creative commons
COMMONS DEED

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

dCollection

공 학 석 사 학 위 논 문

크레비스형 베이퍼 챔버를 가진 히트파이프를 이용한 자동차용 LED 헤드램프의 냉각 시스템 개발

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

여 지 원

공 학 석 사 학 위 논 문

크레비스형 베이퍼 챔버를 가진 히트파이프를 이용한 자동차용 LED 헤드램프의 냉각 시스템 개발

지도교수 김 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2012년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

여 지 원

이 논문을 여지원의 공학 석사

학위 논문으로 인준함

2012年 2月

주 심 공학박사 오 후 규 (인)

위 원 공학박사 금 종 수 (인)

위 원 공학박사 김 종 수 (인)

목 차

ABSTRACT ····· iii
Nomenclature ····· v
List of Figures ····· vi
List of Tables ····· ix

제 1 장 서론 ····· 1
1.1 연구의 배경 ····· 1
1.2 LED의 개념과 특징 ····· 2
1.3 LED 방열의 필요성 ····· 4
1.4 LED 방열의 선행 기술 ····· 8
1.4.1 수동적 방열 기술 ····· 10
1.4.2 능동적 방열 기술 ····· 10
1.5 연구 동향 ····· 11

제 2 장 Crevice Type Vapor Chamber 히트파이프 관련 이론 ····· 13
2.1 Crevice Type Vapor Chamber 히트파이프의 구조 및 원리 ····· 13
2.1.1 좁은 틈에서의 핵비등 ····· 15
2.2 소결 ····· 22
2.3 작동 유체의 선정 ····· 25
2.3.1 증류수 ····· 26
2.3.2 나노유체 ····· 31

제 3 장 실험 장치 및 방법 ····· 36

3.1 실험 장치 ····· 36
3.2 실험 방법 ····· 39
3.3 Crevice Type Vapor Chamber Heat Pipe의 열적 모델링 ····· 42
3.4 LED에서의 열 저항 ····· 44
3.4.1 열접촉저항 ····· 46

제 4 장 실험 결과 및 고찰 ····· 48
4.1 LED 전조등 냉각 시스템의 온도 분포 ····· 48
4.2 LED 전조등 냉각 시스템의 열저항 ····· 60

제 5 장 결론 ····· 62

참고 문헌 ····· 63

謝 辭 ····· 65

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Development of Cooling System for Automobile LED Headlamp using Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber

Ji-Won Yeo

Department of Refrigeration and Air-conditioning Engineering,

Graduate school of

Pukyong National University

Abstract

The Light Emitting Diode(LED) receives attention to headlamp of vehicle because of reduction of using energy and cutting down on CO_2 emissions. Above all, it has long life span as 10,000 hours comparing halogen, and uses low electricity. This is effective for improvement of fuel consumption and it'll helpful for an electromobile. And it has quick response and durability. Also, it is eco-friendly due to not using mercury gas.

Furthermore, it can be compact and light-weight.

However, it has a considerable disadvantage to use LED for headlamp. It is that the LED generate high heat from modules and the heat may cause failures in electronics. We thought that research is needed to solve the problem and studied the method to radiate the high heat quickly.

Therefore, the purpose of this study puts to develop the cooling system of LED headlamp for vehicle using crevice type vapor chamber heat pipe and to analyze thermal properties of a LED headlamp cooling system. Working fluid was distilled water and Al_2O_3 nanofluids, its charging ratio differed according to test conditions. We also considered sintered on heating surface to improve cooling performance. As a result of the experiments, when the charging ratio is 55 $\%_{vol.}$, the LED Chip temperature was 72.05℃ and the thermal resistance was 2.2 ℃/W to search optimum charging ratio of crevice type vapor chamber. And, in the case of sinter, 30 $\%_{vol.}$ of vapor chamber volume showed the best performance among all experiments. At that time, the LED chip temperature was 70.35℃ and the thermal resistance was 2.33 ℃/W. Also, when we use Al_2O_3 nanofluids, the LED Chip temperature was 78.25℃ and the thermal resistance was 2.56 ℃/W. In this study, we knew that LED chip temperature was maintained below 85℃ in all test conditions and and the crevice type vapor chamber heat pipe has possibility for use LED headlamp cooling system.

NOMENCLATURE

Symbols

A	Area	$[m^2]$
D	Diameter	$[mm]$
h_{fg}	Latent heat	$[kJ/kg]$
k	Thermal conductivity	$[W/m\cdot K]$
h_c	Thermal contact conductance	$[W/m^2\cdot℃]$
R	Thermal resistance	$[℃/W]$
R_c	Thermal contact resistance	$[m^2\cdot℃/W]$
R_θ	Total thermal resistance	$[℃/W]$
T	Temperature	[℃]
M_h	Merit number of heat pipe	$[kW/m^2]$
M_t	Merit number of thermosyphon	$[kW^{0.5}/m^2\cdot ℃^{0.75}]$
Pr	Prandtl number	[-]
q	Heat flux	$[W/m^2]$

Greek symbols

α	Heat transfer coefficient	$[W/m^2K]$
μ	Viscosity	[kg/s · m]
ρ	Density	$[kg/m^3]$
σ	surface tension	[N/m]

Subscripts

Ch	Chip
P	PCB
CB	Chamber
TB	Tube
F	Fin
A	Ambient

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

List of Figures

Fig. 1 Principle of LED ····· 3
Fig. 2 Yellowing of epoxy resin ····· 4
Fig. 3 Lifed chip caused by reflow of thermal paste chip attach ····· 5
Fig. 4 Wire breakage caused by thermal stress ····· 5
Fig. 5 Interfacial separation between LED PKG and silicon resin ····· 6
Fig. 6 Relative light output vs. Junction temperature ····· 7
Fig. 7 Light output variation as a function time for the LED arrays ····· 7
Fig. 8 Heat Sink ····· 8
Fig. 9 Heat Pipe ····· 9
Fig. 10 Cooling Fan ····· 9
Fig. 11 Thermoelectric element ····· 10
Fig. 12 Heat flow by working fluid ····· 13
Fig. 13 Principle of crevice type vapor chamber ····· 14
Fig. 14 Boiling behavior in narrow spaces ····· 15
Fig. 15 Boiling behavior in narrow spaces ····· 16
Fig. 16 Schematic of crevice type vapor chamber ····· 17
Fig. 17 Relationship among heat transfer coefficient, heat flux, and clearance (in mm), of boiling water, atmospheric pressure, coalesced bubble region) ····· 18
Fig. 18 Variation of heat transfer coefficient due to change in clearance of boiling space (atmospheric pressure, constant heat flux). ····· 19
Fig. 19 Generalized relation ship of heat transfer coefficient in the coalesced bubble region by $Nu-Fo^{-1}$ for boiling in narrow space. ····· 21
Fig. 20 Enhancement for water boiling at 101 kPa (1 atm) on a stainless

steel surface having minute nonwetted spots (30-60 spots/cm^2, 0.25 mm diameter or less) ····· 22
Fig. 21 Enhancement provided by porous High-FluxTM surface for three fluids boiling at 101kPa (1atm), as reported by Gottzmann et al. [1971,1973] ····· 23
Fig. 22 The picture of sinter on heating surface ····· 24
Fig. 23 Merit number of selected working fluids for heat pipe ····· 28
Fig. 24 Merit number of selected working fluids for thermosyphon ····· 29
Fig. 25 Growth of publications by the nanofluids community ····· 32
Fig. 26 Comparison of the thermal conductivity of common liquids, polymers and solids ····· 32
Fig. 27 The profile of the thermal resistance of charging ratio 50 $\%_{vol.}$ ···· 33
Fig. 28 The profile of the thermal resistance of charging ratio 60 $\%_{vol.}$ ···· 33
Fig. 29 The profile of the thermal resistance of charging ratio 70 $\%_{vol.}$ ···· 34
Fig. 30 The picture of Al_2O_3 production ····· 35
Fig. 31 Schematic diagram of experimental apparatus ····· 37
Fig. 32 Schematic diagram of the crevice type vapor chamber ····· 38
Fig. 33 High vacuum pump system ····· 39
Fig. 34 HPG-10 ····· 40
Fig. 35 Photograph of installation ····· 41
Fig. 36 A series circuit of crevice type vapor chamber heat pipe system thermal resistance ····· 43
Fig. 37 Heat transmission amount generated between two isothermal surface ····· 44
Fig. 38 LED model for heat measurement ····· 46
Fig. 39 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor

Chamber (charging ratio 40 $\%_{vol.}$) ····· 49
Fig. 40 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 45 $\%_{vol.}$) ····· 50
Fig. 41 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 55 $\%_{vol.}$) ····· 51
Fig. 42 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 70 $\%_{vol.}$) ····· 52
Fig. 43 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 100 $\%_{vol.}$) ····· 53
Fig. 44 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 20 $\%_{vol.}$) ····· 54
Fig. 45 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 30 $\%_{vol.}$) ····· 55
Fig. 46 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 40 $\%_{vol.}$) ····· 56
Fig. 47 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 55 $\%_{vol.}$) ····· 57
Fig. 48 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (Al_2O_3 - charging ratio 55 $\%_{vol.}$) ····· 58
Fig. 49 The LED chip temperature following charging ratio ····· 59
Fig. 50 The thermal resistance according to the charging ratio ····· 61

List of tables

Table 1 Classification of radiant heat techniques, characters and research trend ····· 12
Table 2 Heat flux in relation to different clearances and pressures[a,b] ····· 20
Table 3 Working fluids and temperature ranges ····· 27
Table 4 Generalized results of experimental compatibility tests ····· 30
Table 5 Production of Al_2O_3 ····· 35
Table 6 Characteristic of LED ····· 37
Table 7 Specification of crevice type vapor chamber ····· 38
Table 8 Test conditions ····· 41
Table 9 Maximum temperature of each point (40 $\%_{vol.}$) ····· 49
Table 10 Maximum temperature of each point (45 $\%_{vol.}$) ····· 50
Table 11 Maximum temperature of each point (55 $\%_{vol.}$) ····· 51
Table 12 Maximum temperature of each point (70 $\%_{vol.}$) ····· 52
Table 13 Maximum temperature of each point (100 $\%_{vol.}$) ····· 53
Table 14 Maximum temperature of each point (sinter-20 $\%_{vol.}$) ····· 54
Table 15 Maximum temperature of each point (sinter-30 $\%_{vol.}$) ····· 55
Table 16 Maximum temperature of each point (sinter-40 $\%_{vol.}$) ····· 56
Table 17 Maximum temperature of each point (sinter-55 $\%_{vol.}$) ····· 57
Table 18 Maximum temperature of each point (nanofluids-55 $\%_{vol.}$) ····· 58
Table 19 Thermal resistance according to charging ratio ····· 60
Table 20 Thermal resistance according to sintered-charging ratio ····· 60
Table 21 Thermal resistance according to nanofluid-charging ratio ····· 60

제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

LED는 에너지 절감, 이산화탄소 배출의 억제 등의 이점으로 차세대 조명원으로 주목받고 있다. 실제 할로겐 전조등을 대체하여 장착할 경우 연료소비량의 약 19.5%를 절약할 수 있는 것으로 나타났다.(1) 그리고 LED의 수명(약 5,000~10,000시간)은 기존의 할로겐램프(약 1,000시간)에 비해 길며, 빠른 응답성과 다양한 모양의 설계가 가능하기 때문에 자동차 전조등으로서 적합하다고 볼 수 있다. 무엇보다 전조등으로서의 사양을 고려했을 때, LED를 전조등으로 사용할 경우 40 W만으로도 기존의 제품 60 W만큼의 성능을 구현할 수 있고, 보다 소형화, 경량화 설계가 가능하기 때문에 연비개선에 효과적이며 이는 배터리 소모가 중요한 전기자동차의 입장에서 볼 때, 차량용 전조등에서의 LED사용은 그 중요도가 크다고 볼 수 있다. 차량용 LED전조등의 사용은 2007년 일본의 Toyota의 LEXUS LS600h를 세계최초로 고급차종에만 적용되었지만, 이는 점차 증가, 전 차종으로 확대되고 있으며 그에 대한 연구도 활발히 진행 중이다.

하지만, LED는 입력을 100%로 봤을 때 15%만이 빛에너지로 방출되고, 나머지 85%는 열에너지로 방출되며, 또한 자동차 전조등은 고출력 LED를 필요로 하기 때문에 LED에서 발생되는 열이 아직 해결되어야할 문제로 남아있다.(2) 뿐만 아니라, 전조등이라는 협소한 공간에 여러 부품 등과 엔진에서의 열로 인해 그 내부는 더욱 열악한 환경이 될 것이다.

이러한 점에서 볼 때, 급속한 반도체 관련기술의 발전으로 인해 고집적, 고출력화 되면서 반도체 및 전자제품의 성능은 향상되었지만, 열에 취약한 특성을 가지는 전자기기 주변의 상황은 악화되었다고 할 수 있다. 그래서 그들의

신뢰성을 확보하기 위한 방열기능 향상에 대한 중요도와 인지도가 증가하게 되었다. 그에 관련해 Byungdo Kang et al[3]은 3 W의 LED에 루프형 히트파이프 시스템을 적용한 연구에서 냉매(HCFC-123)의 충전량이 44% 일 때 연구의 목표 온도치였던 35℃를 만족하는 결과를 얻었고, 냉각성능이 안정적인 것을 확인 했다.

본 연구에서는 크레비스형 베이퍼 챔버 히트파이프를 이용해 LED의 열을 확산시켜 LED 칩의 온도 상승을 방지하고자 하였으며, 전열면에 소결을 한 것과 증류수와 나노유체를 작동유체로 사용하여 크레비스형 베이퍼 챔버 히트파이프가 차량용 LED전조등으로서의 가능성을 살펴보았다.

1.2. LED의 개념과 특징

LED(Light-Emitting Diode)는 P-N 접합 다이오드의 일종으로, 순방향으로 전압이 걸릴 때 단파장광(monochro-matic light)이 방출되는 현상인 전기발광효과(electroluminescence)를 이용한 반도체 소자이다. Fig. 1과 같이 P, N 반도체를 접합시켜 전압을 가해주면 P형 반도체의 정공은 N형 반도체 쪽으로 가서 전도대(conduction band)의 가장 낮은 곳인 가운데층으로 모인다. 이 전자들은 가전대(valance band)의 빈자리(정공)로 자연스럽게 떨어지며, 이 때 전도대와 가전대의 높이 차이, 즉 에너지 갭(energy gap)에 해당하는 만큼의 에너지를 발산하는데 에너지가 빛의 형태로 방출되면 LED가 된다. 여기서 나오는 빛은 백열전구의 필라멘트처럼 뜨거운 물체에서 나오는 백열과는 달리, 전자가 가지고 있던 에너지가 빛으로 변환되는 것이므로 뜨거워지지 않고도 냉광이다. 또한 백열은 아주 넓은 파장 대역의 빛이 동시에 나오는데 비해, LED 빛은 전도대와 가전대 사이의 에너지 차이에 해당하는 좁은 파장영역의 빛만 나온다.[4]

Diode : 전류가 한쪽 방향으로만 흐르는 2 단자 소자

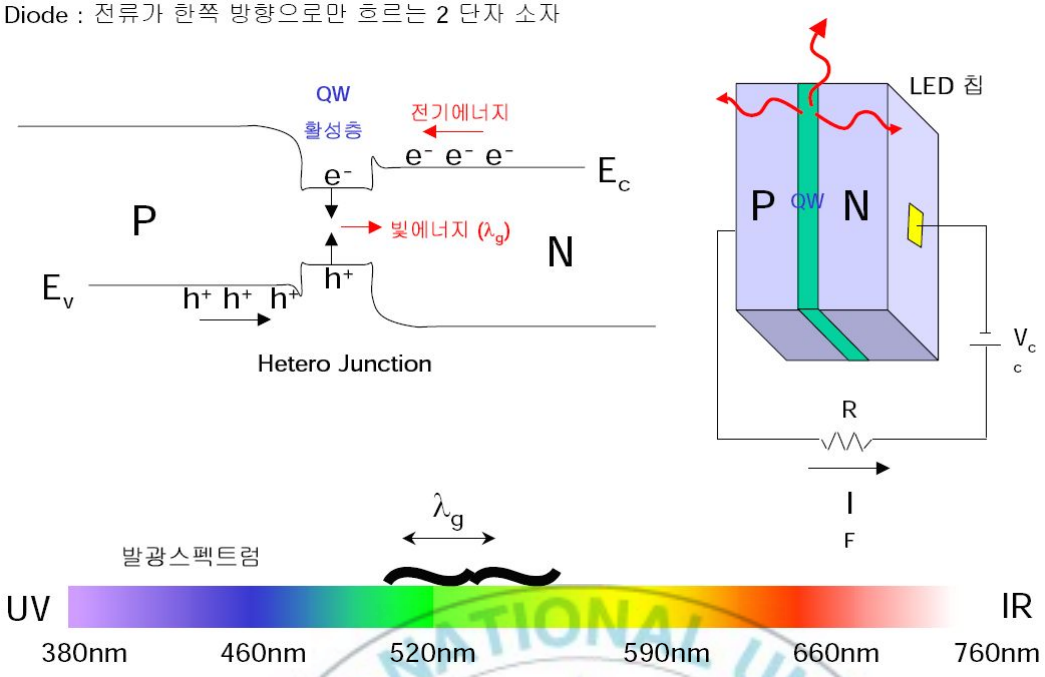

Fig. 1 Principle of LED

LED의 장점을 나열해 보면,

i) 작은 광원이므로 소형화, 박형화, 경량화가 탁월하고, 장수명이며 색의 다양화 및 다기능 광원이다.

ii) 열적 방전적 발광원이 아니므로 예열시간이 필요 없고 점등과 소등 속도가 백열전구의 200만 배로 빠르다.

iii) 점등회로 및 구동장치 등의 구조가 간단하여 부품 수가 적다.

iv) 가스 및 필라멘트가 없으므로 충격에 강하고 고장이 적다.

v) 안정한 직류 점등이므로 소비전력이 적고, 반복 펄스 동작이 가능하여 시신경의 피로도 적다.

vi) 반영구적이므로 폐기물의 문제가 적다.

vii) 형광등처럼 수은 가스를 사용하지 않으므로 친환경성 안전한 광원이다.

