



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 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](#)

공학석사학위논문

소결금속 비등 전열면을 이용한
베이퍼챔버형 히트파이프의 LED
조명등 방열 성능에 관한 연구



2014년 2월

부경대학교 대학원

냉동공조공학과

허준

공학석사학위논문

소결금속 비등 전열면을 이용한
베이퍼챔버형 히트파이프의 LED
조명등 방열 성능에 관한 연구

지도교수 김 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2014년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

냉동공조공학과

허 준

허준의 공학석사 학위논문을 인준함.

2014년 2월 21일



주심 공학박사 김 은 필
위원 공학박사 최 광 환
위원 공학박사 김 종 수



목 차

ABSTRACT	iii
Nomenclature	v
제 1 장 서론	1
1.1 연구의 배경	1
1.2 LED의 개념과 특징	3
1.3 LED 방열의 필요성	6
1.4 LED 방열의 선행 기술	12
1.4.1 COB 기술	13
1.4.2 COH 기술	14
1.4.3 Hearsink PCB 기술	15
제 2 장 히트파이프를 이용한 LED chip 방열 관련이론	16
2.1 Vapor Chamber Type 히트파이프	16
2.1.1 Vapor Chamber Type 히트파이프의 구조 및 원리	13
2.1.2 작동 유체의 선정	20
2.1.3 안정작동을 위한 관경 상관식	27
2.2 소결	30
2.3 LED에서의 열 저항	36
2.3.1 열접촉저항	39

제 3 장 실험장치 및 방법	41
3.1 6.5 W 주백색 LED 조명등의 실험 장치	41
3.2 6.5 W 주백색 LED 조명등의 실험 방법	44
3.3 수평핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 장치	45
3.4 수평핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 방법	50
3.5 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 장치	53
3.6 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 방법	57
3.7 Vapor chamber type heat pipe의 열적 모델링	60
제 4 장 실험결과	63
4.1 6.5 W 주백색 LED 조명등의 온도분포	63
4.2 수평핀 Vapor chamber type LED 조명등의 온도분포	65
4.3 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 온도분포	69
4.4 6.5 W 주백색 LED 조명등의 실험 장치별 LED chip 온도 및 열 저항 비교	72
제 5 장 결 론	75
참고 문헌	77
謝 辭	80

A study on LED illumination heat dissipation in
performance by using the sintered metal boiling
heat transfer surface of
vapor chamber type heat pipe

Jun Heo

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

Abstract

To solve the problem with fluorescent lamps and incandescent lamps which has been the conventional illumination system will

greatly enhanced energy efficiency and lifetime of the LED(Light Emitting Diode) lighting device. Recently, LED lighting system has attracted the attention of the industries and its lighting technology is different from incandescent lamp because it has no filaments which make it more robust and strong to resist vibrations effect. LED lighting system shows less energy consumption, electric spark does not occur and this will greatly improves the performance and stability of indoor lighting system. However, 80% of the electrical energy used in LED is converted into heat through effective heat dissipation of LED temperature modules and lowering the substrate temperature to improve the reliability, lifetime and heat problem should be minimized. Optimal heat dissipation design and equipment manufacturing LED lifetime and the performance can be improved.

Relying on natural convection heat dissipation of the LED is fast becoming a better lighting practice but LED heat generation and dissipation remain a great concern. In order to solve these problems, we use VCTHP(Vapor Chamber Type Heat Pipe). Which has a heat spread role and heat transfer rate 2000 times higher than copper within a short time and large amount of heat can be transported. Optimal quantity state of horizontal fin vapor chamber is R-141b 35%, and the heat transfer surfaces are sintered. At this time, the LED chip temperature was 91.0°C, the thermal resistance 10.84 °C/W. In transformed vertical fin VCTHP was best thermal

performance at R-141b 45%. In this regard, the lowest temperature of LED chip was 77.3°C and thermal resistance was 8.32 °C/W. Performance of VCTHP for heat dissipation in LED illumination cooling system was excellent in all conditions in this study.



NOMENCLATURE

Symbols

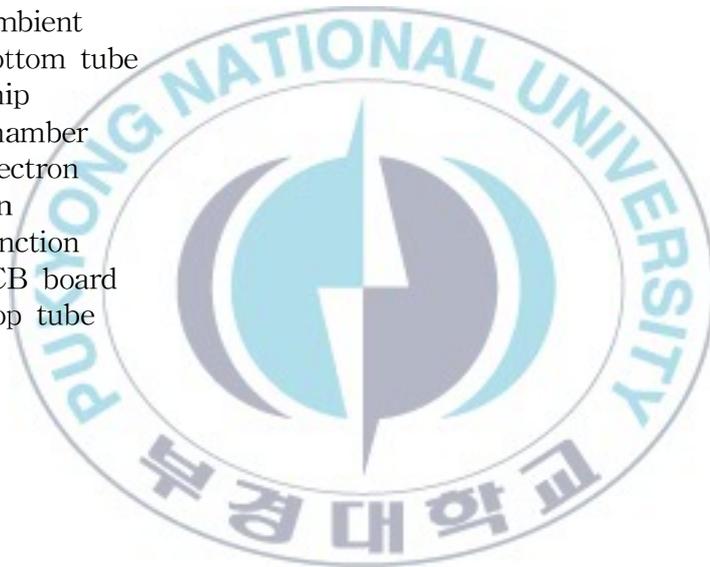
A	Area	$[m^2]$
C	Corrosion allowance	$[mm]$
D	Chamber diameter	$[mm]$
d_p	Sintering powder diameter	$[mm]$
E	Joint efficiency	$[Factor\ 1.0 \sim 0.7]$
h_{fg}	Latent heat	$[kJ/kg]$
h_{ct}	Thermal contact conductance	$[W/m^2 \cdot ^\circ C]$
I	Electronic current	$[A]$
$I.D.$	Inner diameter	$[mm]$
k	Thermal conductivity	$[W/m \cdot K]$
M_h	Merit number of heat pipe	$[kW/m^2]$
M_t	Merit number of thermosyphon	$[kW^{0.5}/m^2 \cdot ^\circ C^{0.75}]$
$O.D.$	Outer diameter	$[mm]$
P	Design internal pressure	$[kg/cm^2]$
R	Thermal resistance	$[^\circ C/W]$
R_{ct}	Thermal contact resistance	$[m^2 \cdot ^\circ C/W]$
R_θ	Total thermal resistance	$[^\circ C/W]$
S	Permissible tensile stress	$[kg/cm^2]$
T	Temperature	$[^\circ C]$
Q	Quantity of heat	$[W]$
q	Heat flux	$[W/m^2]$
V	Voltage	$[V]$

Greek symbols

δ	Sintering powder thickness of heat transfer surface	[<i>mm</i>]
μ_f	Viscosity	[<i>kg/s·m</i>]
ρ_f	Density	[<i>kg/m³</i>]
σ_f	Surface tension	[<i>N/m</i>]

Subscripts

<i>a</i>	Ambient
<i>b</i>	Bottom tube
<i>c</i>	Chip
<i>ch</i>	Chamber
<i>e</i>	Electron
<i>f</i>	Fin
<i>j</i>	Junction
<i>p</i>	PCB board
<i>t</i>	Top tube



List of Figures

Fig. 1 Principle of LED	4
Fig. 2 Yellowing of epoxy resin	7
Fig. 3 Lifted chip caused by reflow of thermal paste chip attach	7
Fig. 4 Wire breakage caused by thermal stress	9
Fig. 5 Interfacial separation between LED package and silicon resin ·	9
Fig. 6 Effect of semiconductor junction temperature on the light output of different color	11
Fig. 7 Useful life of high-brightness white LEDs at different operating temperatures.	11
Fig. 8 Integrated LED module for thermal resistance reduction technology	13
Fig. 9 COB technology for the reduction of the thermal resistance ·	14
Fig. 10 COH technology for the reduction of the thermal resistance	15
Fig. 11 Heat flow by working fluid	17
Fig. 12 Basic concept of VCTHP	18
Fig. 13 Schematic of heat distribution	19
Fig. 14 Merit number of selected working fluids for heat pipe	24
Fig. 15 Merit number of selected working fluids for thermosyphon ·	25
Fig. 16 Enhancement for water boiling at 101 kPa (1atm) on a stainless steel surface having minute nonwetted spots (30–60 spots/cm ² , 0.25 mm diameter or less)	30

Fig. 17 Enhancement provided by porous High-Flux™ surface for three fluids boiling at 101kPa (1atm), as reported by Gottzmann et al. [1971,1973]	31
Fig. 18 Wick thickness vs maximum heat transport rate at $T_o=60^{\circ}\text{C}$, $\Theta=30^{\circ}$	33
Fig. 19 Schematic of sintering process	34
Fig. 20 The picture of sintering on heating surface	35
Fig. 21 Heat transmission amount generated between two isothermal surfaces	37
Fig. 22 LED model for heat measurement	38
Fig. 23 Schematic diagram of experimental apparatus for conventional illumination	41
Fig. 24 Schematic of 6.5 W cool white LED illumination	42
Fig. 25 Photograph of 6.5 W cool white LED illumination experimental device	43
Fig. 26 Schematic of vapor chamber container	46
Fig. 27 Schematic of vapor chamber type heat pipe (Horizontal fin type)	46
Fig. 28 Schematic diagram of experimental apparatus for 6.5 W cool white LED illumination using VCTHP	48
Fig. 29 Photograph of horizontal fin type LED illumination experimental device	49
Fig. 30 Picture of high vacuum device	51

Fig. 31 Attachment position of thermocouples (Horizontal fin type) ·	52
Fig. 32 Photograph of vertical fin type LED illumination experimental device	54
Fig. 33 Photograph of transformed vertical fin type LED illumination experimental device	55
Fig. 34 Attachment position of thermocouples (Vertical fin & Transformed vertical fin type)	58
Fig. 35 A series circuit of horizontal fin VCTHP system thermal resistance	61
Fig. 36 A series circuit of vertical fin VCTHP system thermal resistance	62
Fig. 37 Profile of conventional illumination temperature	64
Fig. 38 Temperature of components with the charging ratio (Horizontal fin type, R-134a, Plain)	66
Fig. 39 Temperature of components with the charging ratio (Horizontal fin type, R-141b, Plain)	67
Fig. 40 Temperature of components with the charging ratio (Horizontal fin type, R-141b, Sintering)	68
Fig. 41 Temperature of components with the charging ratio (Vertical fin type, R-141b, Sintering)	70
Fig. 42 Temperature of components with the charging ratio (Transformed vertical fin type, R-141b, Sintering)	71
Fig. 43 LED chip temperature following vapor chamber type and	

charging ratio 72

Fig. 44 Comparison of thermal image 73

Fig. 45 Variation of VCTHP thermal resistance 74



List of tables

Table 1 Working fluids and temperature ranges	23
Table 2 Generalized results of experimental compatibility tests	26
Table 3 Inner diameters(mm) for stable operating of PHP	28
Table 4 According to particle size and thickness of the experimental conditions	31
Table 5 Experimental sintered-copper wick heat pipes	32
Table 6 Specification of 6.5 W cool white LED illumination	42
Table 7 Specification of VCTHP (Horizontal fin type)	47
Table 8 Test conditions of horizontal fin VCTHP	52
Table 9 Specification of VCTHP (Vertical & Transformed vertical fin type)	56
Table 10 Test conditions of vertical fin VCTHP	59
Table 11 Temperature of conventional illumination	64
Table 12 Temperature & thermal resistance (Horizontal fin type, R-134a, Plain)	66
Table 13 Temperature & thermal resistance (Horizontal fin type, R-141b, Plain)	67
Table 14 Temperature & thermal resistance (Horizontal fin type, R-141b, Sintering)	68
Table 15 Temperature & thermal resistance (Vertical fin type, R-141b, Sintering)	70

Table 16 Temperature & thermal resistance (Transformed vertical fin type, R-141b, Sintering) 71



제 1 장 서론

1.1 연구의 배경

LED(Lighting Emitting Diode)는 반도체 소자의 일종으로 전자회로의 부품이나 정보 전달을 위한 디스플레이 소자에 주로 사용되어 왔으나 1990년대 중반 이후 청색 LED가 양산되기 시작하면서 빛의 3원색인 적색, 녹색, 청색 LED의 조합을 통한 백색 LED의 구현 및 다양한 색의 연출을 통한 풀 컬러화가 가능하게 되었다.

또한 반도체 기술의 발전과 더불어 보다 밝은 빛을 내는 고효율, 고효율의 LED의 개발이 진행되면서 최근에는 기존 일반 조명용 광원을 대체할 수 있는 새로운 광원으로 주목받고 있다.[1]

LED는 전기에너지를 직접 빛으로 변환시키는 고체 발광소자로 여러 가지 전기제품의 표시용 광원으로서 사용되고 있다. LED의 광색은 반도체의 재료에 따라 다르며 초창기에는 휘도가 낮고 광색의 한계가 있었으나, 새로운 LED 재료가 개발되고 생산기술이 진보함에 따라 백색을 포함한 가시광선의 전체 영역에서 다양한 광색을 가지는 LED가 생산되고 있다. LED는 긴 수명, 낮은 소비전력, 높은 신뢰성 등 많은 장점을 가지고 있으나, 효율이 낮고 가격이 높아서 최근 조명용 광원으로 사용되기 시작하였으며, 주로 신호용으로서 표지판의 소형 전구 대체, 항공유도램프, 대형 전광판에 이르기까지 광범위하게 응용되고 있다. 특히 조명용 광원으로는 백색 LED가 중요하며 최근 그 발광효율(lm/W)이 향상되어 현재는 25 lm/W 이상으로 백열전구보다 발광효율이 높아지고 있는 추

세이다.[2]

현재 LED를 일반조명으로 적용할 시 성능적인 면에서 해결되어야 할 문제점을 갖고 있다. 이 중 가장 중요한 것은 다수의 LED 모듈에서 발생하는 고열을 효과적으로 외부로 방열 시키는 것이다. LED junction 온도가 135℃에 가까울수록 모듈이 고온의 온도에 노출되어 LED chip fall이라는 불량 현상이 발생하게 되며 이는 사용 도중에 갑자기 조명이 꺼지는 문제를 초래하여 사용자 안전을 위한 부품의 고신뢰성 확보를 위하여 열화 현상에 따른 LED 접합부와 주위 온도가 일정 온도 이상 넘지 않도록 효과적인 방열 설계가 반드시 필요하다.

기존의 자연대류에 의존한 LED의 방열은 고밀도화와 고휘도화되고 있는 LED의 방열에 대하여 충분하지 않다. 이에 Heat spread 역할 및 냉각 시스템으로 Pulsating Heat Pipe(PHP)를 사용하여 방열문제를 해결하고자 한다. 본 논문에서는 구리의 2000배에 달하는 높은 열전달율을 가지고 있어 대량의 열을 수 초내 수송 가능한 PHP를 LED chip에서 충분한 열원을 공급받기 위한 Vapor Chamber Type Heat Pipe(VCTHP)를 이용하였고, 베이퍼챔버 전열 내부에 소결(Sintering)금속 코팅으로 과열도를 낮추어 방열성능을 극대화시킴으로써 LED조명 방열의 문제점을 해결시키고자 한다.

