



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

다채널 평판형 써모사이폰의
열성능에 미치는 응축부 경사각 및
길이의 영향에 관한 연구



2020년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

김 민 석

공 학 석 사 학 위 논 문

다채널 평판형 써모사이폰의
열성능에 미치는 응축부 경사각 및
길이의 영향에 관한 연구

지도교수 김 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2020년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

김 민 석

김민석의 공학석사 학위논문을 인준함.

2020년 8월



위 원 장 공학박사 김 은 필 (인)

위 원 공학박사 정 석 권 (인)

위 원 공학박사 김 종 수 (인)

목 차

목차	i
<i>Abstract</i>	ii
<i>Nomenclatures</i>	vi
제1장 서론	
1.1 연구 배경 및 목적	1
1.2 히트파이프(Heat pipe)의 개요	3
1.3 유효 열전도율(Effective thermal conductivity)	6
1.4 선행 연구	7
제2장 실험 장치 및 방법	
2.1 실험 장치	9
2.2 실험 방법	14
제3장 실험 결과 및 고찰	
3.1 입열량 5W 및 15W에 대한 실험 결과	18
3.2 입열량 5~25W에 대한 실험 결과	26
제4장 결론	41
참고문헌	43

**A Study on the Influence of Condensation Inclination Angle
and Length on the Thermal Performance of Multi-Channel
Flat Type Thermosyphon**

Min Seok Kim

Department of Refrigeration and Air conditioning Engineering,
Graduate School

Abstract

Heat pipes with simple structure, miniaturization, low production cost and high thermal performance are used in various fields. However, when the heat pipe is used, there is a problem that it does not operate in the horizontal state or the performance becomes low. Therefore, in this paper it is created a mechanism that allows the working fluids to easily return to the evaporation section by inclining only the condensation section, which is part of the heat pipe that emit heat. In addition, it is tried to confirm the thermal performance characteristics of the heat pipe according to the length of the condensation section. The performance characteristics were confirmed experimentally. The experiment was conducted on input power of 5W and 15W based on the

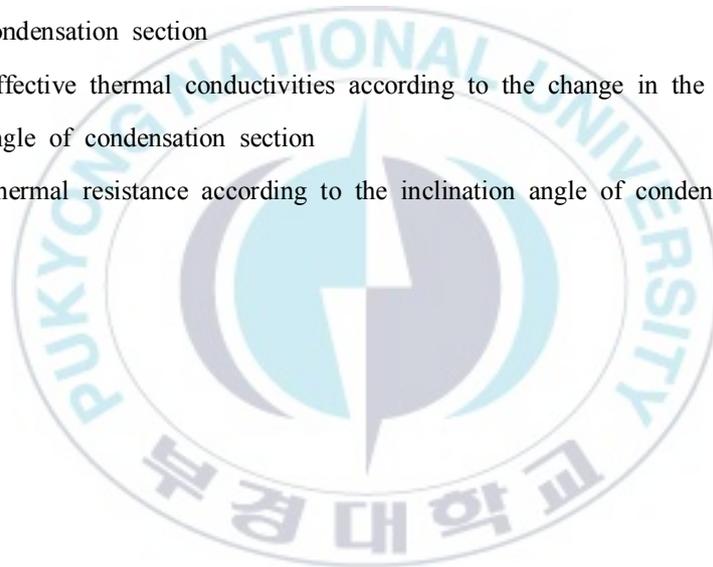
battery temperature of the electric vehicle in order to utilize it for heat dissipation of the battery of the electric vehicle. In addition, in order to expand the range of use, we conducted additional experiments with input power of 5 to 25W. As a result, in the 5W and 15W conditions, according to the inclination angle of the condensation section or the length of the condensation section, the performance was up to 2.3 times higher than when the flat type thermosyphon was horizontally operated. It can be seen that the effective thermal conductivity increases up to 2.4 times under the input power condition of 5W to 25W. As a result of the experiment, the thermal performance of 20% charging ratio shows higher thermal performance than the thermal performance of 40% charging ratio. Compared to the case of, It shows the best thermal performance at $\theta = 10^\circ$ of inclination of the condensation section. The effective thermal conductivity when the length of the condensation section is long is approximately 2.4 times larger than the effective thermal conductivity when the length of the condensation section is short.

List of figures

- Fig. 1.1 Schematic of heat transfer mechanism of heat pipe
- Fig. 1.2 Schematic of thermosyphon
- Fig. 2.1 Photo. of the multi-channel flat type thermosyphon
- Fig. 2.2 Cross section of the multi-channel flat type thermosyphon
- Fig. 2.3 Photo. of heater
- Fig. 2.4 Schematic diagram of the multi-channel flat type thermosyphon
- Fig. 2.5 Schematic of case 1 and case 2
- Fig. 2.6 Schematic diagram of experimental apparatus
- Fig. 3.1 Comparison of effective thermal conductivity between case 1 and case 2
- Fig. 3.2 Temperature of the heater surface
- Fig. 3.3 Comparison of effective thermal conductivity(k_{eff}) with the value of horizontal state (5, 15W)
- Fig. 3.4 Comparison of effective thermal conductivity between case 1 and case 2
- Fig. 3.5 Effective thermal conductivity according to the inclination angle of condensation section
- Fig. 3.6 Comparison of effective thermal conductivity(k_{eff}) with the value of horizontal state(5~25W)
- Fig. 3.7 Each thermal resistance profile according to inclination angle

List of tables

- Table 1 Types of heat pipes according to methods of condensate return
- Table 2.1 Specification of multi-channel flat type thermosyphon
- Table 2.2 ODP and GWP comparison between HFE-7100 and other refrigerants
- Table 2.3 Specification of heater
- Table 3.1 Effective thermal conductivities by inclination angle and length of condensation section
- Table 3.2 Effective thermal conductivities according to the change in the inclination angle of condensation section
- Table 3.3 Thermal resistance according to the inclination angle of condensation section



Nomenclature

Symbols

A	AREA	[mm ²]
Bo	Bond number	
D	Diameter	[mm]
g	Gravity force	[m/s ²]
k	Effective thermal conductivity	[W/m·K]
L	Length	[mm]
N	Number of channel	
Q	Heat input	[W]
R	Thermal resistance	[K/W]
T	Temperature	[°C]

Greek symbols

ρ	Density	[kg/m ³]
σ	Surface tension	[N/m]

Subscripts

<i>eff</i>	Effective
<i>h</i>	Hydraulic

<i>cr</i>	Critical
<i>c</i>	Condensation
<i>e</i>	Evaporation
<i>ec</i>	Evaporation section-condensation section
<i>cond.</i>	Condensation
<i>eva.</i>	Evaporation
<i>g</i>	Gas
<i>l</i>	Liquid



제1장 서론

1.1 연구 배경 및 목적

전자 장비가 콤팩트화 및 고발열화 됨에 따라 모든 전자장치의 방열은 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 최근 작고 얇으며 고성능화된 컴퓨터나 통신장비나 광폭화된 TV 등의 전자 장치 및 전기 자동차 분야의 배터리 등이 개발됨에 따라서 전자 장비 및 배터리의 방열 시스템 또한 소형화 또는 간단한 구조가 요구되고 있다[1]. 전자 제품의 방열 및 열적 신뢰성은 시스템의 문제뿐만 아니라 인간의 안전 및 편의에 직결되어 있기에 열을 효과적으로 방출할 수 있는 방열 시스템의 개발이 필요하다.

히트파이프(heat pipe)는 형태가 간단하고 소형화가 가능하며 높은 열전달 성능을 가지고 있으며, 구동 동력을 필요로 하지 않기 때문에 다양한 분야에서 방열을 위해 사용되기에 적합하다. 그러나, 히트파이프(heat pipe)는 수평 상태에서는 작동하지 않거나 성능이 낮아지는 문제점이 있다. 또한 최근에는 TV 등 가전제품의 고해상도 display 및 방열 부위의 광폭화, 모바일 기기의 고성능화, 전기자동차와 같은 수송기계의 배터리, 전자제품의 사용 비율 확대 등으로 다양한 형태에 대응하는 냉각 시스템이 요구되고 있다. 지금까지 종래의 연구들에서 원형 히트파이프에 대한 연구는 많이 있었지만, 다채널 평판형 박판 써모사이폰에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다. 이에 경량화, 박판화 및 고성능화에 대한 연구가 절실하게 필요한 실정이다.

이에 본 실험에서는 이를 해결하기 위해 다채널 평판형 써모사이폰을 이용하여 써모사이폰의 일부, 즉 열을 방출하는 응축부 부분에만 경사를 주어 작동 유체가 증발부로 보다 쉽게 귀환할 수 있도록 하였다. 또한 응축부의 길이를 다르게 설정하거나 증진율을 다르게 하여 작동 유체의 유동 특성과 써모사이폰의 열적 특성을 실험적으로 확인하였다. 이 결과를 전기 자동차용 배터리 방열 및 고성능화된 컴퓨터나 통신장비나 광폭화된 TV 등 다양한 온도 영역의 전자제품 등에 응용될 수 있는 최적 냉매 증진량, 액 귀환을 위한 응축부 경사각 및 응축부 길이가 열전달 성능에 미치는 영향을 분석하여 기초설계 자료로 제시하고자 한다.



1.2 히트파이프(Heat pipe)의 개요

1.2.1 히트파이프

히트파이프는 작은 온도차로 큰 열량을 수송할 수 있는 고성능의 전열소자이다. 히트파이프의 구성은 기본적으로 매우 단순하며, 밀폐 용기와 작동 유체로 되어있다. 밀폐 용기(container)는 용도나 작동 원리에 따라 원관이나 평판 형태, 세관의 다발 등 여러가지 형태가 있다. 작동 유체는 밀폐 용기를 진공으로 만든 후 봉입하여, 용기 내에는 액 상태와 증기 상태의 작동 유체가 적당한 비율로 존재하고 있다. 히트파이프의 일부분을 가열하고 다른 부분을 냉각하면, 작동 유체는 증발부에서 응축부로 흐르는 증기의 흐름과 응축부에서 증발부로 액이 귀환되는 액-증기 사이클을 구성한다. 이때 열은 증발부에서 용기로부터 작동 유체로 전달되고, 액은 증기로 변화되기 때문에 에너지, 즉 증발 잠열로 증기에 축적된다. 응축부에서는 역으로 증기가 응축되어 액으로 될 때 방출되는 에너지, 즉 응축 잠열을 작동 유체로부터 용기로 전달시킨다. 이와 같이 열은 상변화를 일으키는 작동 유체의 흐름에 의하여 증발부로 부터 응축부로 운반된다. 증기의 흐름은 증발부의 액이 증발함에 따라 생기므로 시간이 지나면 증발부 액이 감소하여 없어지면 증기의 흐름도 중지되며, 히트파이프의 기능도 정지된다. 따라서 히트파이프를 연속적으로 작동시키기 위해서는 응축부 액을 증발부로 되돌리지 않으면 안 된다. 즉 액의 귀환이 필요하다.

작동 유체의 상변화를 동반한 흐름의 사이클을 구성하면, 연속적인 열수

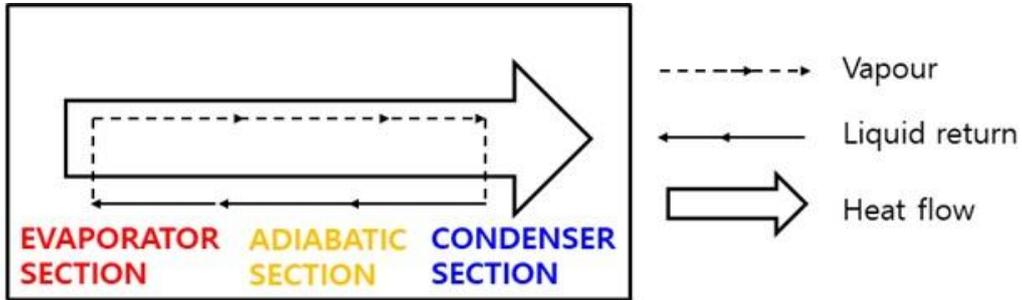


Fig. 1.1 Schematic of heat transfer mechanism of heat pipe

Table 1 Types of heat pipes according to methods of condensate return

Gravity	Thermosyphon
Capillary force	Standard heat pipe
	Loop heat pipe
Centripetal force	Rotating heat pipe
Electrokinetic forces	Electro-hydrodynamic heat pipe
	Electro-osmotic heat pipe
Magnetic forces	Magneto-hydrodynamic heat pipe
	Magnetic fluid heat pipe
Osmotic forces	Osmotic heat pipe
Bubble pump	Inverse thermal syphon

송이 가능하게 된다. Fig. 1.1은 히트파이프의 열전달을 위한 상변화의 흐름을 보여준다. Table 1은 각종 액 귀환 방법과 그에 따른 히트파이프의 구체적인 종류를 나타낸 것이다. 그리고 히트파이프의 특징은 다음과 같다 [2].

- 매우 높은 열전도율
- 열유속 조절기능
- 낮은 열 임피던스의 등온 표면(히트파이프의 응축기 표면은 균일한 온도에서 작동하는 경향이 있으며, 국소 열부하가 가해지면 이 시점에서 더 많은 증기가 응축되어 온도를 원래 수준으로 유지하는 경향이 있음.)

1.2.2 써모사이폰

윅(wick)과 모세관 구조를 사용하지 않고 중력을 이용하여 응축액을 증발기로 귀환시키는 구조의 히트파이프를 써모사이폰이라고 한다. 중력장은 밀도가 큰 것일수록 큰 힘을 받는다. 중력장에서는 용기의 증기는 상부, 액은 하부로 이동한다. 따라서 중력장에서는 응축부를 증발부보다 위쪽에 설치하면 응축액은 중력으로 인해 자연스럽게 액 귀환을 한다. 중력을 이용하여 액 귀환을 하는 히트파이프를 써모사이폰이라고 한다. 액은 아래에 있는 증발부에 고이며, 증기는 상부의 응축부에서 응축된다. 응축액은 벽면을 타고 증발부로 되돌아간다. Fig. 1.2는 써모사이폰의 구조와 작동 원리를 나타내었다.