1.3 LED 방열의 필요성

고출력 발광 다이오드의 특성 및 신뢰성은 발광 다이오드의 접합에서 발생하는 열에 의해 크게 좌우된다. 일반적인 고출력 발광 다이오드에서는 약 1 W/㎡의 열을 발생시킨다. 발광 다이오드에서 발생하는 열은 패키지내의 열팽창계수가 서로 다르기 때문에 최대 정격 이상의 높은 온도에 노출시키거나 열순환을 반복하면 각기 다른 유형의 치명적 고장을 초래할 수 있다.

Fig. 2에서 보는 것처럼, 에폭시 레진은 과도한 온도에 노출되면, 특히 장시간 동안 수분이 많이 존재하는 경우, 노란색으로 변색될 수 있다. 발광 다이오드 칩의 광출력에는 영향을 미치지 않지만 결과적으로 발광 다이오드 렌즈의 흡수력으로 인해 광출력 저하가 나타난다.

또한, 높은 내부 온도에 노출되면 발광 다이오드 칩을 방열판에 부착하는데 사용되는 열전도성 접착제가 재용해 될 수 있다. 접합 온도가 접착제의 용해점을 초과하면 발광 다이오드가 개방되어 치명적인 고장을 일으킬 수 있다.

Fig. 2 Yellowing of epoxy resin

Fig. 3 Lifed chip caused by reflow of thermal paste chip attach

Fig. 4 Wire breakage caused by thermal stress

Fig. 3은 과도한 열적 과부하로 인한 접착제의 재용해로 틈이 생긴 발광 다이오드 패키지를 나타낸다. 고출력 발광 다이오드 패키지는 보통 -40℃/120℃에서 1,000번 이상의 온도 순환을 견딜 수 있어야 한다. 하지만 더 높은 온도 순환에서 더욱 빨리 치명적인 고장이 발생한다. 열적 과부하로 인한 고장의

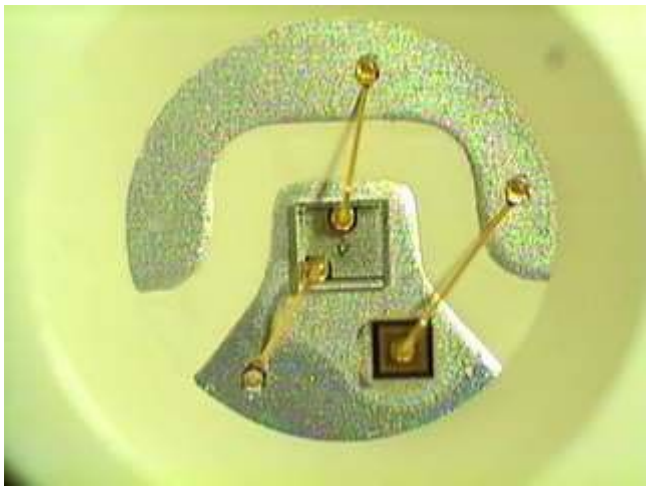

Fig. 5 Interfacial separation between LED PKG and silicon resin

가장 공통된 유형은 와이어 끊김이다. 와이어 끊김 현상은 패키지 재료들의 각각의 열 특성에 의해 야기되는 열응력에 의해 발생한다. Fig. 4는 패키지 내의 열응력으로 인하여 와이어가 끊어진 모습을 보여준다.

과도한 온도는 발광 다이오드 칩과 보호막 간의 층간 분리를 유발하는데, 이는 패키지 내의 칩-실리콘 간의 접촉면을 얇게 한다. Fig. 5는 발광 다이오드 칩과 실리콘 보호막 간의 계면 분리를 나타낸다. 일반적으로 이 문제는 치명적 고장을 유발하지 않지만 광출력을 지속적으로 저하시킬 수 있다. 백색 발광 다이오드의 경우 형광체 코팅과 실리콘 보호막 간 또는 칩과 형광체 코팅 간의 계면 분리가 발생할 수 있다.

이처럼 LED의 온도 상승으로 인하여 광출력이 저하되고, 열화 촉진으로 인한 Bond Wire 파손 및 에폭시 렌즈 황변, 솔더(Solder)부 파괴 등으로 인해 수명의 저하에 영향을 미치게 된다. 따라서 LED의 열 제거가 필수적이며, 사용 환경에 따른 방열설계가 필요하다. Fig. 6은 각 색광별 LED의 Junction 온도에 따른 광출력을 나타낸 것이다. Junction 온도 25℃를 기준으로 각 색광의 광출력이 100% 이하로 떨어지며, 일반적인 LED Junction 온도의 기준은 60~

75℃이며 최소한 LED의 온도가 그 사이로 유지되어야 할 필요성이 있다.

Fig. 7은 Junction 온도에 따른 광출력과 수명의 변화를 보여준다. 광출력이 80% 일 때 LED Junction 온도가 74℃인 경우 수명이 약 10,000시간이며 LED Junction 온도가 63℃인 경우엔 수명이 약 28,000시간으로 Junction 온도가 LED 수명 및 신뢰성과 직결됨을 알 수 있다.

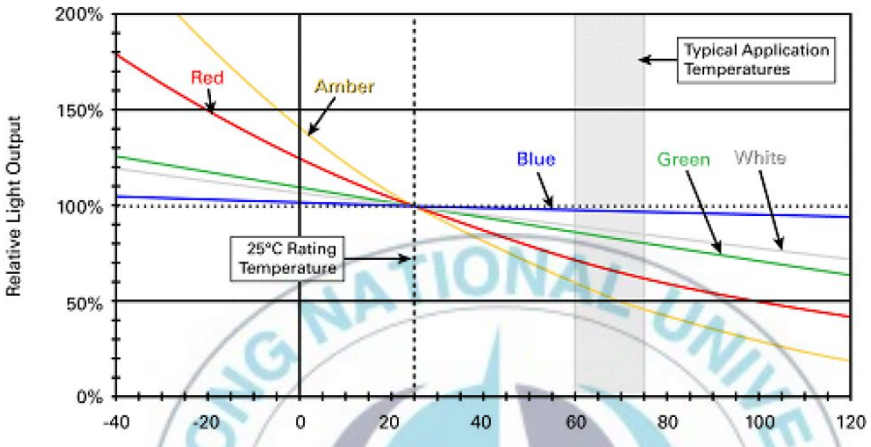

Fig. 6 Relative light output vs. Junction temperature

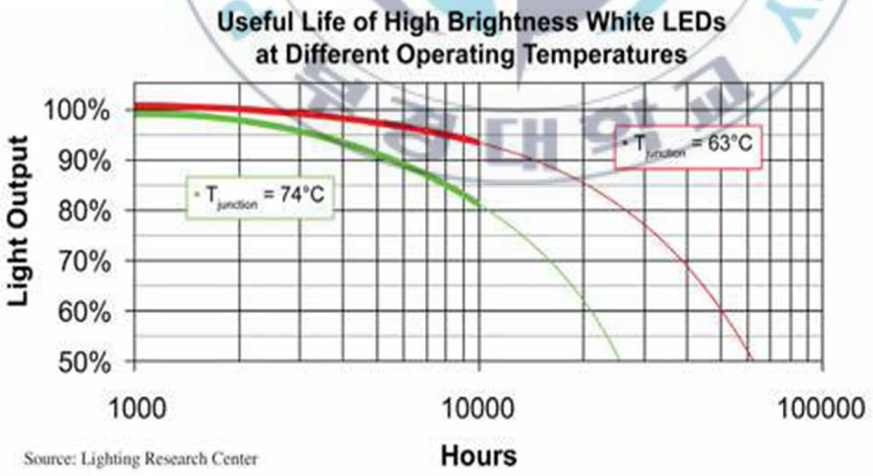

Fig. 7 Light output variation as a function time for the LED arrays

1.4 LED 방열의 선행 기술

LED 칩의 경우 고집적화되어 조명기구로 사용될 때에 사용 용도에 따라 구조적인 크기와 설치 장소가 제한될 여지가 있으므로 방열 공간과 열전달 통로(thermal path)의 부족으로 인해 기존의 방열 기술의 적용이 용이치 않을 수 있다.

모든 방열 기술은 장치의 냉각을 위해 부가적인 에너지를 필요로 하는가의 여부에 따라 크게 수동적인 냉각(passive cooling) 방식과 능동적인 냉각(active cooling)방식으로 나뉜다. 현재 상용화되어 전자장치의 냉각에 사용되는 주요 기술들 중에서 냉각 핀, 히트 파이프 기술은 수동적인 냉각에 속하며 냉각 팬, 열전소자 기술은 능동적인 냉각에 속한다. Fig. 8에서 Fig. 11까지 전자장치의 냉각에 주로 사용되는 기술들을 나타내었다.[5]

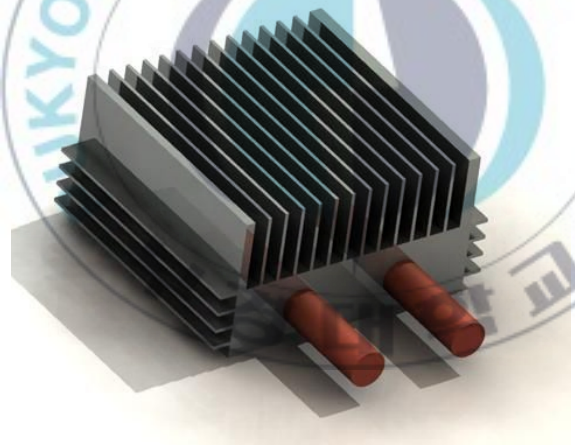

Fig. 8 Heat Sink

Fig. 9 Heat Pipe

Fig. 10 Cooling Fan

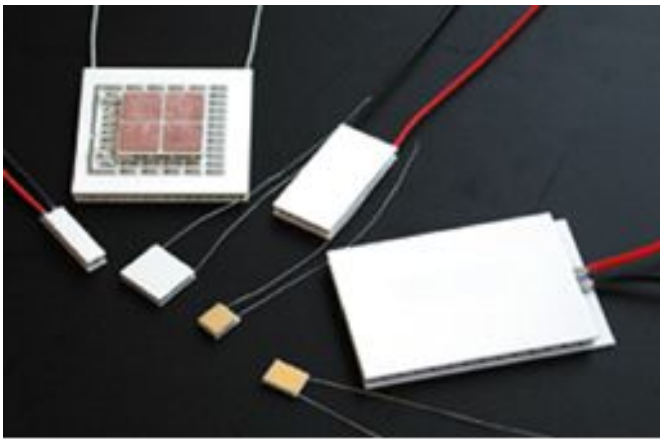

Fig. 11 Thermoelectric element

1.4.1 수동적 방열 기술

부가적인 에너지원을 필요로 하지 않는 수동적인 방열 기술에 있어서 가장 많이 사용되는 전통적인 기술은 냉각 fin을 사용하는 방법이다. 반도체 소자에서 발생된 열이 금속 소재의 Fin을 이용해 분산되며 주위의 공기가 데어짐에 따라 부력에 의해 공기의 자연대류(natural convection)이 발생하여 열을 fin 외부로 이송하게 된다. Fin은 제작 방식에 따라 사출식, 전기 용접식, 알루미늄 fin 접착식, scrubbing 방식이 있으며, 그에 따른 냉각 성능과 단가가 상이하다. 일반적으로 fin 냉각 방식은 다른 기술에 비해 저렴하지만 방열 성능이 낮다.[5]

1.4.2 능동적 방열 기술

방열을 위해 부가적인 에너지를 필요로 하는 능동적 방열 기술 중에서 가장 보편적으로 많이 사용되는 방식은 fan을 이용한 냉각 방식이다. 자동차 엔진이나 산업체에서 많이 쓰이는 압축기의 냉각에서부터 컴퓨터 CPU의 냉각에

이르기까지 범용적으로 상용되고 있으나 소음이 심하고 먼지 등의 이물질에 의한 모터의 손상으로 인해 수명이 비교적 짧다.

앞서 언급된 수동적인 방열기술과 능동적인 방열기술의 냉각 및 구동 방법과 장단점 및 연구 개발 동향을 Table 1에 요약 정리하였다.[5]

Yan Lai et al[6]은 자동차에 적용된 LED를 냉각시키기 위해서는 공기와 수동적인 냉각은 LED Junction 온도를 최대온도 이하로 유지시키지 못하거나 실제 적용하기에는 문제점이 있으며, 능동적인 냉각이 보다 적합한 해결책이라 제시했다.

하지만, 본 연구에서는 수동적인 방법으로 히트파이프를 이용한 LED 냉각을 고려하였다.

1.5 연구 동향

우리나라의 산업분야에서 열전달 제어와 관련된 설계기술들은 타 분야에 비하여 비교적 낙후되어 있다. 제조산업 위주의 우리나라 산업체들로서는 여러 가지 열 시스템을 설계하는데 필요한 열전달 제어기술이 취약하여 고부가가치가 있는 장치는 대부분 해외에서 수입하고 있는 실정이다. 외국의 경우 최근 소형화 고집적화로 전자부품들의 발열량이 급격히 증가하면서 미세유로, micro heat pipe를 이용한 전자장치 냉각기술 분야에 많은 기술 개발 투자를 하고 있다. 예를 들어 micro heat pipe의 경우 미국과 일본 등 선진국에서는 이미 설계기술을 확보하여 기업화를 서두르고 있는 분야이지만 국내에서는 설계기술 확보를 위한 이론적이고 체계적인 연구가 미미한 실정이다. 또한, 여러 가지 반도체 제조 공정과 관련된 열유체 계측분야도 취약하여 이에 대한 집중적인 투자가 요구된다.[5

Table 1 Classification of radiant heat techniques, characters and research trend

구분	방열 기술	냉각/구동 방법	장점 단점	연구 개발 동향
Passive cooling	냉각 fin	공기의 자연 대류	경제적 낮은 냉각 성능	한계에 다다른 기술
	Heat pipe	유체의 상변화/중력, 모세관력, 구심력, 정전기력, 삼투압력 등	검증된 기술 소형화 어려움, 고비용	Micro heat pipe 혹은 모세관력을 이용한 micro CPL에 관한 연구 활발
Active cooling	냉각 fan	Fan을 이용한 공기의 강제 대류	보편화된 기술 소음, 먼지, 단수명	한계에 다다른 기술
	열전 냉각	Peltier 효과	소형화 가능 낮은 효율	상용화, 주로 산업체에서 높은 냉각 효율과 소형화를 위한 연구
	초음파 냉각	초음파 가진을 통한 자연대류 증가	- 검증되지 않음, 소음, 진동	일부 연구자들에 의해 수행
	미세 유로 냉각	액체의 강제 대류	높은 냉각 성능, 소형화 가능 구동원 미흡	구동원으로서 micropump에 대한 연구 활발

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

제 2 장 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프 관련 이론

2.1 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프의 구조 및 원리

히트파이프는 증발부, 단열부, 응축부로 구성되어 있으며, 증발부에 열이 가해지면 액체 상태의 작동유체는 증발하여 응축부로 이동한다. 응축부에서는 기체 상태인 작동유체가 응축하여 윅 또는 중력 등의 어떠한 힘에 의해 증발부로 돌아오게 된다. 이렇게 작동유체는 증발, 응축의 상변화 과정을 거치며 순환하게 되고, 열은 증발부로 들어가서 응축부로 빠져나간다. Fig. 12에 도식적으로 이 과정을 나타내었다.[7]

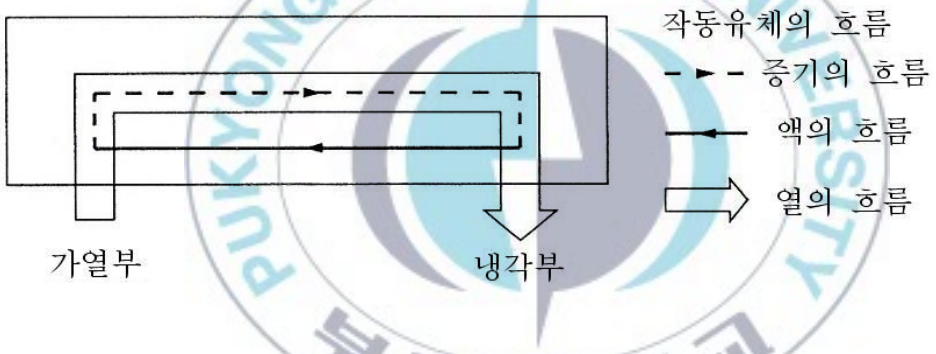

Fig. 12 Heat flow by working fluid

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프의 경우, 베이퍼챔버의 일종으로 히트파이프의 원리와 같다. 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프는 Fig. 13과 같이 챔버와 관이 내부로 연결 되어 있고, 관에는 평판 휜이 달려있다. 챔버의 전면에 LED가 부착되어 열이 가해지면, 그 열로 인해 작동유체는 기체로 상변화하여 관을 따라 이동하게 된다. 그 후 관의 벽면과 접촉하여 응축되고, 응축된 유체는 윅과 중력에 의해 챔버로 회귀하게 된다.