1.2 LED의 개념과 특징

LED는 P-N 접합 다이오드의 일종으로, 순방향으로 전압이 걸릴 때 단파장광(monochromatic 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.[3]

Diode : 전류가 한쪽 방향으로만 흐르는 2 단자 소자

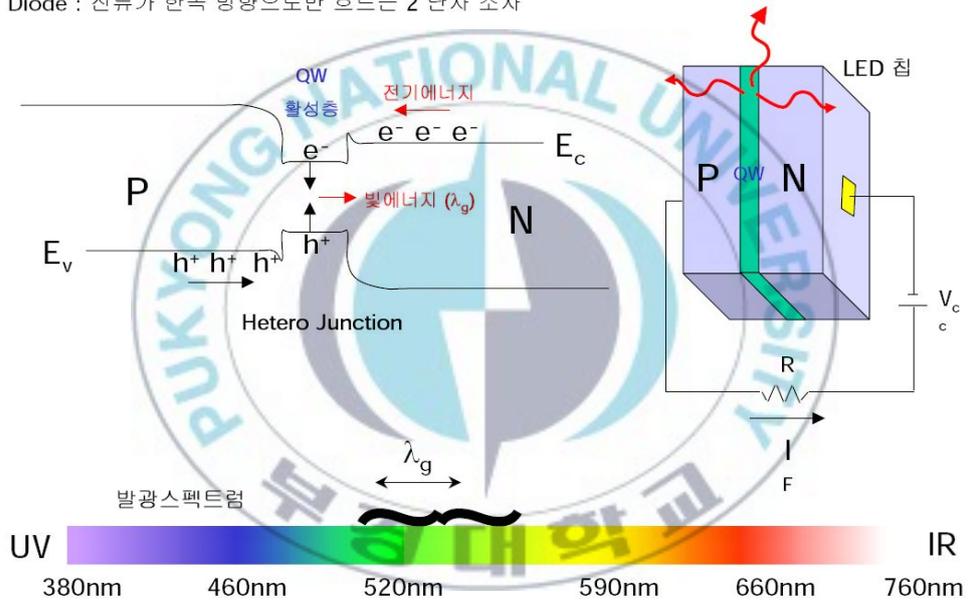


Fig. 1 Principle of LED

LED의 장점을 나열해 보면,

- i) 광 변환 효율이 기존 광원보다 높으며, 에너지소비량이 백열전구의 10분의 1, 형광등의 2분의 1정도로 매우 적다.
- ii) LED는 크기가 소형이고 전력소비가 매우 적으며 제어방식(DC구동)이 단순하여 복잡한 구동회로가 필요하지 않기 때문에, 광원 및 시스템의 소형화, 박형화, 경량화를 이룰 수 있다.
- iii) 다른 광원과 달리 필라멘트나 전극이 없기 때문에 수명이 약 10만 시간의 장수명이고, 충격에 강하고, 안정적이기에 반영구적으로 사용할 수 있다.
- iv) 방전등처럼 수은이나 방전용 가스를 사용하지 않기 때문에 환경친화적이다.
- v) 고체발광으로서 열 및 가스방전 발광이 아니기 때문에 예열시간이 필요 없다.
- vi) 점·소등 속도가 9~10초 정도로 매우 빠르며, 전류에 의한 광출력 제어가 가능하다.
- vii) 안정적인 직류 점등방식으로 소비전력이 작고, 고반복, 펄스 동작이 가능하며 시신경의 피로를 감소시킬 수 있다.
- viii) 서로 다른 광색과 특성을 가진 LED를 조합하여 다양하고 역동적인 광원의 모양과 광색을 표현할 수 있다.[4]

1.3 LED의 방열의 필요성

고출력 발광 다이오드의 특성 및 신뢰성은 발광 다이오드의 접합에서 발생하는 열에 의해 크게 좌우된다. 일반적인 고출력 발광 다이오드에서는 약 1 W/m^2 의 열을 발생시킨다. 발광 다이오드에서 발생하는 열은 패키지내의 열팽창계수가 서로 다르기 때문에 최대 정격 이상의 높은 온도에 노출시키거나 열 순환을 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 채용해 될 수 있다. 접합 온도가 접착제의 용해점을 초과하면 발광 다이오드가 개방되어 치명적인 고장을 일으킬 수 있다.

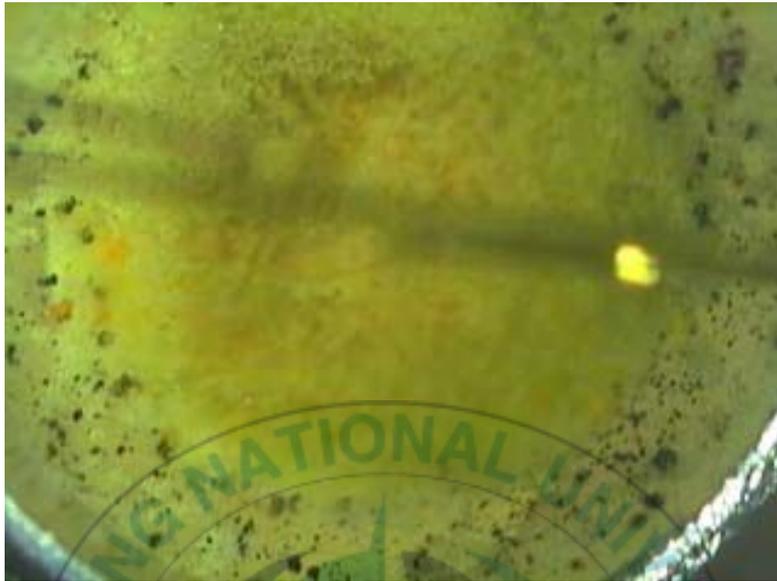


Fig. 2 Yellowing of epoxy resin



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

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





Fig. 4 Wire breakage caused by thermal stress

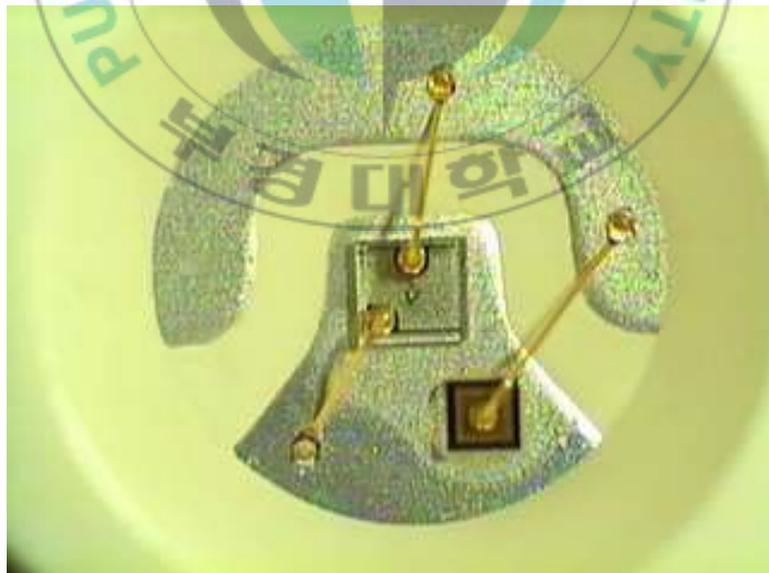


Fig. 5 Interfacial separation between LED package and silicon resin

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 온도가 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 70% 일 때 LED Junction 온도가 80℃인 경우 수명이 약 15,000시간이며 LED Junction 온도가 70℃인 경우엔 수명이 약 40,000시간으로 Junction 온도가 LED 수명 및 신뢰성과 직결됨을 알 수 있다.

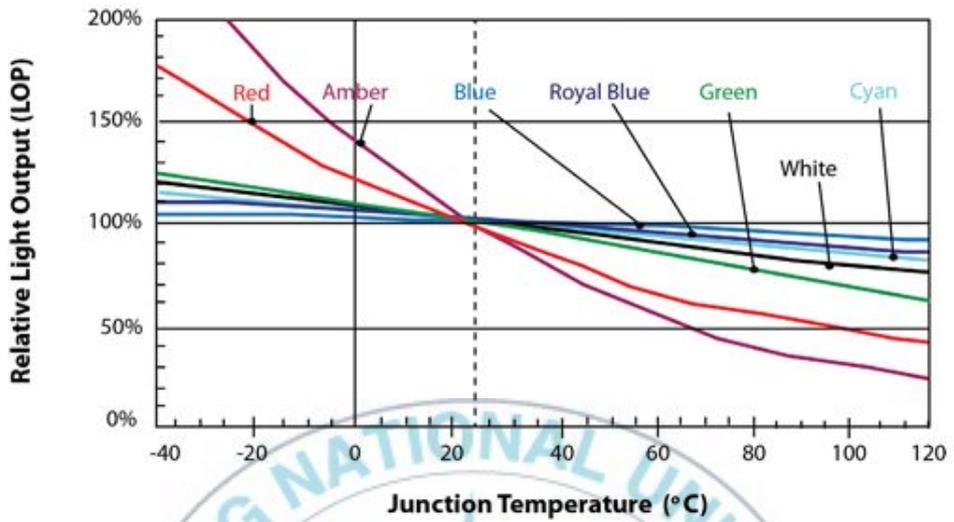


Fig. 6 Effect of semiconductor junction temperature on the light output of different color LEDs

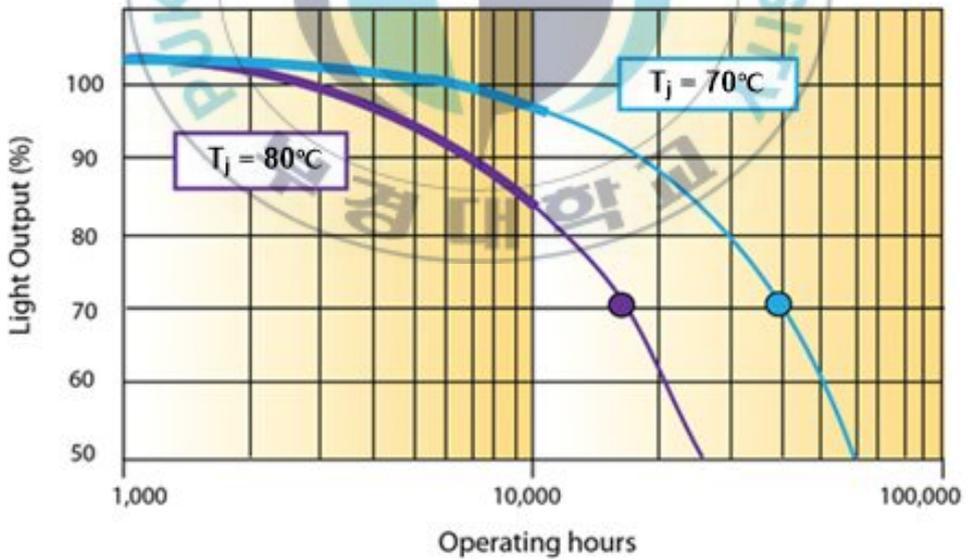


Fig. 7 Useful life of high-brightness white LEDs at different operating temperatures.

1.4 LED 방열의 선행 기술

칩으로부터 히트싱크에 이르기까지 여러 구성 소재를 거치면서 열방출은 소재 자체의 열전도도에도 영향을 받지만 소재와 소재간의 계면에서의 접촉 저항에 의해서도 큰 영향을 받게 된다. 즉 열방출이 잘 안되면서 열 저항이 증가하게 되는 것이다. 따라서 모듈을 구성하는 여러 요소를 일부 제거하거나 두 가지 구성요소를 일체형으로 만들어 열 저항을 줄여주는 기술에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다. Fig. 8은 앞서 설명한 기술 중 가장 많이 개발 중인 COB, 히트싱크 PCB, COH(Chip on Heatsink) 기술을 각각 보여주고 있다. 각각의 경우 모두 기존의 LED 모듈 구성요소에 비해 구조적으로 단순하게 설계됨으로 인해 열 저항이 감소된다는 것을 알 수 있다.

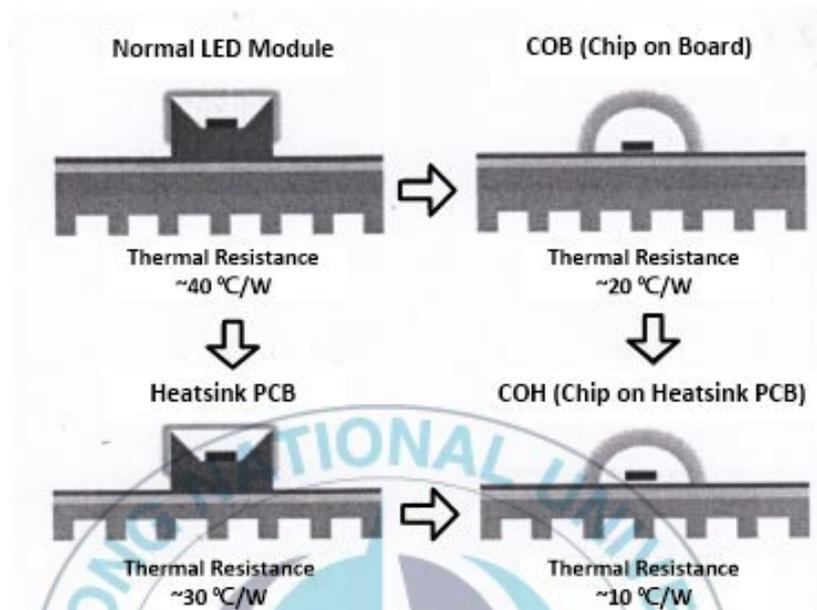


Fig. 8 Integrated LED module for thermal resistance reduction technology

1.4.1 COB 기술

패키지와 PCB 기판을 일체화한 것이 COB(Chip on Board)이며, 이는 칩을 패키지 내부에 심고 밀봉하여 제조하는 대신에 PCB 기판위에 직접 칩을 심어 그 위에 렌즈를 성형하는 방식을 사용한 것이다. 이러한 패키지 칩에서 발생한 열이 빠져나가는 저항을 줄임으로써 전체적인 방열효과를 증대시키는 데 유리하다. Mforce(Matsushita)나 6-chip Ostar(Osram)같은 경우가 Fig. 9처럼 대표적인 예이다.

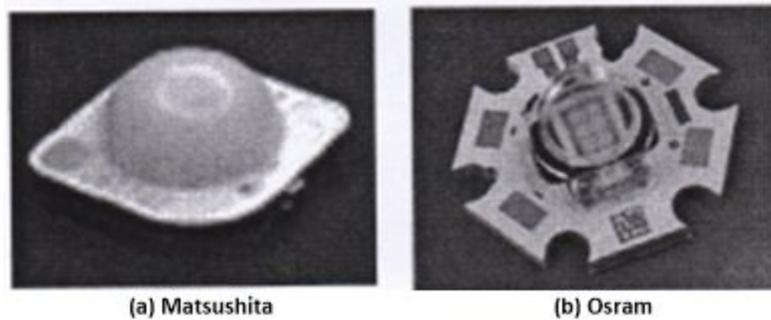
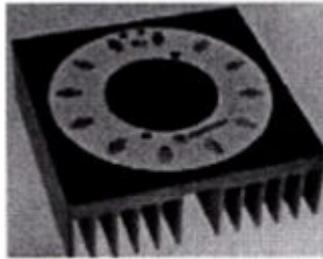


Fig. 9 COB technology for the reduction of the thermal resistance

1.4.2 COH 기술

Fig. 10과 같이 칩을 바로 히트싱크 위에 부착하는 COH 기술은 열 저항 측면에서는 가장 우수한 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 히트싱크 종류에 따라서 금속(Al)을 이용하는 경우와 알루미나 세라믹 가공을 통해 제조하는 경우도 있다. 이 경우 열 저항이 가장 작아진다고 알려져 있지만 실제로 열 저항이 감소한다고 무조건 LED 모듈의 수명이 길어지는 것은 아니며 열 팽창 계수 차이로 인해 나타날 수 있는 열응력에 대한 대비가 필요하다. 따라서 히트싱크 금속(Al) 대신에 세라믹 가공을 통해 제작하고 인쇄방법으로 그 위에 패터닝하는 경우도 개발되어 있다.



Metal Based COH
(by Anodizing & Metallizing)



Ceramic Based COH
(by Metallizing on Al_2O_3)

Fig. 10 COH technology for the reduction of the thermal resistance

1.4.3 Heatsink PCB 기술

Heatsink PCB라 함은 히트싱크 상단부에 MCPCB를 부착하지 않고 히트싱크를 마치 MCPCB의 베이스금속과 같이 사용하여 유전체 층을 바로 히트싱크위에 부착한 형태를 의미한다. COB나 COH의 경우 칩의 불량률 일일이 확인하기 어렵기 때문에 수율 향상에 어려움을 겪는 데 비해 이 기술은 흔히 사용되고 있는 LED 패키지를 그대로 사용할 수 있다는 점에서 유리한 기술이라 할 수 있다. 하지만, 히트싱크 위에 바로 유전체 층을 어떻게 형성할 것인가가 중요한 문제로 떠오르게 된다. 일반적인 적층 공법을 이용하기에는 어려운 점이 많은 실정이며 히트싱크의 형상이 복잡할수록 적층 압착 공정에서 균일한 압력을 가해주기 어렵기 때문에 더 적용이 불가능하다.

