, 1998.
- [4] A. Faghri, Heat pipe science and technology, Taylor & Francis, Washington, DC, pp. 625-671, 1995.
- [5] G. P. Peterson, heat pipes, John wiley & sons, Inc., New York, 1994.
- [6] Shigefumi Nishio, Oscillatory-Flow Heat-Transport Device, 11th International Heat Pipe Conference, Vol3, pp 39-49, 1999.
- [7] J. S. Kim, W. H. Lee, J. H. Lee, H. S. Jung, J. H. Kim and J. I. Jang, Flow Visualization of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, Proceeding of Thermal Engineering Conference of KSME, pp. 65-70, 1999.

- [8] W. H. Lee, H. S. Jung, J. H. Kim and J. S. Kim, Flow Visualization of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, 11th International Heat Pipe Conference, Vol. 2, pp. 131-136, Tokyo, 1999.
- [9] Lee, W. H., Kim, J. H., Kim, J. S. and Jang, I. S., 1999, The Heat Transfer Characteristics of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, 2th Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Vol. 3, pp. 1713-1718, Pisa, Italy.
- [10] H. Akachi, Looped Capillary Tube Heat Pipe, Proceedings of 7th General Meeting Conference of JSME, Vol.3, No. 940-10, pp. 606-611, 1994.
- [11] S. Nishio, Bubble Driven Heat-Transport Tubes, Journal of HTSJ, Vol. 3, No. 142, pp. 53-56, 1997.
- [12] S. Nishio, The Trend of Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, Journal of JAHP, Vol. 17, No. 2, pp. 8-15, 1998.
- [13] T. Izumi, K. Gi and S. Maezawa, Heat Transfer Characteristics of Double-Ended Closed Oscillating Capillary Tube Heat Pipe, Journal of JAHP, Vol. 17, No. 1, pp. 7-11, 1998.
- [14] K. Gi, T. Izumi, S. Maezawa, and H. Akachi, Heat Transfer Characteristics of Looped Oscillating Heat Pipes, 35th National Heat

Transfer Symposium of Japan, Vol. 2, pp. 519-520, 1998.

[15] O. Takahashi, Z. Kawara, A. Serizawa, M. Kohno and H. Akachi, Visualization of Boiling and Condensation in Capillary Tunnel Type Flat Plate Heat Pipe with Proton Radiography, 35th National Heat Transfer Symposium of Japan, pp. 529-530, 1998.

[16] N. Hosoda, S. Nishio and R. Shirakashi, Bubble-Driven Heat Transport Tube(Flow Patterns and Heat Transport Model), 34th National Heat Transfer Symposium of Japan, Vol. 1, pp. 267-268, 1997.

[17] K. Gi, R. Sato and S. Maezawa, Flow Visualization Experiment on Oscillating Heat Pipe, 36th National Heat Transfer Symposium of Japan, pp. 659-660, 1999.

[18] Y. Miyazaki, M. Arikawa, Visualization of Oscillating Heat Pipe, 36th National Heat Transfer Symposium of Japan, pp. 661-662, 1999.

[19] S. Nishio, M. Hosoda, S. Nagata and K. Watanabe, Bubble Driven Heat Transport Tube(Experiments of Heat Transfer Characteristics), 34th National Heat Transfer Symposium of Japan, pp. 269-270, 1997.

[20] S. Nagata, Y. Takita, R. Shirakashi and S. Nishio, Meandering Closed-Loop Heat-Transport Tube, 35th National Heat Transfer Symposium of Japan, Vol. 2, pp. 527-528, 1998.

[21] S. Maezawa, T. Izumi, R. Nakajima and K. Gi, Nonlinear Chaotic Characteristics of Oscillating Heat Pipe, 34th National Heat Transfer Symposium of Japan, Vol. 1, pp. 275-276, 1997.

[22] Y. B. Im, J. H. Lee, W. H. Lee, J. H. Kim and J. S. Kim, Influence of Working Fluids to Heat Transfer Characteristics of the Heat Exchanger using Oscillating Capillary Tube Heat Pipe for Low Temperature Waste Heat Recovery, Proceedings of '99 Summer Conference of SAREK, pp. 89-94, 1999.

[23] 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.

[24] Suzuki O., "Heat Transfer Characteristics of a Bubble-Driven Capillary Heat Pipe", 37<sup>th</sup> National Heat Transfer Symposium of Japan, pp. 35-36, 2000-5.

[25] J. S. Kim, H. S. Jung, W. H. Lee, and S. B. Ko, 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.

[26] H. Y. Kwak, H. Y. Yoon, C. K. Yu, Y. H. Kang, Operating

characteristics of a two-phase closed thermosyphon with a binary mixture,  
The 2nd Heat Pipe Workshop Korea, pp. 147-153, February 6-7, 1998.

## 감사의 글

20대의 대부분을 보낸 대학 생활 중에서 가장 바쁘게 지나간 생활이 연구실에서 보낸 시간이 아닌가 합니다. 내가 선택한 길에 대한 의심과 새로운 각오로 내 자신을 추스르기를 반복하면서 보낸 시기였지만 선배, 후배와 밤을 지새우며 실험을 한 후에는 더없이 큰 만족감을 느낄 수 있었습니다.

본 논문이 완성되기까지 변함 없는 지도와 가르침을 주신 김종수 교수님의 깊은 은혜에 감사 드리고 싶습니다. 그리고 논문 심사를 위해 애써주시고 학문적인 조언을 주시던 오후규 교수님, 금종수 교수님, 김영수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

연구실을 처음 선택했을 때 시행착오를 하나하나 가르쳐 주던 큰 정훈형, 실험에 대해 항상 관심을 가지고 조언해 주신 주원형과 옥현형, 그리고 일본에서 공부하고 있는 작은 정훈형 모두 감사 드립니다. 바쁜 생활중에서도 후배들과 정을 주고 받으며 학문적인 토론을 펼치기 좋아했던 영태형, 큰 현석형, 종현형, 성준형 모두에게 감사하다는 말을 하고 싶습니다. 함께 연구실을 이끌어 나갔던 태운이와 많은 나날을 같이 지새웠던 성복이는 나의 석사생활에 큰 도움이 되었습니다. 타국에 와서 연구에 매진하는 Mr hung과 지금 이 순간 열심히 석사생활을 하고 있는 후배들 원호, 성호, 수정, 재홍, 영수, 상훈이와 학부생 태훈, 태진, 태호 모두의 앞날에 멋진 일이 가득하기를 바랍니다.

2년 동안 언제나 나를 믿고 의지해주고, 또 나의 버팀목이 되어준 수연이, 인생의 형이 되어준 김용한 형께 특히 감사드립니다.

하지만 지금 내 자신과 이 논문은 할머니님과 부모님이 아니었다면 결코 있을 수 없었다는 것을 잘 알고 있습니다. 존경합니다.