즉, 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프에서 베이퍼챔버는 증발부의 기능을 하고, 관은 응축부의 기능을 한다고 볼 수 있다. 따라서 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프는 위와 같은 과정을 반복하면서 LED의 열을 고내로 방열하게 된다.

Fig. 13 Principle of crevice type vapor chamber

2.1.1 좁은 틈에서의 핵비등

Nishikawa와 Fujita[8]는 대기압에서 증류수는 3 mm또는 그 이상의 틈에서 비등하며, 그들의 직경은 평균 3 mm에서 3.5 mm로 Fig. 14는 전형적인 기포 생성을 보여주고 있다. 수직의 좁은 공간에서의 비등은 그들의 비등양식의 차이에 따라 두 개의 비등영역으로 나누어진다. 하나는 isolated bubble region으로 작은 구모양의 많은 기포들이 가열면에서 생성되어 분리되고, 떠오른다. 다른 하나는 coalesced bubble region으로 적은 빈도지만 규칙적으로 큰 coalesced 기포들이 생성되어 좁은 공간을 채우고, 그 후 분리되어 떠오른다.

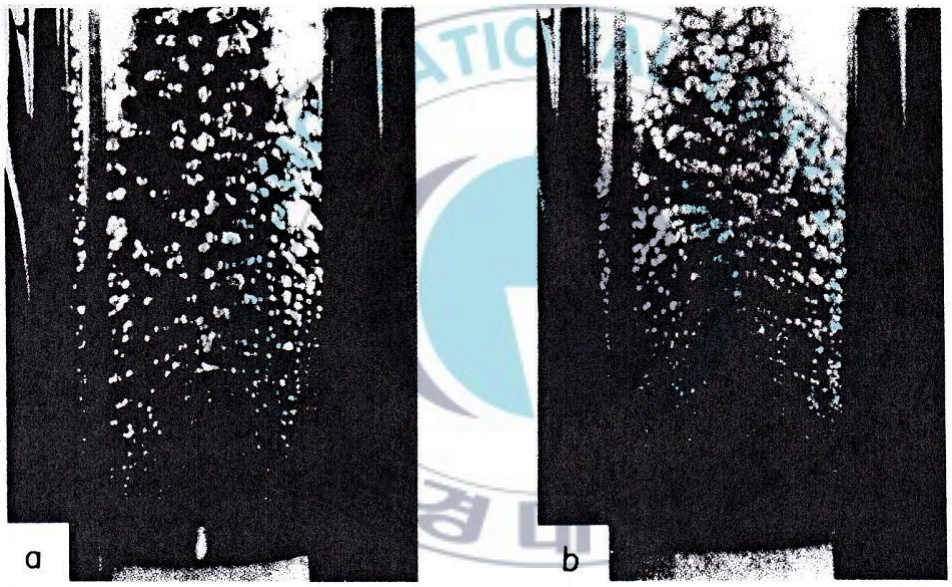

Fig. 14 Boiling behavior in narrow spaces (at atmospheric pressure within an isolated bubble region). (a) Clearance is 5.04 mm, liquid is distilled water, q = 47500 W/m^2, α = 7090 W/m^{2}K, $\triangle$T = 6.70 K. (b) Clearance is 5.04 mm, liquid is 15 ppm sodium oleate aqueous solution, q = 47500 W/m^2, α = 7940 W/m^{2}K, $\triangle$T=5.99 K.

틈이 3 mm보다 더 작아지는 경우에는, isolated 기포는 더 이상 관찰되지 않고, 그 공간은 Fig. 15와 같이 큰 coalesced 기포로 채워지며, 그 행동은 isolated bubble region과는 상이했다. 예를 들어, 틈이 0.97 mm의 경우, 이러한 coalesced 기포들이 그 높이가 30 mm까지 바로 확장하여 순간적으로 전체의 가열면을 덮기도 하였다. 하나의 coalesced 기포가 생성될 때, 기포에 의해 덮혀진 얇은 액막이 관찰되었다.

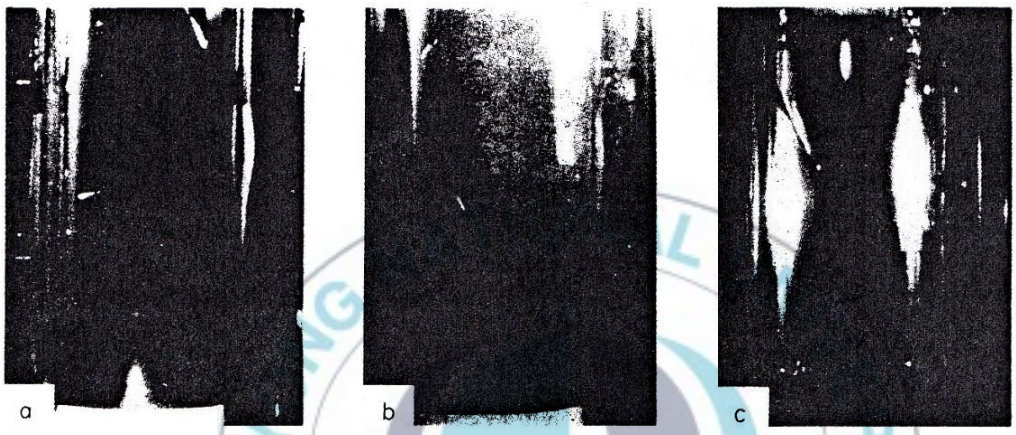

Fig. 15 Boiling behavior in narrow spaces (at atmospheric pressure, within a coalesced bubble region). (a) Clearance is 0.97 mm, liquid is distilled water, q = 2950 W/m^2, α = 2750 W/m^{2}K, $\triangle$T = 1.08 K. (b) Clearance is 0.97 mm, liquid is 15 ppm sodium oleate aqueous solution, q = 2900 W/m^2, α = 2640 W/m^{2}K, $\triangle$T = 1.10 K. (c) Clearance is 1.64 mm, liquid is distilled water, q = 5310 W/m^2, α = 2820 W/m^{2}K, $\triangle$T = 1.89 K.

제작된 챔버의 경사각은 2.2°로 윗부분의 챔버 내부의 가로방향의 길이는 3.03 mm이다. 또한 LED가 부착된 가열면은 직경이 76 mm로 가열면에서는 isolated bubble region이 되고, 챔버 아랫부분은 틈이 isolated와 coalesced의 기준인 3 mm보다 작아지므로 coalesced bubble region이라 볼 수 있다. 하지만 챔버의 재질은 구리, 두께는 1 mm, 챔버 내는 진공 상태로 전열이 빠르게 되기 때문에 전체를 coalesced bubble region이라고 가정했다. Fig. 16에 크레비스형 베이퍼챔버 내부의 전열면을 나타내었다.

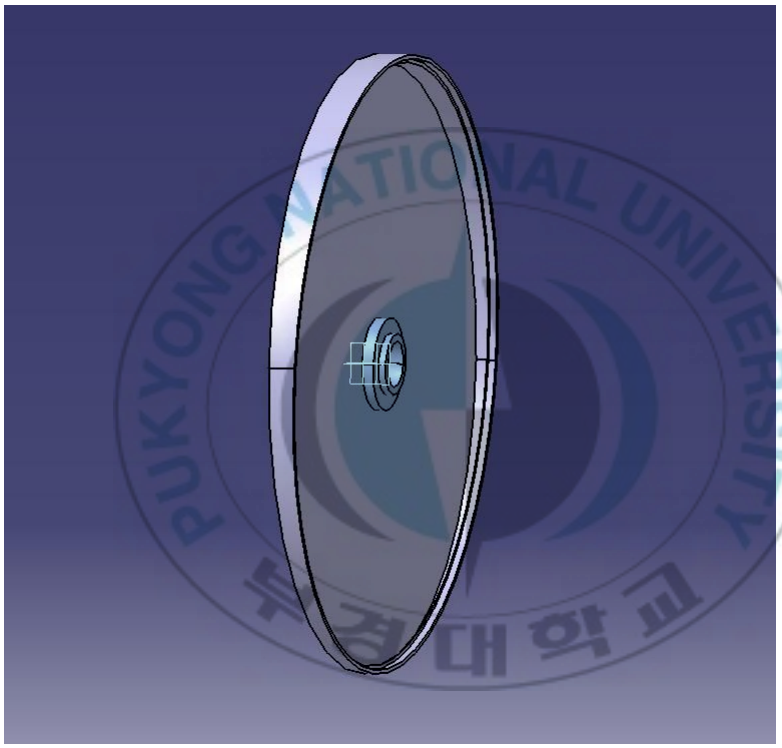

Fig. 16 Schematic of crevice type vapor chamber

$$\alpha \propto q^{2/3} \tag{1}$$

$$q \propto \Delta T^3 \tag{2}$$

식 (1)은 heat flux q에 대한 heat transfer coefficient α의 관계식을 나타낸 것이다. 또한 heat flux q와 온도차 ΔT의 관계식은 공통적으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 Fig. 17을 보면 알 수 있듯이, coalesced bubble region에서의 그래프로 틈이 더 작아질수록 α가 커지는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 18은 coalesced bubble region 과 isolated bubble region에서의 heat transfer coefficient를 나타낸 것으로 isolated bubble region에 비해 coalesced bubble region의 heat transfer coefficient가 현저하게 증가하는 것을 확인할 수 있다. Table 2는 틈과 압력에 대한 heat flux를 나타낸 것이다.

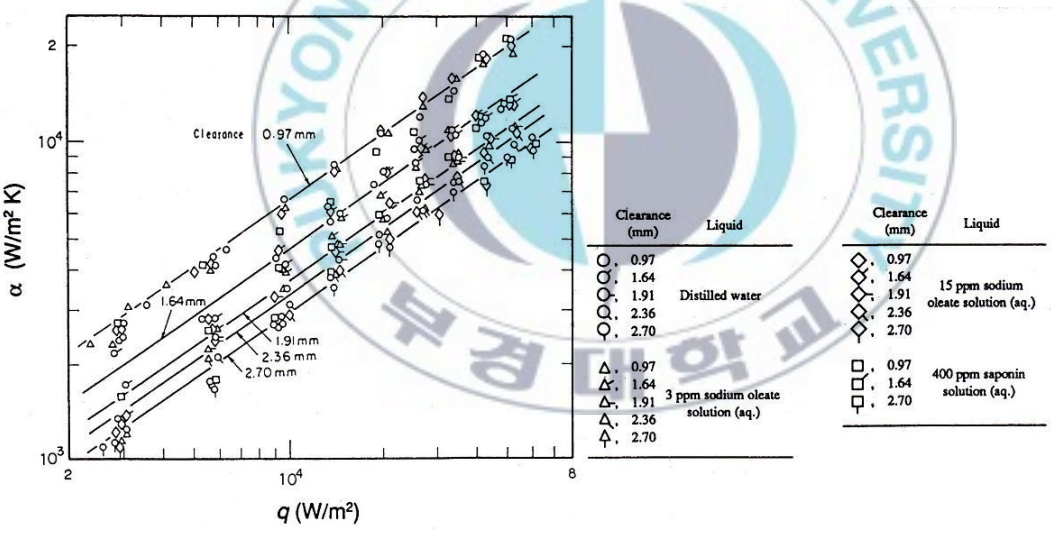

Fig. 17 Relationship among heat transfer coefficient, heat flux, and clearance (in mm), of boiling water, atmospheric pressure, coalesced bubble region)

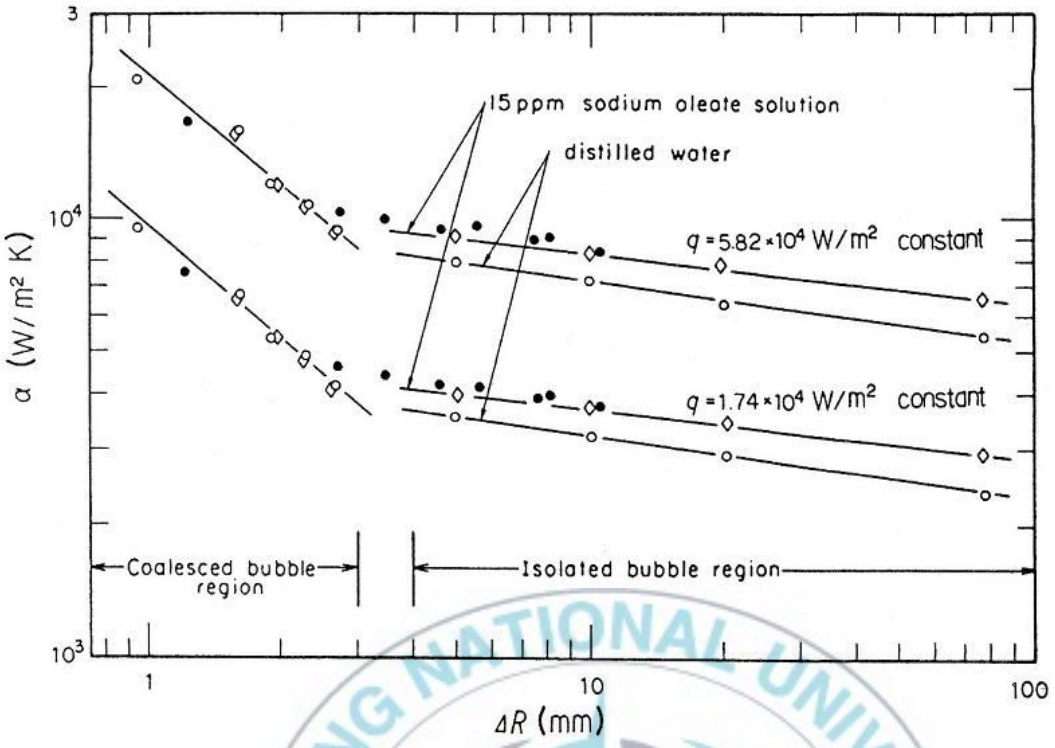

Fig. 18 Variation of heat transfer coefficient due to change in clearance of boiling space (atmospheric pressure, constant heat flux). Data for a vertical copper cylinder with 80 mm diameter and 304 mm height are shown for, distilled water (○) and 15 ppm sodium oleate aqueous solution (◇) (from Ishibashi and Nishikawa). Data for a vertical copper tube with 19.6 mm diameter and 479 mm height and also for a verical steel tube 21.5 mm diameter and 479 mm height are shown for distilled water (●) (from Chernobyl'skii and Tananaiko).

Table 2 Heat flux in relation to different clearances and pressures[a,b]

Pressure	Clearance(mm)						
	0.57	0.97	1.11	1.58	1.64	1.91	1.05
0.1	2870-92575	23675-57800	2840-89120	4490-75620	2790-55240	2790-57570	4690-76580
0.2	4390-74850		6520-89400	4745-76060			4590-70790
0.4	3010-89030		6370-88810	4270-78290			
1.1	4450-92840		11130-73040				

Pressure	Clearance(mm)					
	2.36	2.70	5.04	10.20	20.31	83.5
0.1	7675-58030	2440-66520	10930-58150	11400-65360	10820-65830	14190-57100
0.2						
0.4						
1.1						

[a] Heat flux in units of watts per square meters.

[b] Portion above the solid line for the coalesced bubble region; below the solid line, the isolated bubble region.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

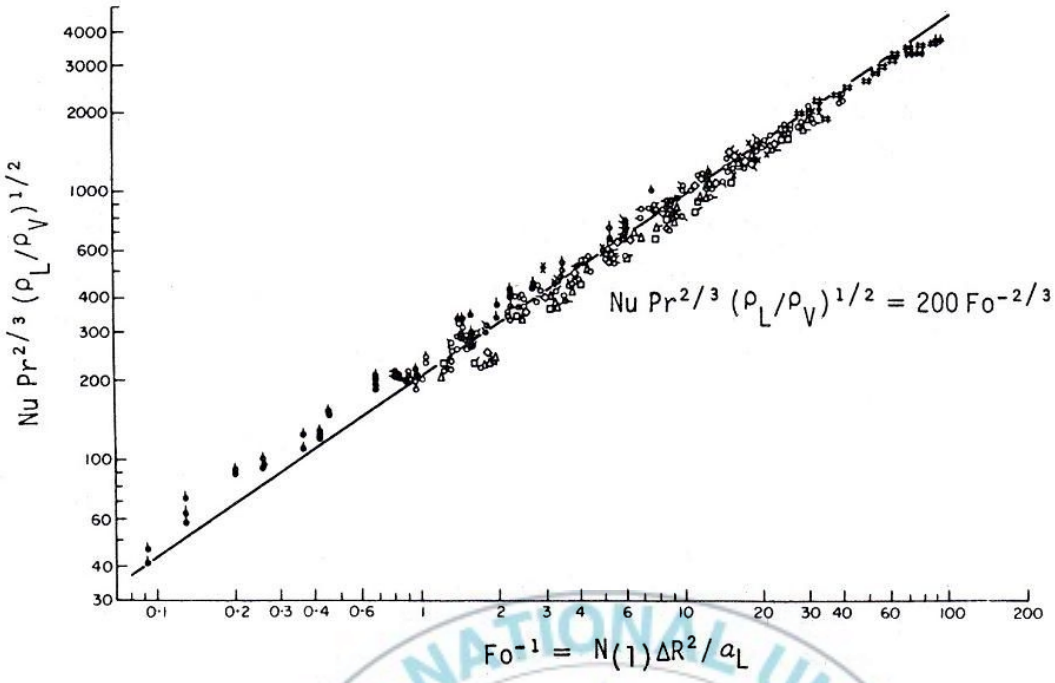

Fig. 19 Generalized relation ship of heat transfer coefficient in the coalesced bubble region by Nu-Fo^{-1} for boiling in narrow space.

coalesced bubble region에서는 다음 무차원수를 따른다.

$$N \equiv \frac{\alpha \triangle R}{\lambda_L}, \quad Fo \equiv \frac{\alpha_L}{N_{(1)} \triangle R^2}, \quad \Pr \equiv \frac{\nu_L}{a_L}, \quad \frac{\rho_L}{\rho_V} \tag{3}$$

모든 실험적인 자료는 Fig. 19의 single line과 상관이 있으며, 다음의 식과 같이 표현 될 수 있다.

$$Nu = 200 Fo^{-2/3} \Pr_L^{-2/3} (\rho_L / \rho_V)^{-1/2} \tag{4}$$

2.2 소결

소결이란 특정물질의 분말을 압축한 것을 녹는점 이하의 온도로 열을 가했을 때, 가루가 녹으면서 서로 밀착하여 고결하는 것으로 소결을 통해 전열면적의 확대와 동시에 공동(空洞, cavity)이 생성되어 핵비등이 더 잘 일어나게 된다. Fig. 20 ~21을 보면 매끈한 표면보다 소결된 쪽의 과열도가 적음에도 불구하고 heat flux가 높은 것을 알 수 있다.