제 2 장 히트파이프를 이용한 LED chip 방열 관련이론

2.1 Vapor Chamber Type 히트파이프

2.1.1 Vapor Chamber Type 히트파이프의 구조 및 원리

히트파이프는 증발부, 단열부, 응축부로 구성되어 있으며, 증발부에 열이 가해지면 액체 상태의 작동유체는 증발하여 응축부로 이동한다. 응축부에서는 기체 상태인 작동유체가 응축하여 워 또는 중력 등의 어떠한 힘에 의해 증발부로 돌아오게 된다. 이렇게 작동유체는 증발, 응축의 상변화 과정을 거치며 순환하게 되고, 열은 증발부로 들어가서 응축부로 빠져나간다. Fig. 11에 도식적으로 이 과정을 나타내었다.[5]

VCTHP는 워(wick)에 의한 증발부로의 작동액 환원 없이, 유체의 진동에 의해 열을 수송하는 열전달 기구로, 구조는 Fig. 12에 나타낸 것과 같이 (a)는 응축부측의 핀 형태가 수평이고, (b)는 수직이다. 증발부측은 베이퍼챔버 밀폐 구조로서, 진공 상태로 만든 후 임의의 비율로 작동 유체를 충전시킨 매우 단순한 구조로 되어 있다.

기존의 히트파이프 형태를 사용하지 않고 베이퍼챔버형을 사용한 이유는 LED의 접촉 면적이 작기 때문에 충분한 열원을 받기가 힘들다. 베이퍼챔버형을 적용하면 접촉면적을 최대화 할 수 있다. 작동원리는 LED 칩의 열원을 받아 작동유체가 챔버 내에서 끓어 증기가 되어 올라가 다시 응축되는 구조이다. 베이퍼챔버형을 사용하면 Fig. 13의 황색선과 같이 열 유속을 분산시켜 LED chip의 방열을 효과적으로 할 수 있다.

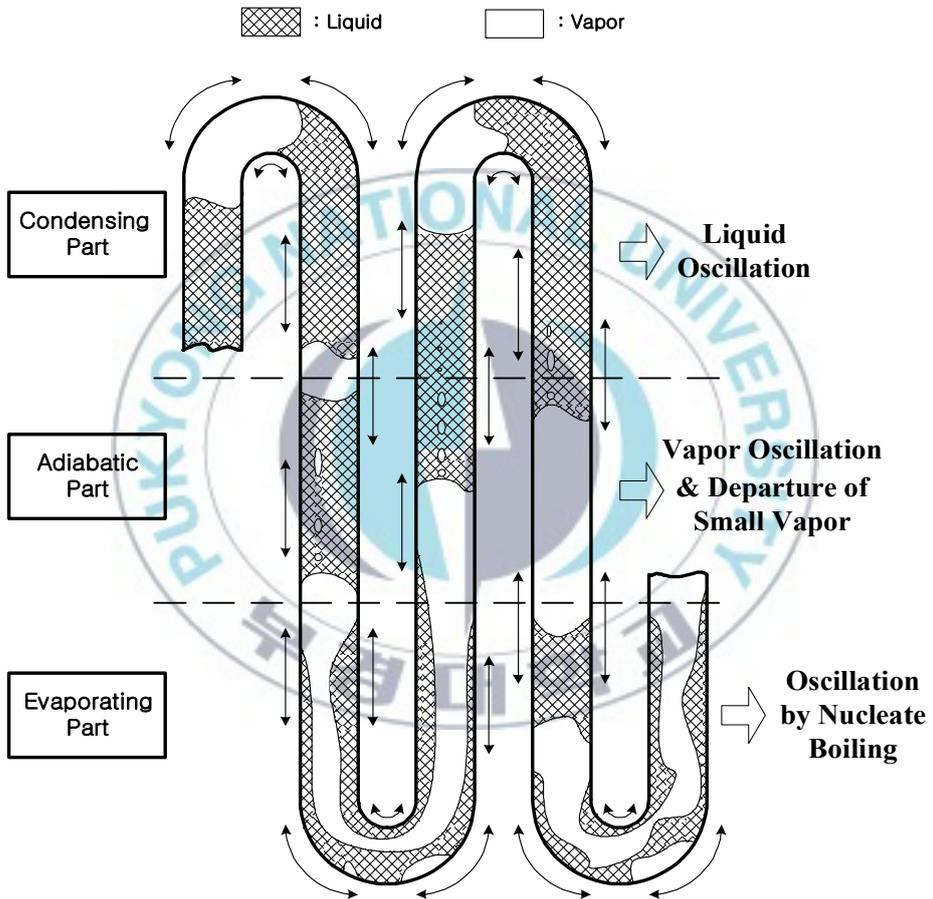
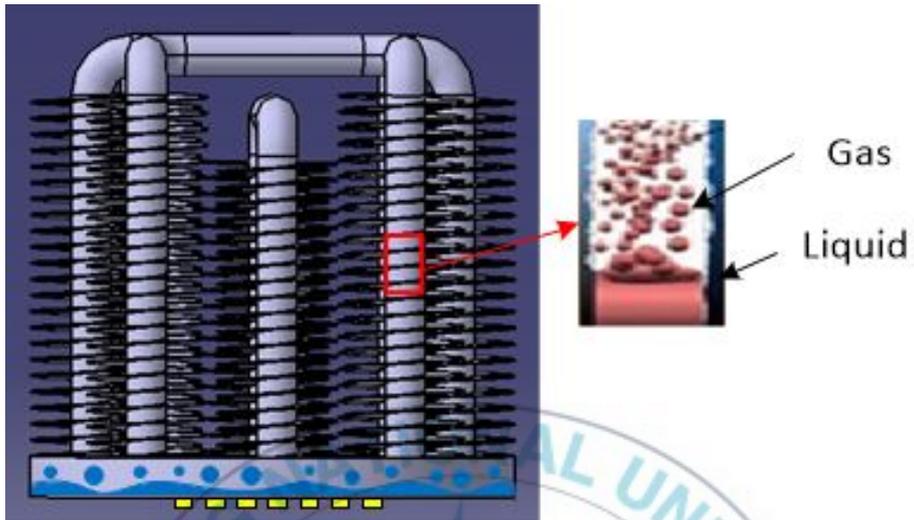
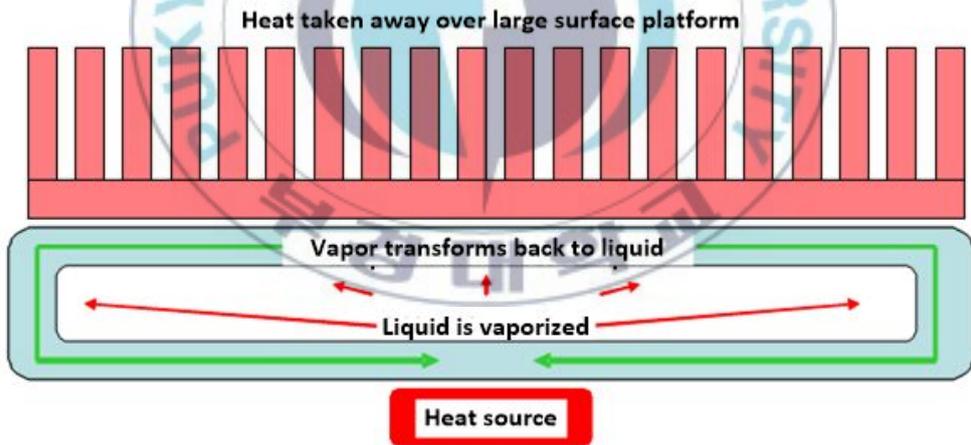


Fig. 11 Heat flow by working fluid



(a) Horizontal fin type



(b) Vertical fin type

Fig. 12 Basic concept of VCTHP

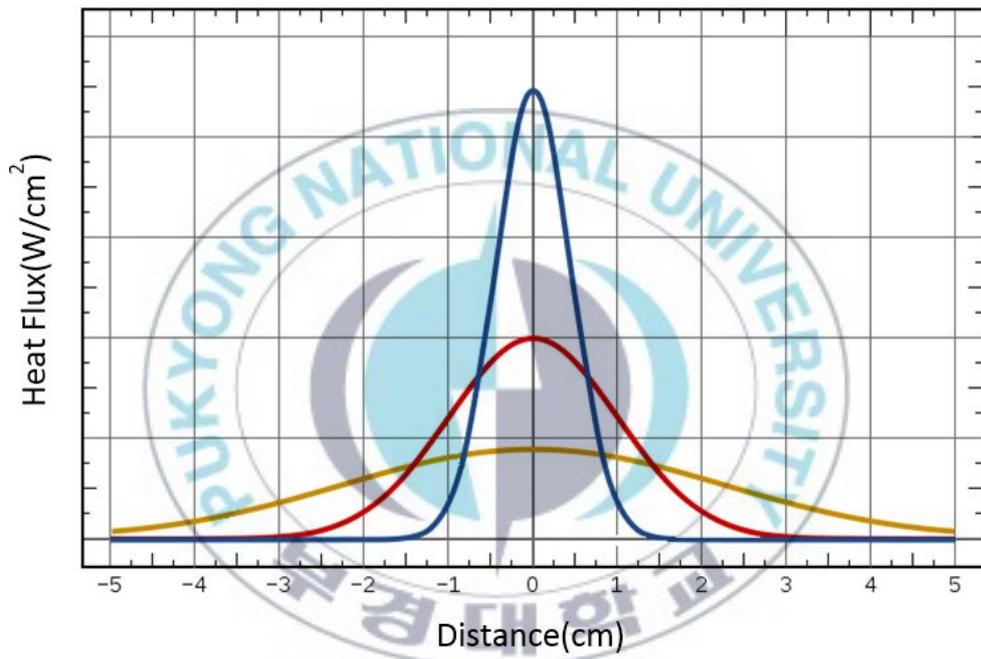


Fig. 13 Schematic of heat distribution

2.1.2 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, 증발 잠열 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 1은 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.[6] 하지만 이러한 온도 범위는 매우 넓기 때문에 효과적인 히트파이프 성능을 얻기 위해서 이러한 작동 온도에 따른 열수송 성능에 미치는 작동유체 열물성의 영향을 인지할 필요가 있다. 그러므로 히트파이프의 정확한 설계를 위해, 작동 유체의 열물성을 통해서 열수송 성능을 예측할 수 있는 평가지수인 Merit number[7]를 이용하며, 일반적으로 Merit number의 값이 클수록 열수송 성능이 우수하다고 알려져 있다. 히트 파이프의 경우는 식 (1)과

같으며,

$$M_h = \frac{\rho_f \sigma_f h_{fg}}{\mu_f} \quad (1)$$

써모사이폰의 경우는 식 (2)와 같다.

$$M_t = \left[\frac{(k_f)^3 (\rho_f)^3 h_{fg}}{\mu_f} \right]^{0.25} \quad (2)$$

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. 14~15는 작동온도(240~360 K)에서 워형 히트 파이프와 써모사이폰에 사용되는 대표적인 작동 유체의 평가 지수를 나타낸 것이다.

기존의 Merit number는 워형 히트 파이프나 써모사이폰의 경우에 적용이 가능하도록 각각 제시되어 있으며 PHP에 적용할 수 있는 기준이 아직까지는 명확하게 정립되지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 Table 2에 나타낸 것과 같이 저온용(150~750 K)으로 사용되는 작동 유체 중에서 열적, 물리적으로 안정 상태에 있으며, 시험부의 재료인 동에 화학적 반응을 보이지 않는 작동 유체로 R-134a와 R-141b를 선택하였다. M_h 와 M_t 가 높

은 R-22 냉매도 동에 화학적 반응을 보이진 않지만 CFC계열 냉매로 인한 오존파괴지수(ODP) 및 지구온난화지수(GWP)가 높음에 따라 최근 사용규제냉매로 대체냉매인 HFC계열 냉매인 R-134a와 R-141b를 선정하였다.



Table 1 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
Low Temperature (200~550 K)	Ethane	89.9 & 184.6	305.53&4.871	150~240
	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
	Methanol	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
Naphthalene	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

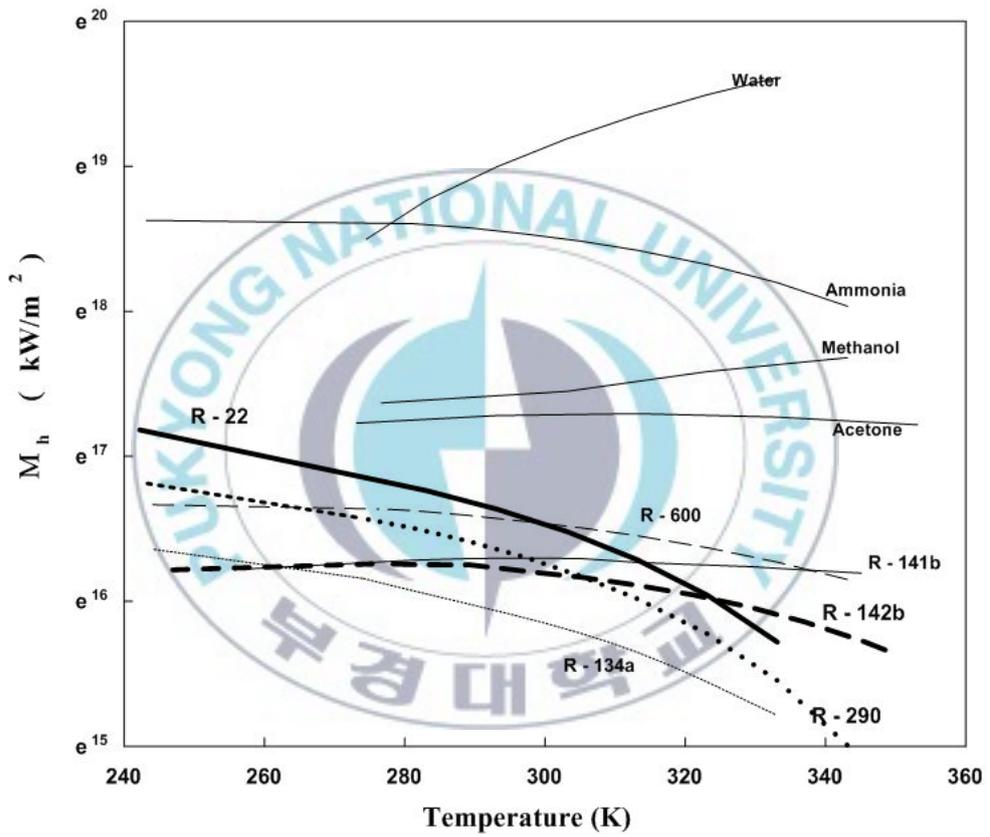


Fig. 14 Merit number of selected working fluids for heat pipe

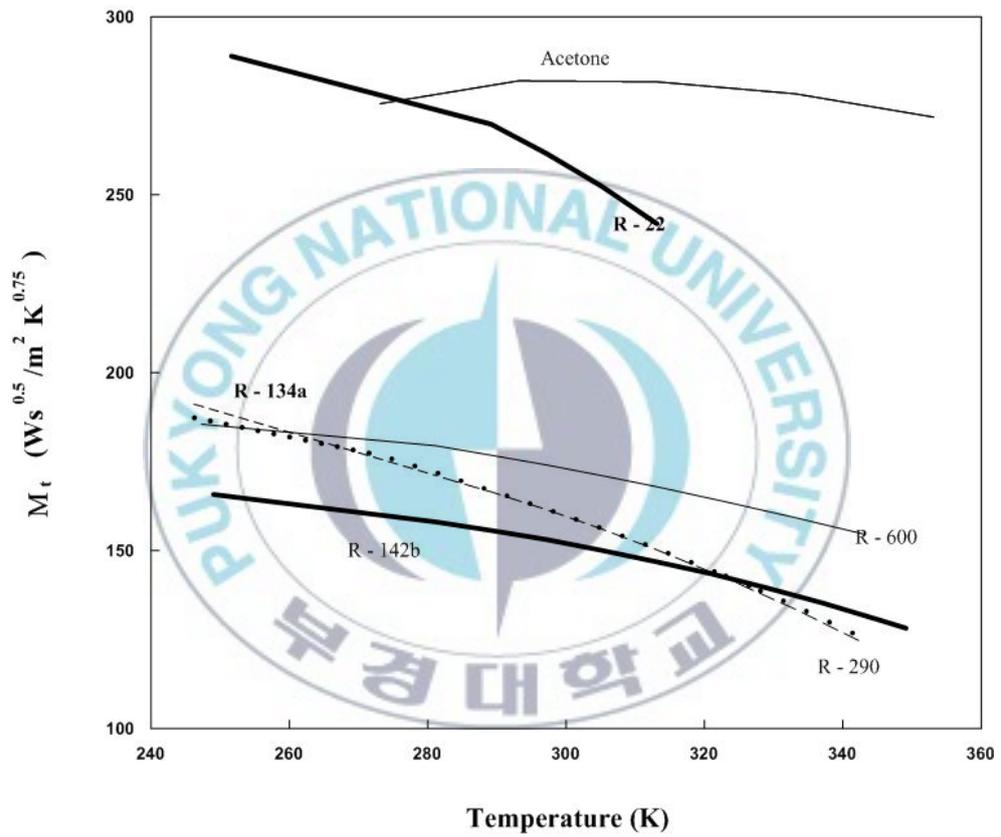


Fig. 15 Merit number of selected working fluids for thermosyphon

Table 2 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	
R-141b	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

2.1.3 안정작동을 위한 관경 상관식

赤地[8]는 PHP로서 작동이 확인된 관경범위는 내경 0.1~5.0 mm라고 보고하였다. 이러한 관경 범위에서는 봉입된 작동액이 표면장력에 의해 증기포와 작동액이 각각 플러그형상으로 유지되고, 이러한 형태의 기액이 항상 관내를 막는 형상을 유지한다고 하였다. Chandratilleke 등[9]은 증기포가 관내에 충전되어 흐르는 슬러그 상태가 되기 위한 관경 조건을 제시하였다. 또한, Rossi 등[10]은 PHP가 성공적으로 작동하기 위해서는 액플러그와 기포들이 관내에 공존해야 하며, 이를 위한 관경 조건은 0.5~3.0 mm 사이라고 하였다. 西尾 등[11]도 수직 PHP의 안정작동을 위한 내경 조건을 제시하였다. 다음은 각 연구자들이 제시한 PHP의 안정작동을 위한 관경 조건식들이다.