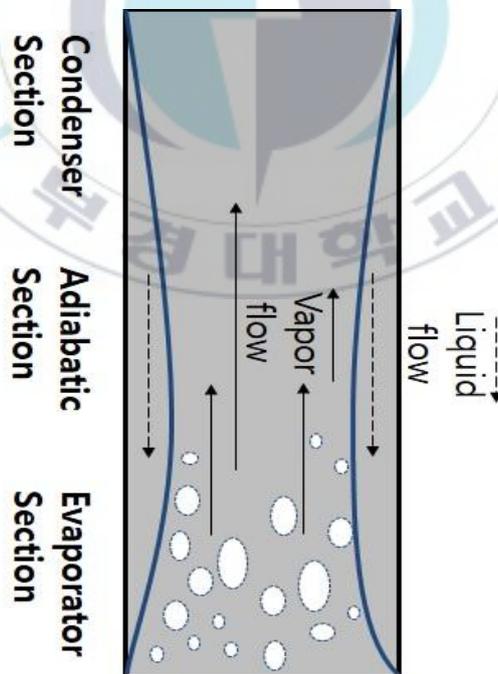


Fig. 1.2 Schematic of thermosyphon

1.3 유효 열전도율(Effective thermal conductivity)

열전도율(λ 또는 k 로 표시)은 열을 전달하거나 전도하는 재료의 고유 열물성치이다. 유효 열전도율(k_{eff})은 히트파이프와 같이 작동유체의 충전량 및 종류, 설치 경사도, 열유속 등에 따라 열전도 성능이 달라지는 열성능을 평가하는 중요한 지표이다. 전도에 의한 열전달은 물질 전체의 움직임 없이 물질 내에서 에너지의 전달을 포함한다. 온도 구배가 고체 (또는 정지 유체) 매체에 존재할 때 전도가 일어난다. 높은 온도는 더 높은 분자 에너지 또는 더 많은 분자 운동과 동일하기 때문에, 온도가 감소하는 방향으로 전도성 열 흐름이 발생한다. 이웃 분자들이 충돌할 때 에너지는 에너지가 낮은 분자 쪽으로 전달된다. 유효 열전도율은 히트파이프가 정상 상태 조건에서 열이 발생할 때 단위 온도 구배(ΔT)로 인해 단위 면적(A)의 표면에 수직인 방향으로 단위 두께(L)를 통해 전달되는 열량(Q)으로 정의된다. 전도는 온도 구배에만 의존한다. 유효 열전도율은 $W/(m \cdot K)$ 의 국제 단위계(SI 단위)를 사용하여 정량화되며 열전달 저항 기능을 측정하는 열 저항의 역수이다. 유효 열전도율은 다음 식 (1)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T} [W/(m \cdot K)] \dots \dots \dots (1)$$

1.4 선행 연구

히트파이프는 간단한 구조, 소형화, 저렴한 생산비, 높은 열전달 성능 등의 특성을 가지고 있어 다양한 분야에서 사용되고 있으나 수평 상태에서는 작동하지 않거나 성능이 낮아지는 문제가 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 연구들이 보고되고 있다. 그 중 대표적 연구는 다음과 같다.

김종수 등[3]은 증발부가 응축부보다 높아질 경우 작동 유체의 귀환이 원활하지 않아 작동이 불안정하거나, 성능이 저하되는 단점을 보완하기 위해 접이각에 따른 히트파이프의 온도 분포 및 열전달 성능에 대한 연구를 진행했다. 그 결과 접이각 $1.5^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 에서 0° 의 조건보다 우수한 열전달 성능을 낸다는 것을 확인하였다. 그러나 히트파이프의 열특성에 영향을 미치는 응축부 길이에 따른 열전달 성능 분석에 대한 연구는 이루어지지 않았다.

김주노 등[4]은 냉각 시스템의 소형화, 박막화의 흐름에 따라 좁은 면적에서 열을 효과적으로 방출시킬 수 있는 방열 시스템 개발에 대한 실험을 위해 증발부 길이를 고정하고 응축부의 길이가 히트파이프의 열성능에 미치는 영향에 관한 연구를 하였다. 히트파이프의 열성능을 결정하는 최적의 응축부 길이가 존재함을 규명하였다.

Shuangfeng Wang[5] 등은 전자칩과 같이 열유속이 매우 높은 고밀도 전자기기의 냉각에서의 높은 유효 열전도율과 신뢰성 등을 높이기 위해 증발부와 응축부의 길이가 미치는 영향을 조사하는 실험을 하였다. 이 실험을 통해 단열부가 존재할 시, 응축부 길이와 증발부 길이가 서로 비슷해야 열성능이 향상된다는 것을 확인하였다.

Zhongrui Yan[6] 등은 태양 에너지 활용에 이용하기 위해 히트파이프를 이용하여 증발부 부분과 응축부 부분의 길이를 조절하고 경사각을 달리하

여 실험을 진행하였다. 이 실험을 통해 최적의 응축부 부분의 길이와 증발부 부분의 길이 비율은 경사각에 따라 달라진다는 것을 보고하였다.

Yeonghwan Kim 등[7]은 폐열 회수 시스템, 태양열 수집기 및 전자 제품 냉각과 같은 다양한 분야의 열전달 장치에 써모사이폰을 적용하여 최상의 열성능을 평가하고자 써모사이폰의 충전율이나 경사각 등에 변화를 주며 실험을 진행하였다. 이 실험을 통해 충전율이 50% vol.일 때에는 써모사이폰의 경사각이 30°에서 최상의 열성능을 나타낸다는 것을 보고하였다.



제2장 실험 장치 및 방법

2.1 실험 장치

2.1.1 다채널 평판형 써모사이폰

Fig. 2.1은 본 실험에 사용된 다채널 평판형 써모사이폰의 사진이다. 본 연구에 사용된 다채널 평판형 써모사이폰은 알루미늄 압출관을 이용한 모세관(wickless)으로 구성되며 사이즈는 $170\text{mm} \times 196\text{mm} \times 1.6\text{mm}$ 이다. 본 써모사이폰은 채널 하나의 내부 크기는 $2.6\text{mm} \times 0.6\text{mm}$ 인 56개의 채널이 독립적으로 써모사이폰을 형성하고 있으며, 그 모세관 써모사이폰들이 집적되어 하나의 평판형 써모사이폰을 이루고 있다. 56개의 독립된 모세관 써모사이폰을 집적하여 평판형 써모사이폰을 제작한 이유는 써모사이폰 사용시 몇 개의 모세관이 정상 작동을 못하더라도 전체적인 성능에는 문제가 없도록 하기 위하여 모세관 집적식 평판형 써모사이폰을 제작하였다. 모세관력은 중력에 대한 표면장력이 커야 발생한다. 즉, 표면장력이 중력보다 큰 조건을 만족하는 모세관의 수력 직경이어야 한다. 모세관의 직경은 통상의 모세관 한계와 관련된 무차원수 조건, Bond number가 4 미만을 만족해야 한다. 다음의 식 (2)는 이 조건을 만족하는 관계식이다[8].

$$d_h < d_{cr} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{liquid} - \rho_{gas})}} \quad [m] \quad (Bo < 4) \dots \dots \dots (2)$$

본 실험에 사용한 채널의 모세관 수력 직경은 1.67mm로, 위의 식으로 계산한 임계 직경 1.94mm의 조건을 만족시키는 충분히 작은 값이다. 작동 유체는 HFE-7100을 사용하였다. 충전율은 종래의 연구 결과를 참고하여 20% vol.과 40% vol.으로 설정하였다.

Table 2.1은 실험에 사용한 다채널 평판형 써모사이폰의 상세한 제원을 나타내었다. Fig 2.2은 평판형 써모사이폰을 구성하는 모세관의 내부 형상이다.

작동유체는 HFE-7100(methoxy-nonafluorobutane(C4F9OCH3))을 사용하였으며, 무색, 무취이며 ODP가 0이고 GWP가 320으로 낮으며 대기중 lifetime이 4.1년으로 비교적 짧아 대기환경에 미치는 영향이 적은 대체냉매를 사용하였다. Table 2.2는 HFE-7100과 다른 냉매들과의 열물성치를 비교한 것이다 [9].

Table 2.1 Specification of multi-channel flat type thermosyphon

Parameter		Specification
Material		Aluminium
Working fluid		HFE-7100
Charging ratio [% vol.]		20, 40
Total size [mm]		170 × 196 × 1.6
Condensation section length [mm]		(each) 70, 126
Inner channel	Number	56
	Size [mm]	2.6 × 0.6

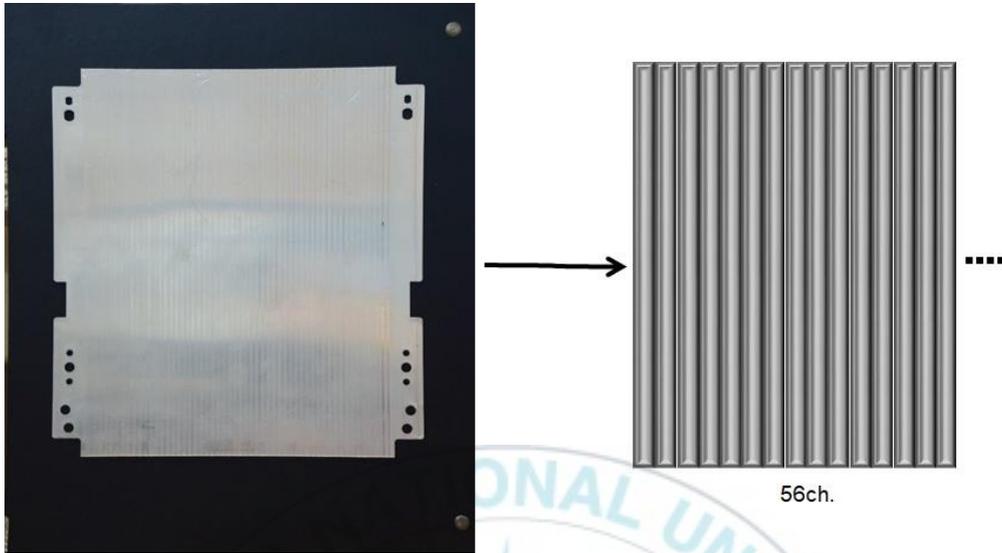


Fig. 2.1 Photo. of the multi-channel flat type thermosyphon

Table 2.2 ODP and GWP comparison between HFE-7100 and other refrigerants

Properties	HFE-7100	CFC-113	HCFC-141b
Flash point	none	none	none
ODP	0.00	0.80	0.10
GWP	320	5000	630
Atmospheric lifetime(years)	4.1	85	9.4

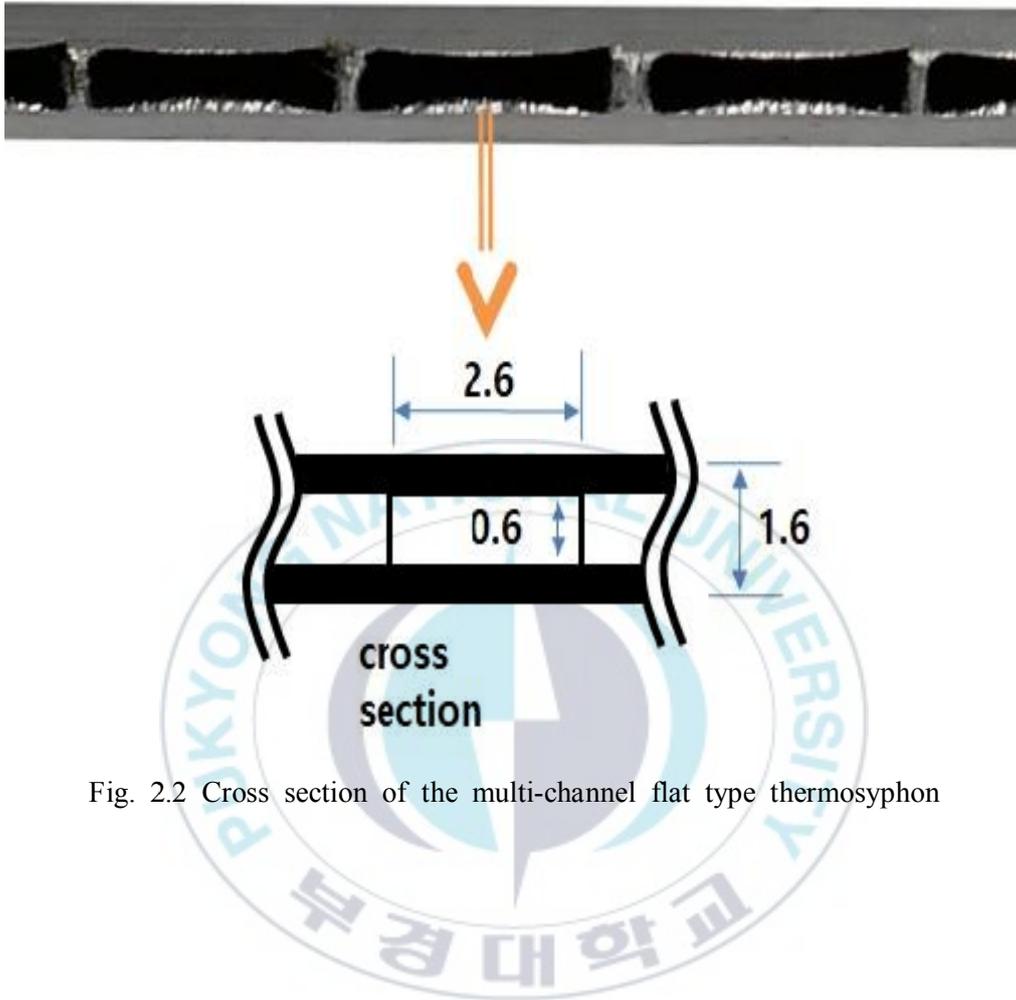


Fig. 2.2 Cross section of the multi-channel flat type thermosyphon

2.1.2 실험에 사용된 히터

본 실험에 사용된 평판형 히터(DC 12V, 100W)는 직류 전원 공급 장치(DC power supply)에 의해 가열된다. 평판형 히터의 상세한 재원을 Table 2.3에 나타내었다. 입열량은 5, 10, 15, 20, 25W이다. 입열량 선정 기준은 전기자동차 배터리 방열에 이용하고자 전기자동차 배터리 온도(45°C)에 기준한 5W와 고해상도 LED TV 작동 온도(65°C)에 기준하여 입열량 15W로 진행하였고, 다양한 입열량 조건(온도영역)에서 사용하기 위하여 입열량 5~25W까지 증가시킨 실험도 진행하였다. Fig. 2.3은 히터의 실제 사진이다.