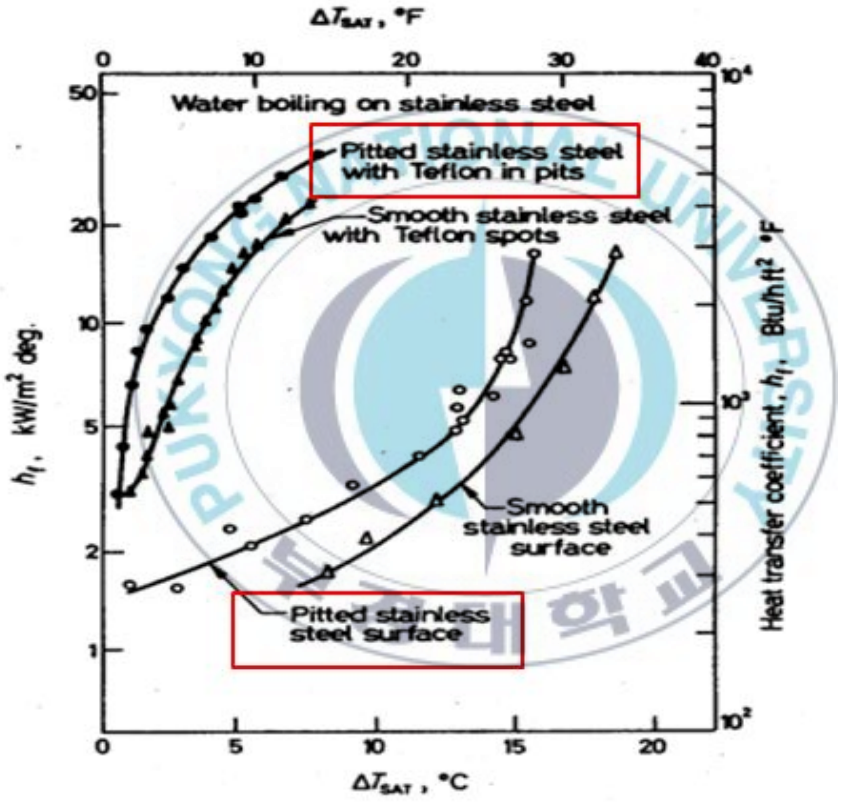

Fig. 20 Enhancement for water boiling at 101 kPa (1 atm) on a stainless steel surface having minute nonwetted spots (30-60 spots/cm^2, 0.25 mm diameter or less)

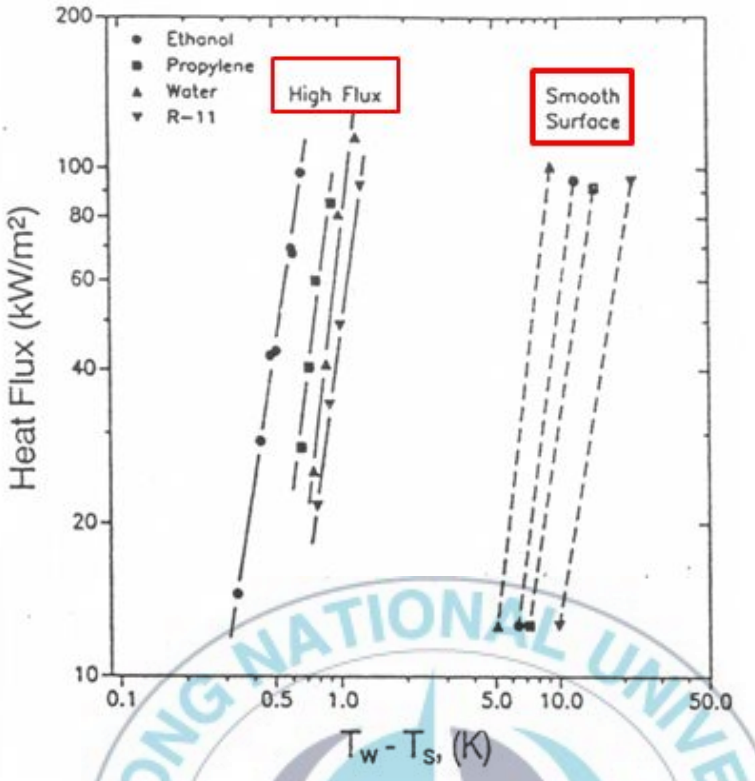

Fig. 21 Enhancement provided by porous High-Flux™ surface for three fluids boiling at 101kPa (1atm), as reported by Gottzmann et al. [1971,1973]

따라서 챔버의 전열면에 분말입자크기가 180~250 ㎛인 청동(Sn 10%, P 0.35%, 나머지 Cu) 파우더를 소결하였다. 공정은 다음과 같다.

공정 : 분말혼합 → 분말분산코팅 → 소결 → 완성

1) 분말혼합 : 분말과 바인더의 결합.

2) 분말분산코팅 : 코팅하고자하는 면에 바인더를 흡착 후 분말을 분산시키는 공정.

3) 소결조건 : 800℃에서 30분간 유지 후 냉각.

Fig. 22 The picture of sinter on heating surface

Fig. 22는 소결한 상태의 챔버 전열면이다. 소결 전의 챔버 체적은 6.635cc로 작기 때문에, 소결로 인한 체적의 감소가 불가피할 것이라 사려된다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

2.3 작동유체의 선정

히트파이프의 근본적인 작동 요소가 작동유체의 증발과 응축이기 때문에 적절한 작동유체의 선정은 히트파이프의 설계 및 제조에 있어 가장 중요한 요소이다. 작동유체의 선정 시 고려해야 될 사항에는 작동온도 범위, 증기압, 증발잠열 및 점성 계수 등과 같은 작동유체의 열·물리적 물성과 관 재료와의 친화성, 안정성 및 독성 등이 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 결정된다.

Table 3은 작동 온도에 따른 대표적인 작동 유체의 종류를 극저온용(0 ~ 200 K), 저온용(200 ~ 550 K), 중온용(550 ~ 750 K), 고온용(750 ~ 3000 K)으로 분류하였고, 임계점의 온도와 압력을 나타내었다. 극저온용으로는 헬륨, 아르곤등이 대표적인 작동유체이며, 저온용으로는 물과 프레온계 냉매를 비롯한 많은 종류의 작동유체가 있다. 또한, 고온용으로는 나트륨, 칼륨, 리튬 등과 같은 액체금속이 사용된다[9]. 하지만 이러한 온도 범위는 매우 넓기 때문에 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서 이러한 작동 온도에 따른 열수송 성능에 미치는 작동유체 열물성의 영향을 알 필요가 있다. 그러므로 히트파이프의 정확한 설계를 위해, 작동 유체의 열물성을 통해서 열수송 성능을 예측할 수 있는 평가지수인 Merit number[10]를 이용하며, 일반적으로 Merit number의 값이 클수록 열수송 성능이 우수하다고 알려져 있다. 히트 파이프의 경우는 식 (5)과 같으며,

$$M_h = \frac{\rho_f \sigma_f h_{fg}}{\mu_f} \qquad (5)$$

써모사이폰의 경우는 식 (6)과 같다.

$$M_t = \left[\frac{(k_f)^3 (\rho_f)^3 h_{fg}}{\mu_f} \right]^{0.25} \quad (6)$$

여기서, ρ_f, σ_f, μ_f, k_f 및 h_{fg}는 각각 작동유체의 밀도, 표면장력, 점성계수, 열전도율 및 증발잠열이다. 상관식에 나타난 바와 같이 작동유체의 열전도율, 밀도, 표면장력 및 증발잠열이 클수록, 점성계수가 작을수록 열역학적 특성이 우수하다. Fig. 23 ~ 24는 작동온도(240 ~ 360 K)에서 윅형 히트 파이프와 써모사이폰에 사용되는 대표적인 작동 유체의 평가 지수를 나타낸 것이다.

2.3.1 증류수

기존의 Merit number는 윅형 히트 파이프나 써모사이폰의 경우에 적용이 가능하도록 각각 제시되어 있으며 PHP에 적용할 수 있는 기준이 아직까지는 명확하게 정립되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 저온용(150 ~ 750 K)으로 사용되는 작동 유체 중에서 Merit number가 크고, 시험부의 재료인 구리에 화학적으로 반응하지 않는 증류수로 선정했다. M_h와 M_t가 높은 R-22냉매는 구리에 화학적 반응을 보이진 않지만 CFC계열 냉매로 인한 오존파괴지수(ODP) 및 지구온난화지수(GWP)가 높음에 따라 최근 환경에 무해한 작동유체를 선정하게 되었다.

Table 3 Working fluids and temperature ranges

Logarithmic Temp. Scale	Working Fluids	Melting & Boiling Point, K at 1 atm	Critical Point, K & MPa(abs)	Useful Ranges, K
Cryogenic Temperature (0~200 K)	Helium	1.0 & 4.21	5.2 & 0.227	2 ~ 4
	Hydrogen	13.8 & 20.38	33.19 & 1.315	14 ~ 31
	Neon	24.4 & 27.09	44.5 & 0.018	27 ~ 37
	Nitrogen	63.1 & 77.35	126.19 & 3.397	73 ~ 103
	Argon	83.9 & 87.29	150.66 & 4.860	84 ~ 116
	Oxygen	54.7 & 90.18	154.58 & 5.043	73 ~ 119
	Methane	90.6 & 111.4	190.55 & 4.595	91 ~ 150
	Ethane	89.9 & 184.6	305.53 & 4.871	150 ~ 240
Low Temperature (200~550 K)	R-11	162 & 297	470.96 & 4.407	233 ~ 393
	R-22	113.1 & 232.2	369.17 & 4.990	193 ~ 297
	R-134a	169.70 & 246.3	374.03 & 4.056	213 ~ 300
	R-141b	253↓ & 302.0	423.0↑ & 1.81↑	253 ~ 420
	R-142b	223↓ & 263.3	398.0↑ & 3.37↑	223 ~ 373
	R-290	123↓ & 231.1	369.70 & 4.248	200 ~ 330
	Ammonia	195.5 & 239.9	402.22 & 11.333	213 ~ 373
	Ethanol	158.7 & 351.5	513.9 & 6.14	273 ~ 403
	Methonol	175.1 & 337.8	512.6 & 8.09	283 ~ 403
	Acetone	180.0 & 329.4	508.1 & 4.70	273 ~ 393
	Water	273.1 & 373.1	646.99 & 22.064	323 ~ 473
	Toluene	178.1 & 383.7	591.8 & 4.10	323 ~ 473
	Naph thalene	353.4 & 490	748.4 & 4.05	408 ~ 478
Medium Temperature (550~750 K)	Dowtherm	285.1 & 527.0	-	423 ~ 668
	Mercury	234.2 & 630.1	-	523 ~ 923
	Sulphur	385.9 & 717.8	-	530 ~ 947
High Temperature (750~3000 K)	Cesium	301.6 & 943.0	-	723 ~ 1173
	Sodium	371.0 & 1151	-	873 ~ 1473
	Lithium	453.7 & 1615	-	1273 ~ 2073
	Calcium	1112 & 1762	-	1400 ~ 2100
	Lead	600.6 & 2013	-	1670 ~ 2200
	Silver	1234 & 2485	-	2073 ~ 2573

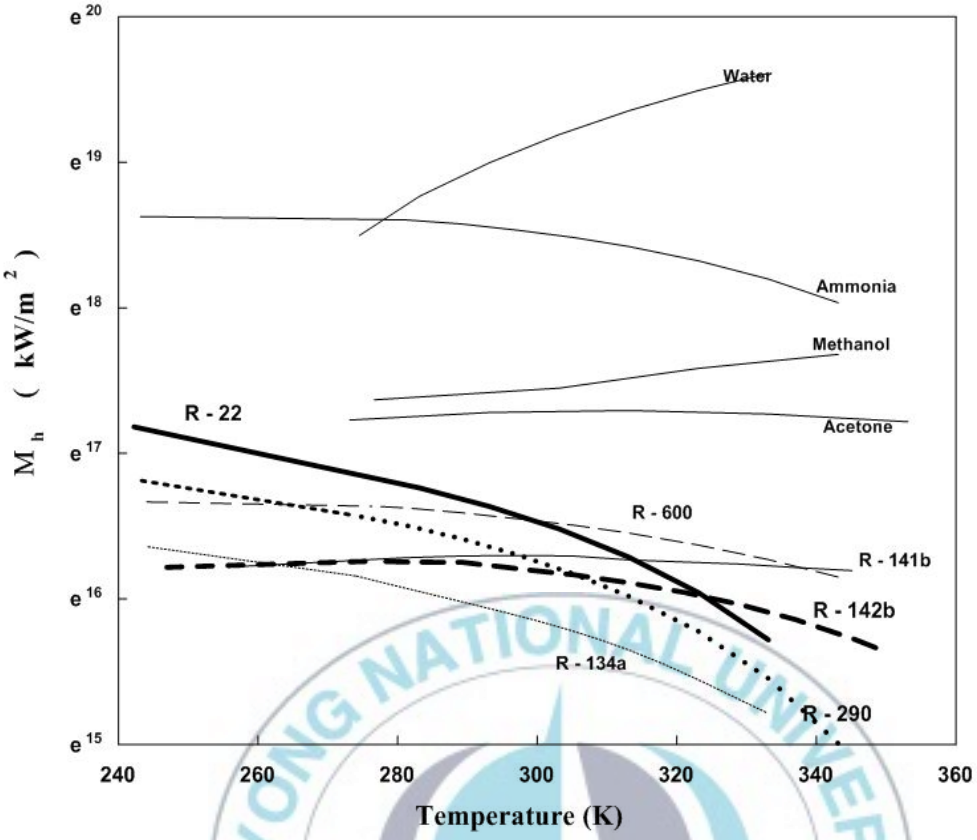

Fig. 23 Merit number of selected working fluids for heat pipe

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

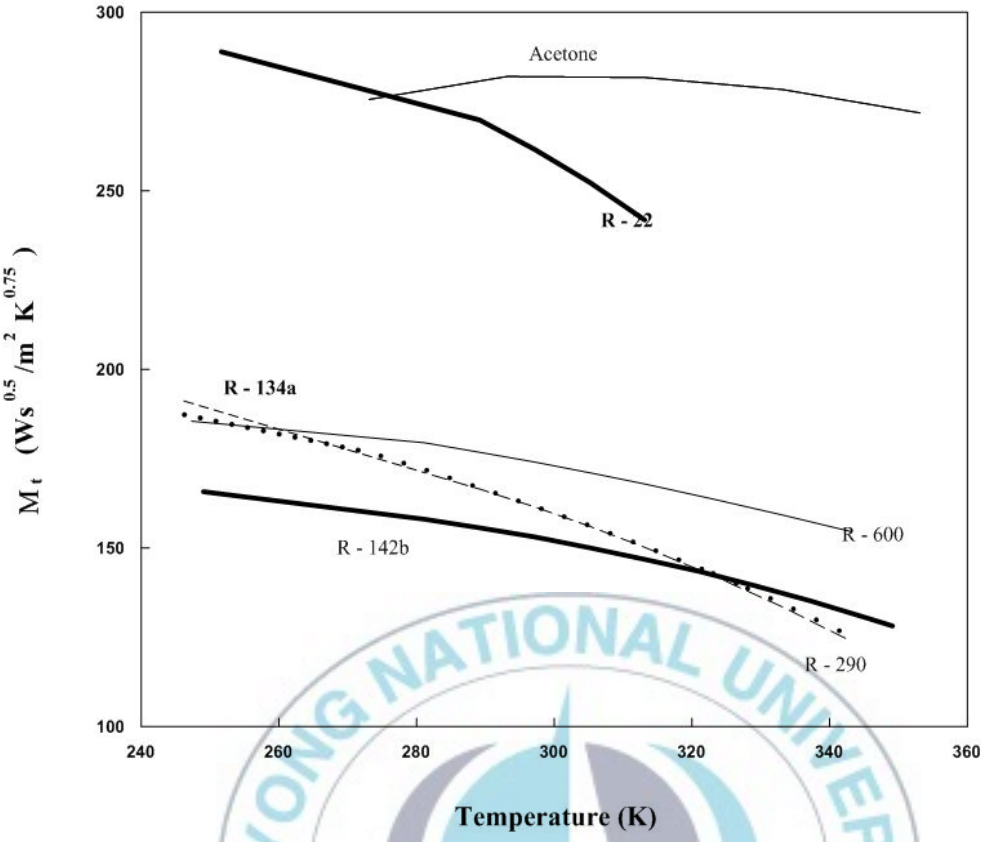

Fig. 24 Merit number of selected working fluids for thermosyphon

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

Table 4 Generalized results of experimental compatibility tests

Working Fluids	Compatible Material	Incompatible Material
Water	Stainless steel, Copper, Monel, Silica, Nickel, Titanium,	Aluminum, Inconel
Ammonia	Aluminum, Carbon steel, Stainless steel, Iron, Nickel,	Copper
Methanol	Stainless steel, Iron, Copper, Silica, Nickel, Brass	Aluminum
Acetone	Stainless steel, Aluminum, Copper, Brass, Silica, Nickel	
R-11	Aluminum	
R-21	Aluminum, Iron	
R-22	Aluminum, Copper	
R-134a	Aluminum, Copper	
Heptane	Aluminum	
Dowtherm	Stainless steel, Copper, Silica	
Lithium	Tungsten, Tantalum, Molybdenum, Niobium	Stainless steel, Nickel, Inconel, Titanium
Sodium	Stainless steel, Nickel, Inconel, Niobium	Titanium
Cesium	Titanium, Niobium	
Mercury	Stainless steel	Molybdenum, Nickel, Inconel, Tantalum, Titanium, Niobium
Lead	Tantalum, Tungsten	Stainless steel, Nickel, Inconel, Titanium, Niobium
Silver	Tantalum, Tungsten	Rhenium