Chandratilleke의 상관식

$$D = (1.5 \sim 2.0) \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}} \quad (3)$$

Akachi & Polasek의 상관식

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f g}} \quad (4)$$

Nishio의 상관식

$$D < 1.84 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}} \quad (5)$$

여기서, g 는 중력가속도이다.

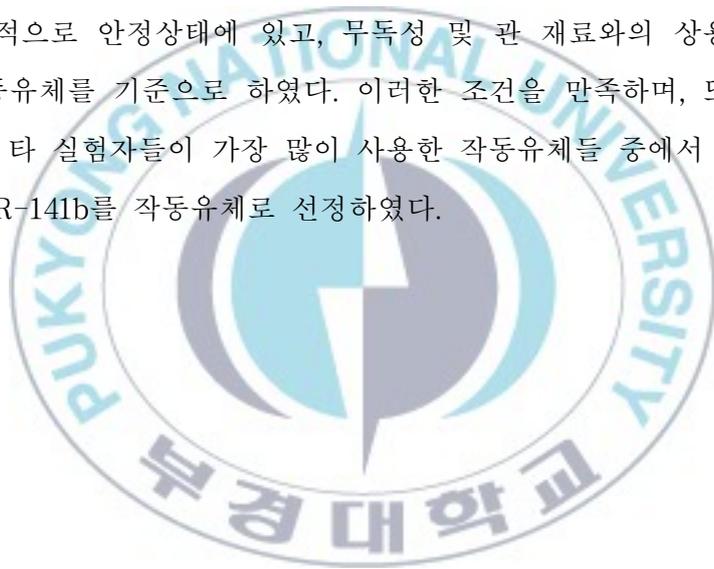
위의 상관식들에서 알 수 있듯이 최적관경은 작동유체의 표면장력과 중력이 평형을 이루어 모세관내에 기액 슬러그 형상이 유지될 수 있는 관 직경을 의미한다. Table 3은 여러 가지 작동유체의 작동온도에 따른 최적관경을 나타낸 것이다.

Table 3 Inner diameters(mm) for stable operating of PHP

	Chandratilleke et. al. $D = (1.5 \sim 2.0) \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}}$			Akachi et. al. $D = 2 \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_f g}}$			Nishio et. al. $D < 1.84 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}}$		
	Temp. (K)	303	333	353	303	333	353	303	333
H ₂ O	4.1~5.4	3.9~5.2	3.8~5.1	5.4	5.2	5.2	5.0	4.8	4.7
Ethanol	2.7~3.6	2.6~3.5	2.6~3.4	3.6	3.4	3.4	3.3	3.2	3.2
R134a	1.2~1.6	0.9~1.3	0.7~0.9	1.6	1.2	0.8	1.5	1.2	0.8
R141b	1.8~2.4	1.7~2.2	1.6~2.1	2.4	2.2	2.2	2.0	2.0	2.0

관경이 큰 경우, PHP가 안정작동하기 위해서는 표면장력이 커야 하고 액밀도가 작아야 한다. Table 3에서 볼 수 있듯이 작동온도가 증가함에 따라 최적 관경은 작아짐을 볼 수 있다. 이것은 온도가 증가할수록 표면장력은 작아지고 액의 밀도도 작아지지만, 표면장력/밀도의 비가 온도의 증가에 따라 작아지기 때문이다.

작동유체의 선정을 위해서 우선 PHP의 작동온도 범위는 상온을 중심으로 하여 0℃~60℃로 정하였으며, 이러한 온도 범위 내에서 작동유체가 열·물리적으로 안정상태에 있고, 무독성 및 관 재료와의 상용성을 만족하는 작동유체를 기준으로 하였다. 이러한 조건을 만족하며, 또한 종래의 연구에서 타 실험자들이 가장 많이 사용한 작동유체들 중에서 대체냉매인 R-134a, R-141b를 작동유체로 선정하였다.



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. 16와 Fig. 17을 보면 매끈한 표면보다 소결된 표면의 과열도가 적음에도 불구하고 heat flux가 높은 것을 알 수 있다.

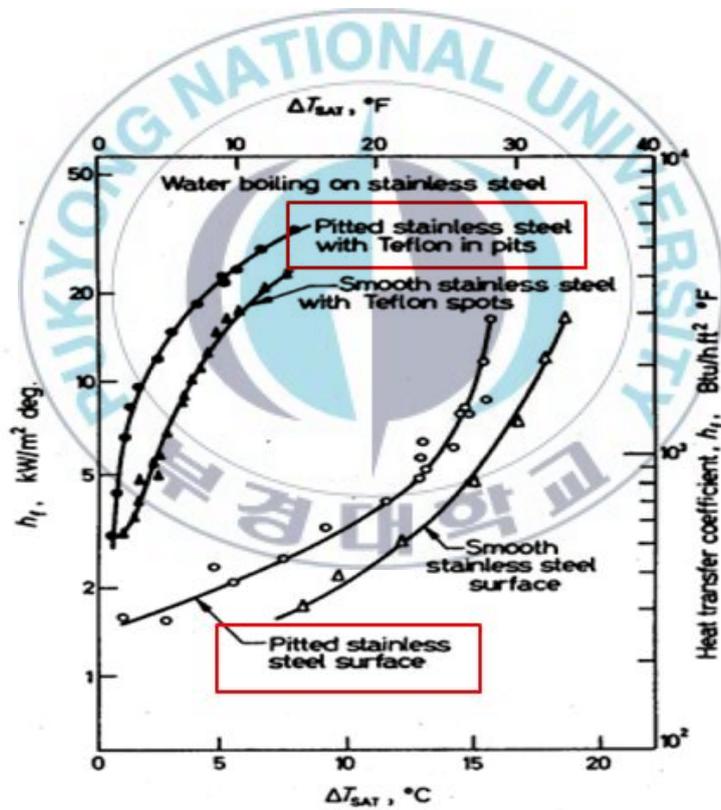


Fig. 16 Enhancement for water boiling at 101 kPa (1 atm) on a stainless steel surface having minute nonwetted spots (30-60 spots/ cm^2 , 0.25 mm diameter or less)

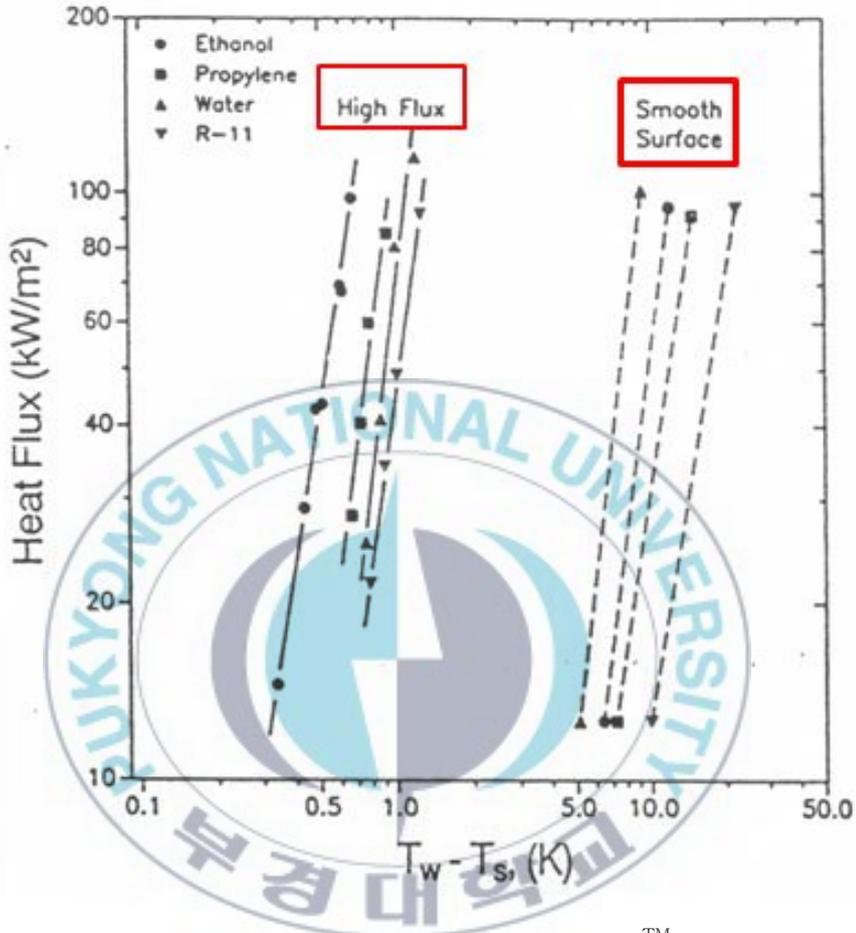


Fig. 17 Enhancement provided by porous High-Flux™ surface for three fluids boiling at 101 kPa (1 atm), as reported by Gottzmann et al. [1971,1973]

Table 4 According to particle size and thickness of the experimental conditions

	Diameter(d_p)	Thickness(δ)
Test 1	0.25 mm	0.4~4 mm
Test 2	0.10, 0.25, 0.50 mm	2.0 mm

Nishikawa, K.[12]와 Ito, T[13]는 작동유체 R-11, R-113을 사용하여 18 mm의 관경에 구리(Cu) 또는 청동(Bronze)으로 소결 코팅을 하여 입자의 크기와 두께에 따른 열전달 성능을 평가하는 실험을 Table 4와 같이 진행하였다. Test 1에서는 입자의 직경을 0.25 mm로 선정하고, 소결 코팅 두께에 따른 실험을 하였다. Test 2에서는 소결 코팅 두께를 2.0 mm로 선정하고, 입자의 직경을 0.10, 0.25, 0.50 mm로 실험을 하였다. 이 두 실험의 결과 모두는 δ/d_p 의 비율이 4를 만족할 때 가장 뛰어난 성능을 나타냈다.

Table 5 Experimental sintered-copper wick heat pipes

Wicks	Wick #1(nom. particle size 180 μm) Wick #2(nom. particle size 200 μm)
Model-1	Wick #1 & $t_{w1} = 0.5$ mm
Model-2	Wick #1 & $t_{w1} = 0.8$ mm
Model-3	Wick #1 & $t_{w1} = 1.1$ mm
Model-4	Wick #2 & $t_{w2} = 0.5$ mm
Model-5	Wick #2 & $t_{w2} = 0.8$ mm
Model-6	Wick #2 & $t_{w2} = 1.1$ mm

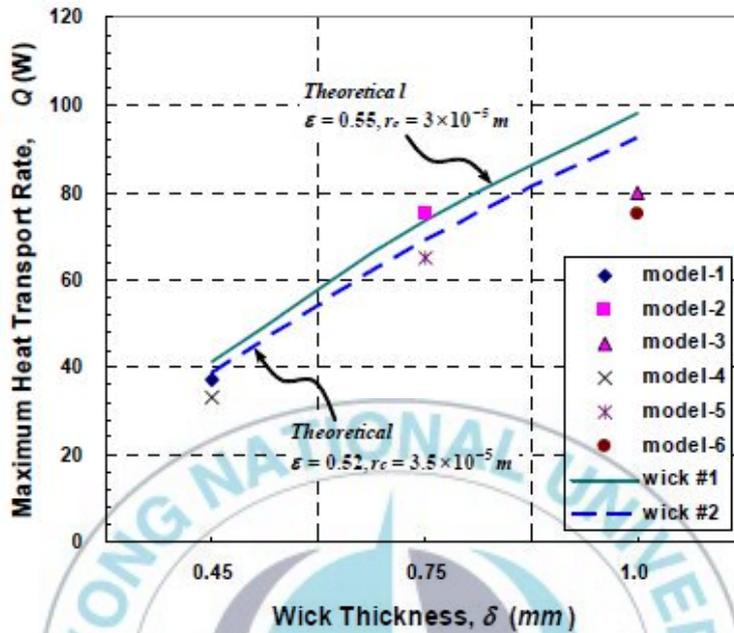


Fig. 18 Wick thickness vs maximum heat transport rate at $T_o=60^\circ\text{C}$, $\theta=30^\circ$

또한 김근배[14]는 Table 5와 같이 실험을 진행하여, Fig. 18과 같이 Model-2와 Model-3에서 뛰어난 열전달 성능을 얻었다. 즉 입자의 크기가 0.18 mm이고 두께는 0.8~1.1 mm 일 때 가장 효과가 뛰어났다. Nishikawa의 식 δ/d_p 에 따르면 Model-2의 값은 4.44, Model-3은 6.11로 Model-2의 값이 더 신뢰성이 있다.

따라서 높은 열전달 효율을 얻기 위한 입자의 크기는 180~250 μm , 소결 코팅의 두께는 0.8~1.0 mm이다. 이 조건으로 챔버의 전열면에 청동(Cu 89.65%, Sn 10%, P 0.35%) 파우더를 소결 코팅하였다. 공정은 Fig. 19 에 나타내었다.

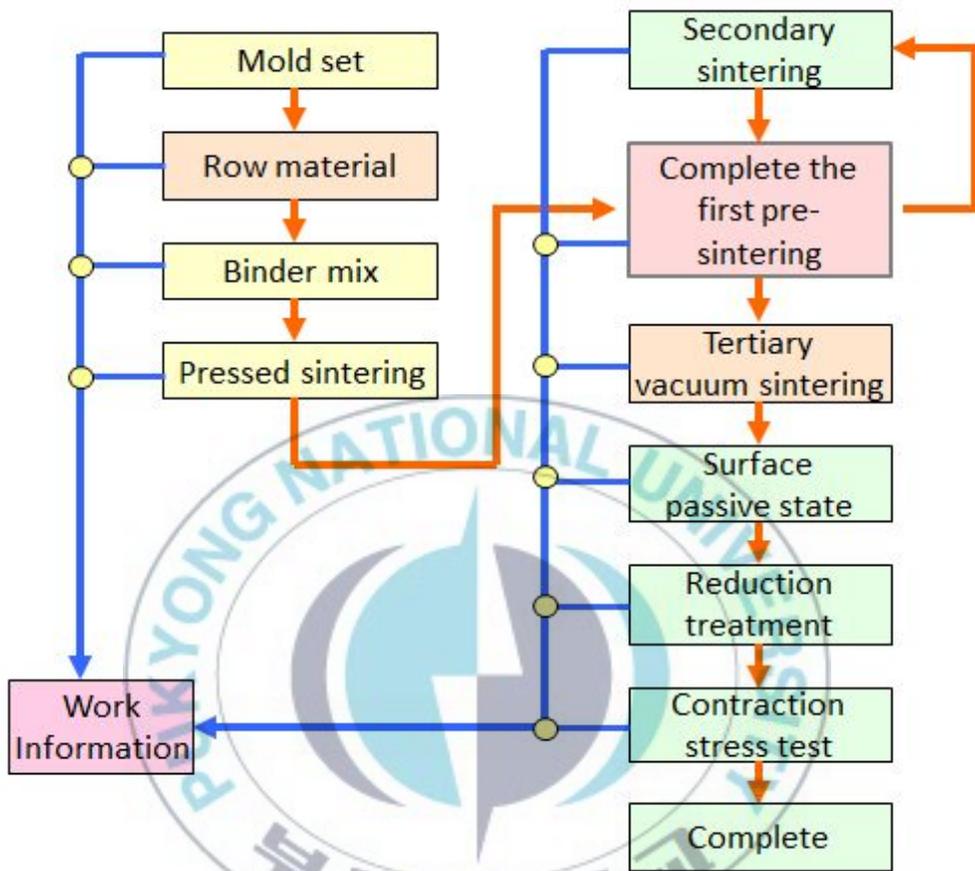


Fig. 19 Schematic of sintering process

공정 : 분말혼합 → 분말분산코팅 → 소결 → 완성

i) 분말혼합 : 분말과 바인더의 결합.