Table 2.3 Specification of heater

Parameter	Specification
Size [mm]	170 ×70
Input power [W]	5, 10, 15, 20, 25



Fig. 2.3 Photo. of heater

2.2 실험 방법

수평 가열상태에서 응축부에만 경사각을 주어 다채널 평판형 써모사이폰의 열성능을 측정하였다. 응축부의 경사각은 $0\sim 90^\circ$ 까지 변화를 주었다. 써모사이폰의 제작 시, 보통의 경우에는 전체 길이의 1/3씩 나누어 응축부, 단열부, 증발부로 구성되게 한다. 그러나 본 실험의 경우 방열이 목적이었기에 단열부는 없는 형태의 써모사이폰으로 실험을 진행하였다. 그래서 case 1에서는 응축부의 길이와 증발부의 길이 모두 동일하게 70mm로 선정하는 일반적인 경우로 하였으며, case 2에서는 증발부의 길이는 70mm로 고정하고 이후 단열부 없이 응축부의 길이를 126mm로 선정하였다. 응축부의 방열은 자연 대류 조건에서 수행하였다. 온도는 Fig. 2.4에 나타난 것과 같이 증발부(1~5) 5곳, 응축부(6~10) 5곳씩 측정한 평균을 사용하였으며, 히터에는 3곳을 나누어 측정하여 평균을 사용하였다.

Fig. 2.5는 case 1, 2의 개략도이다. 다채널 평판형 써모사이폰의 열성능에 미치는 응축부 경사각의 영향에 관한 실험 장치의 구성은 Fig. 2.6에 나타내었으며, 실험의 차례는 다음과 같다.

1. 다채널 평판형 써모사이폰의 측정부위에 $\phi=0.322mm$ 의 열전대를 설치하고 각각의 채널에 접지한다.
2. 히터의 접촉 가열면에 써멀 컴파운드를 도포하고 다채널 평판형 써모사이폰을 접촉시킨 후, 히터부위를 단열재로 단열한다.
3. 슬라이닥스(TF-075)를 통해 조건에 맞는 입열량을 맞추고 파워미터(HM8115K)를 통해 정확한 입열량을 확인하여 공급한다.
4. 데이터 로거(MX-100)를 이용하여 1초당 1회 온도를 기록한다.
5. 정상상태에 도달할 때까지 가열하고 정상상태 도달 후, 15분을 유지하고

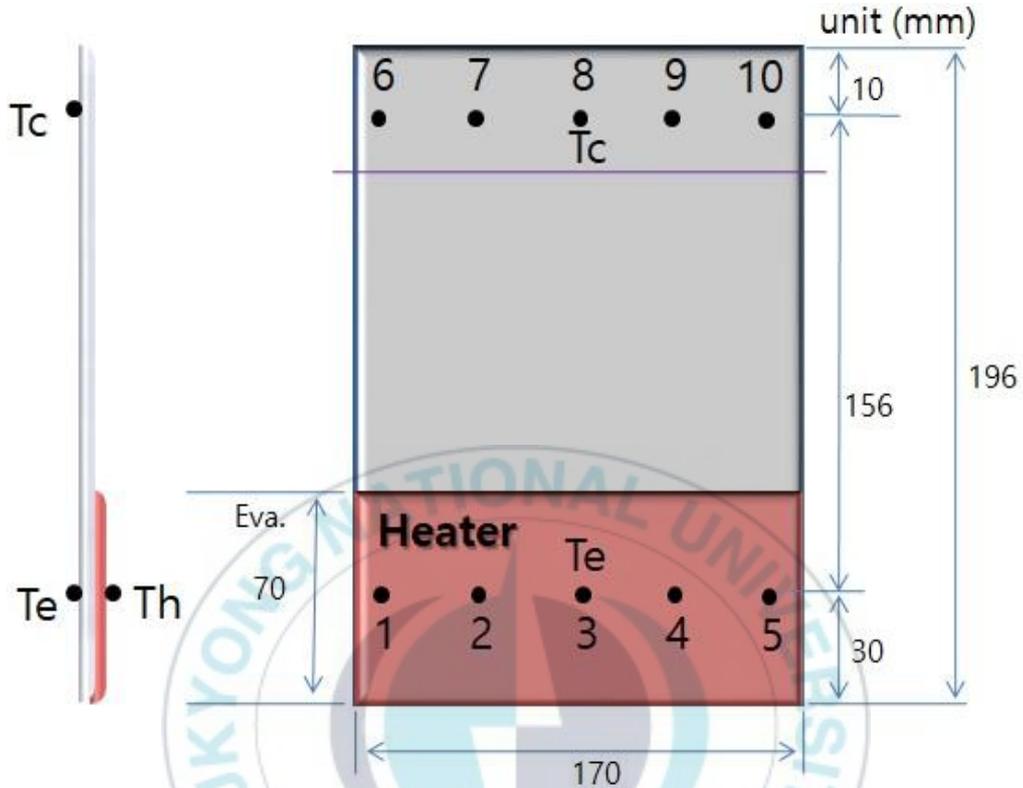


Fig. 2.4 Schematic diagram of the multi-channel flat type thermosyphon

실험을 정지한다.

6. 정상상태 도달 후, 15분동안 얻은 온도 정보로 열성능을 평가한다.

일반 금속은 일정한 유효 열전도율을 가진다. 그러나 실험에서는 여러 가지 조건에 따라 유효 열전도율이 변하기 때문에 식 (3)을 통하여 유효 열전도율(k_{eff})을 계산하였다. 또한 식 (4)를 통하여 열저항을 구한 후, 유효 열전도율과 열저항을 써모사이폰의 열성능 지표로 활용하였다[10, 11].

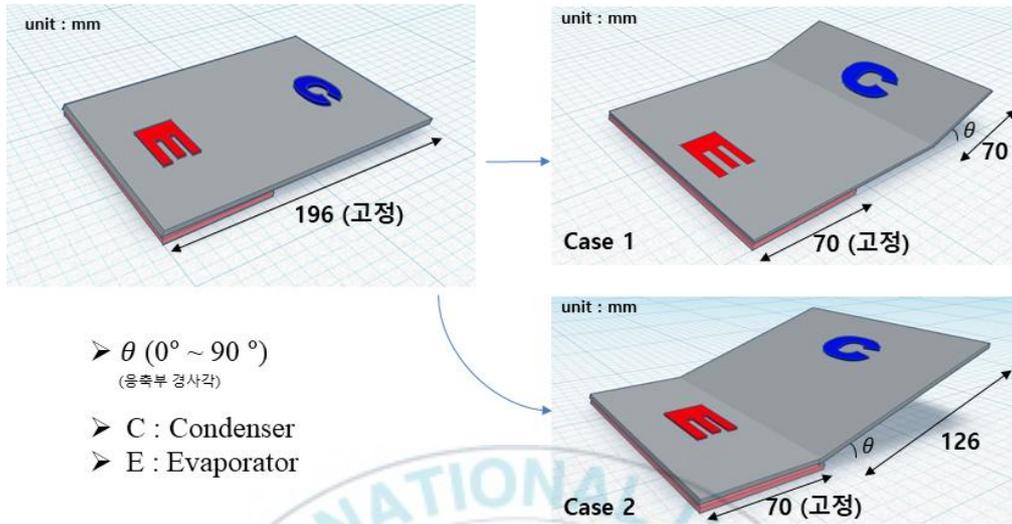


Fig. 2.5 Schematic of case 1 and case 2

$$k_{eff} = \frac{Q \cdot L}{A_c \cdot \Delta T_{ec}} [W/(m \cdot K)] \dots \dots \dots (3)$$

$$R = \frac{\Delta T_{ec}}{Q} \dots \dots \dots (4)$$

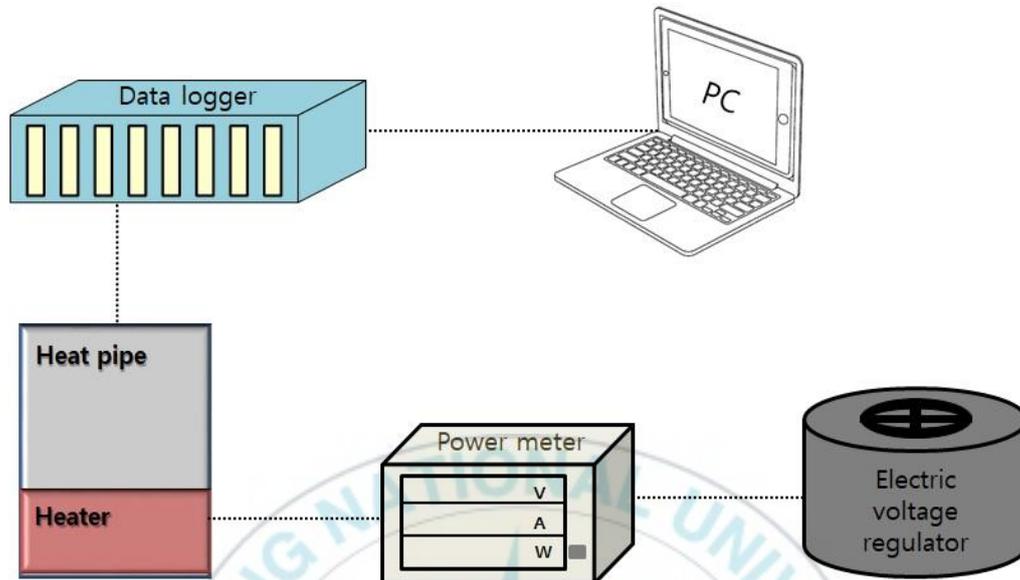


Fig. 2.6 Schematic diagram of experimental apparatus

제3장 실험 결과 및 고찰

3.1 입열량 5W 및 15W에 대한 실험 결과

먼저 전기자동차 배터리 방열에 이용하고자 전기자동차 배터리 온도에 기준하여 먼저 5W, 15W로 진행한 실험의 결과는 다음과 같다.

Fig. 3.1과 Table 3.1은 입열량 5W, 15W에서 충전율이 20%vol., 40% vol. 조건에 대해 응축부 경사각(bending angle)에 따른 유효 열전도율 값을 정리한 것이다. Case 1, 2 전부 충전율 20% vol.의 경우가 충전율 40% vol.의 경우에 비해 높은 열성능을 보였다. 응축부 길이가 짧은(70mm) case 1에서는 응축부 경사각에 관계없이 평판형의 수평 작동시 성능과 거의 동일한 열성능을 보이지만 응축부 경사각 10°에서는 약 2배 높은 유효 열전도율을 확인할 수 있었다. 또한 입열량 5W, 충전율 20% vol. 조건에서는 최대 2.6배 높은 2,560W/(m·K)의 유효 열전도율 값을 보였다. 응축부 길이가 긴(126mm) case 2에서는 응축부 경사각에 관계 없이 평판형의 수평 작동시 성능보다 약 3.1배 높은 열성능을 보이며 응축부 경사각 10°에서는 약 4배 높은 유효 열전도율을 확인할 수 있었다. 또한 입열량 5W, 충전율 20% vol. 조건에서는 최대 8.2배 높은 8,193W/(m·K)의 유효 열전도율 값을 보였다. Case 1, 2에서 입열량 5W, 충전율 20% vol.일 때, 유효 열전도율이 가장 큰 값을 보이고 있으며, 이는 작동 유체의 증발부 귀환이 원활해서라고 사료된다. Case 1, 2 모두 응축부 경사각 10°에서 가장 높은 유효 열전도율 값을 보였다. 또한 경사각에 관계 없이 응축부 길이가 긴(126mm) case 2의

경우가 응축부 길이가 짧은(70mm) case 1의 경우보다 유효 열전도율 값이 전반적으로 약 2.2배 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그 이유는 case 1의 수평 구간이 case 2의 수평 구간보다 약 1.8배 길어서 증발부로부터 발생하는 작동 유체 기포들이 수평 구간에서 긴 슬러그를 형성해 증발부와 응축부 사이의 작동 유체 순환을 방해하고 증발-응축부 사이의 최대 수두차도 case 2가 크기에 응축부 길이가 긴 경우 flooding을 극복하고 작동 유체가 원활하게 증발부로 귀환할 수 있게 되어 열전달 성능이 뛰어난 것으로 사료된다.

Fig. 3.2는 응축부 경사각 및 길이에 따른 발열부(히터)의 온도를 나타낸 그래프이다. 발열부(히터)는 실제 전자 제품의 작동시 방열판이 아닌 실제 전자 장치의 온도에 해당하기에 실험에 있어 중요한 온도 측정점이다. 발열부(히터)의 온도는 3개의 점에서 측정된 평균을 이용하였다. 그래프 (a), (b)는 전기자동차 정상 작동 적정 온도인 45°C에 맞추어 입열량을 5W로 하였고 그래프 (c), (d)는 고해상도 LED TV 작동시 정상 작동 적정 온도인 65°C에 맞추어 입열량을 15W로 한 그래프이다.

Case 1의 경우 대부분 수평 가열 조건에서 발열부 온도가 목적인 배터리 작동 적정 온도인 45°C와 65°C를 넘어가지만, case 2에서는 거의 모든 경사각과 입열량 조건에서 적정 작동 온도 조건을 만족시키는 것을 확인할 수 있다. 경사각에 따른 영향보다는 응축부의 길이가 열성능에 영향을 준다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3.3은 수평 조건(응축부 경사각 $\theta=0^\circ$)의 다채널 평판형 써모사이폰과 응축부 경사각과 길이에 변화를 준 case 1과 2에 해당하는 써모사이폰의 유효 열전도율(k_{eff})을 비교한 그래프이다. Case 1의 경우, 입열량 5W, 충전율 20% vol.에서 수평 조건의 평판형 써모사이폰보다 2.6배 이상 높은 열성능을 보이고 나머지 조건에서는 수평 조건의 평판형 써모사이폰과 비

슷한 열성능을 보인다. 그러나 응축부 경사각 $\theta=10^\circ$ 의 경우에는 입열량이나 충전율 관계 없이 약 1.9배 높은 열성능을 보인다. Case 2의 경우에는 모든 입열량과 충전율 조건에서 최소 1.2배에서 최대 8.2배 뛰어난 열성능을 보인다. Case 2에서도 응축부 경사각 $\theta=10^\circ$ 에서 높은 열전달 성능을 볼 수 있지만 입열량 5W, 충전율 20% vol. 조건에서 가장 큰 유효 열전도율 값인 8,193W/(m·K)를 보이고 있다.