2.3.2 나노유체

나노유체(nanofluids)란 일반 유체에 나노입자 또는 나노튜브와 같은 나노 크기의 섬유들을 분산, 부유 시켜서 만든 유체로, Fig. 25은 최근 몇 년 동안 미국, 유럽연합, 중국, 최근에는 인도와 한국에서의 나노유체 연구의 급격한 성장을 나타내고 있다. 나노유체의 열전달 적용에 대한 잠재적인 시장은 매년 2백만 달러를 넘는 것으로 추정되고, 이후 5~10년 동안 더 많은 성장을 할 것으로 기대된다.[11]

이러한 추세를 보이는 이유는 단순히 열전도도를 비교한 Fig. 26만 보더라도 이해할 수 있다. 다음과 같이 열전도율을 비교했을 때, 물은 0.6 W/m K로 낮지만, 그에 반해 금속산화물은 비교적 높은 열전도율 값을 나타내는 것을 확인할 수 있다.[11] 그리고, Fig. 27 ~ 29는 물과 알루미나 나노유체의 OHP 차징량에 따른 열저항을 나타낸 것이다. 열저항은 알루미나 나노유체와 증류수를 비교 했을 때 눈에 띄게 감소했으며, 알루미나 입자의 첨가로 OHP의 열수송 능력이 향상 되었다. 또한 열저항은 차징량에 따라 크게 변하며, 차징량이 작을 때 열저항이 작았다. 그리고 열저항은 나노유체의 최적비가 0%에서 0.9%로 증가함에 따라 감소하였고, 그 후 다시 증가하였다. 따라서 0.9%가 최적의 체적비라 할 수 있으며, 이때 열저항이 가장 작고, 열전달 성능이 좋았다. 최적비인 0.9%일 때 증류수와 비교하면 열저항의 가장 큰 감소는 약 0.14 ℃/W(32.5%)로, 입력전원이 58.8 W, 70 $\%_{vol.}$ 차징율의 경우였다. 따라서 기존 유체에 대한 알루미나 입자의 첨가는 OHP의 열성능을 향상시켰다.[12] 또한, S.M. Peyghambarzasdeh et al.[13]이 알루미나 나노유체와 증류수를 작동유체로 자동차 radiator에 차징하여 실험한 결과, 알루미나 나노유체는 열전달률을 상승시킬수 있고, 열전달향상은 나노입자의 함유량에 달려있으며, 나노유체가 1 $\%_{vol.}$일 때, 증류수에 비해 열전달이 45% 향상되었다.

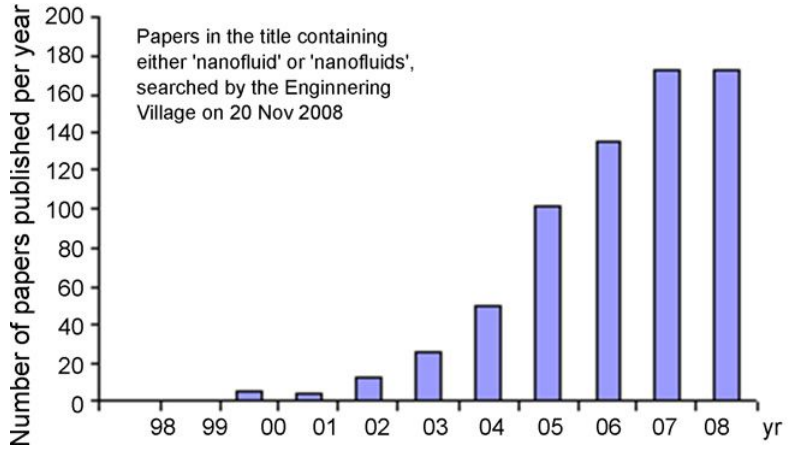

Fig. 25 Growth of publications by the nanofluids community

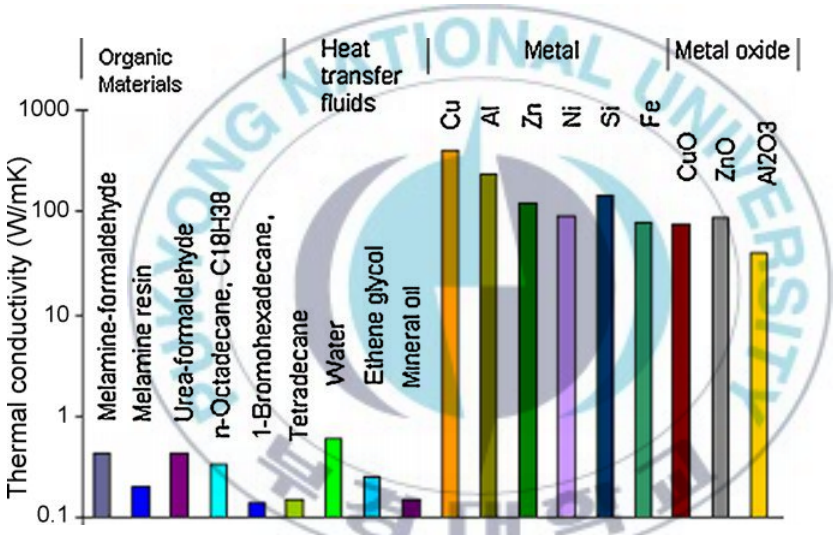

Fig. 26 Comparison of the thermal conductivity of common liquids, polymers and solids

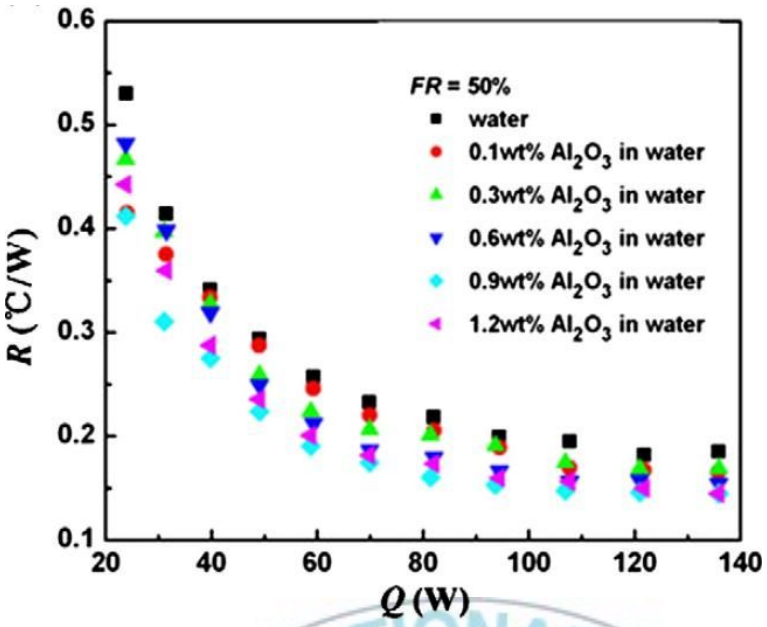

Fig. 27 The profile of the thermal resistance of charging ratio 50 %vol.

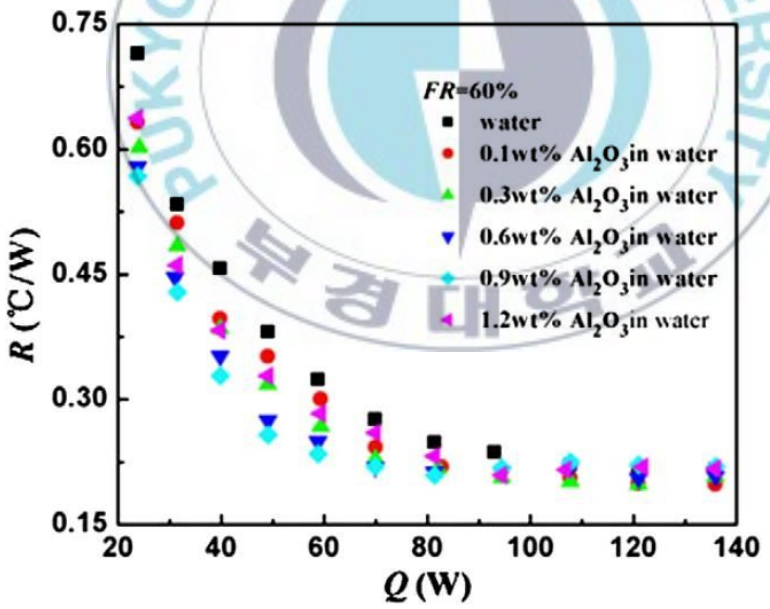

Fig. 28 The profile of the thermal resistance of charging ratio 60 %vol.

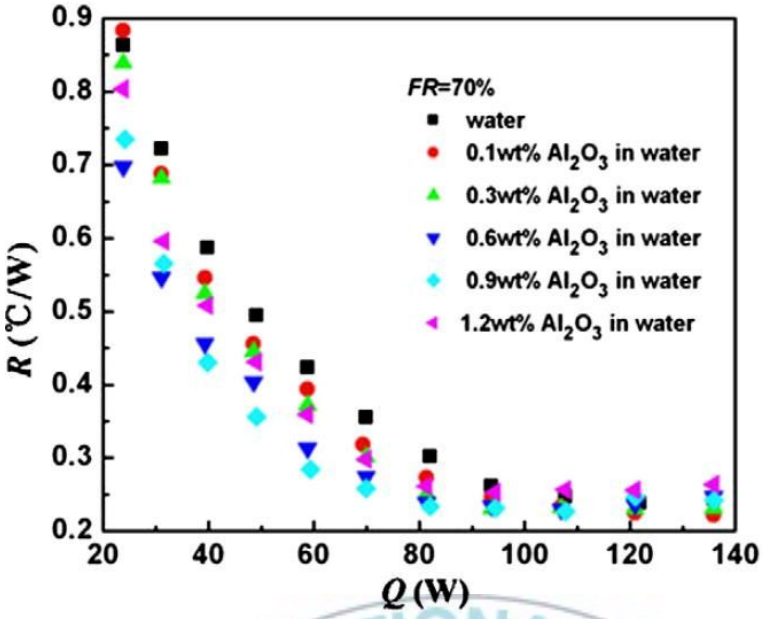

Fig. 29 The profile of the thermal resistance of charging ratio 70 $\%_{vol.}$

Sameer Khandekar et al.[14]은 문헌에 보고된 나노유체의 증가된 열전도도는 비록 단상에서의 열전달을 증가시킨다고 하더라도, 핵비등 열전달 계수에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 나노유체의 비등특성은 나노입자와 핵이 생기는 곳에서의 상호작용에 의한 영향이 더 크다고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 Table 6에 나타난 것처럼 정량의 증류수와 알루미나 입자를 유리막대로 최대한 섞은 다음, Fig. 30에 나타난 Probe형의 쏘니케이터를 이용하여 10분 동안 초음파에너지를 가하는 Two step method로 알루미나 나노유체를 제작하였다. 제작 시 발열을 고려하여 3초 쏘닉, 1초 휴식 하는 방법으로 진행하였다. 알루미나는 다른 입자들보다 경제적이며, 시험부와의 화학적인 반응이 없을 뿐만 아니라, 물에 잘 분산되어 제작이 쉬웠다.

Table 5 Production of Al_2O_3

	Distilled water	Al_2O_3	Al_2O_3-water
$\%_{vol.}$	99.0	1.0	
Temperature(℃)	21	21	
wt%	96.485	3.515	
density (kg/m^3)	998.183	3600	1024.201

Fig. 30 The picture of Al_2O_3 production

제 3 장 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

Fig. 31은 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프의 열적 특성을 알아보기 위한 실험 장치도이다. 장치는 크게 시험부, 전원입력부, 계측부, 데이터 처리부로 구성된다.

먼저, 시험부에는 차량용 헤드램프 하나에 상응하는 40 W급에 상응하는 발열을 위해, 서울반도체의 고출력 10 W LED로 4개를 병렬 연결하여 사용하였으며, Table 7에 그 제원을 나타내었다. LED는 정전류 방식의 LED 드라이버(LED-2000)에 연결되고, LED 드라이버는 스위칭모드 전원 공급장치(Switching Mode Power Supply)에 연결되어 전원을 공급받았다. 또한 크레비스형 베이퍼챔버의 제원은 Table 8에 나타내었다. 베이퍼챔버의 재질은 구리이며 증발부측의 크기는 0.08×0.08×0.00503 m^3으로 챔버내 체적은 0.000006635 m^3(6.635 cc)이다. 베이퍼챔버의 용기의 두께는 물의 작동 온도 조건과 압력에 대한 동의 허용응력 t값을 구하여 그를 충족시키는 1 mm로 설계하였고, 응축부 형상의 총 전열면적은 0.045 m^2이다. 그에 대한 도면을 Fig. 32에 나타내었다. 전원입력부에는 일정한 전력량을 공급하기 위한 전압조정기(Variable AC Autotransformer)와, 그 양을 측정하는 Digital Power Meter(Protronix. co.)를 연결하여 고내가 실험조건이 되도록 열량을 공급하였다. 계측부는 T-type의 열전대를 각각 1개씩 부착해 측정하였으며, 측정된 데이터는 YOKOGAWA사의 DR600-00-1F를 통해 2초 간격으로 노트북에 실시간 저장되었다.

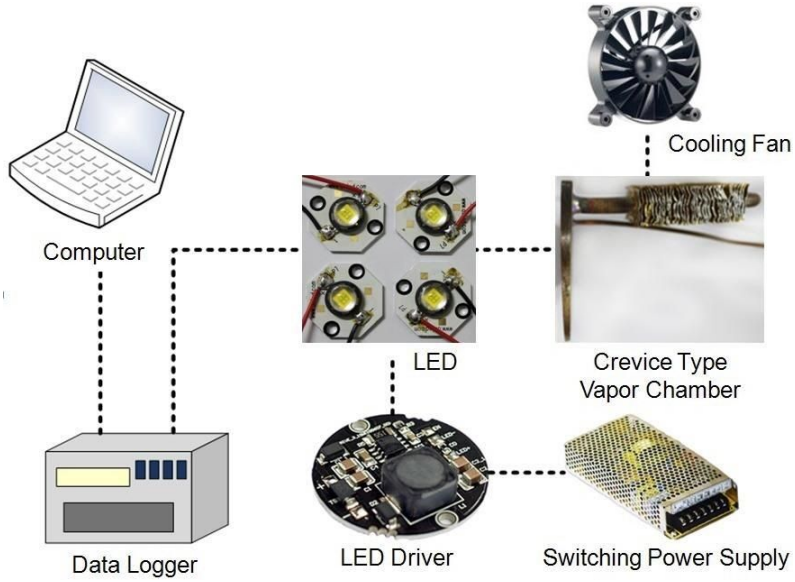

Fig. 31 Schematic diagram of experimental apparatus for crevice type vapor chamber

Table 6 Characteristic of LED

Parameter	Value(Max.)
Forward Current	2.8 A
Power Dissipation	11.8 W
Junction Temperature	140℃
Operating Temperature	-40 ~ +85℃
Storage Temperature	-40 ~ +100℃

Table 7 Specification of crevice type vapor chamber

Specification		Crevice type vapor chamber heat pipe
Material		Copper
Evaporator	Chamber size	0.08×0.08×0.00503 m^3
	Vapor chamber volume	6.635 cc
Condenser	Tube length	0.0092 m
	Tube(O.D.)	0.0072 m
	Tube(I.D.)	0.0068 m
	Fin surface area	0.045 m^2

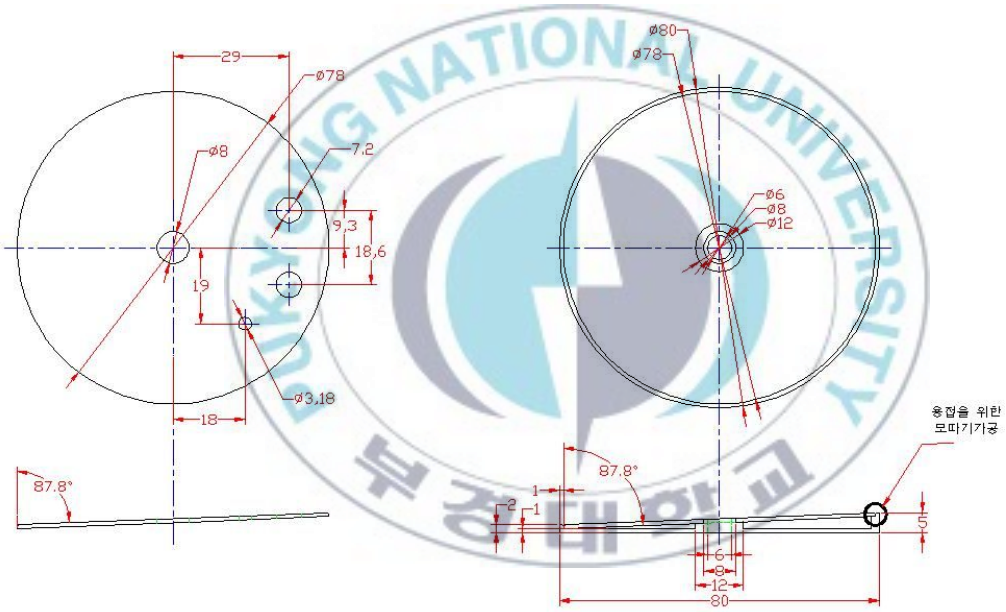

Fig. 32 Schematic diagram of the crevice type vapor chamber

3.2 실험 방법

본 연구에서는 베이퍼챔버에 작동유체를 봉입하기 위해서 제작된 크레비스형 베이퍼챔버 내부를 로터리펌프와 확산펌프로 구성된 Fig. 34의 고진공 시스템으로 2.67×10^{-3} Pa(2.0×10^{-5} torr)까지 진공시키고 2시간 정도 유지하였다. 그 후 작동유체를 냉매충전실린더를 이용해 챔버에 봉입하였다. 베이퍼챔버의 체적이 0.000001 m^3(10 cc)미만으로 소량이기 때문에 정확한 충전을 위하여 Taiatsu사의 HPG-10을 사용하였다. Fig. 33 ~ 34에 고진공 펌프와 충전실린더를 나타내었다.