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

iii) 소결조건 : 800℃에서 30분간 유지 후 냉각.



Fig. 20 The picture of sintering on heating surface

Fig. 20은 소결 코팅한 상태의 전열면이며, 소결 전의 챔버 체적은 매우 작기 때문에, 소결로 인한 체적의 감소가 불가피할 것이라 생각된다.

2.3 LED에서의 열 저항

일반적으로 Fig. 21에서처럼 어떤 시스템이 열적 평형에 도달한 상태에서, 두 개의 등온면 A_1 , A_2 사이에 발생하는 열전달량 q 는

$$q = \frac{T}{R_\theta} = \frac{T_1 - T_2}{R_\theta} \quad (6)$$

로 표시된다. 이 때 T_1 은 A_1 의 온도, T_2 는 A_2 의 온도이며, 열전달량은 A_1 에서 A_2 로 흐르는 시간당 열량(에너지)을 의미한다.

인가된 전기에너지는 LED의 P-N접합에서 극히 일부 빛 에너지로 변환되고, 대부분의 에너지는 접합에서 발생하는 열에너지로 변환된다. 따라서 접합에서 발생하는 시간당 열에너지는 Q_e 는 인가되는 시간당 전기 에너지(전력)와 같다고 가정할 수 있다.

$$Q_e = I_f \times V_f \quad (W) \quad (7)$$

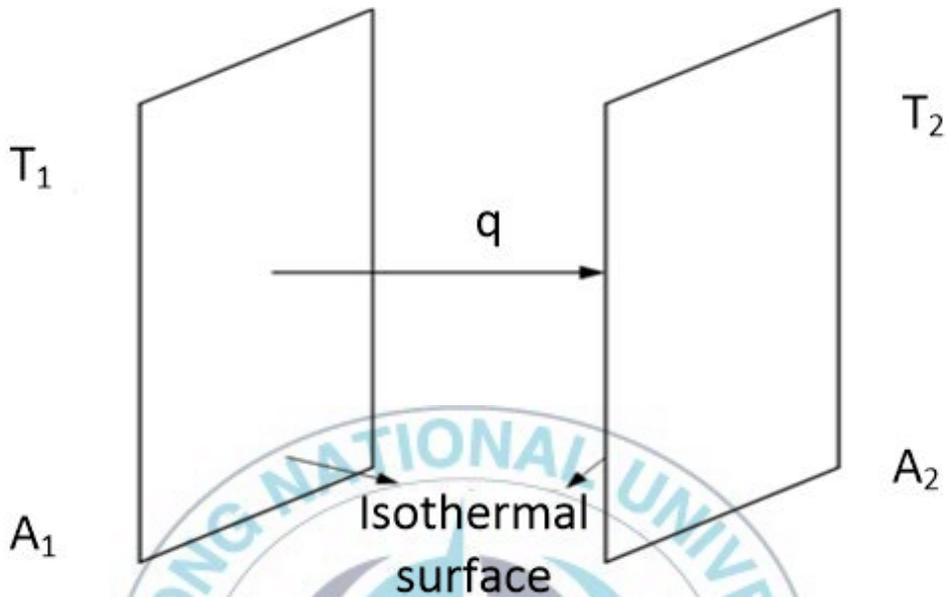


Fig. 21 Heat transmission amount generated between two isothermal surfaces

접합에서 발생하는 열에너지는 대부분 Cathode쪽 Lead Frame으로 전도에 의해 외부로 전달된다. Fig. 22는 계가 열적 평형에 도달했을 때의 모델이다. 여기서 A_1 은 Junction을 감싸고 있는 가상의 등온면이고, A_2 는 Model 바로 아래쪽의 Cathode Lead Frame을 포함하는 등온면, 그리고 A_3 는 전체 LED를 감싸고 있는 등온면이다. 이 때 각각의 등온면의 온도를 T_j , T_f , T_a 라 하고, 각 등온면 사이의 열 저항을 $R_{\theta_{j-f}}$, $R_{\theta_{f-a}}$ 라 하면 열적 평형상태에서 다음식이 성립한다.

$$Q_{j-f} = \frac{T_j - T_f}{R_{\theta_{j-f}}} \quad (8)$$

$$Q_{f-a} = \frac{T_f - T_a}{R_{\theta_{f-a}}} \quad (9)$$

$$Q_c = Q_{j-f} = Q_{f-a} \quad (10)$$

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

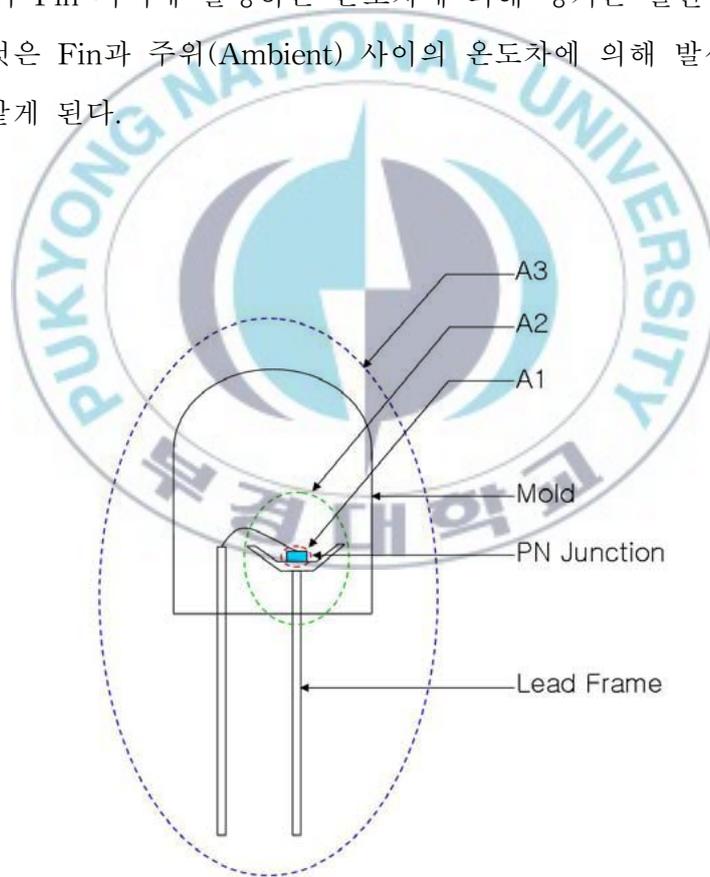


Fig. 22 LED model for heat measurement

2.3.1. 열 접촉저항

두 개의 표면이 서로 압착될 때 뽀족한 끝은 물체와 적절한 접촉을 하지만 끝은 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 열 저항을 제공하고 이러한 접촉면의 단위면적당 열 저항을 열 접촉저항(thermal contact resistance) R_{ct} 라 부른다. 열 접촉저항은 Newton의 냉각법칙과 유사한 방법으로 식 (11)과 같이 표시된다.

$$\dot{Q} = h_{ct} A \Delta T_{interface} \quad (11)$$

여기서 A 는 접촉면 면적이고 $\Delta T_{interface}$ 는 접촉면에서의 유효온도차이다. 대류열전달계수에 대응하는 h_{ct} 는 열 접촉 컨덕턴스(thermal contact conductance)라 부르고 식 (12)과 같이 표현한다.

$$h_{ct} = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T_{interface}} (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (12)$$

이것은 열 접촉저항과 다음과 같은 관계가 있다.

$$R_{ct} = \frac{1}{h_{ct}} = \frac{A \cdot \Delta T_{interface}}{\dot{Q}} (m^2 \cdot ^\circ C / W) \quad (13)$$

즉, 열 접촉저항은 열 접촉 컨덕턴스의 역수이다. 대체로 열 접촉 컨덕턴스는 문헌에서 보고되고 있으나, 열 접촉저항의 개념은 열전달에 있어서 접촉면의 영향을 설명하는데 더 좋은 수단으로 제공된다. 열 접촉저항은 접촉면에서의 온도강하 측정치를 정상상태에서의 열 유동으로 나눔으로써 식 (13)와 같이 구해질 수 있다.



제 3 장 실험장치 및 방법

3.1 6.5 W 주백색 LED 조명등의 실험 장치

Fig. 23은 6.5 W 주백색 LED 조명등(SI-I7R061140KR)의 열적 특성을 실험하기 위한 장치도이다. 장치는 크게 시험부, 전원입력부, 계측부, 데이터 처리부로 구성된다. 먼저 시험부로는 상용전구인 6.5 W 주백색 LED 조명을 선정하여 기초 열 분포 실험을 하였다. 선정된 6.5 W 주백색 LED 조명은 14개의 칩으로 구성되어 있고, 40 W 백열전구를 대체할 수 있으며, 광속은 550 lm, 발산각(Beam angle) 140°, 색 온도는 5000K, 칩 한 개당 열 유속은 11.6 W/cm^2 이다. Table 6과 Fig. 24에 6.5 W 주백색 LED 조명등의 자세한 사양과 그 형상을 나타내었다.



Fig. 23 Schematic diagram of experimental apparatus for conventional illumination

Table 6 Specification of 6.5 W cool white LED illumination

Type	6.5 W cool white LED illumination
Wattage	6.5 W
Incandescent lamp	40 W
Lumen output	550 lm
Illumination efficiency	85 lm/W
Voltage	AC 220 V
Input current	60 mA
Color temperature	5028±283K
Beam angle	140°
Number of LED chips	14 EA
Output per one chip	0.464 W
Chip area	0.04 cm ²
Heat flux	11.6 W/cm ²
Life time	15,000 hours



Fig. 24 Schematic of 6.5 W cool white LED illumination

전원 입력부는 입력 열량을 공급 조절할 수 있는 슬라이더스와 공급되는 전력을 측정할 수 있는 Digital power meter(Protronix co.)로 이루어져 있다. 발열체에 들어가는 전력량을 일정하게 유지하기 위해 슬라이더스를 이용하였다. 그리고 LED 조명의 열 저항을 구하기 위해 측정된 데이터는 Graphtec사의 GL-820을 통해 1초 간격으로 내장메모리로 실시간 저장되었다. Fig. 25는 실제 실험장치도의 사진이며 LED package 온도측정을 위한 $\Phi 0.127$ K-type 테프론 열전대선의 부착모습을 나타낸 것이다.



Fig. 25 Photograph of 6.5 W cool white LED illumination experimental device

3.2 6.5 W 주백색 LED 조명등의 실험 방법

본 연구에서는 선정된 6.5 W 주백색 LED 조명등의 열 분포 및 열 저항을 측정하기 위해 K-type(Chromega-Alomega) 열전대를 부착하여 다점의 온도를 전원공급 후 30분 동안 측정하였다. 각 열전대의 지점은 LED chip 온도, PCB board 온도, 조명등 표면온도, 마지막으로 외기온도를 측정하였다. 실험외기는 기술 표준원 KS 규격에 따른 외기온도 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 및 상대습도 45~85%, 자연대류상태에서의 시험 기준에 따라 측정하였다.



3.3 수평핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 장치

본 연구에서는 VCTHP를 이용한 6.5 W 주백색 LED 조명등의 방열 설계를 위해 우선적으로 상용전구 6.5 W 주백색 LED 조명등의 온도 분포 실험을 통해 LED 패키지의 열 저항을 알아본 후, 이 실험을 토대로 하여 LED 방열 설계를 위한 VCTHP의 형상을 구상하여 Fig. 23 과 Fig. 24에 나타내었다. Fig. 26은 VCTHP의 증발부측으로써 베이퍼 챔버의 재질은 구리이며 폭은 상용전구와 동일한 65 mm이고, 높이는 5 mm로 용기 내 체적은 8.84 cc이다. 베이퍼챔버 용기의 설계 조건은 작동유체 R-134a와 R-141b의 작동온도 조건과 압력에 대한 허용응력과 안전율을 고려하여 식(14)에 따라 상판과 하판의 두께는 각각 1 mm, 식(15)에 따라 원주방향의 두께는 1.2 mm로 설계하였다.[15]

Fig. 27은 본 연구에서 설계한 VCTHP의 형상으로 수평핀의 전열면적은 0.062 m²이다. Table 7과 같이 수평핀 VCTHP의 제원을 나타내었다.

$$t = \frac{PD}{2SE + 0.4P} + C \quad (14)$$

$$t = \frac{PD}{SE - 0.6P} + C \quad (15)$$

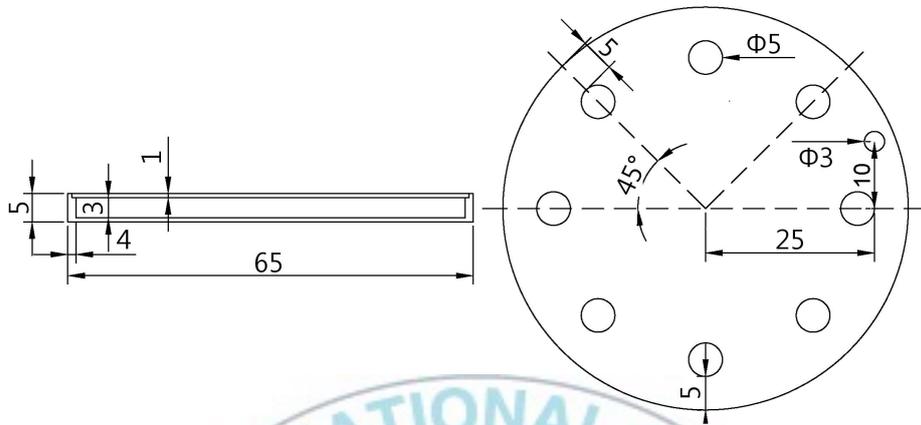


Fig. 26 Schematic of vapor chamber container

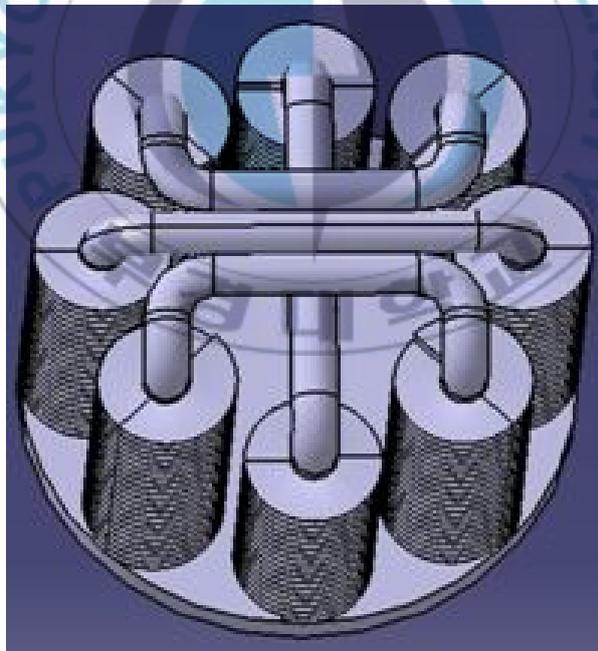


Fig. 27 Schematic of VCTHP
(Horizontal fin type)

Table 7 Specification of VCTHP
(Horizontal fin type)

Vapor chamber type design specification		
	Type	Vapor chamber
Condensation part	Copper tube (O.D.)	4.8 mm
	Copper tube (I.D.)	3.3 mm
	Height	46 mm
	Fin materials	Aluminum
	Fin type	Horizontal
	Fin tube	4 EA
	Heat transfer area of fin	0.062 m ²
Vapor chamber	Material	Copper
	Diameter	Φ65
	Height	5 mm
	Heat transfer surface	Plain / Sintering
Total volume		8.84 cc

Fig. 28은 VCTHP를 이용한 LED 조명등의 방열 성능을 알아보기 위해 구성된 실험 장치이다. 시험부인 VCTHP, 전원입력부, 온도를 측정하기 위한 계측부로 구성된다. 입력열량은 전력전산기(Protronix co.)로 측정하였고, 계측부는 K-type(Chromega-Alomega) 열전대에서 측정한 온도를 표시하는 Graphtec사의 GL-820과 데이터를 분석하기 위한 PC로 구성하였다.