Table 3.1 Effective thermal conductivities by inclination angle and length of condensation section

(a) Case 1

[unit : W/(m·K)]

Input power		5W		15W	
Charging ratio		20% vol.	40% vol.	20% vol.	40% vol.
Bending angle θ	0°	1003	652	1018	654
	5°	1463	722	959	672
	10°	2560	1111	1830	988
	30°	1517	928	1269	888
	60°	1838	721	1193	684
	90°	2868	664	1366	637

(b) Case 2

[unit : W/(m·K)]

Input power		5W		15W	
Charging ratio		20% vol.	40% vol.	20% vol.	40% vol.
Bending angle θ	0°	1003	652	1018	654
	5°	8193	1220	3615	1579
	10°	4860	1420	6669	1559
	30°	3019	1190	5586	1265
	60°	2034	1456	3511	982
	90°	2078	779	3140	922

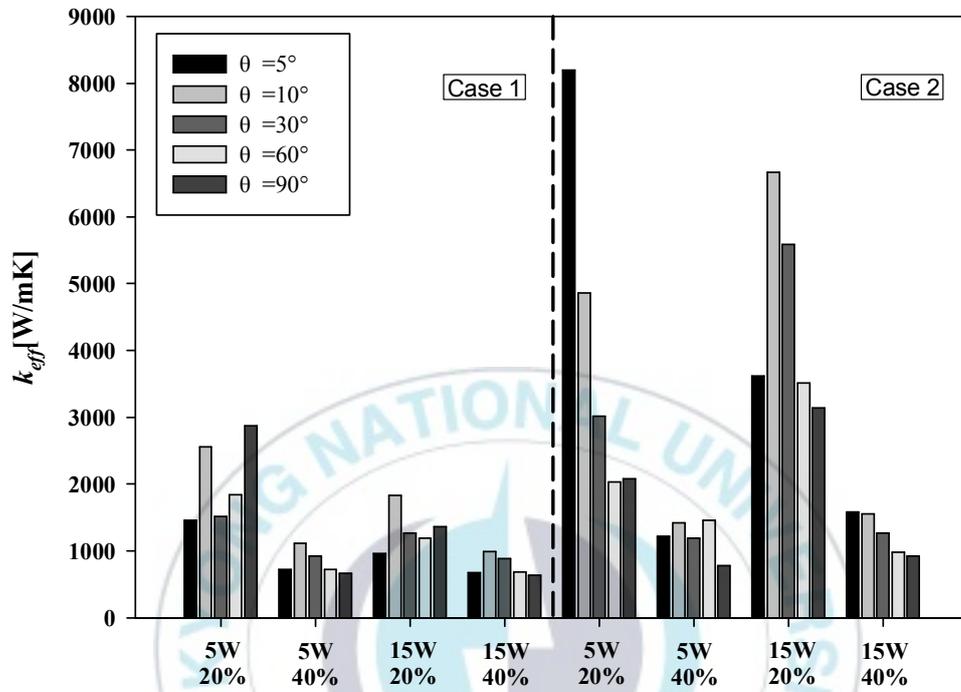
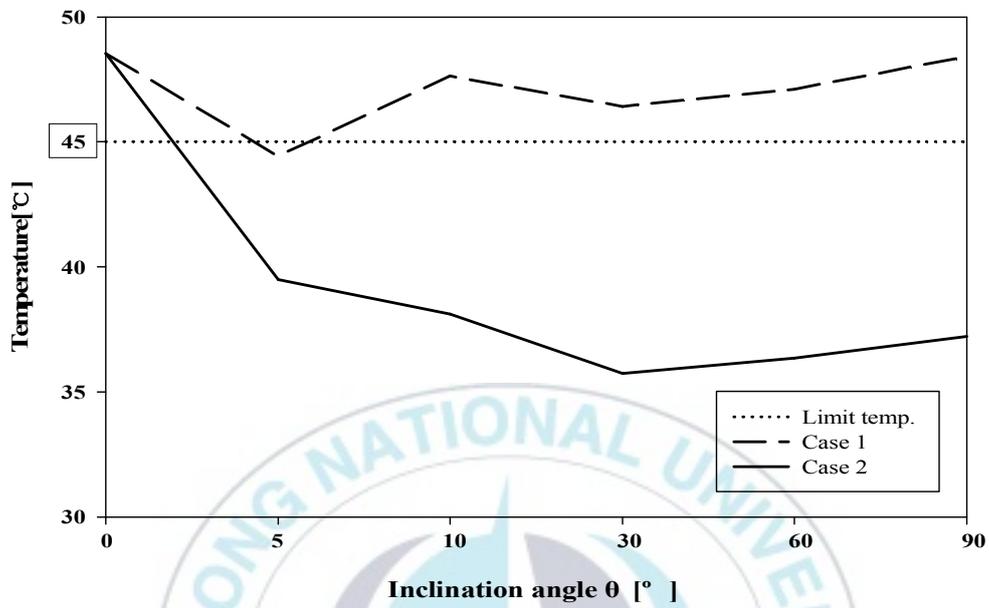
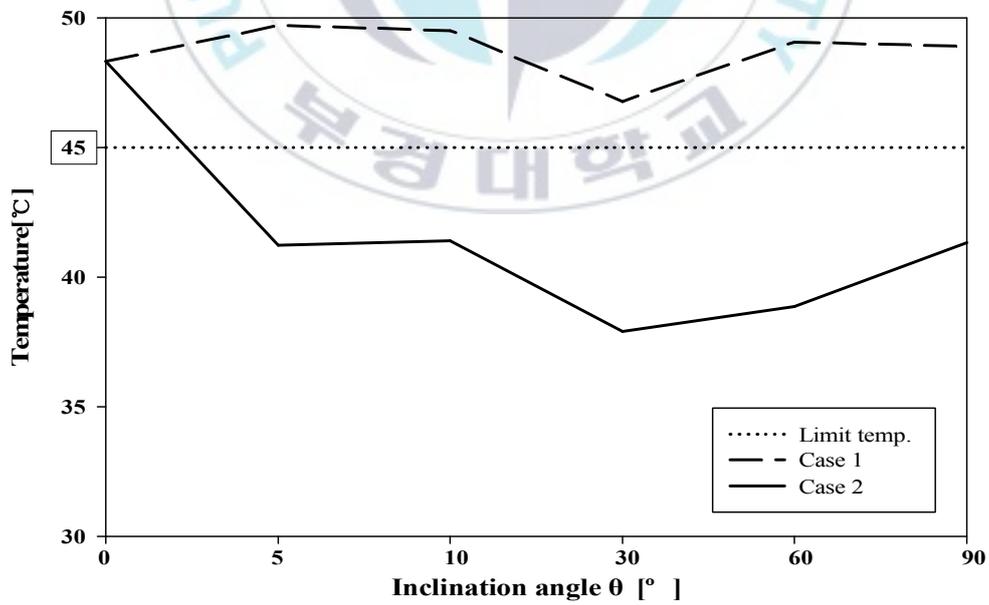


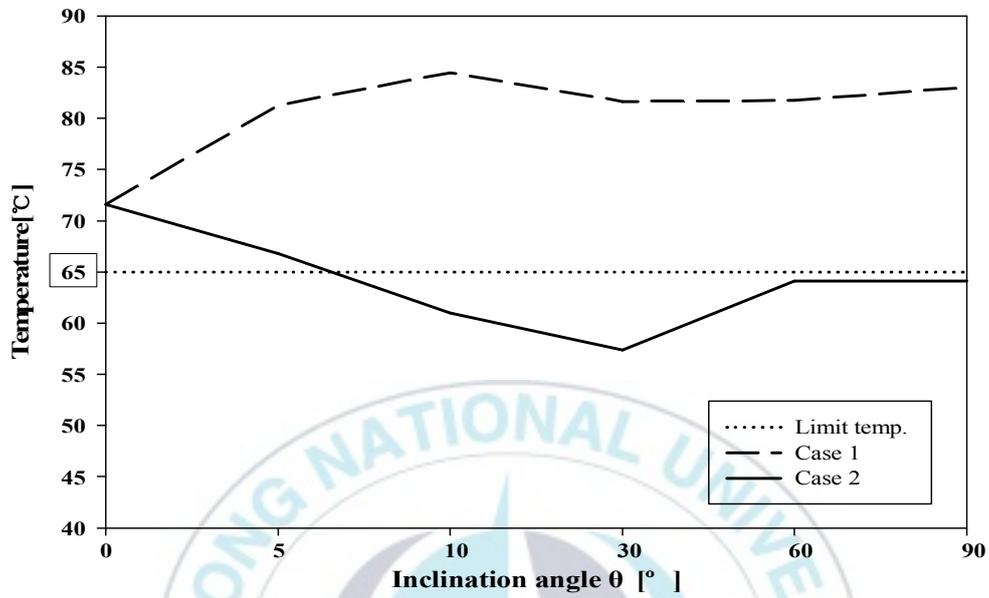
Fig. 3.1 Comparison of effective thermal conductivity between case 1 and case 2



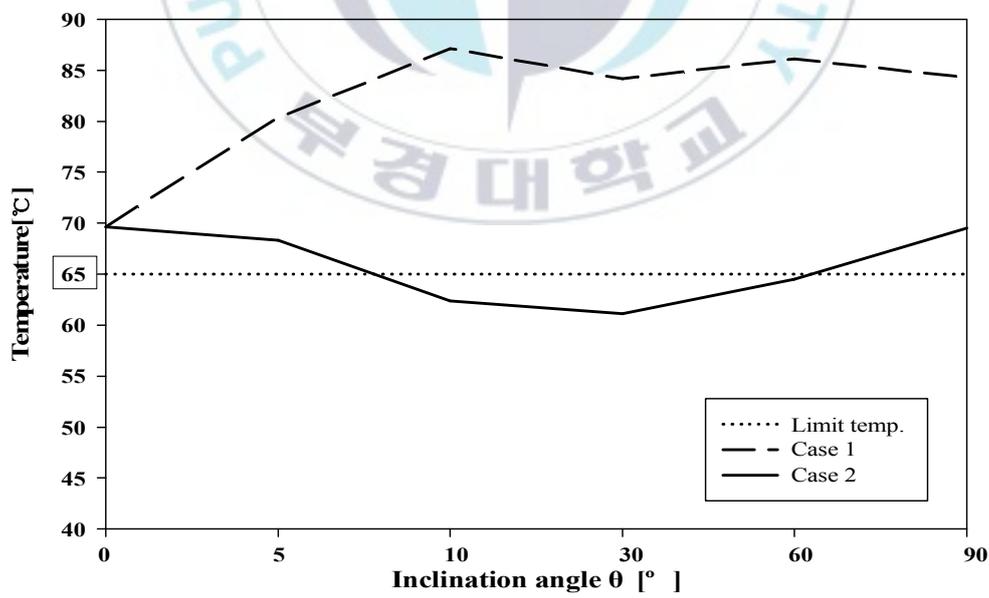
(a) 5W/20% vol.



(b) 5W/40% vol.

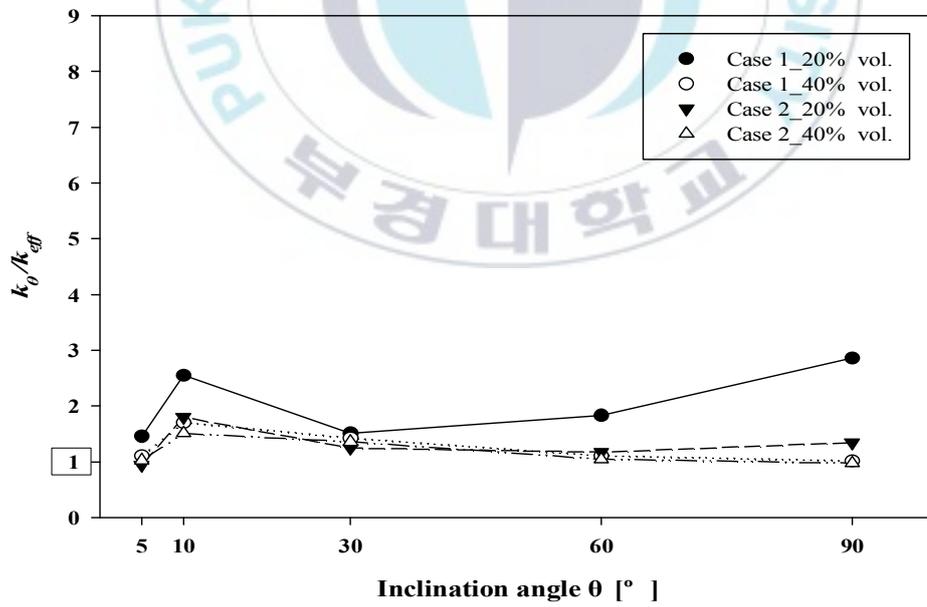
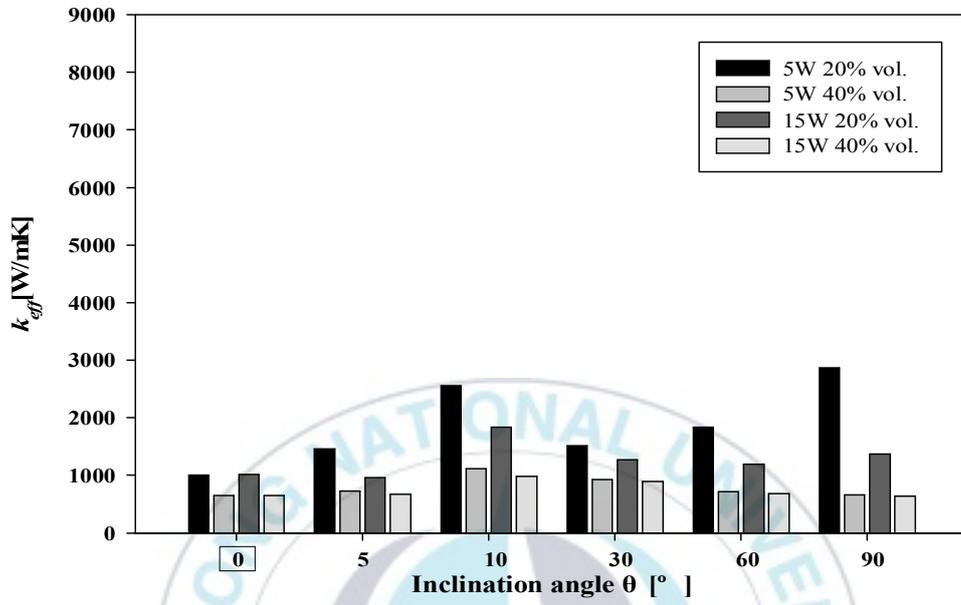


(c) 15W/20% vol.