Fig. 33 High vacuum pump system

Fig. 34 HPG-10

그 후 선정된 4개의 LED를 베이퍼챔버의 전면에 부착하고, 응축부에 소형 팬을 달아 강제대류 상태에서 실험하였다. 수직형 챔버이기 때문에 LED칩(상, 하), PCB(상, 하), 베이퍼챔버(전면의 상, 중, 하, 뒷면), 관 입구와 끝, 휜, 휜의 입·출구, 외기의 온도를 측정하기 위해 각 측정점에 열전대를 부착하고, LED 칩과 PCB가 고내에 노출되지 않게 밀폐하고자 하였으며, 그 후 고내온도가 설정된 온도에서의 정상상태에 도달했을 때부터 시작하여 30분 동안 온도를 측정하였다. Table 10에 실험조건을 자세히 나타내었으며 본 연구에서는 크게 3종류의 실험을 진행하였다. Test 1에서는 크레비스형 베이퍼챔버의 최적 차징량을 찾기 위해 작동유체로 선정된 증류수를 이용하여 챔버 체적의 40, 45, 55, 75, 100 $\%_{vol.}$을 차징하여 실험을 진행하였다. 그 후 챔버의 전열면에 소결이 된 베이퍼챔버에 최적 차징량의 증류수를 봉입하여 진행한 실험이 Test 2이다. 그 중 최적의 차징량과 같은 양의 1%의 알루미나를 차징하여 진행한 실험이 Test 3이다. Fig. 35는 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프를 차량용 전조등에 장착한 사진이다.

Table 8 Test conditions

Test	1	2	3
Working Fluid	Distilled Water		Al_2O_3
Input amount of heat(W)	40		
charging ratio($\%_{vol.}$)	40, 45, 55, 75, 100	20, 30, 40, 55	55
Room condition(℃)	55±2		
Relative humidity(%)	13.7		
Forced Convection(m/s)	5.5		

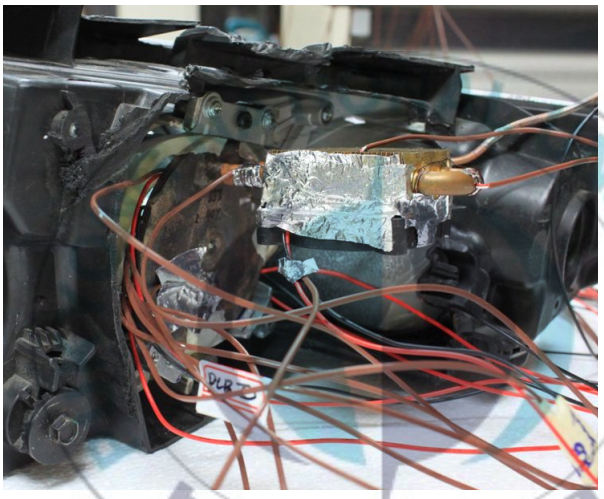

Fig. 35 Photograph of installation

3.3 LED 전조등에서의 열적 모델링

열 모델링의 목적은 접합 온도(T_J)를 예측하는 것이다. “접합”이란 용어는 반도체 다이의 P-N 접합을 의미한다. 열관리 설계에서 사용되는 기본적인 수학 도구 중 하나는 열저항(R_θ)이다. 열 저항은 해당 전력 소산에 대한 온도차의 비율로 정의 된다. R_θ전체 열저항($R_{\theta J-A}$)은 접합에서부터 주변에 이르는 열 경로의 개별 열 저항의 합으로 나타낼 수 있다. 열 경로의 각 저항에 해당하는 구성요소는 Fig. 36에 표시되어 있다. 각 저항의 실제 구성요소는 각각의 온도 노드 사이에 위치한다.[8]

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교

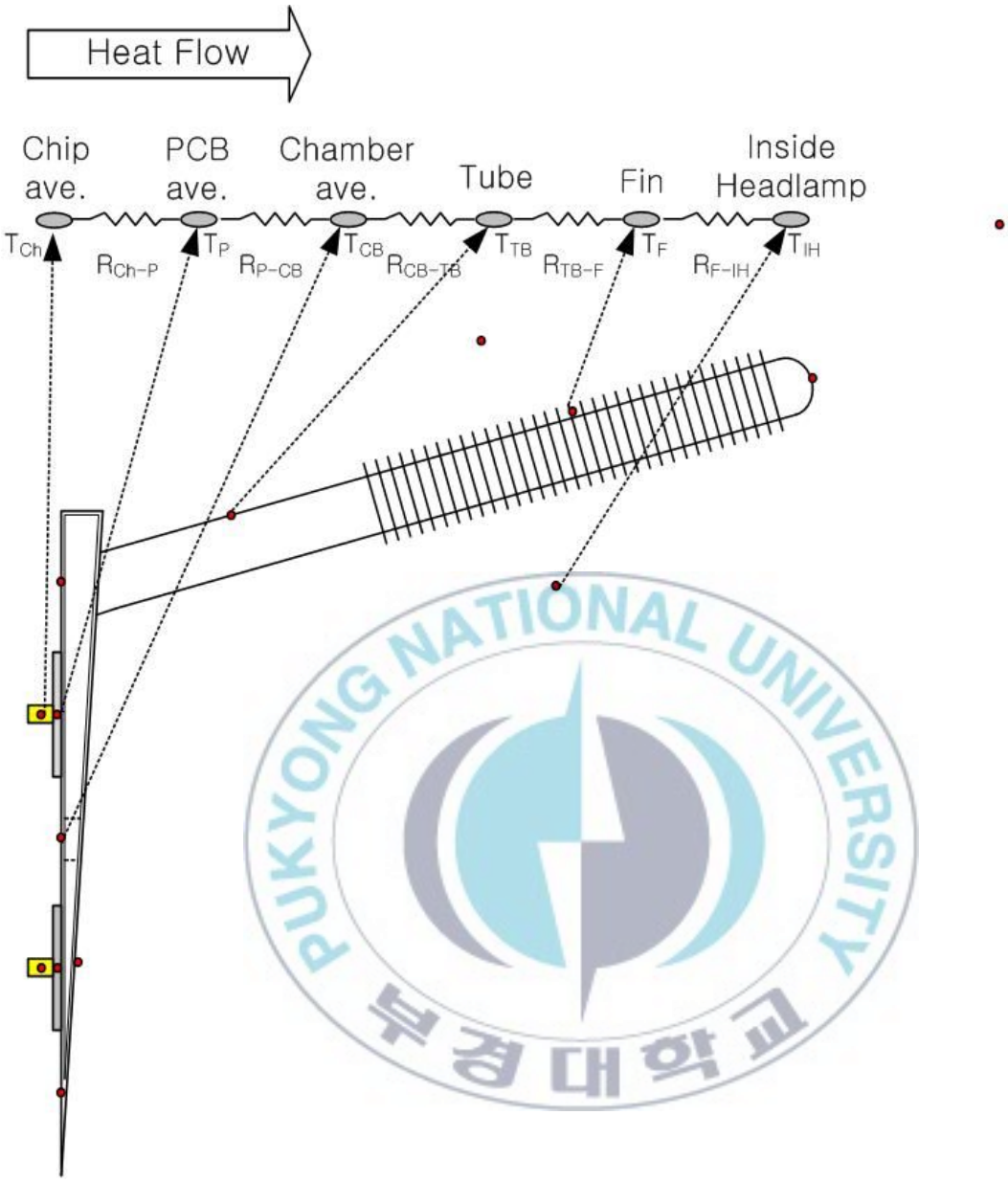

Fig. 36 A series circuit of crevice type vapor chamber heat pipe system thermal resistance

3.4 LED에서의 열저항

일반적으로 Fig. 37에서처럼 어떤 시스템이 열적 평형에 도달한 상태에서, 두 개의 등온면 A_1, A_2 사이에 발생하는 열전달량 q는

$$q = \frac{T}{R_\theta} = \frac{T_1 - T_2}{R_\theta} \tag{7}$$

로 표시된다. 이 때 T_1은 A_1의 온도, T_2는 A_2의 온도이며, 열전달량은 A_1에서 A_2로 흐르는 시간당 열량(에너지)을 의미한다.

인가된 전기에너지는 LED의 P-N접합에서 극히 일부 및 에너지로 변환되고, 대부분의 에너지는 접합에서 발생하는 열 에너지로 변환된다. 따라서 접합에서 발생되는 시간당 열에너지는 Q_E는 인가되는 시간당 전기에너지(전력)와 같다고 가정할 수 있다.

$$Q_E = I_F \times V_F \quad (W) \tag{8}$$

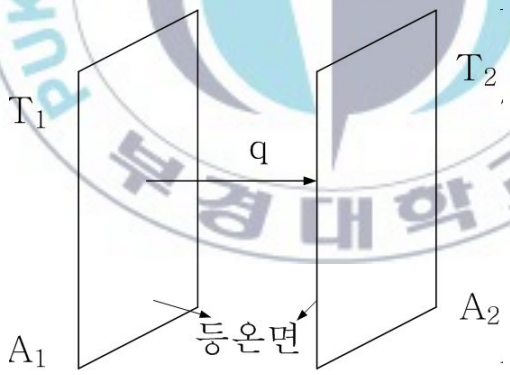

Fig. 37 Heat transmission amount generated between two isothermal surfaces

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

접합에서 발생되는 열에너지는 대부분 Cathode쪽 Lead Frame으로 전도에 의해 외부로 전달된다. Fig. 38은 계가 열적 평형에 도달했을 때의 모델이다. 여기서 A1은 Junction을 감싸고 있는 가상의 등온면이고, A2는 Model 바로 아래쪽의 Cathode Lead Frame을 포함하는 등온면, 그리고 A3는 전체 LED를 감싸고 있는 등온면이다. 이 때 각각의 등온면의 온도를 T_J, T_P, T_A라 하고, 각 등온면 사이의 열저항을 $R\Theta_{J-P}$, $R\Theta_{P-A}$라 하면 열적 평형상태에서 다음식이 성립한다.

$$Q_{J-P} = \frac{T_J - T_P}{R\theta_{J-P}} \tag{9}$$

$$Q_{P-A} = \frac{T_P - T_A}{R\theta_{P-A}} \tag{10}$$

$$Q_E = Q_{J-P} = Q_{P-A} \tag{11}$$

즉, Junction에서 전기에너지 소모에 의해 발생한 시간당 열에너지는 Junction과 Pin 사이에 발생하는 온도차에 의해 생기는 열전달량과 같고 다시 이것은 Pin과 주위(ambient) 사이의 온도차에 의해 발생하는 열전달량과 같게 된다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

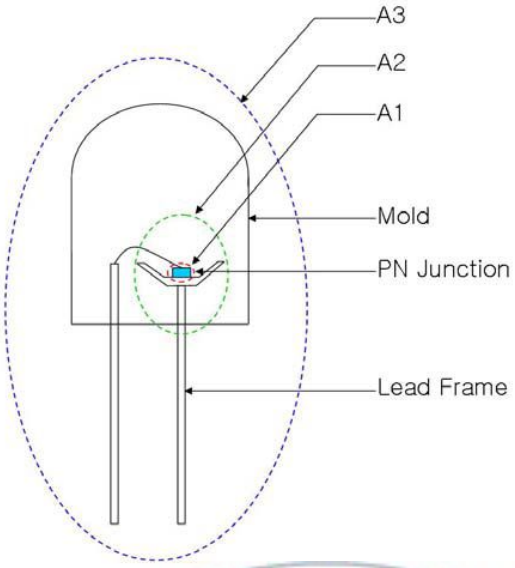

Fig. 38 LED model for heat measurement

3.4.1 열접촉저항

두 개의 표면이 서로 압착될 때 뾰족한 끝은 물체와 적절한 접촉을 하지만 골은 공기로 채워진 공극(void)을 형성할 것이다. 이 결과로 접촉면은 공기의 작은 열전도도로 인해 단열 작용을 하는 여러 크기의 많은 공극을 가진다. 그러므로 접촉면은 열전달에 약간의 열저항을 제공하고 이러한 접촉면의 단위면적당 열저항을 열접촉저항(thermal contact resistance) R_C라 부른다. 열접촉저항은 Newton의 냉각법칙과 유사한 방법으로 식 (12)과 같이 표시된다.

$$\dot{Q} = h_c A \Delta T_{\text{interface}} \tag{12}$$

여기서 A는 접촉면 면적이고 $\Delta T_{interface}$는 접촉면에서의 유효온도차이다. 대류열전달계수에 대응하는 h_c는 열접촉 컨덕턴스(thermal contact conductance)라 부르고 식 (13)과 같이 표현한다.

$$h_c = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \triangle T_{interface}} (W/m^2 \cdot ℃) \tag{13}$$

이것은 열접촉저항과 다음과 같은 관계가 있다.

$$R_c = \frac{1}{h_c} = \frac{A \cdot \triangle T_{interface}}{\dot{Q}} (m^2 \cdot ℃ / W) \tag{14}$$

즉, 열접촉저항은 열접촉컨덕턴스의 역수이다. 대체로 열접촉컨덕턴스는 문헌에서 보고되고 있으나, 열접촉저항의 개념은 열전달에 있어서 접촉면의 영향을 설명하는데 더 좋은 수단으로 제공된다. 열접촉저항은 접촉면에서의 온도강하 측정치를 정상상태하에서의 열유동으로 나눔으로써 식 (14)과 같이 구해질 수 있다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 LED 전조등 냉각 시스템의 온도 분포

다음의 결과는 자동차가 주행 중인 상황을 고려하여 진행한 실험으로 엔진의 열로 인한 55±2℃의 열악한 조건에서의 전조등 내에서 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프의 온도분포를 나타낸 것이다. 먼저, 최적 차징량을 찾기 위한 실험의 결과는 Fig. 39 ~ 43에 나타내었다. 두 번째 실험인 소결한 챔버에 20, 30, 40, 55 $\%_{vol.}$ 의 실험 결과는 Fig. 44 ~ 47에 나타내었다. 세 번째 실험으로 체적비 1%의 알루미나 수용액을 챔버 체적의 55 $\%_{vol.}$를 차징하여 실험한 결과는 Fig. 48에 나타내었다.

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

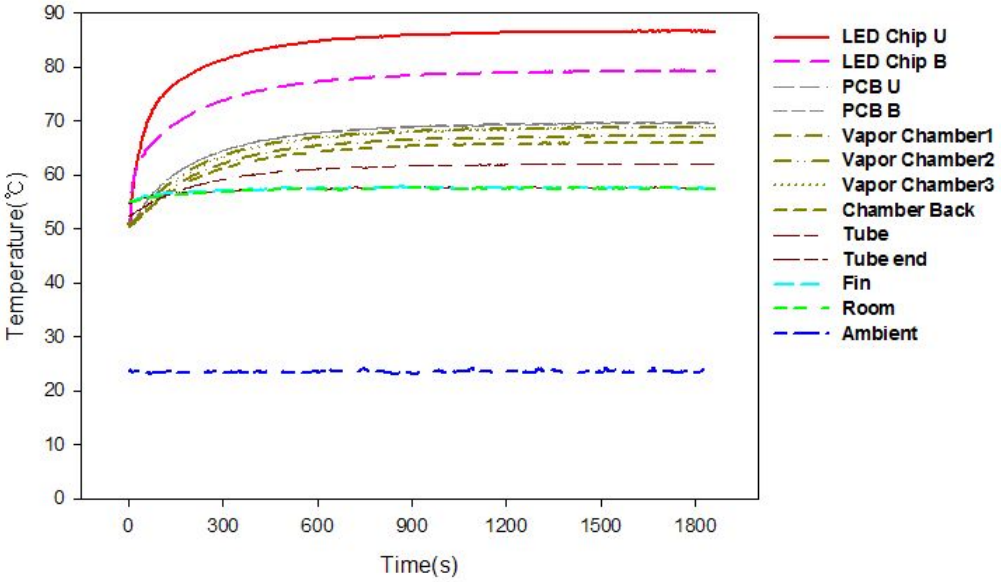

Fig. 39 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 40 %vol.)