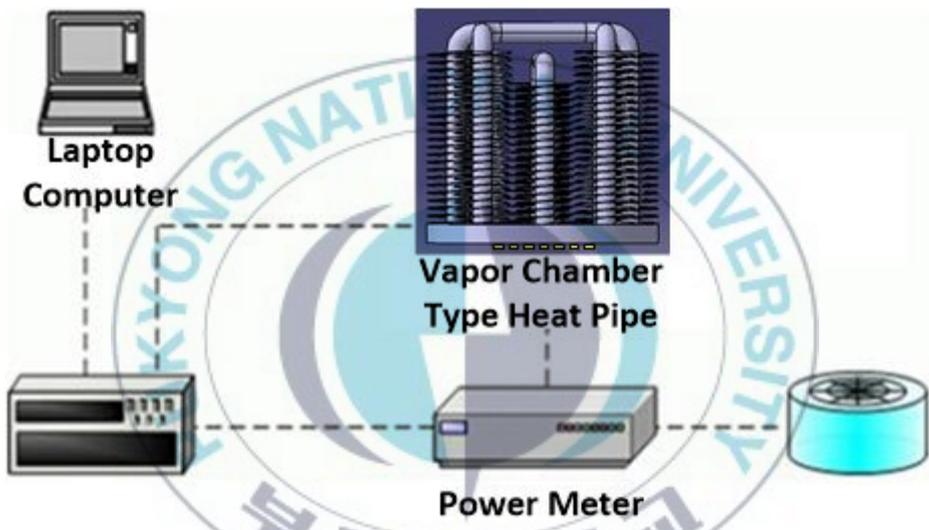


Fig. 28 Schematic diagram of experimental apparatus for 6.5 W cool white LED illumination using VCTHP

Fig. 29는 실제 실험장치도의 사진이며 VCTHP를 이용한 6.5 W 주백색 LED package 온도 측정을 위한 열전대 부착모습을 나타낸 것이다. 측정오차 범위를 줄이기 위해 LED chip 및 PCB board 등 다점 온도를 측정하였다.

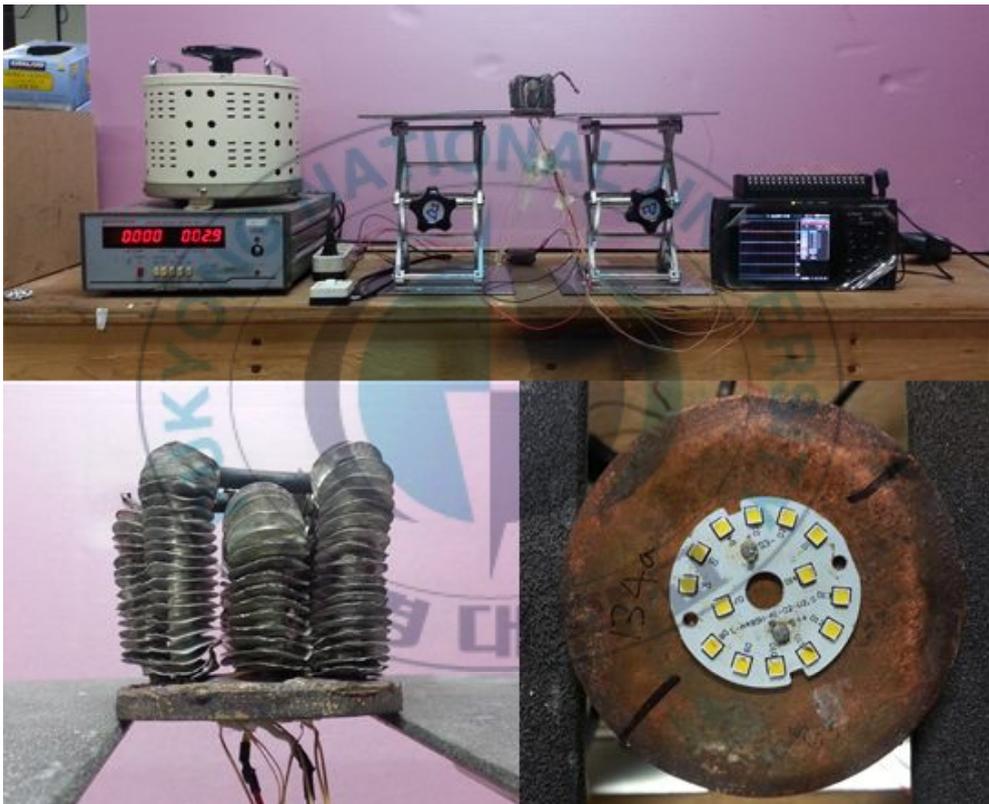


Fig. 29 Photograph of horizontal fin type LED illumination experimental device

3.4 수평핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 방법

본 연구에서는 VCTHP 내부에 작동유체를 충전하기 위해 Fig. 30의 로터리펌프(Rotary pump)와 확산펌프(Diffuser pump)를 이용하여 고진공상태(2.0×10^{-5} torr)로 2시간 동안 유지시켰다. 그 후 냉매충진실린더(HPG-10, Taiatsu)로 작동유체를 충전하였다. 조명등의 방열성능을 알아보기 위해 각 열전대의 지점은 Fig. 31과 같이 LED chip 온도, PCB board 온도, 베이퍼챔버 표면온도, 튜브의 상·하부 온도, 핀 온도, 마지막으로 외기온도를 측정하였다. 자연대류 냉각 방식으로 외기온도는 기술표준원 KS 규격에 따라 $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 및 상대습도 45~85%로 실험하였다. Table 8에는 충전율에 따른 최적냉매를 선정하고, 그 선정된 냉매로 내부 전열면을 소결 코팅한 베이퍼챔버에 충전하여 기존 베이퍼챔버와 비교하는 실험조건을 나타내었다. Test 1에서는 작동유체 R-134a를 충전하여 VCTHP의 최적충진량을 찾기 위해 냉매 충전량을 전체체적의 25%, 35%, 45%로 변경해가면서 실험을 진행하였다. Test 2에서도 동일한 조건으로 냉매만 R-141b로 바꾸어 실험을 진행하였다. Test 3은 앞선 Test 1과 Test 2에서 방열성능이 뛰어난 냉매를 선정하여 그 선정된 냉매로 동일한 조건으로 소결 코팅된 베이퍼챔버에 충전하여 실험하였다. 수평핀 Vapor chamber type LED 조명등의 열 분포 및 열 저항을 측정하기 위해 K-type(Chromega-Alomega) 열전대를 부착하여 다점의 온도를 전원공급 후 30분 동안 측정하였다.



Fig. 30 Picture of high vacuum device

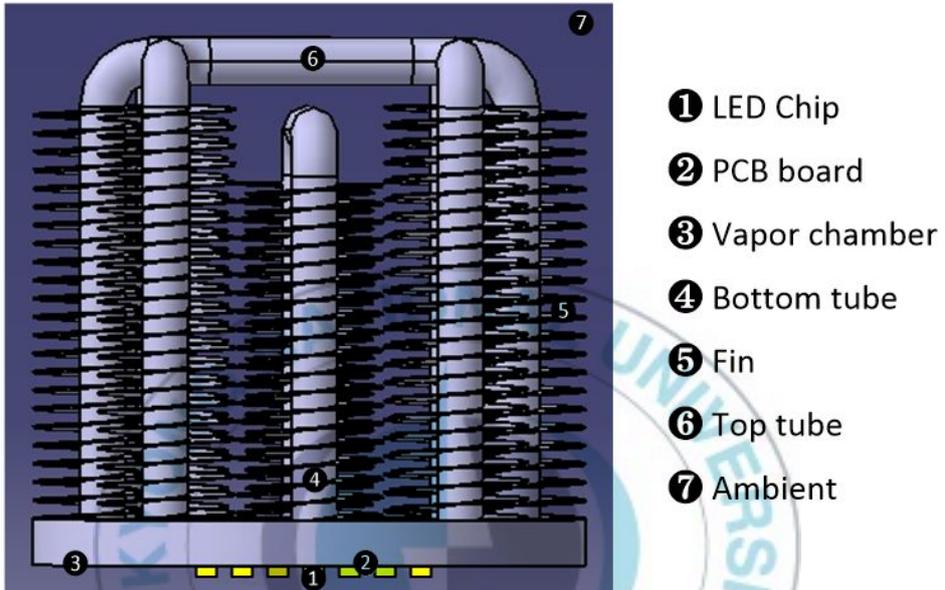


Fig. 31 Attachment position of thermocouples
(Horizontal fin type)

Table 8 Test conditions of horizontal fin VCTHP

Test	1	2	3
Working fluids	R-134a	R-141b	R-141b
Charging ratio(%)	25, 35, 45	25, 35, 45	25, 35, 45
Heat transfer surface	Plain		Sintering
Input power(W)	6.5		

3.5 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 장치

수직핀 VCTHP는 수평핀과는 다르게 응축부에 구리관으로 형성되어 내부에 작동유체가 흐르는 것이 아니라 증발부 측과 일체형으로 동일한 구리 재질의 수직사각 핀만 형성되어 있다. 핀 면적은 수평핀 VCTHP와 동일하게 제작하였고, 증발부의 형상은 작동유체가 환원되어 쉽게 재증발이 가능하도록 역사다리꼴(▽) 형상으로 설계하였다.

그리고 기존 방열부의 수직핀을 잘라 형태를 변형한 실험도 추가적으로 실시하였다. 방열면적은 동일하게 0.062 m^2 이고 가로×세로×높이의 길이는 $59 \times 65 \times 34 \text{ mm}$ 이며 그 외 조건은 동일하다.

Fig. 32와 Fig. 33은 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 장치도 사진이며, Table 9와 같이 수직핀 VCTHP의 제원을 나타내었다.

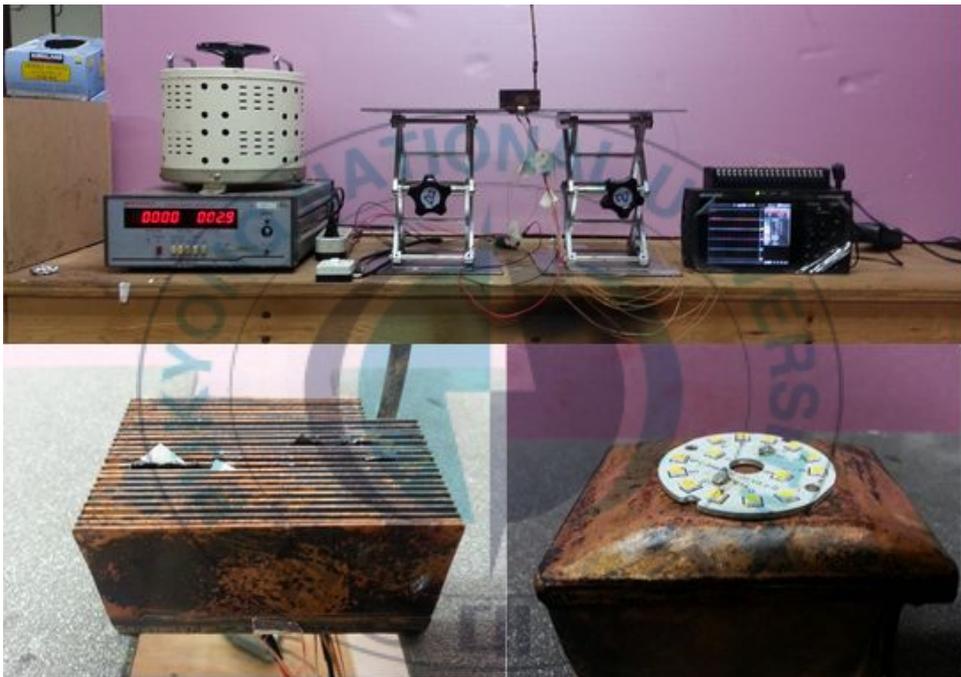


Fig. 32 Photograph of vertical fin type LED illumination experimental device



Fig. 33 Photograph of transformed vertical fin type LED illumination experimental device

Table 9 Specification of VCTHP
(Vertical & Transformed vertical fin type)

Vapor chamber type design specification		
Fin type	Vertical	Transformed vertical
Heat dissipation part	Height	28 mm
	Fin materials	Copper
	Fin pitch	1 mm
	Heat transfer area of fin	0.062 m ²
Vapor chamber	Material	Copper
	Height	6 mm
	Heat transfer surface type	Sintering
Width×Length×Height	59×44×34 mm	59×65×34 mm
Total volume	10.5 cc	14.2 cc

3.6 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 실험 방법

수평핀 Vapor chamber type LED 조명등과 동일한 조건과 방법으로 진공펌프를 사용하여 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등에 작동 유체 R-141b를 충전하였다. 조명등의 방열성능을 알아보기 위해 각 열전대의 지점은 Fig. 34와 같이 LED chip 온도, PCB board 온도, 베이퍼 챔버 표면온도, 핀 온도, 마지막으로 외기온도를 측정하였다. 자연대류 냉각 방식으로 외기온도는 기술표준원 KS 규격에 따라 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ 및 상대 습도 45~85%로 실험하였다. Table 10에는 수직핀 VCTHP의 최적충진량을 찾기 위해 냉매 충전율을 전체체적의 35%, 45%, 55%로 변경해가면서 실험을 진행하였다. Test 1에서는 수직사각 핀 Vapor chamber type LED 조명등의 최적충진량과 열적성능을 알아보는 실험을 하였고, Test 2에서는 변형된 수직사각 핀 Vapor chamber type LED 조명등의 충전량과 방열성능을 알아보는 실험을 하였다. 각 LED 조명등의 열 분포 및 열 저항을 측정하기 위해 K-type(Chromega-Alomega) 열전대를 부착하여 다짐의 온도를 전원공급 후 30분 동안 측정하였다.