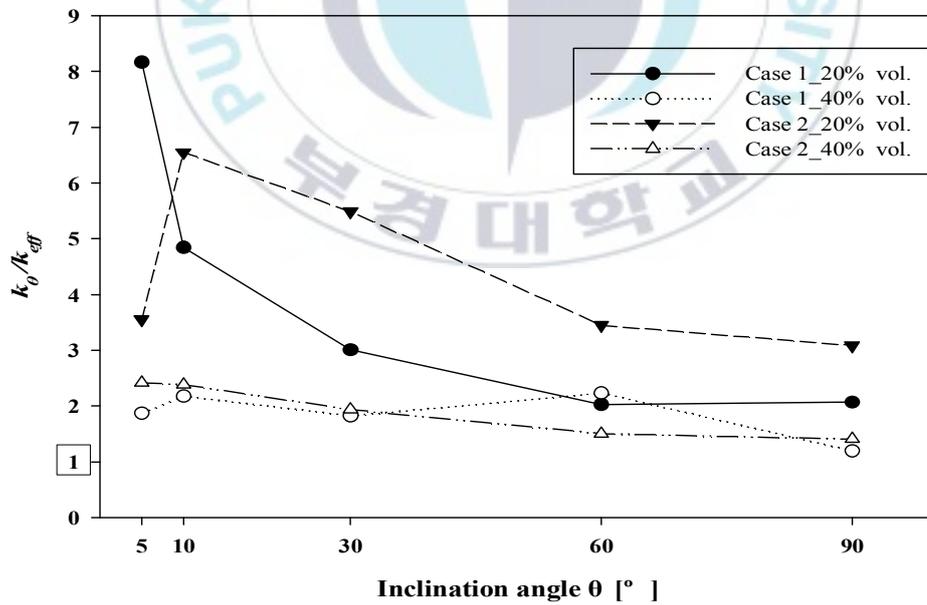
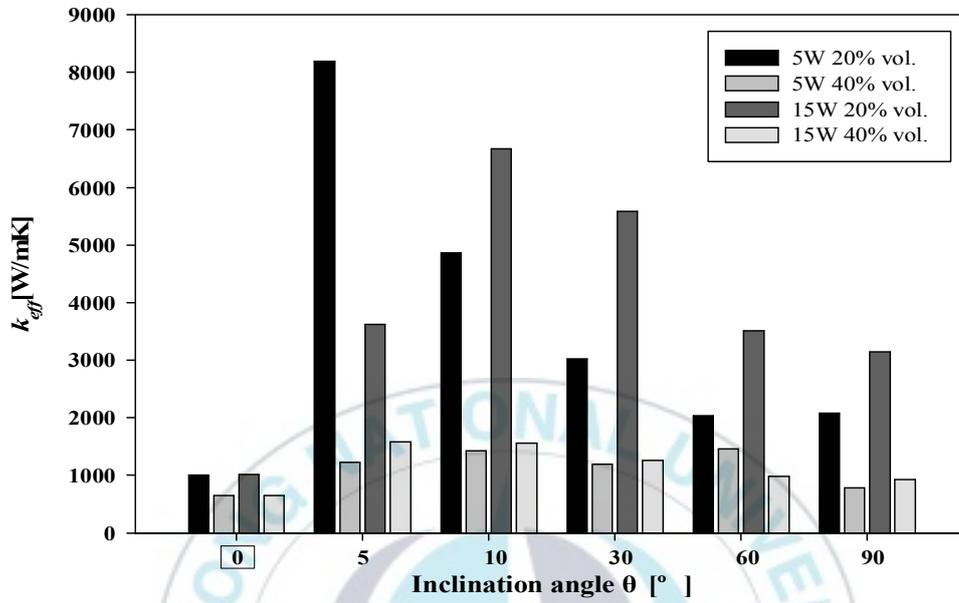


(d) 15W/40% vol.

Fig. 3.2 Temperature of the heater surface



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3.3 Comparison of effective thermal conductivity(k_{eff}) with the value of horizontal state (5, 15W)

3.2 입열량 5W ~ 25W에 대한 실험 결과

다양한 용도의 전자장치 방열에 기준하여 5W~25W로 진행한 실험의 결과는 다음과 같다. Fig. 3.4에서 보는 것과 같이 대부분 경우에서 응축부 길이가 긴 case 2가 응축부 길이가 짧은 case 1에 비해 유효 열전도율이 평균적으로 2.4배 정도 높다. 그 이유는 case 1의 수평 구간이 case 2의 수평 구간보다 약 1.8배 길어서 증발부로부터 발생하는 작동 유체 기포들이 수평 구간에서 긴 슬러그를 형성해 증발부와 응축부 사이의 작동 유체 순환을 방해하고 증발-응축부 사이의 최대 수두차도 case 2가 크기에 응축부 길이가 긴 경우 flooding을 극복하고 작동 유체가 원활하게 증발부로 귀환할 수 있게 되어 열전달 성능이 뛰어난 것으로 사료된다. 응축부 경사각 $\theta=5^\circ$, 입열량 10W 조건에서는 case 2의 유효 열전도율 값이 case 1의 유효 열전도율 값의 약 6.4배 높은 것을 확인할 수 있다. Case 1의 경우, 입열량이 커질수록 유효 열전도율이 낮아지는 경향을 보이지만, case 2의 경우, 응축부 경사각 $\theta=5^\circ$ 의 유효 열전도율 값을 제외한 나머지 응축부 경사각 θ 에서는 일정 입열량 이상에서 유효 열전도율이 높아지는 경향을 확인할 수 있다. 그 이유는 일정 입열량 이하에서는 증발하는 작동 유체가 응축부로부터 귀환하는 액의 양에 밀려 응축부로 가지 못한다. 입열량이 증가할 경우, 증발부 압력 및 작동 유체의 응축부 유입 속도는 증가하여 flooding을 극복해 작동유체 증기가 응축부로의 전달이 원활해져 열전달 성능이 향상되는 것으로 사료된다. 또한 모든 경우에서 충진율 20% vol.일 때의 유효 열전도율이 충진율 40% vol.일 때의 유효 열전도율보다 높은 유효 열전도율을 보인다. 이는 실험 장치의 히터가 써모사이폰의 30% 정도의 면적을 차지하므로 히터가 충분히 가열할 수 있는 충진율 20% vol.의

써모사이폰은 증발부로부터 작동 유체가 원활하게 응축부로 전달되지만 충전율 40% vol.의 써모사이폰은 충전율 20% vol.의 써모사이폰과 비교하여 작동 유체를 효과적으로 증발시킬 수 없기에 충전율 20% vol.의 써모사이폰이 충전율 40% vol.의 써모사이폰보다 열성능이 뛰어난 것으로 사료된다. 응축부의 경사각이나 응축부의 길이에 따라 평판형의 수평 작동시(응축부 경사각 $\theta=0^\circ$) 보다 성능이 저하되는 영역은 없었으며, case 1의 경우에는 충전율 20% vol.에서는 평판형 써모사이폰의 수평 가열시보다 약 1.4배 높은 유효 열전도율을 보였고 충전율 40% vol.에서는 대체적으로 1.2배의 수준의 열성능을 보여 평균적으로는 1.3배 높은 열성능을 확인할 수 있었다. Case 2의 경우에는 충전율 20% vol.에서는 평판형 써모사이폰의 수평 가열시보다 4.3배 높은 유효 열전도율을 보였고 충전율 40% vol.에서는 1.9배로 높은 열성능을 보여 평균적으로 3.1배 높은 열성능을 확인할 수 있다. 응축부 길이가 긴(126mm) case 2의 입열량 5W, 충전율 20% vol. 조건에서는 8,193W/(m·K)로 응축부 경사각 $\theta=0^\circ$ 의 같은 조건의 유효 열전도율 값의 8.2배 많은 유효 열전도율로 증가함을 알 수 있었다. 모든 입열량 조건에서 응축부 길이가 긴(126mm) case 2의 충전율 20% vol. 조건의 써모사이폰이 가장 뛰어난 열성능을 보였다. 열저항의 경우에서 또한 응축부 경사각 $\theta=10^\circ$ 조건에서 가장 낮은 열저항을 가진다. 이는 응축부 경사각이 커질수록 곡부에서의 폐쇄현상이 심해짐에 따라 증발부로의 액귀환이 어려워져서 일정 응축부 경사각부터는 열성능이 나빠지는 것으로 사료된다. 응축부 경사각이 없는 평판형 써모사이폰($\theta=0^\circ$)에서는 충전율 20% vol.에서는 0.60K/W 이하, 충전율 40% vol.에서는 0.90K/W 이하의 값을 나타낸다.

응축부 경사각 $\theta=5^\circ$ 의 경우에는 응축부 길이가 짧은 case 1의 충전율 20% vol.에서는 0.70K/W 이하, 충전율 40% vol.에서는 0.95K/W 이하의

값을 나타내고 응축부 길이가 긴 case 2의 총진율 20% vol.에서는 0.30K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.50K/W 이하의 값을 나타낸다.

응축부 경사각 $\theta = 10^\circ$ 의 경우에는 응축부 길이가 짧은 case 1의 총진율 20% vol.에서는 0.40K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.65K/W 이하의 값을 나타내고 응축부 길이가 긴 case 2의 총진율 20% vol.에서는 0.15K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.50K/W 이하의 값을 나타낸다.

응축부 경사각 $\theta = 30^\circ$ 의 경우에는 응축부 길이가 짧은 case 1의 총진율 20% vol.에서는 0.55K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.70K/W 이하의 값을 나타내고 응축부 길이가 긴 case 2의 총진율 20% vol.에서는 0.20K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.50K/W 이하의 값을 나타낸다.

응축부 경사각 $\theta = 60^\circ$ 의 경우에는 응축부 길이가 짧은 case 1의 총진율 20% vol.에서는 0.55K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.85K/W 이하의 값을 나타내고 응축부 길이가 긴 case 2의 총진율 20% vol.에서는 0.30K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.60K/W 이하의 값을 나타낸다.

응축부 경사각 $\theta = 90^\circ$ 의 경우에는 응축부 길이가 짧은 case 1의 총진율 20% vol.에서는 0.60K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.95K/W 이하의 값을 나타내고 응축부 길이가 긴 case 2의 총진율 20% vol.에서는 0.30K/W 이하, 총진율 40% vol.에서는 0.75K/W 이하의 값을 나타낸다. 대부분 입열량, 응축부 경사각에 관계 없이 응축부 길이가 긴(126mm) case 2가 응축부 길이가 짧은 case 1에 비해 낮은 열저항을 보인다. 그리고 총진율 20% vol.의 경우가 총진율 40% vol.에 비해 낮은 열저항을 보인다. Fig. 3.5와 Table 3.2는 각각의 응축부 경사각 유효 열전도율 값을 나타낸 그래프이고, Fig 3.6은 입열량에 따른 각각의 응축부 경사각의 유효 열전도율 값을 나타낸 그래프이다. Fig. 3.7과 Table 3.3은 각각의 응축부 경사각 열저항을 나타낸 그래프와 표이다.

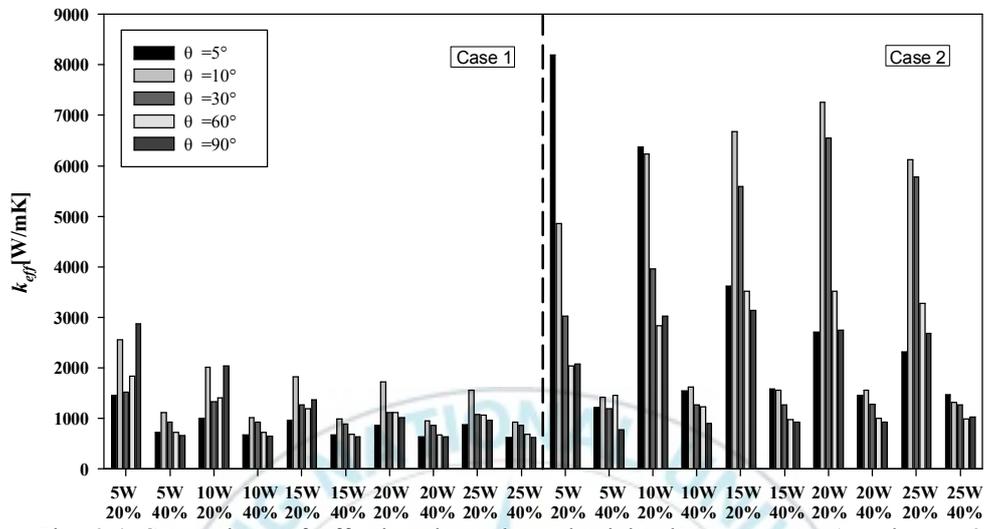
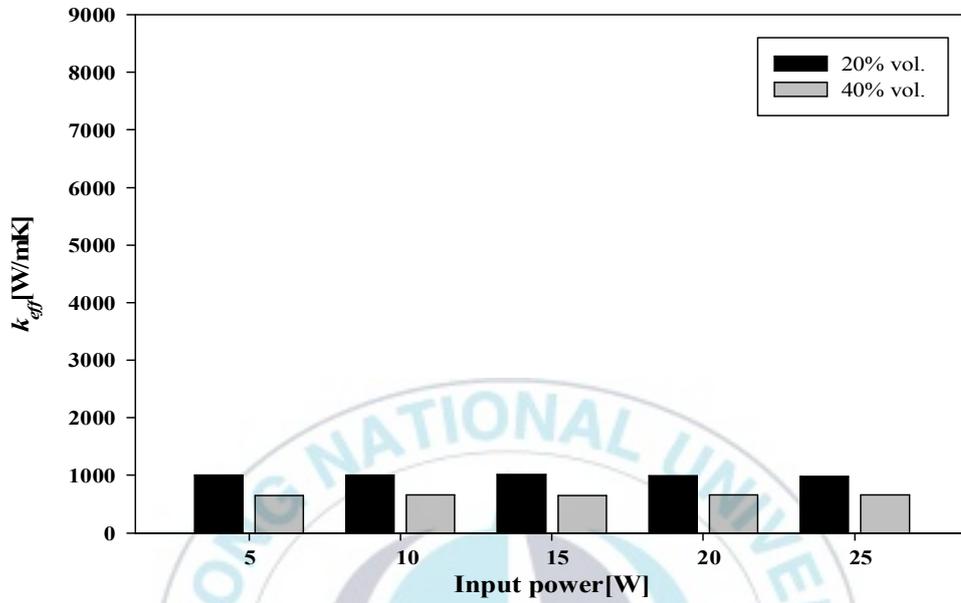
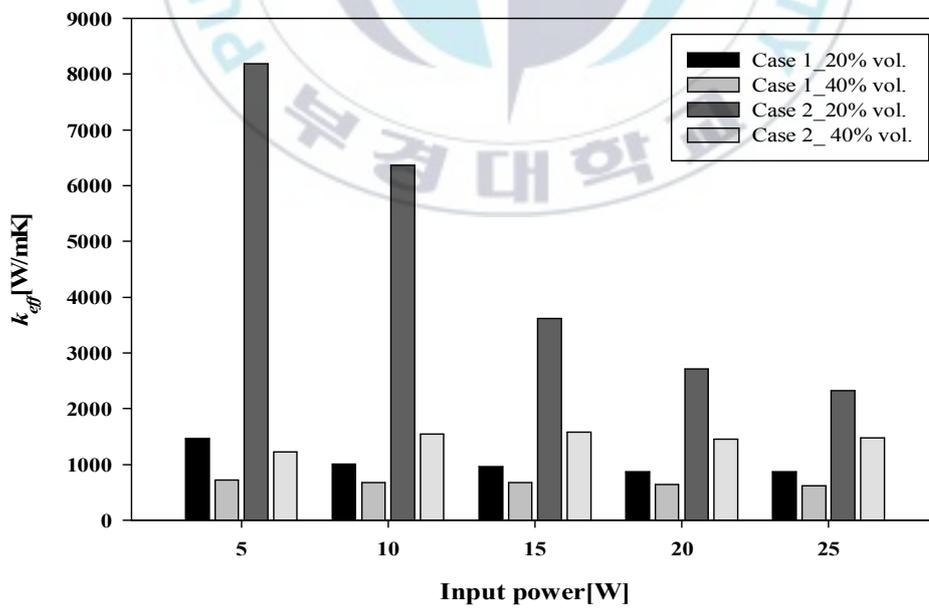