Table 9 Maximum temperature of each point (charging ratio 40 %vol.)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	86.6
LED Chip B	79.2
PCB U	69.7
PCB B	69.5
Vapor Chamber1	67.2
Vapor Chamber2	68.8
Vapor Chamber3	68.7
Vapor Chamber Back	65.9
Tube	62.0
Tube end	57.6
Fin	57.4
Room	57.4
Ambient	23.4

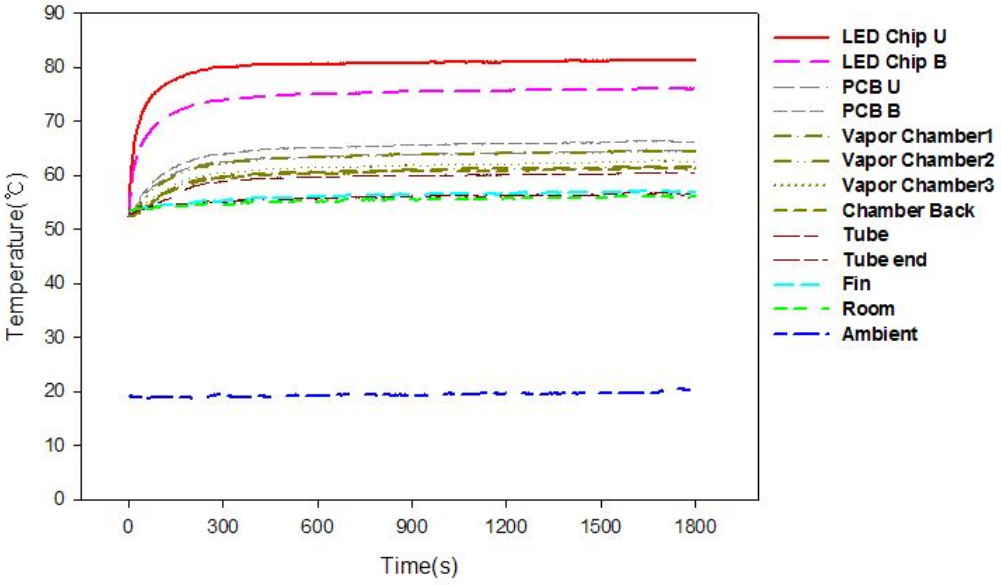

Fig. 40 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 45 $\%_{vol.}$)

Table 10 Maximum temperature of each point (charging ratio 45 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	81.1
LED Chip B	75.9
PCB U	64.5
PCB B	66.1
Vapor Chamber1	61.5
Vapor Chamber2	64.4
Vapor Chamber3	62.6
Vapor Chamber Back	61.1
Tube	60.4
Tube end	56.6
Fin	56.9
Room	56.0
Ambient	19.9

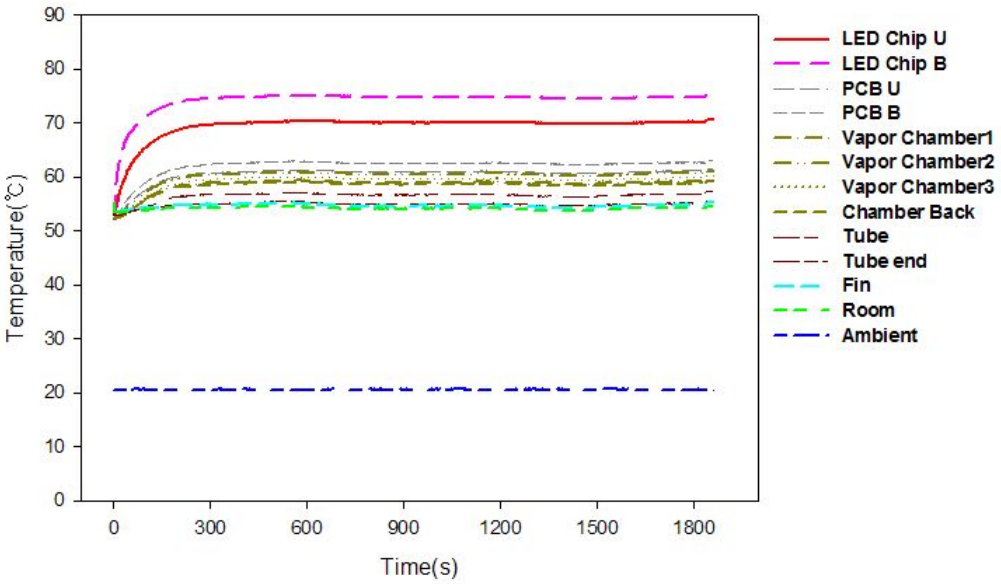

Fig. 41 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 55 %vol.)

Table 11 Maximum temperature of each point (charging ratio 55 %vol.)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	70.2
LED Chip B	74.8
PCB U	61.1
PCB B	62.7
Vapor Chamber1	59.2
Vapor Chamber2	60.7
Vapor Chamber3	59.8
Vapor Chamber Back	58.8
Tube	56.8
Tube end	55.2
Fin	54.9
Room	54.3
Ambient	20.6

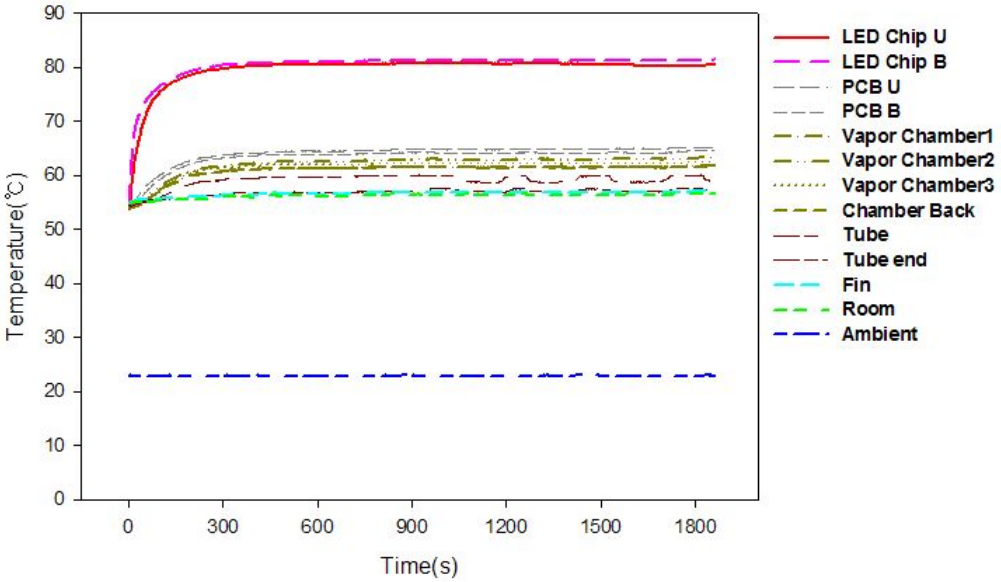

Fig. 42 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 70 $\%_{vol.}$)

Table 12 Maximum temperature of each point (charging ratio 70 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	80.2
LED Chip B	81.3
PCB U	65.1
PCB B	64.5
Vapor Chamber1	61.7
Vapor Chamber2	63.2
Vapor Chamber3	62.4
Vapor Chamber Back	61.5
Tube	60.0
Tube end	57.6
Fin	57.0
Room	56.6
Ambient	22.9

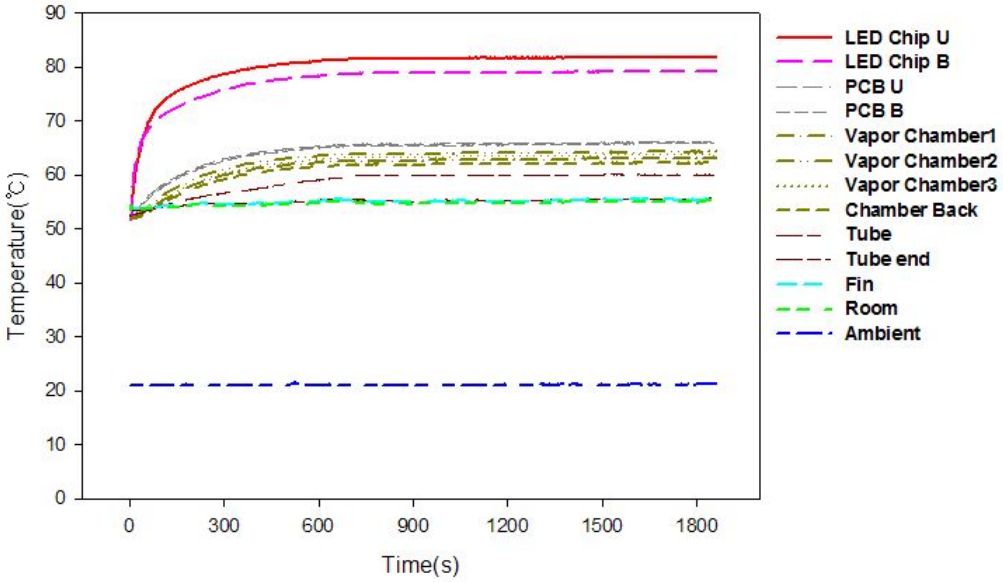

Fig. 43 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (charging ratio 100 $\%_{vol.}$)

Table 13 Maximum temperature of each point (charging ratio 100 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	81.8
LED Chip B	79.2
PCB U	66.1
PCB B	65.8
Vapor Chamber1	63.1
Vapor Chamber2	64.3
Vapor Chamber3	63.8
Vapor Chamber Back	62.2
Tube	60.0
Tube end	55.3
Fin	55.2
Room	54.8
Ambient	21.2

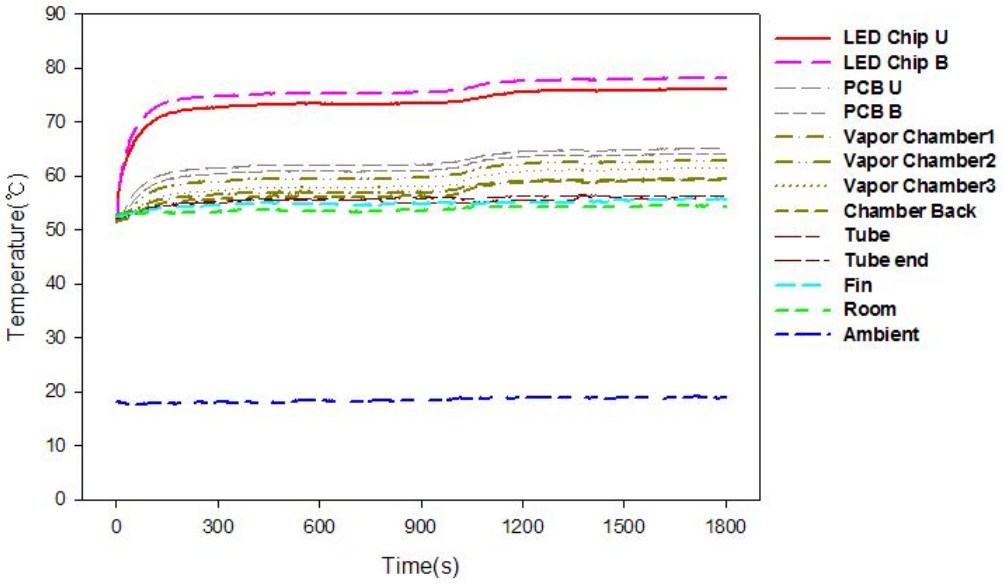

Fig. 44 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 20 $\%_{vol.}$)

Table 14 Maximum temperature of each point (sinter - charging ratio 20 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	76.1
LED Chip B	78.1
PCB U	65.0
PCB B	64.1
Vapor Chamber1	59.4
Vapor Chamber2	62.7
Vapor Chamber3	61.4
Vapor Chamber Back	59.2
Tube	56.3
Tube end	55.8
Fin	55.6
Room	54.3
Ambient	18.9

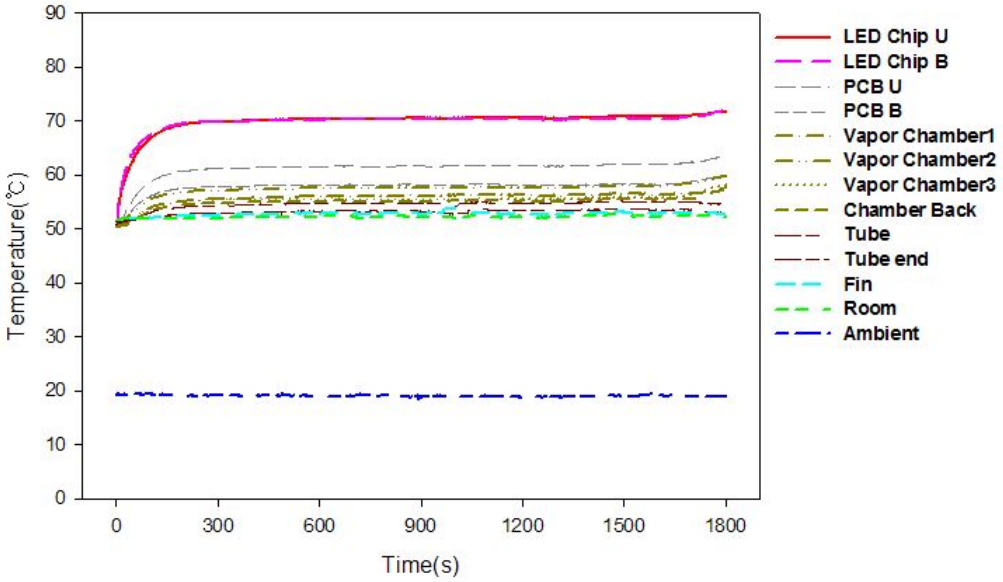

Fig. 45 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 30 $\%_{vol.}$)

Table 15 Maximum temperature of each point (sinter - charging ratio 30 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	71.8
LED Chip B	71.9
PCB U	63.4
PCB B	59.9
Vapor Chamber1	57.5
Vapor Chamber2	59.6
Vapor Chamber3	58.1
Vapor Chamber Back	57.1
Tube	54.5
Tube end	53.0
Fin	52.6
Room	52.1
Ambient	18.9

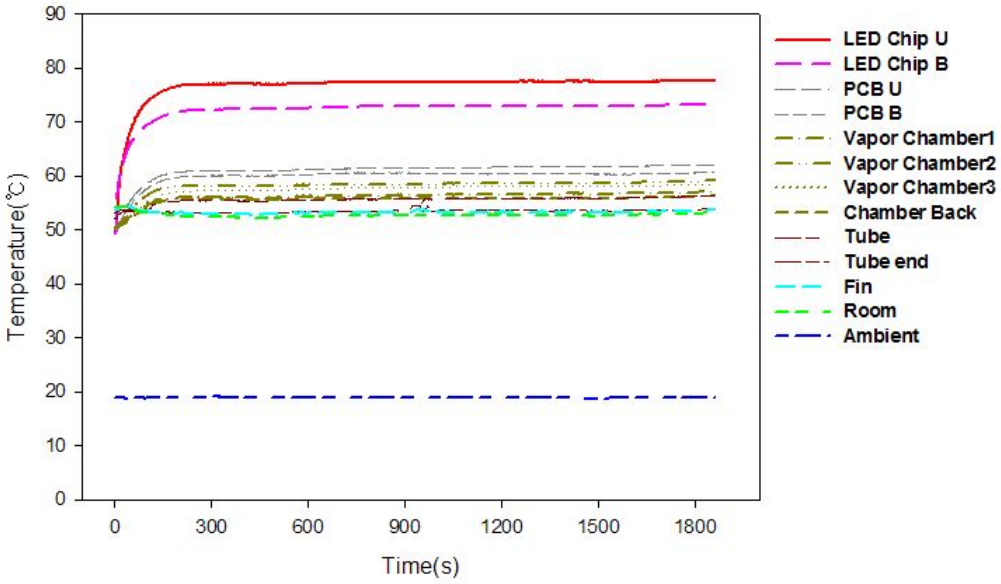

Fig. 46 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 40 $\%_{vol.}$)

Table 16 Maximum temperature of each point (sinter - charging ratio 40 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	77.5
LED Chip B	73.2
PCB U	62.0
PCB B	60.5
Vapor Chamber1	56.9
Vapor Chamber2	59.0
Vapor Chamber3	58.4
Vapor Chamber Back	56.1
Tube	56.2
Tube end	53.8
Fin	53.5
Room	52.9
Ambient	18.9

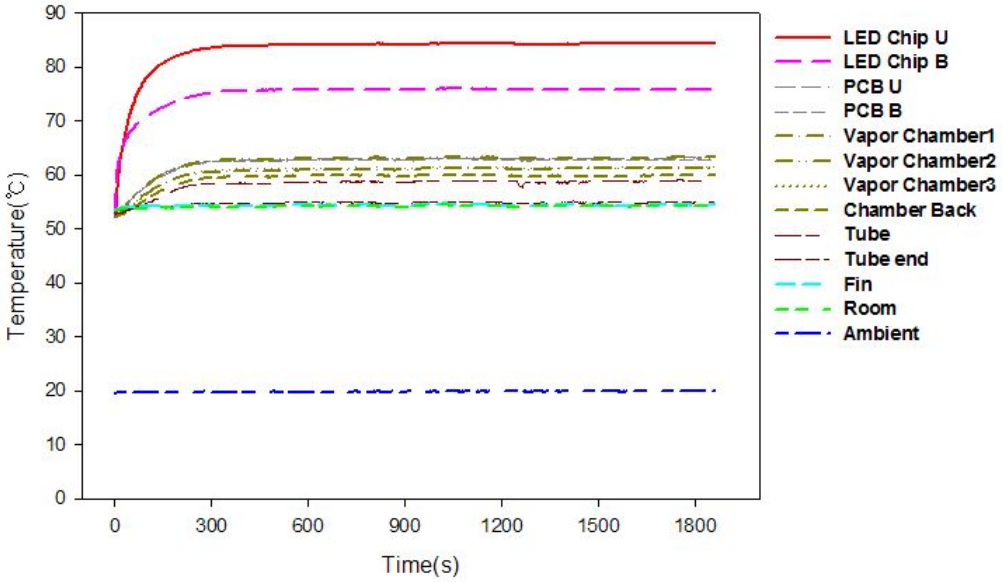

Fig. 47 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (sinter - charging ratio 55 %vol.)