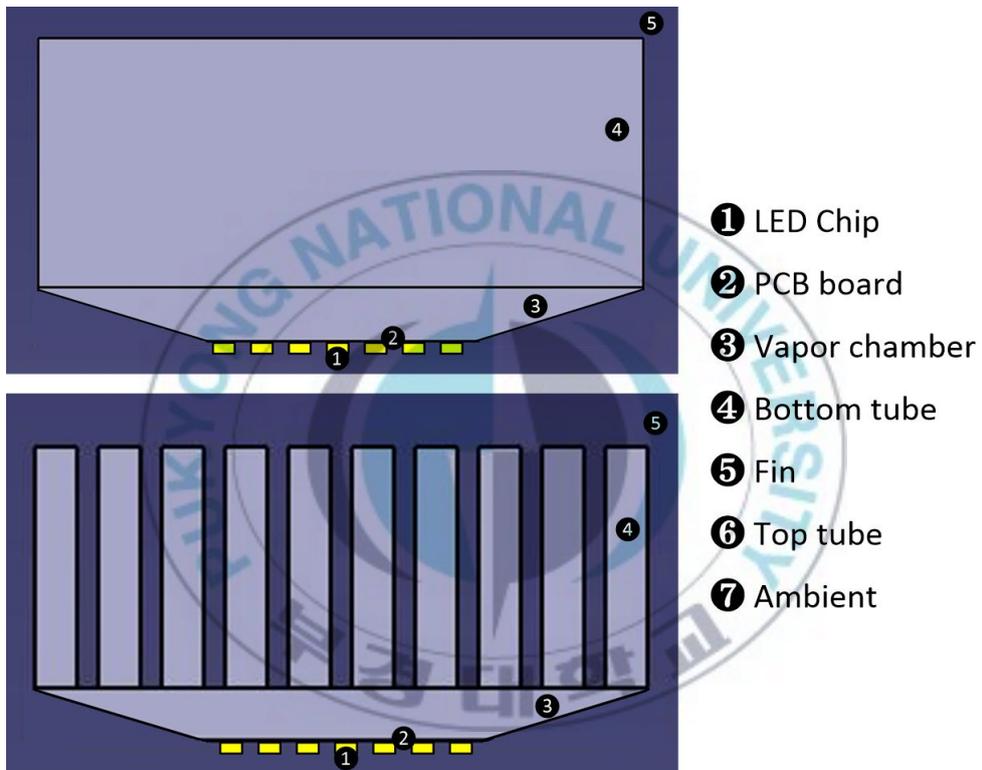


Fig. 34 Attachment position of thermocouples
(Vertical fin & Transformed vertical fin type)

Table 10 Test conditions of vertical fin VCTHP

Test	1	2
Fin type	Vertical	Transformed vertical
Working fluid	R-141b	
Charging ratio(%)	35, 45, 55	35, 45, 55
Heat transfer surface	Sintering	
Input power(W)	6.5	

3.7 Vapor chamber type heat pipe의 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 열 저항(R_{θ})이다. 열 저항은 해당 전력 소산에 대한 온도차의 비율로 정의 된다. R_{θ} 전체 열 저항($R_{\theta J-A}$)은 접합에서부터 주변에 이르는 열 경로의 개별 열 저항의 합으로 나타낼 수 있다. 열 경로의 각 저항에 해당하는 구성요소는 Fig. 35와 Fig. 36에 표시되어 있다. 각 저항의 실제 구성요소는 각각의 온도 노드 사이에 위치한다.[16]



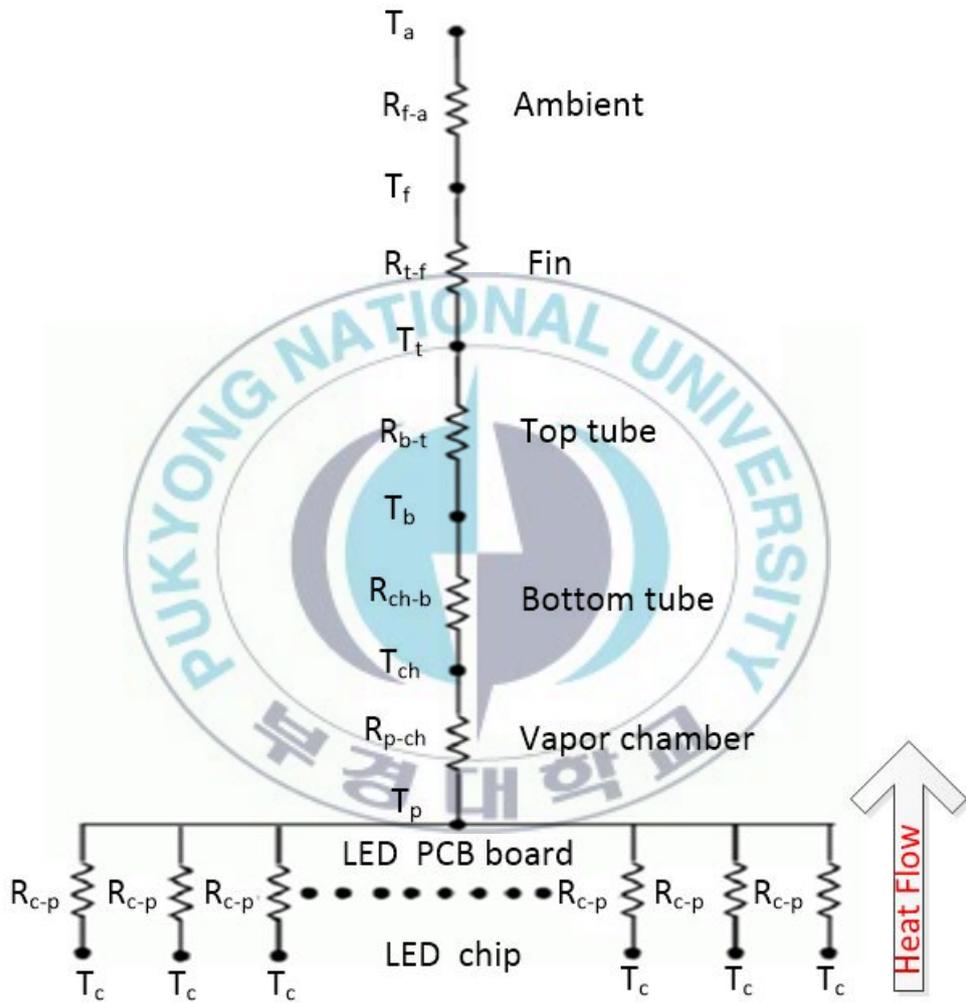


Fig. 35 A series circuit of horizontal fin VCTHP system thermal resistance

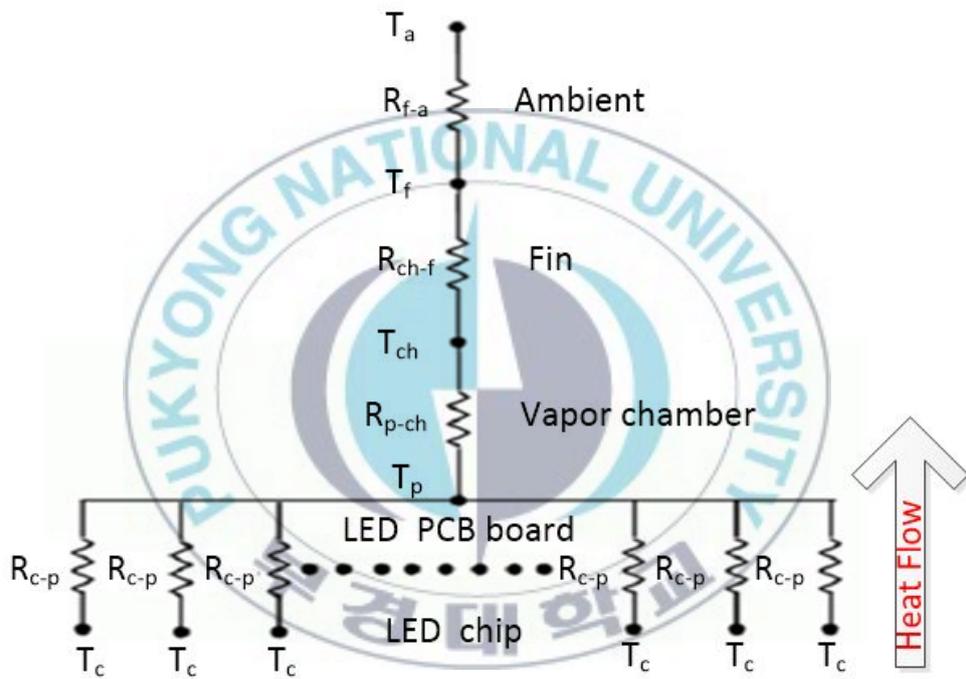


Fig. 36 A series circuit of vertical fin VCTHP system thermal resistance

제 4 장 실험 결과

4.1 6.5W 주백색 LED 조명등의 온도분포

Fig. 37은 전원 공급 후 30분 동안 소비전력에 따른 상용전구의 열적 성능을 나타낸 그래프이다. Table 11은 각 지점의 다점 평균온도를 측정하여 나타낸 표이다. 실험결과와 같이 LED chip온도가 136.6℃로 유지되는 것으로 보아 LED 조명의 광출력이 현저히 저하되는 현상을 초래하며, 조명의 수명 또한 단축되게 된다. 이에 따라 부품의 고신뢰성 확보를 위하여 열화 현상에 따른 LED chip 온도와 주위 온도가 일정 온도 이상 넘지 않도록 효과적인 방열 설계를 할 필요성이 있다.

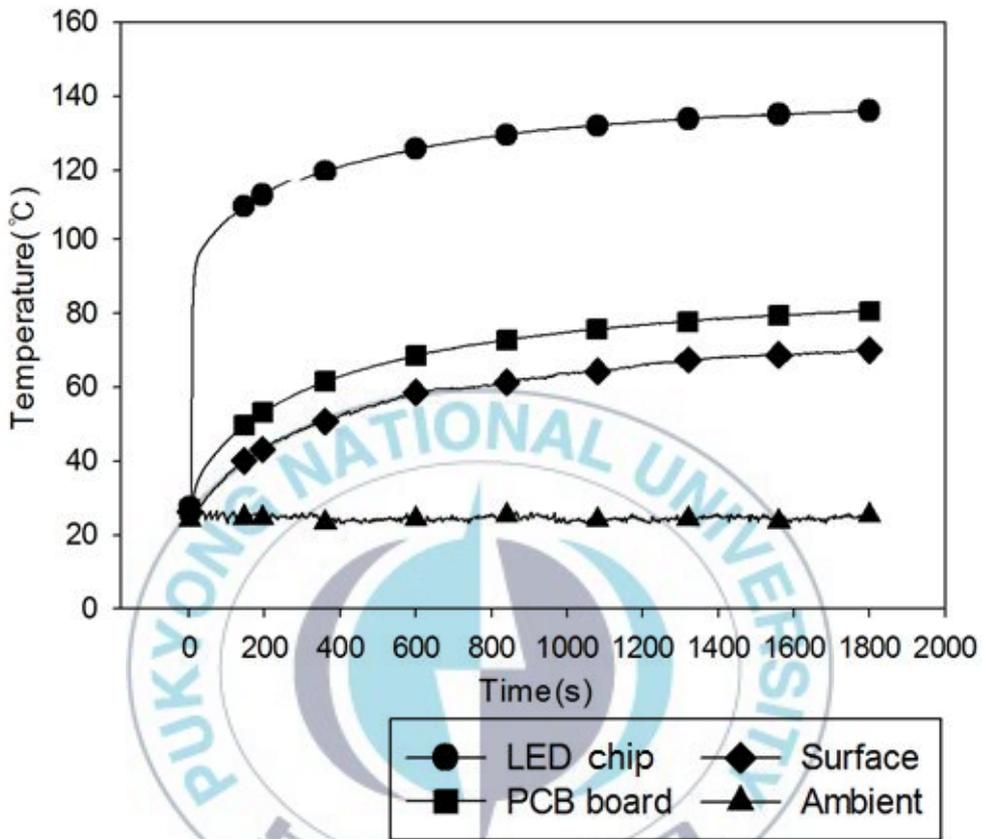


Fig. 37 Profile of conventional illumination temperature

Table 11 Temperature of conventional illumination

Type	Temperature(°C)	Illumination
LED chip	136.6	
PCB board	81.5	
Illumination surface	70.6	

4.2 수평판 Vapor chamber type LED 조명등의 온도분포

Table 12은 R-134a를 작동유체로 사용하여 충전율에 따른 평균온도와 열 저항 합을 나타낸 표이고, Fig. 38에 그래프로 나타내었다. 그 결과 충전율이 35%일 때 LED chip 온도가 101.1℃로 가장 낮게 유지되고 약 600s에서 안정화되었다.

Fig. 39와 Table 13은 작동유체 R-141b를 적용하여 나타낸 표와 그래프이며, 최적충진율은 35%임을 보여준다.

Fig. 40과 Table 14는 최적냉매로 선정된 R-141b 35%를 전열면이 소결 코팅된 VCTHP에 충전하여 실험한 수치들이다. 충전율이 35%일 때 LED chip 온도는 91.0℃, 총 열 저항 합은 10.84 ℃/W로 가장 낮게 유지되었다. LED chip 온도가 약 400s에서 안정화되었고, 충전율에 따라 최고 7.9℃ 차이가 났다. 소결 코팅된 VCTHP의 경우 LED chip 온도가 91.0℃로 일반표면과 비교시 9℃ 낮게 유지되었다.

그 결과 상용전구보다 소결 코팅된 VCTHP의 LED chip은 45.6℃, PCB board는 19.1℃ 낮게 유지되었다.

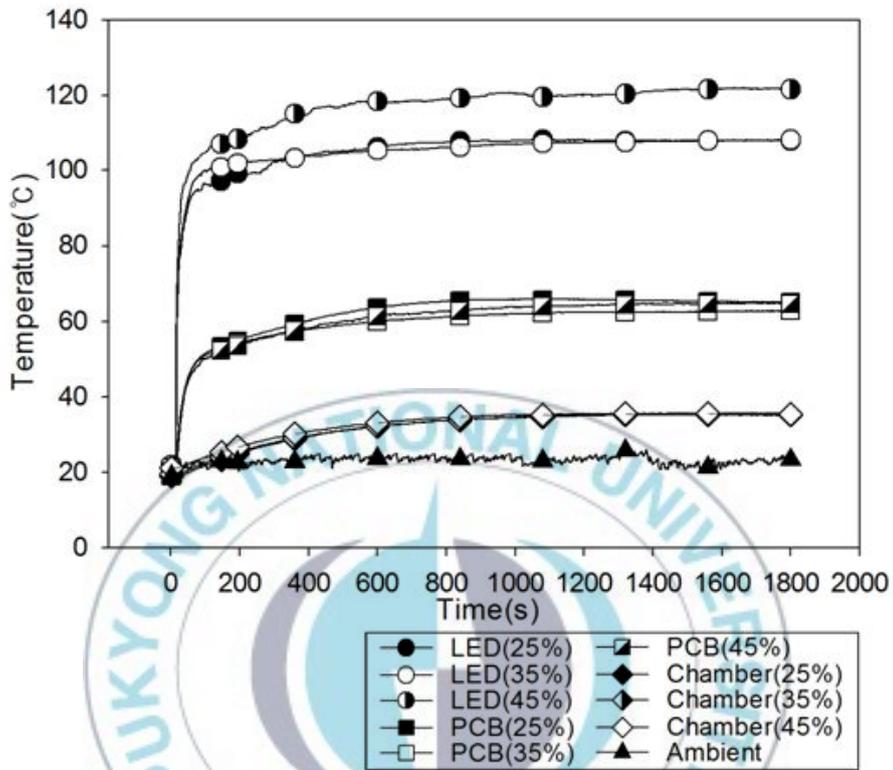


Fig. 38 Temperature of components with the charging ratio (Horizontal fin type, R-134a, Plain)

Table 12 Temperature & thermal resistance (Horizontal fin type, R-134a, Plain)

Charging ratio		25%	35%	45%
Temperature(°C)	LED chip	104.6	101.1	112.9
	PCB board	62.1	60.8	61.9
	Vapor chamber	34.4	35.4	33.7
	Bottom tube	34.1	35.1	33.3
	Top tube	32.8	32.5	32.2
	Fin	31.2	31.9	31.0
	Ambient	23.1	22.5	23.4
R_{total} (°C/W)		19.57	12.28	13.71

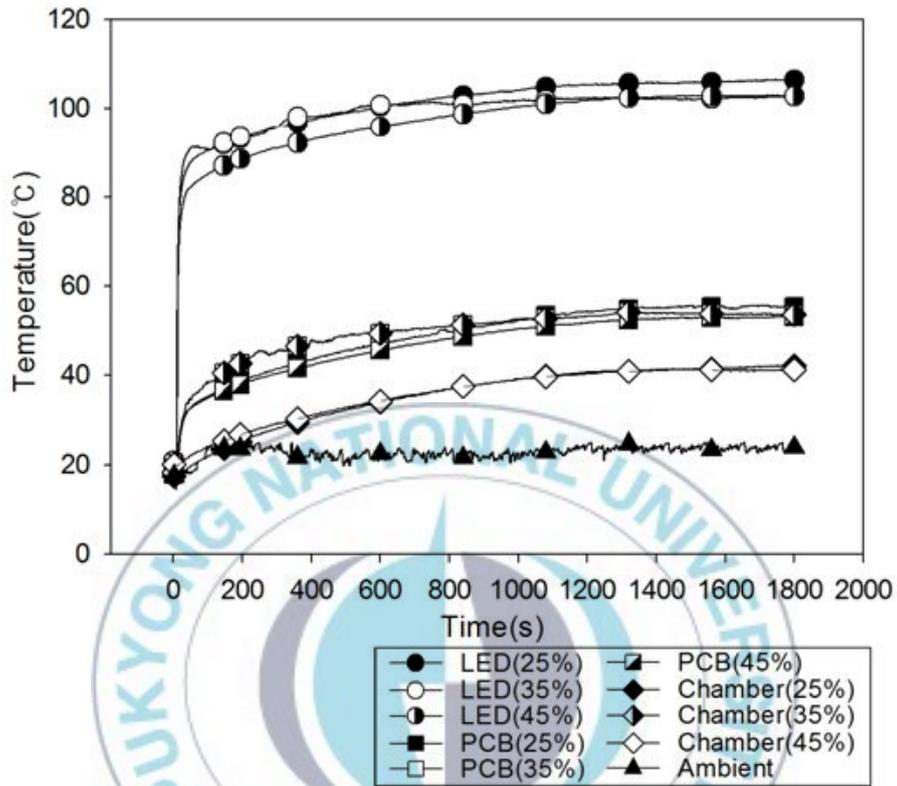


Fig. 39 Temperature of components with the charging ratio (Horizontal fin type, R-141b, Plain)