Fig. 3.4 Comparison of effective thermal conductivity between case 1 and case 2

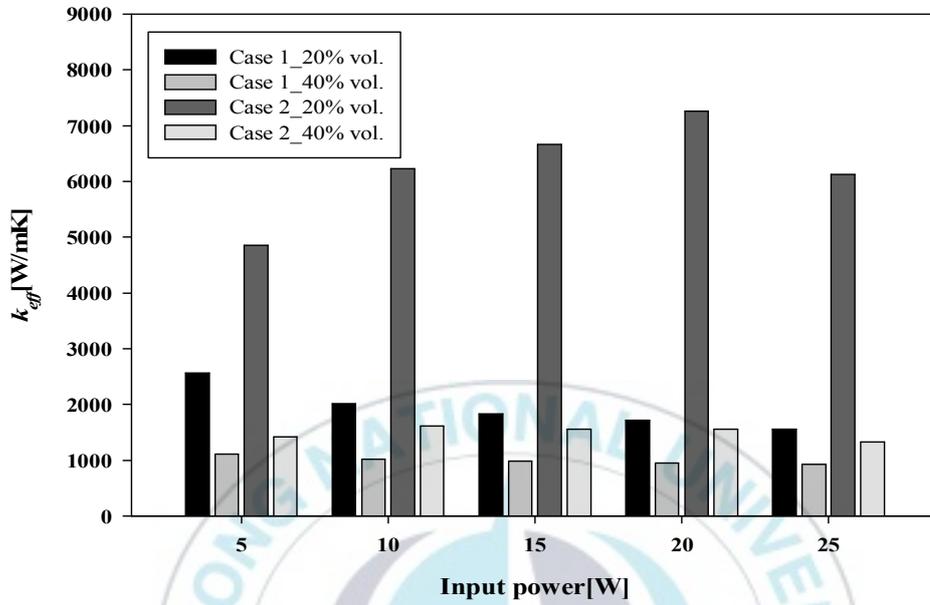




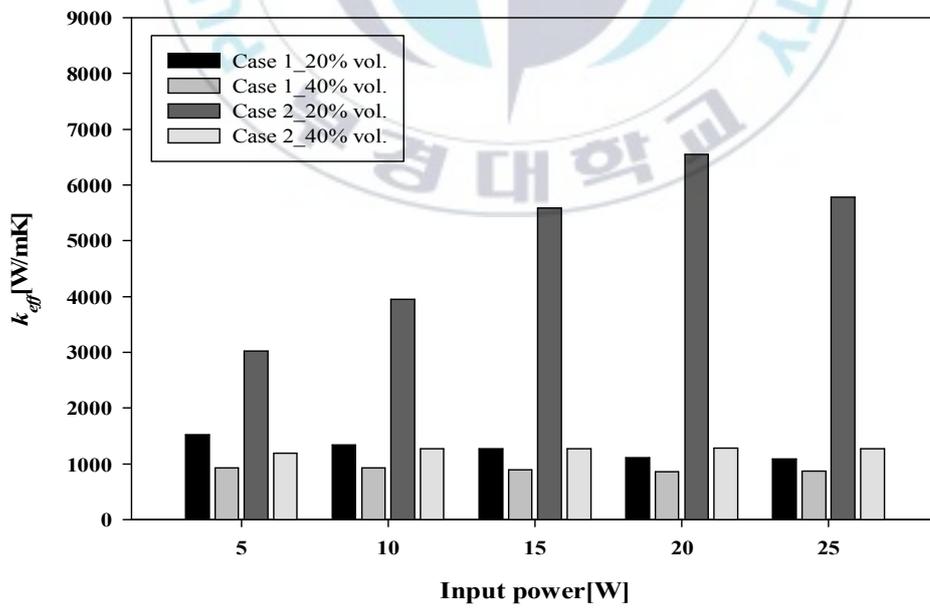
(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 5^\circ$



(c) $\theta = 10^\circ$



(d) $\theta = 30^\circ$

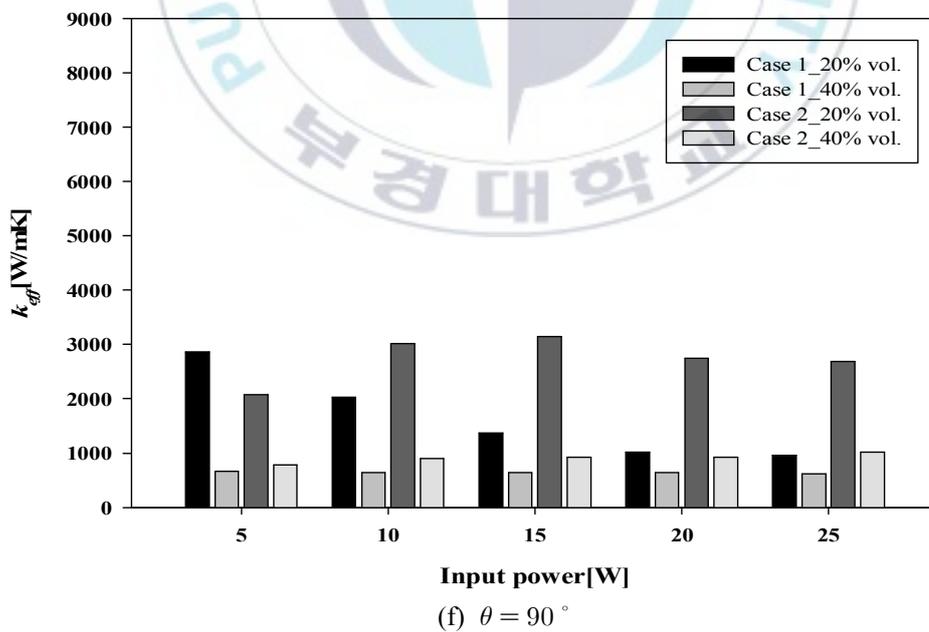
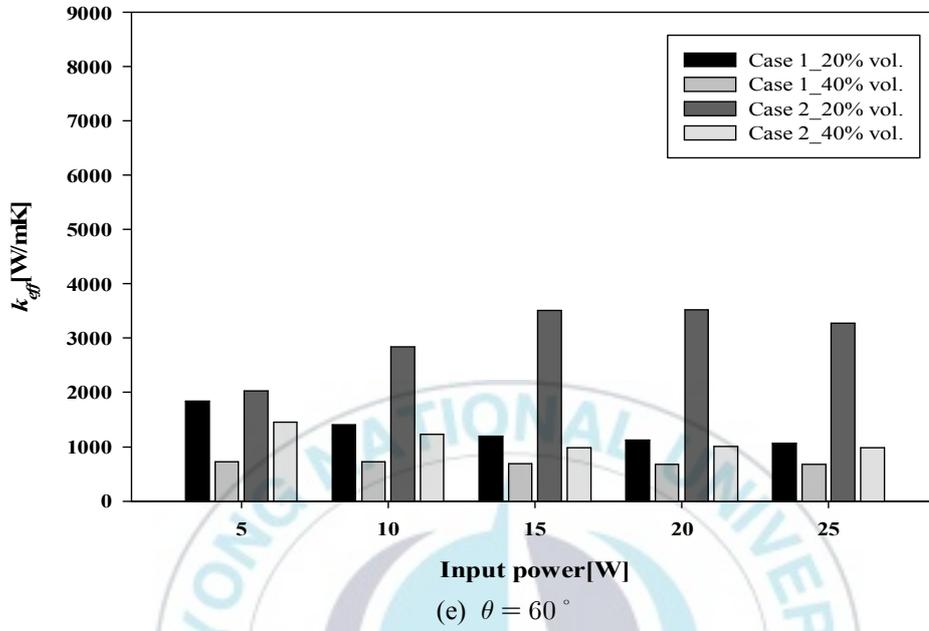
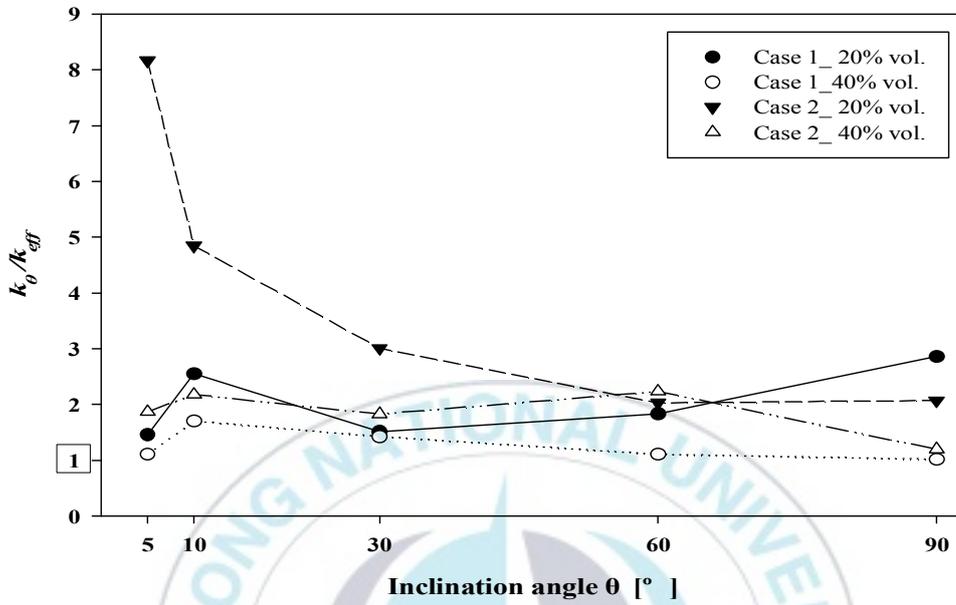


Fig. 3.5 Effective thermal conductivity according to the inclination angle of condensation section

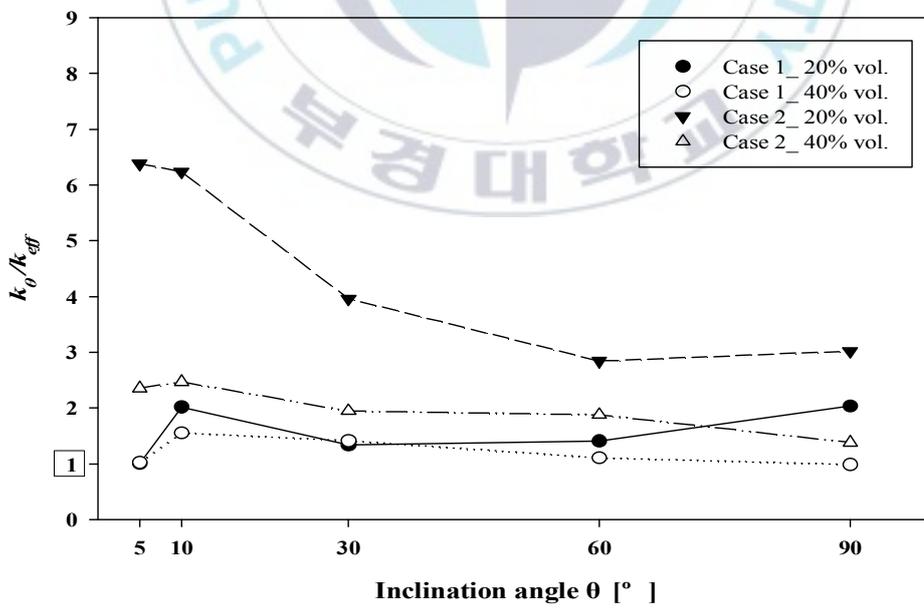
Table 3.2 Effective thermal conductivities according to the change in the inclination angle of condensation section

[unit : W/(m·K)]