Table 17 Maximum temperature of each point (sinter - charging ratio 55 %vol.)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	84.4
LED Chip B	75.9
PCB U	63.2
PCB B	62.8
Vapor Chamber1	61.3
Vapor Chamber2	63.2
Vapor Chamber3	61.5
Vapor Chamber Back	59.8
Tube	58.9
Tube end	54.9
Fin	54.3
Room	54.1
Ambient	20

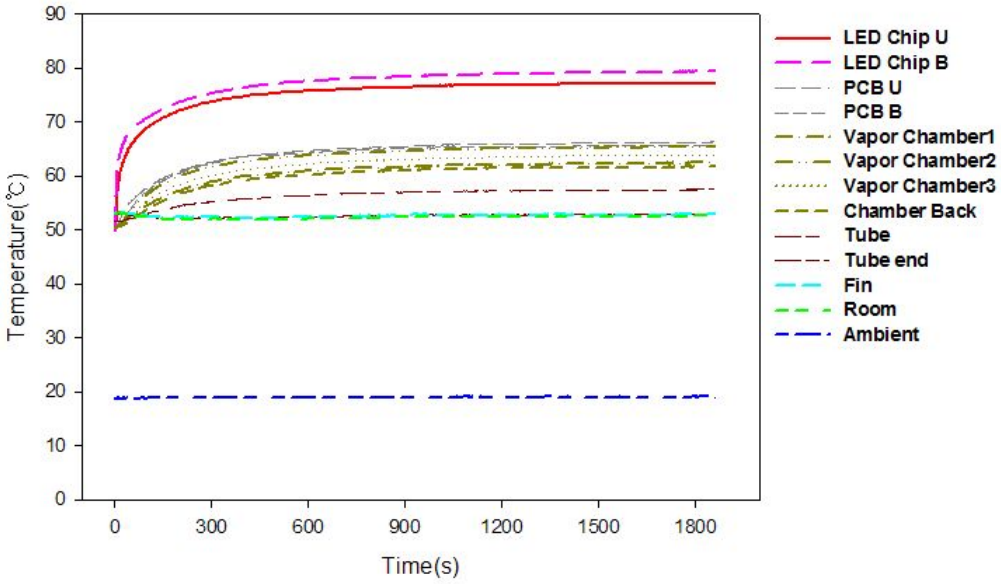

Fig. 48 Profile of temperature of Heat Pipe with Crevice Type Vapor Chamber (Al_2O_3 - charging ratio 55 $\%_{vol.}$)

Table 18 Maximum temperature of each point (Al_2O_3 - charging ratio 55 $\%_{vol.}$)

Point	Max. Temp.(℃)
LED Chip U	77.1
LED Chip B	79.3
PCB U	66.2
PCB B	65.6
Vapor Chamber1	62.4
Vapor Chamber2	65.3
Vapor Chamber3	63.8
Vapor Chamber Back	61.7
Tube	57.4
Tube end	53.0
Fin	52.9
Room	52.6
Ambient	19.1

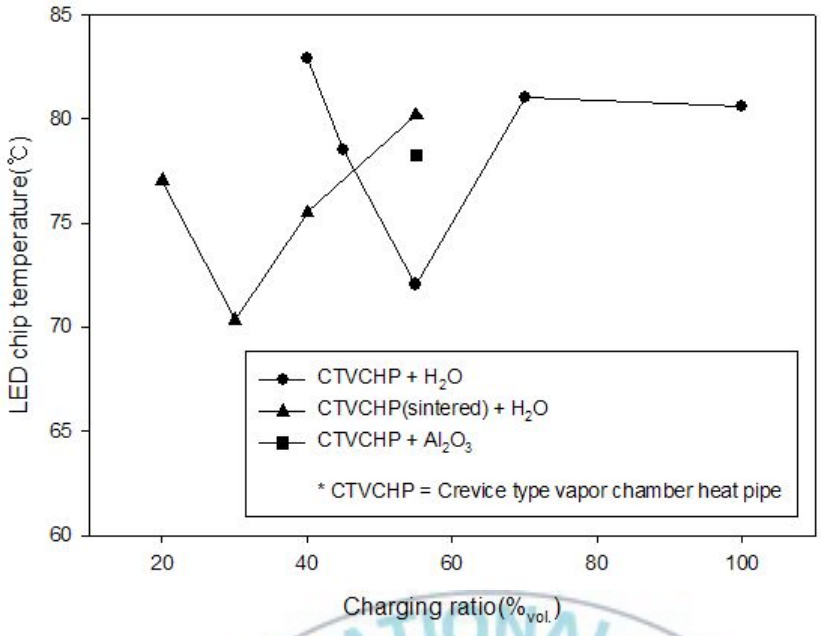

Fig. 49 The LED chip temperature according to the charging ratio

Fig. 49는 실험조건에 따른 LED칩의 온도를 나타낸 것으로, 측정된 LED 칩의 상, 하 온도를 평균하여 사용하였다. 실험 1의 최적차징량을 찾는 실험에서 베이퍼챔버의 55 $\%_{vol.}$의 LED칩의 평균온도가 72.05℃로 가장 낮았다. 그 후 최적차징량의 증류수를 소결된 챔버에 주입하여 실험하였으나, 80.2℃로 더 높게 나타났다. 이는 소결로 인해 내부 체적이 감소된 것으로 보이며, 소결된 챔버에 추가 차징량 실험을 한 결과, 30 $\%_{vol.}$일 때, LED칩의 평균온도는 70.35℃로 가장 낮게 나타났다. 또한, 알루미나 나노유체를 55 $\%_{vol.}$ 주입하여 실험 한 결과, LED칩의 평균온도는 78.25℃로 나타났다.

4.2 LED 전조등 냉각 시스템의 열저항

본 실험에서는 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프를 적용한 고출력 40 W LED 전조등 냉각 시스템의 냉각성능의 차이를 알기 위해 열저항을 구하였다.

Table 19 Thermal resistance according to charging ratio

Junction to Ambient	40 $\%_{vol.}$ (℃/W)	45 $\%_{vol.}$ (℃/W)	55 $\%_{vol.}$ (℃/W)	70 $\%_{vol.}$ (℃/W)	100 $\%_{vol.}$ (℃/W)
R_{Ch-P}	1.33	1.32	1.02	1.62	1.46
R_{P-CB}	0.14	0.25	0.20	0.23	0.23
R_{CB-TB}	0.16	0.06	0.03	0.06	0.09
R_{TB-F}	0.12	0.01	0.10	0.08	0.12
R_{F-A}	0.85	1.00	0.86	0.86	0.86
R_{θ}	2.59	2.64	2.20	2.84	2.74

Table 20 Thermal resistance according to sintered-charging ratio

Junction to Ambient	20 $\%_{vol.}$ (℃/W)	30 $\%_{vol.}$ (℃/W)	40 $\%_{vol.}$ (℃/W)	55 $\%_{vol.}$ (℃/W)
R_{Ch-P}	1.25	1.05	1.41	1.71
R_{P-CB}	0.34	0.34	0.30	0.10
R_{CB-TB}	0.12	0.04	0.05	0.07
R_{TB-F}	0.01	0.05	0.05	0.11
R_{F-A}	0.92	0.85	0.88	0.87
R_{θ}	2.65	2.33	2.70	2.86

Table 21 Thermal resistance according to nanofluid-charging ratio

Junction to Ambient	55 $\%_{vol.}$ (℃/W)
R_{Ch-P}	1.23
R_{P-CB}	0.21
R_{CB-TB}	0.16
R_{TB-F}	0.11
R_{F-A}	0.86
R_{θ}	2.56

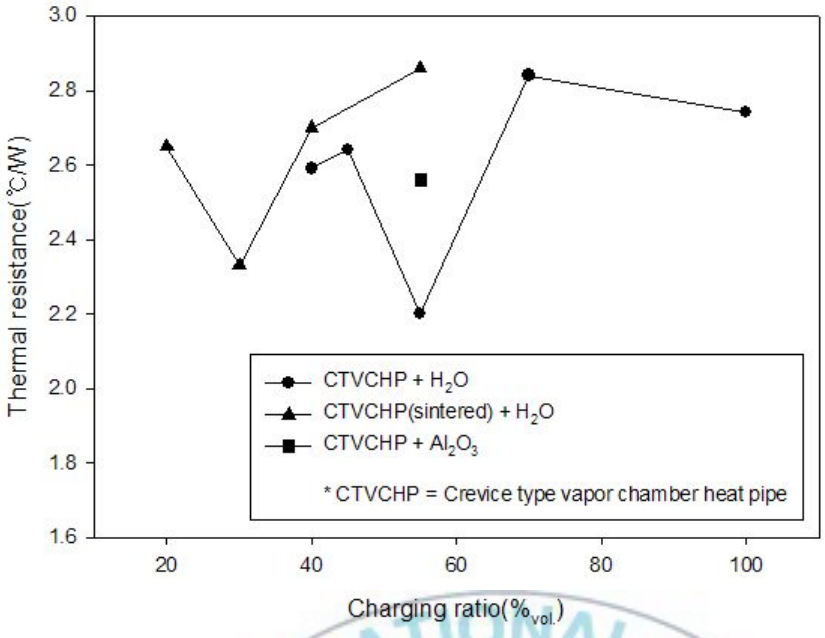

Fig. 50 The thermal resistance according to the charging ratio

Table 21의 차징율에 따른 열저항을 볼 때, 실험조건 1의 차징량 55 $\%_{vol.}$에서 2.2 ℃/W로 가장 낮았으며, 그 다음으로 소결된 챔버 30 $\%_{vol.}$에서 2.33 ℃/W였다. 실험 조건 3인 나노유체를 사용한 실험의 총 열저항은 2.56 $\%_{vol.}$였다.

제 5 장 결론

최근 에너지 절약과 환경보호를 이유로 LED의 사용이 크게 증가하였으며, 기술의 발달로 고성능화되기는 하였지만, 그만큼의 발열량이 증가하고 있어 방열의 중요도가 커졌다. 특히, 차량용 전조등의 경우 고출력 LED의 사용이 불가피하며, 그에 대한 방열이 아직 해결되어야 할 문제로 남아있다. 또한 전조등의 공간은 협소하며, 차량이 주행 중인 경우 엔진에서 전해지는 열도 LED에 악영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프를 적용한 LED 전조등 냉각 시스템의 성능 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프의 최적차징률 실험 결과, 베이퍼챔버 체적의 55 %vol.에서 LED칩의 평균온도는 73.05℃이며, 열저항이 2.20 ℃/W로 가장 낮았다.

(2) 소결된 베이퍼챔버의 경우, 30 %vol.에서 LED칩의 평균온도는 70.35℃로 모든 실험 조건에서 가장 낮았으며, 열저항은 2.33℃/W였다.

(3) 알루미나 수용액을 작동유체로 사용한 경우, LED칩의 평균 온도가 78.25℃로 냉각성능이 저하되어 나노유체에 의한 열전달 촉진은 없었다.

(4) 모든 실험조건에서 LED칩의 온도가 85℃이하로 유지되었으며, 크레비스형 베이퍼챔버 히트파이프가 LED 전조등 냉각시스템으로써 성능이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Kang, B. D., Park, K. S., Yong, B. J. and Kim, H. G., 2009, Evaluation of fuel consumption between LED headlamp and halogen headlamp, *KSAE 2009 Annual Conference*, pp. 1709-1714.

(2) Ko, M. S., Lee. J. H., Oh, S. J., Cho, H. S., and Seo, T. B., 2009, Cooling Performance of LED Head Lamp with Heat Sink and Cooling Fan, *KSAE-B.2009.33.12,* pp.947-951

(3) Kang, B. D., Park, K. S., Son, S. M., 2006, A Evaluation on LHPS Cooling Performance of LED Headlamp, KSAE, pp.563-567

(4) Ra. H. W, 2005, A Study on the Heat Transfer Characteristics of High Power Light Emitting Diode Package, Master thesis of Chonbuk National University.

(5) 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 modeling and experimentation, Vol. 3, pp. 1713 ~ 1718, Pisa, Italy.

(6) Lai, Y., Cordero, N., Barthel, F., Tebbe, F., Kuhn, J., Apfelbeck, R., Würtenberger, D. (2009), Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications, Applied Thermal Engineering, 29(5-6).

(7) 日本ヒート · パイプ協會, 2001, 實用 ヒート · パイプ 第2版

(8) KANEYASA NISHIKAWA and YASUNOBU FUSJTA, Nucleate Boiling Heat Transfer and Its Augmentation, Advances in heat transfer, Vol. 20, pp. 36-55.

(9) G. P. Peterson, 1994, An introduction to heat pipes, John wiley & sons,

Inc., New York.

(10) G. F. Hewitt, G. L. Shires and Y. V. Polezhaev, 1997, International encyclopedia of heat & mass transfer, CRC Press, New York, pp. 551 ~ 555.

(11) Wen, D., Lin, G., Vafaei, S., Zhang, K., 2009, Review of nanofluids for heat transfer applications, Particuology 7, 141-150

(12) Qu, J., Wu, H. Y., Cheng, P., 2010, Thermal performance of an oscillating heat pipe with Al_2O_3-water nanofluids, International Communications in Heat and Mass Transfer 37, 111-115

(13) Peyghambarzadeh, S. M., Hashemabadi, S. H., Seifi Jamnani, M., Hoseini, S. M., 2011, Improving the cooling performance of automobile radiator with Al_2O_3/water nanofluid, Applied Thermal Engineering 1-6

(14) Khandekar, S., Joshi, Y. M., Mehta, B., 2008, Thermal performance of closed two-phase thermosyphon using nanofluids, International Journal of Thermal Sciences 47, 659-667

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY 부경대학교

謝　　辭

2년이라는 시간의 끝맺음을 하려하니, 문득 그 시작이 생각납니다. 소소한 일들에도 감사했었던 그 마음과, 무엇이든 하고자했던 그 열정이 귀한 자산이었다고 이제야 느끼게 되는 오늘입니다.

생각해보면 평탄치 않았던 고개와 암흑 같았던 터널을 계절의 변화를 느낄 새도 없이 잘 지나온 것 같습니다. 궂은 길 함께 걸어주신 김종수 교수님께 고개 숙여 깊은 감사의 인사를 드립니다. 그리고 좋은 이야기 많이 해주시던 오후규 교수님, 항상 다정하게 맞아주시던 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 인생의 선배로 많은 것을 일러주시고 가르쳐 주셨던 하수정쌤, 잘 챙겨주셨던 권용하선배, 좋은 얘기 많이 해주신 아리투스의 안성준선배, 한국에너지 기술연구소의 이욱현선배, 실험에 있어 도움을 주신 소결지앤티의 김정훈님, 우성진공의 최재범님께도 감사의 인사를 드립니다.

그리고 정완선배, 재호선배, 종호선배, 길재선배, 현직이, 동광선배 그동안 감사했습니다. 앞으로 더 사랑받을 후임 한숨 상일이, 포도당코코아 제조 일본 연우, 먹을 때 행복한 흠흠 종석이, 눈에 뵈는 게 없는 어린 준이, 선생님이라 불러주던 땡큐 Friday 모두들 고맙습니다. 처음의 마음가짐 잊지 말고, 항상 정진하기를 기원(祈願)합니다.

그리고 항상 바쁘다고 몇 개월 만에 만나도 전혀 어색하지 않은 내 소중한 사람들, 감각적인 무첨삭의 대명사 주영언니, 막 떠나는 여행일지라도 믿어주는 동반자 민지, 남천동으로 떠난 도쿄 벚꽃놀이 세영이, 글로벌한 여인 수미, 무작정이라도 스토리가 되는 현수언니, 서울역으로 한걸음에 달려와주던 고딩 짝지 소영이, 내공쌓인 효미, 멀리 있는 기쁨이, 무의식적인 존재 아람이, 격려해주던 호진언니, 뭔가 남달랐던 은영이, 힘내라고 맛있는 것 사주던 태희 오빠와 효경 오라방, 이것저것 고민상담 영주언니, 함께 울산, 거제도 찍은 은정

쌤, Pleades 21th 친구들 외 모든 분들께 정말 감사드립니다.

마지막으로, 끝까지 믿어준 우리 아빠, 이유 모를 짜증 받아준다고 속상했을 우리 엄마, 장난스럽지만 믿음직한 우리 오빠, 귀염둥이 우리 막내, 우리 가족에게 가장 감사하다는 말 전하고 싶습니다.

석사과정이기에 가능했었고, 경험할 수 있었으며, 지나갔을 모든 상황을 공기조화 연구실에서 보낸 것은 행복이었고, 소중한 것을 찾았던 귀중한 시간이었습니다.

2012년 1월 겨울

여 지 원 배상

PUKYONG NATIONAL UNIVERSITY
부경대학교