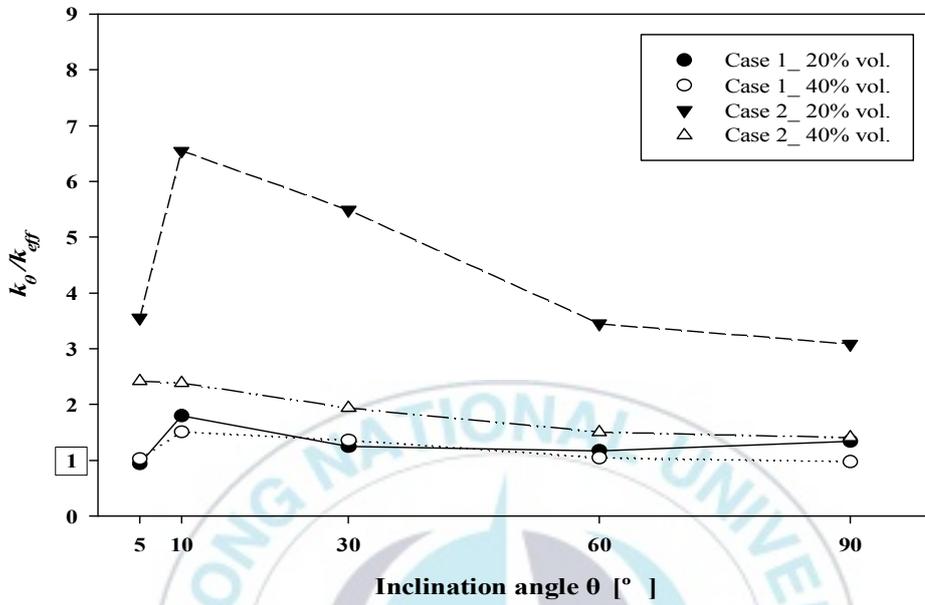
Inclination angle θ	Input power	Charging ratio		Charging ratio	
		Case 1		Case 2	
		20% vol.	40% vol.	20% vol.	40% vol.
0°	5W	1003	652	1003	652
	10W	999	656	999	656
	15W	1018	654	1018	654
	20W	997	656	997	656
	25W	977	658	977	658
5°	5W	1463	722	8193	1220
	10W	1003	673	6373	1546
	15W	959	672	3615	1579
	20W	866	637	2712	1456
	25W	873	622	2324	1475
10°	5W	2560	1111	4860	1420
	10W	2019	1019	6234	1620
	15W	1830	988	6669	1559
	20W	1720	954	7260	1559
	25W	1555	926	6127	1323
30°	5W	1517	928	3019	1190
	10W	1334	927	3955	1275
	15W	1269	888	5586	1265
	20W	1115	861	6555	1279
	25W	1084	868	5782	1272
60°	5W	1838	721	2034	1456
	10W	1406	726	2839	1233
	15W	1193	684	3511	982
	20W	1118	679	3519	1001
	25W	1068	681	3274	985
90°	5W	2868	664	2078	779
	10W	2034	647	3019	906
	15W	1366	637	3140	922
	20W	1020	641	2751	921
	25W	960	622	2690	1023



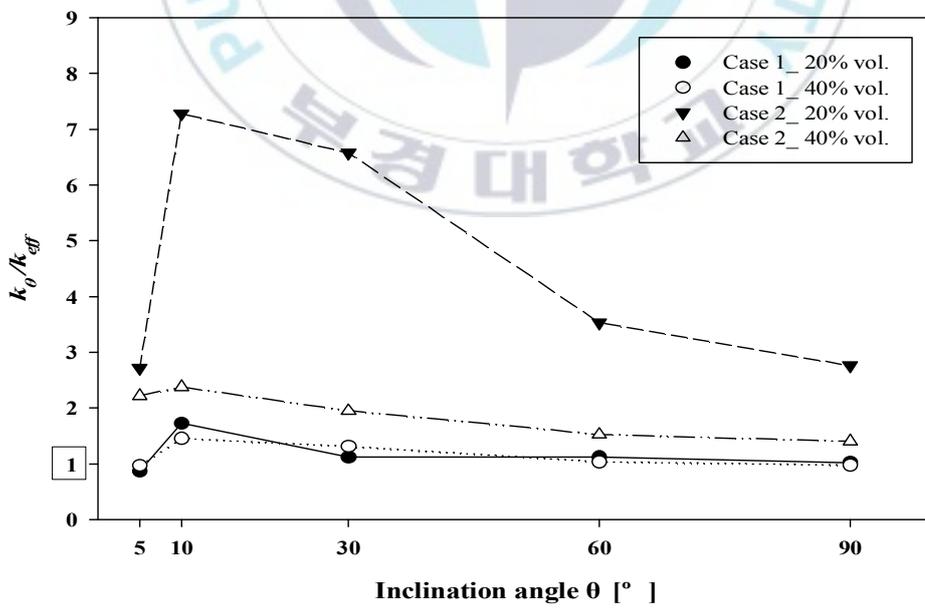
(a) Q=5W



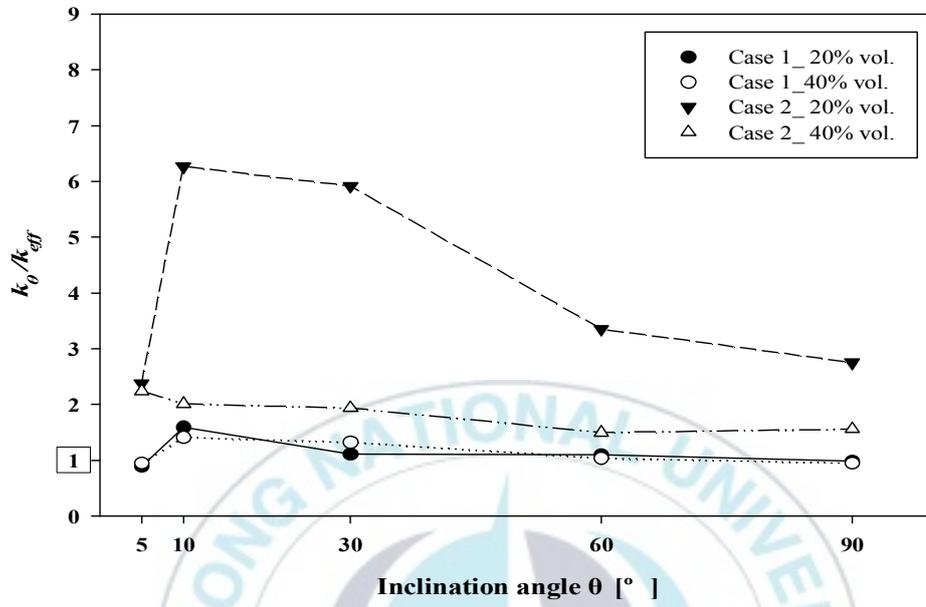
(b) Q=10W



(c) Q=15W

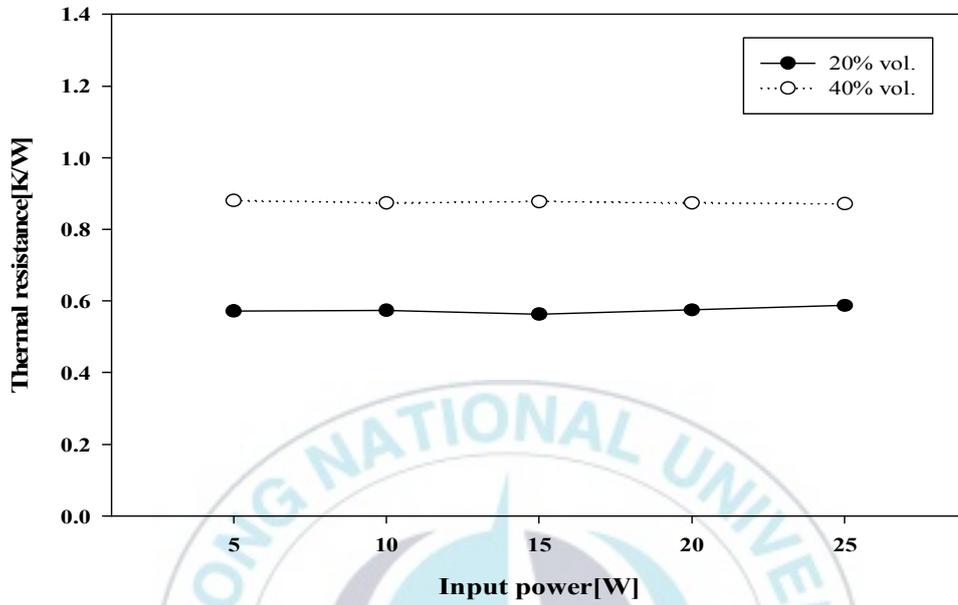


(d) Q=20W

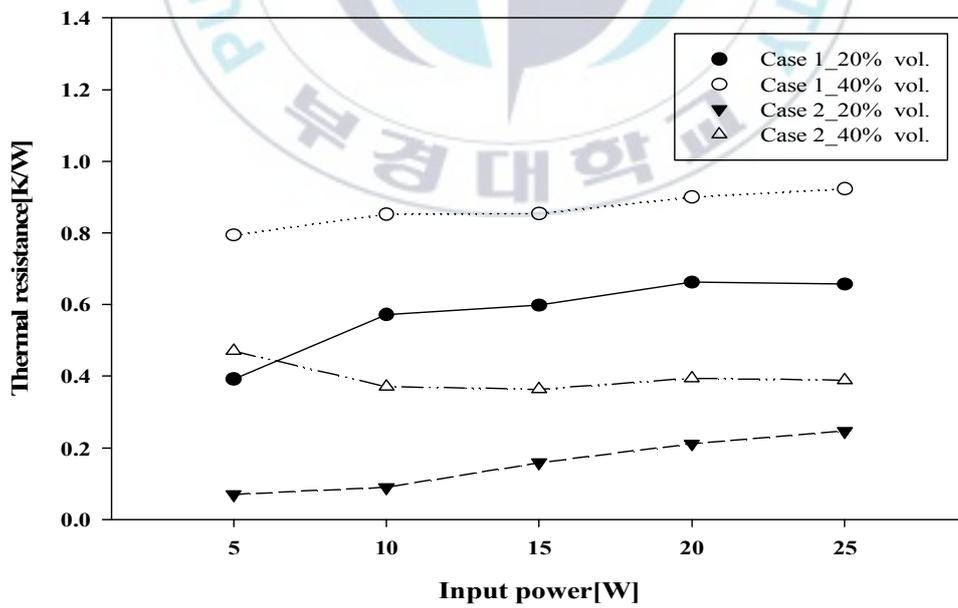


(e) $Q=25W$

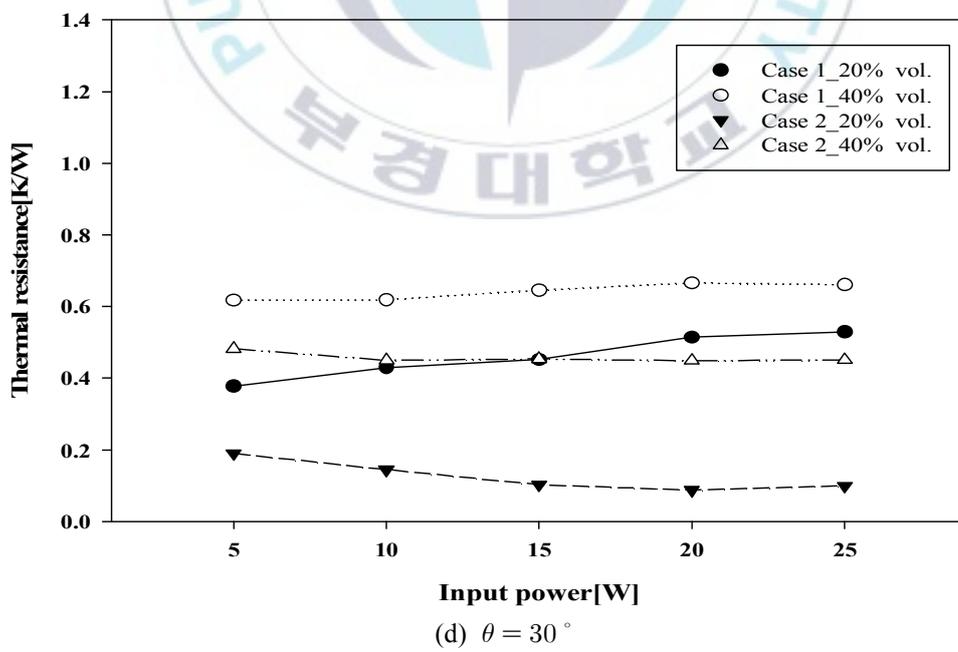
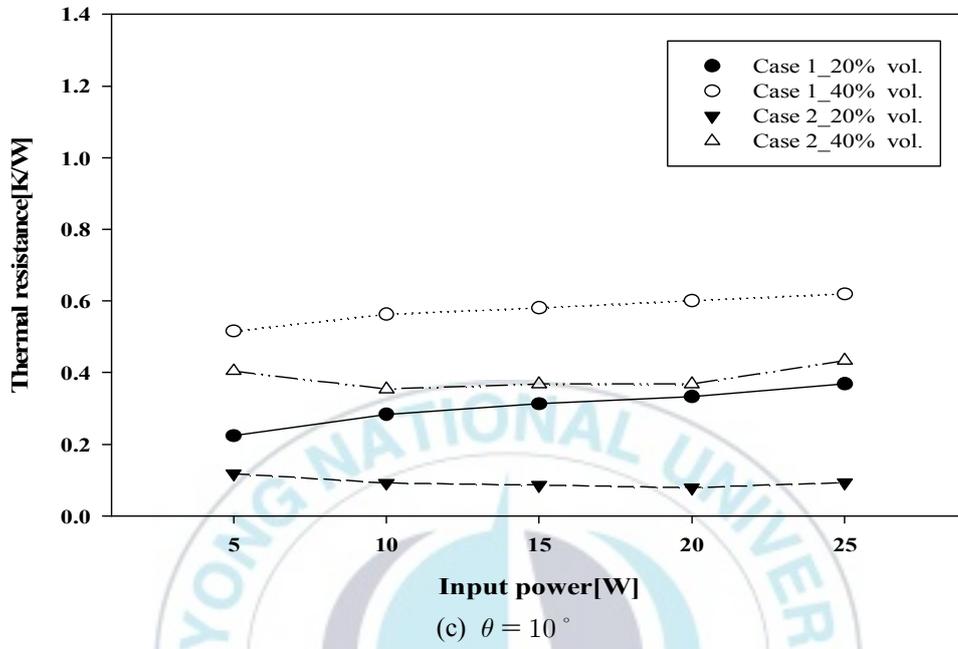
Fig. 3.6 Comparison of effective thermal conductivity(k_{eff}) with the value of horizontal state(5~25W)



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 5^\circ$



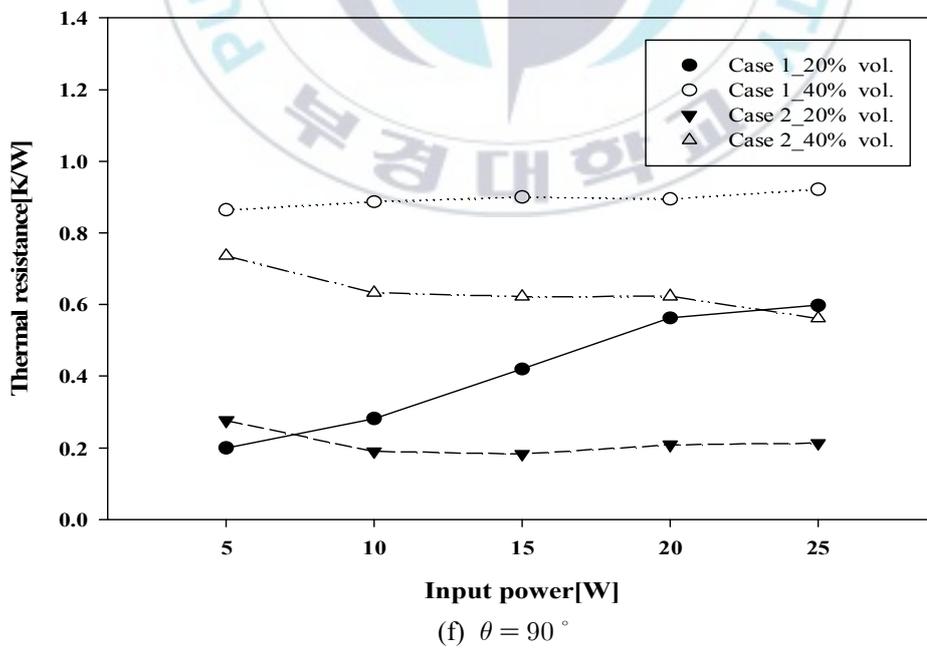
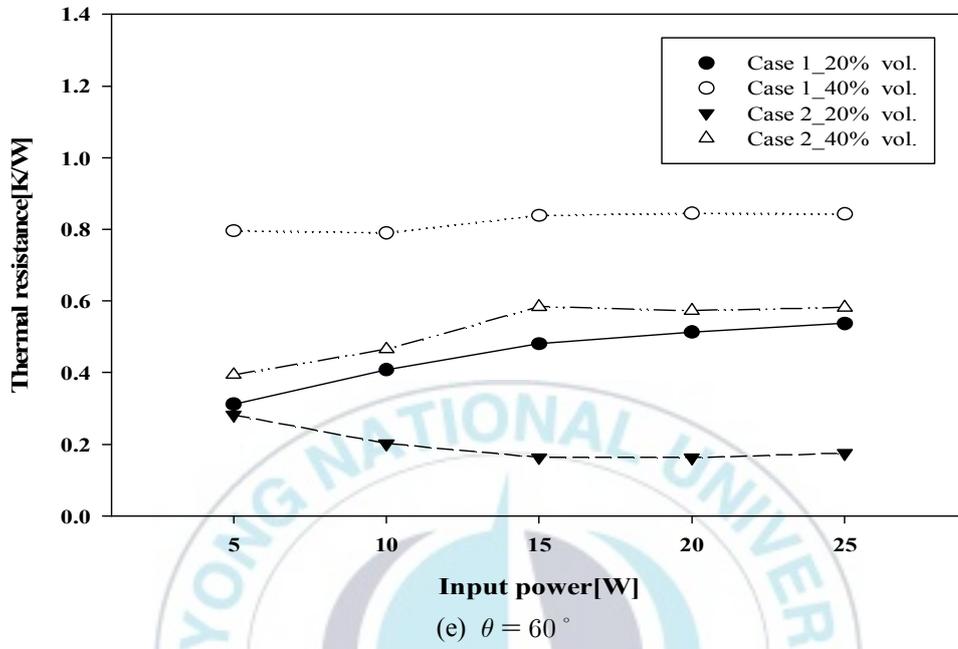


Fig. 3.7 Thermal resistance profile according to inclination angle

Table 3.3 Thermal resistance according to the inclination angle of condensation section
[unit : K/W]

Inclination angle θ	Input power	Charging ratio		Charging ratio	
		Case 1		Case 2	
		20% vol.	40% vol.	20% vol.	40% vol.
0°	5W	0.57	0.88	0.57	0.88
	10W	0.57	0.87	0.57	0.87
	15W	0.56	0.88	0.56	0.88
	20W	0.58	0.87	0.58	0.87
	25W	0.59	0.87	0.59	0.87
5°	5W	0.39	0.79	0.07	0.47
	10W	0.57	0.85	0.09	0.37
	15W	0.60	0.85	0.16	0.36
	20W	0.66	0.90	0.21	0.39
	25W	0.66	0.92	0.25	0.39
10°	5W	0.22	0.52	0.12	0.40
	10W	0.28	0.56	0.09	0.35
	15W	0.31	0.58	0.09	0.37
	20W	0.33	0.60	0.08	0.37
	25W	0.37	0.62	0.09	0.43
30°	5W	0.38	0.62	0.19	0.48
	10W	0.43	0.62	0.15	0.45
	15W	0.45	0.65	0.10	0.45
	20W	0.51	0.67	0.09	0.45
	25W	0.53	0.66	0.10	0.45
60°	5W	0.31	0.80	0.28	0.39
	10W	0.41	0.79	0.20	0.47
	15W	0.48	0.84	0.16	0.58
	20W	0.51	0.84	0.16	0.57
	25W	0.54	0.84	0.18	0.58
90°	5W	0.20	0.86	0.28	0.74
	10W	0.28	0.89	0.19	0.63
	15W	0.42	0.92	0.18	0.62
	20W	0.56	0.89	0.21	0.62
	25W	0.60	0.92	0.21	0.56

제4장 결론

간단한 구조, 소형화, 저렴한 생산비, 높은 열전달 성능 등의 특성을 가지는 히트파이프는 다양한 분야에 사용되고 있지만, 수평 상태에서는 작동하지 않거나 성능이 낮아지는 문제가 있었다. 본 실험에서는 이를 해결하기 위하여 알루미늄 박판형 다채널 써모사이폰에 대한 응축부 경사각 및 길이에 변화를 주어 열성능의 변화를 확인하고자 하였다. 또한 일부의 써모세관 써모사이폰에 문제가 생기더라도 전체적인 성능에 문제가 없도록 하기 위하여 56개의 모세관 써모사이폰이 집적된 평판형 써모사이폰을 이용하여 실험을 진행하였다. 전기 자동차의 배터리 및 다양한 용도의 전자장비의 방열을 목적으로 하여 응축부 경사각 및 길이에 따른 유효 열전도를 변화와 열저항 변화를 분석하는 실험을 진행하여 다음과 같은 연구 결론을 얻었다.

(1) Case 1과 case 2 모두 충전율 20% vol.의 열성능이 충전율 40% vol.의 열성능 보다 뛰어났다.

(2) 입열량 5, 15W의 경우, 응축부 길이가 긴(126mm) case 2가 응축부 길이가 짧은(70mm) case 1보다 유효 열전도를 값이 2.2배 컸으며, 5~25W의 경우, 응축부 길이가 긴(126mm) case 2가 응축부 길이가 짧은(70mm) case 1보다 유효 열전도를 값이 2.4배 컸다.

(3) 입열량 5, 15W 조건에서 응축부 길이가 긴(126mm) case 2의 경우, 수

평 가열 조건에서도 응축부 경사각 θ 가 5° 이상이면 발열부 온도가 작동 온도 조건을 만족한다.

(4) 부분 경사형 써모사이폰과 완전 평판형($\theta=0^\circ$) 써모사이폰 유효 열전도율을 비교시, 입열량 5 및 15W 조건의 응축부 길이가 짧은(70mm) case 1에서는 약 1.5배 높은 유효 열전도율 값을 나타내었다. 응축부 길이가 긴 (126mm) case 2에서는 증진율 20% vol.조건에서는 약 3.1배 높은 유효 열전도율 값을 나타내었다.

(5) 부분 경사형 써모사이폰과 완전 평판형($\theta=0^\circ$) 써모사이폰 유효 열전도율을 비교시, 입열량 5~25W 조건의 응축부 길이가 짧은(70mm) case 1에서는 약 1.3배 높은 유효 열전도율 값을 나타내었고, 응축부 길이가 긴 (126mm) case 2에서는 약 3.2배 높은 유효 열전도율 값을 나타내었고 최대 8.2배 큰 값을 보였다.

(6) 완전 평판형 써모사이폰($\theta=0^\circ$)과 응축부 경사각이 있는 써모사이폰을 비교하였을 때, 응축부 경사각을 준 써모사이폰의 열저항 값이 작게 나왔으며, 응축부 경사각 $\theta=10^\circ$ 일 때의 열저항 값이 가장 낮게 나타났다.

참고문헌

- [1] 강인석, 최동규, 김택영, “전자장비 냉각을 위한 2상 순환형 써모사이폰 시스템의 성능에 대한 실험적 연구”, 대한기계학회 논문집 B권, 28(4), 415-424, 2004
- [2] Reay, D. A, Kew, P. A., Heat Pipes 5th, Elsevier, pp.246-250., 2005
- [3] 김종수, 이재영, “접이식 버블젯 루프 히트파이프의 접이각에 따른 열 전달 및 압력변동”, 수산해양교육연구, 30(1), 199-205, 2018
- [4] 김주노, 김성진, “응축부의 길이가 진동형 히트 파이프의 열성능에 미치는 영향에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회 논문집, pp. 210-211, 2016
- [5] Shuangfeng Wang, Jinjian Chen, Yanxin Hu, Wei Zhang, “Effect of evaporation section and condensation section length on thermal performance of flat plate heat pipe”, Applied Thermal Engineering 31, 2367-2373, 2011
- [6] Zhongrui Yan, Mingyi Zhang, Wansheng Pei, Dongwei Li, Yuanming Lai, “Effect of length ratios on the cooling performance of an inclined two-phase closed thermosyphon under negative temperature conditions”, Solar Energy 204, 600-616, 2020
- [7] Yeonghwan Kim, Dong Hwan Shin, Jin Sub Kim, Seung M. You, Jungho Lee, “Boiling and condensation heat transfer of inclined two-phase closed thermosyphon with various filling ratios“, Applied Thermal Engineering 145, 328-342, 2018
- [8] 이재영, 김민석, 권용하, 김종수, ”알루미늄 평판 진동형 히트파이프의 경사각이 열전달 성능에 미치는 영향“, 대한설비공학회 학술발표대회논문

집, 120-124, 2018

[9] www.inventec.dehon.com/en/surfaces-technologies/cleaning/26/3m-novec-7100/328.html

[10] Faghri, A., Heat Pipes Science and Technology, Taylor & Francis Ltd. Washington, DC., pp. 341-400, 1995

[11] 김민석, 이재영, 권용하, 김종수, "다채널 평판형 히트파이프의 열성능에 미치는 경사각의 영향에 관한 연구", 대한기계학회 부산/경남 추계학술대회, pp. 81-83, 2018



감사의 글

석사 과정을 통해 약 2년 6개월이라는 시간을 대학원에서 보내면서 많은 것을 보고 배우며 일할 수 있었습니다. 먼저 이런 경험을 할 수 있도록 허락해주신 김종수 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 부족한 부분이 많은 저를 항상 바르게 잡아주시고 지도해주셔서 무사히 졸업을 할 수 있었습니다. 감사합니다. 그리고 졸업 논문을 살펴봐 주시고 더 좋은 논문이 될 수 있도록 많은 가르침을 주신 금종수 교수님, 김은필 교수님, 손창호 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 최광환 교수님께도 정말 감사드립니다.

실험실의 권용하 박사님, 실험과 논문에 대해서 많은 지도를 해주셔서 감사했습니다. 덕분에 실험실에서 어려울 수 있었던 부분들도 잘 해결할 수 있었습니다.

‘냉동공조공학’이라는 전공을 공부할 수 있도록 조언을 해주신 정영록 전무님께도 감사의 인사를 드립니다.

또한 새로운 공부의 시작에 있어서 용기를 북돋아 주고 과정 중에도 항상 응원을 아끼지 않았던 故 허진아 양에게도 진심으로 감사를 표합니다. 하늘나라에서는 항상 편안하고 행복한 일만 있길 기도드립니다. 그리고 힘든 시기를 보내는 나에게 석사 과정의 처음부터 끝까지 용기를 주고 기댈 곳이 되어준 나의 친구들 박철재, 안희재, 유해준에게도 고마움을 전합니다.

마지막으로 세상에서 가장 사랑하는 우리 가족에게도 감사를 전합니다. 그 어떤 일보다 저의 건강과 미래를 생각해주는 부모님을 생각하면 죄송스러운 마음이 더 큼니다. 다니던 직장을 그만두고 대학원 진학을 결심했을 때에도 망설임 없이 믿어주시고 허락해주셔서 감사합니다. 아직 제 자신도 책임지지 못하는 위치에 있지만, 앞으로는 멋진 아들이 되어서 부모

님께 걱정을 드리지 않도록 노력하며 전진하겠습니다. 때로는 밋지만 누구보다 나를 생각해주는 사랑하는 내 동생 김수현, 한동안 오빠다운 모습을 보이지 못하고 나약한 모습을 보였던 점 미안하다. 앞으로 다가올 날에는 든든한 오빠가 될게. 사랑하는 가족 여러분, 앞으로 의지할 수 있는 아들, 오빠가 되겠습니다. 사랑하고 감사합니다!

이 글을 적으며 지금까지 제가 얼마나 많은 은혜 속에 살아왔는지를 느꼈습니다. 모두에게 감사드립니다. 앞으로 항상 발전적이고 멋진 모습으로 살아가겠습니다. 정말 감사합니다.