Table 13 Temperature & thermal resistance (Horizontal fin type, R-141b, Plain)

Charging ratio		25%	35%	45%
Temperature(°C)	LED chip	106.3	100.0	103.0
	PCB board	55.4	50.5	48.4
	Vapor chamber	42.0	41.1	41.4
	Bottom tube	40.5	35.3	38.8
	Top tube	39.5	33.9	38.7
	Fin	37.1	33.7	35.9
	Ambient	24.4	23.1	24.2
	R_{total} (°C/W)	12.59	11.81	12.11

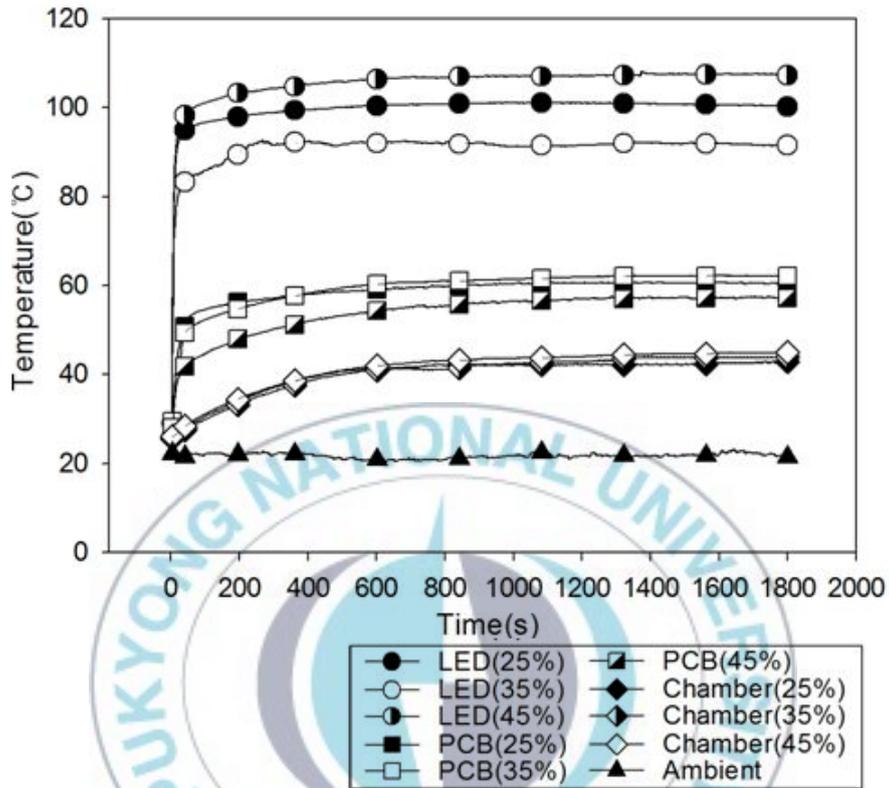


Fig. 40 Temperature of components with the charging ratio (Horizontal fin type, R-141b, Sintering)

Table 14 Temperature & thermal resistance (Horizontal fin type, R-141b, Sintering)

Charging ratio		25%	35%	45%
Temperature(°C)	LED chip	99.4	91.0	107.3
	PCB board	60.1	62.4	57.2
	Vapor chamber	43.8	44.9	45.0
	Bottom tube	41.2	40.2	43.4
	Top tube	40.0	38.9	41.6
	Fin	39.9	38.0	35.4
	Ambient	20.0	20.5	21.2
	R_{total} (°C/W)	12.21	10.84	13.21

4.3 수직핀 Vapor chamber type LED 조명등의 온도분포

Fig. 41은 냉매 충전율에 따라 전열표면이 소결코팅 되어 있는 수직핀 베이퍼챔버의 열적 성능을 나타낸 그래프이다. 데이터는 전원공급 후 30분 동안 1초 간격으로 측정을 하였다. 충전율에 따른 성능수치를 Table 15에 나타내었으며, 그 결과 충전율이 45%일 때, LED chip온도가 81.4℃로 가장 낮게 유지되었고, 열 저항도 9.11 ℃/W로 낮게 유지되었다.

Fig. 42는 수직핀 베이퍼챔버의 방열핀을 잘라 변형시켜 실험한 데이터를 나타낸 열적성능 그래프이다. 각 충전율에 따른 실험결과를 Table 16에 정리하여 나타내었으며, 충전율 45%에서 LED chip 온도와 열저항이 각각 77.3℃, 8.32 ℃/W로 가장 낮게 측정되었다. 이는 상용전구의 LED chip 온도보다 59.3℃ 낮은 수치이다.

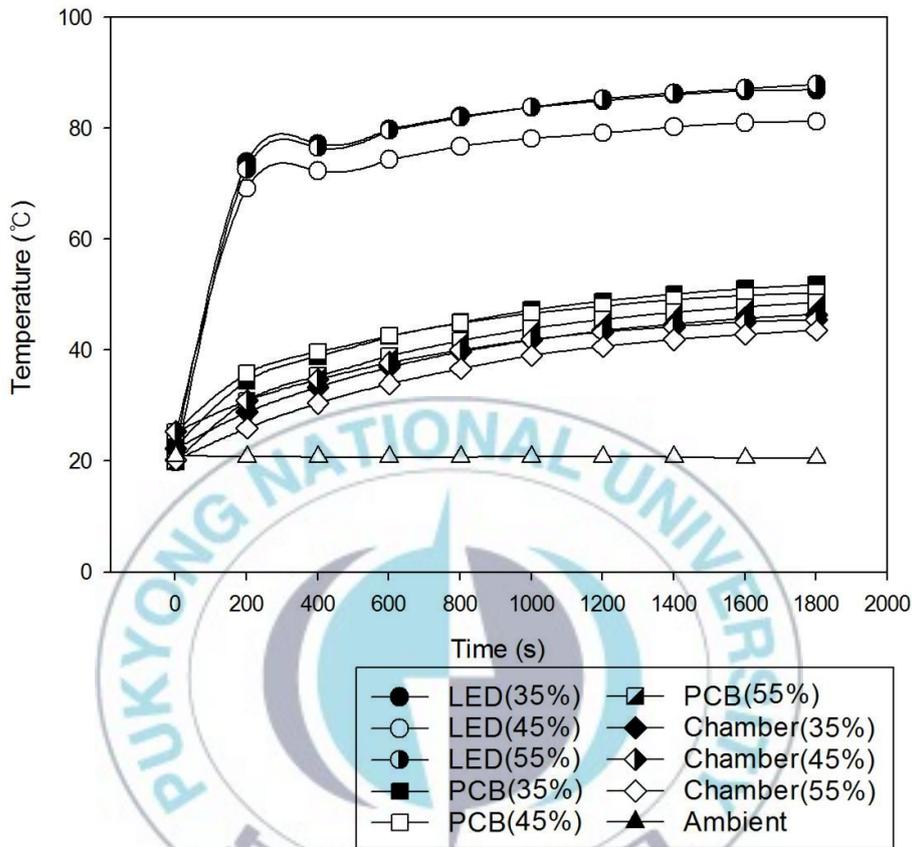


Fig. 41 Temperature of components with the charging ratio (Vertical fin type, R-141b, Sintering)

Table 15 Temperature & thermal resistance (Vertical fin type, R-141b, Sintering)

Charging ratio		35%	45%	55%
Temperature(°C)	LED chip	87.4	81.4	88.0
	PCB board	51.6	50.5	48.6
	Vapor chamber	46.5	45.6	43.7
	Fin	45.7	44.8	42.8
	Ambient	22.9	22.1	22.3
$R_{total}(\text{°C/W})$		9.90	9.11	10.09

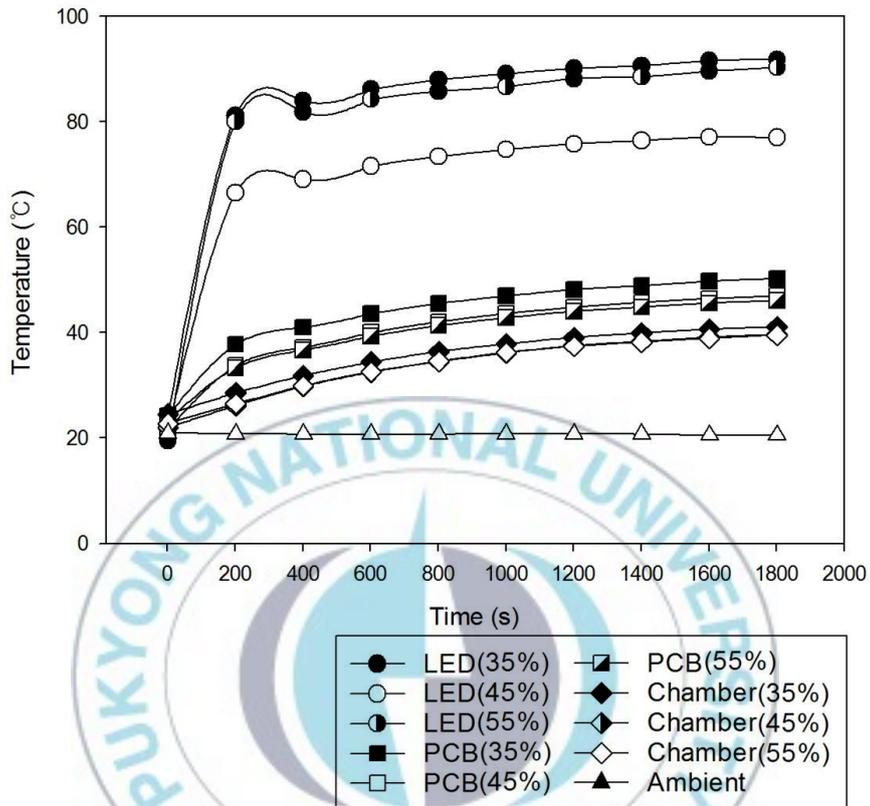


Fig. 42 Temperature of components with the charging ratio (Transformed vertical fin type, R-141b, Sintering)

Table 16 Temperature & thermal resistance (Transformed vertical fin type, R-141b, Sintering)

Charging ratio		35%	45%	55%
Temperature(°C)	LED chip	87.4	77.3	90.3
	PCB board	50.3	47.0	45.5
	Vapor chamber	41.1	39.7	38.8
	Fin	40.1	39.0	37.9
	Ambient	22.8	23.1	22.3
R_{total} (°C/W)		9.92	8.32	10.45

4.4 6.5W 주백색 LED 조명등의 실험 장치별 LED chip 온도 및 열저항 비교

Fig. 43은 베이퍼챔버 형태와 충전율에 따른 LED chip 온도를 나타낸 것이며, 다점의 LED chip 온도를 측정하여 평균값으로 나타낸 수치이다. 수평핀 베이퍼챔버에서는 작동유체가 R-141b, 충전율은 35%, 전열면은 소결 코팅되어 있는 조건에서 LED chip 온도가 91.0°C로 가장 낮게 측정되었으며, 수직핀 베이퍼챔버에서는 작동유체가 R-141b, 충전율은 45%, 전열면이 소결 코팅되어 있는 조건에서 LED chip 온도가 77.3°C로 가장 낮게 유지되었다.

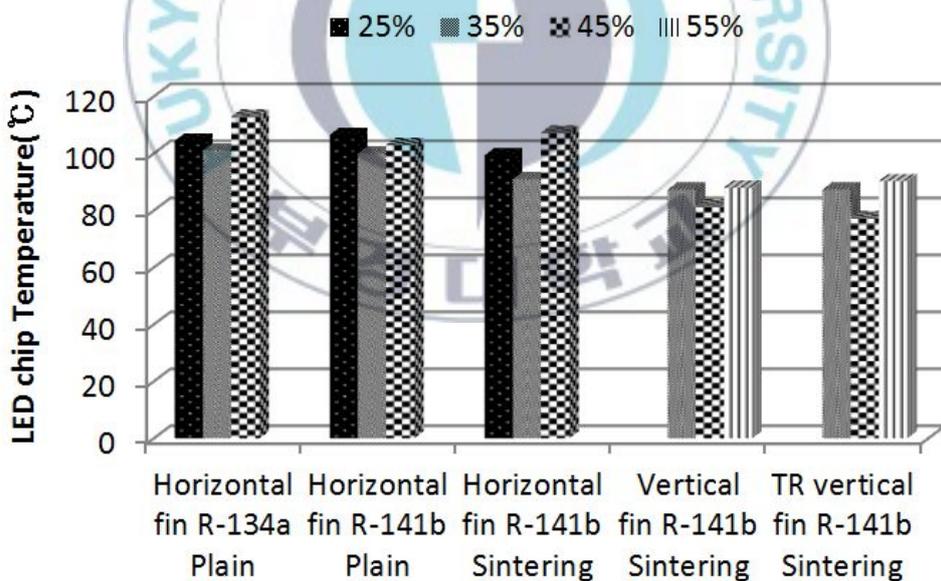
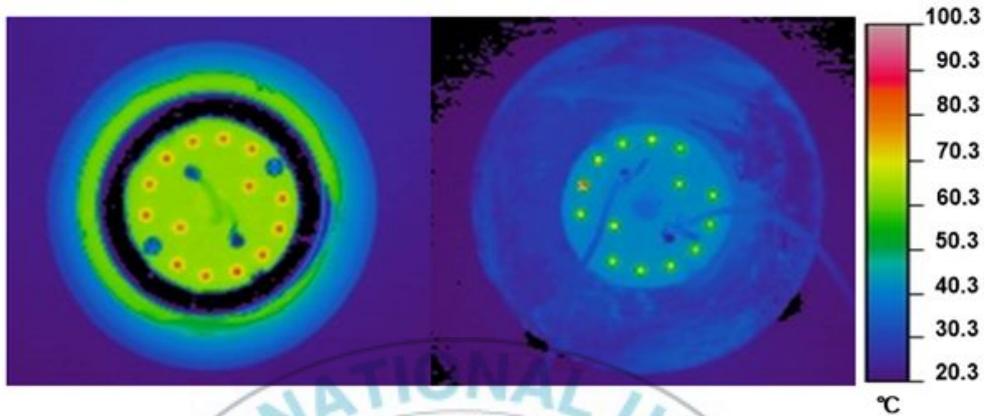
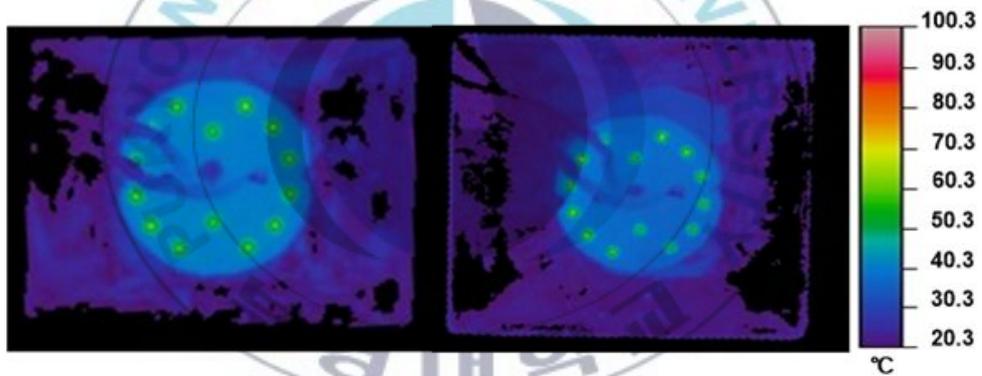


Fig. 43 LED chip temperature following vapor chamber type and charging ratio



(a) Conventional illumination (b) Horizontal fin vapor chamber



(c) Vertical fin vapor chamber (d) Transformed vertical fin vapor chamber

Fig. 44 Comparison of thermal image

Fig. 44의 (a)는 상용전구, (b)는 수평핀 베이퍼챔버, (c)는 수직핀 베이퍼챔버, (d)는 변형된 수직핀 베이퍼챔버에 상용전구의 LED를 부착하여 촬영한 열화상 사진이다. 모든 베이퍼챔버에서 색감이 푸른색으로 유지되어 열 방열이 우수하게 되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 45에서 냉매충진량과 베이퍼챔버 핀 형태에 따른 열 저항을 살펴 보면 전열면이 소결코팅 되지 않은 수평핀 베이퍼챔버에서는 최고 19.57 °C/W 까지 높게 측정된 반면에 전열면이 소결코팅이 되어 있고 변형된 수직핀 베이퍼챔버에서는 가장 낮은 8.32 °C/W로 측정되었다.

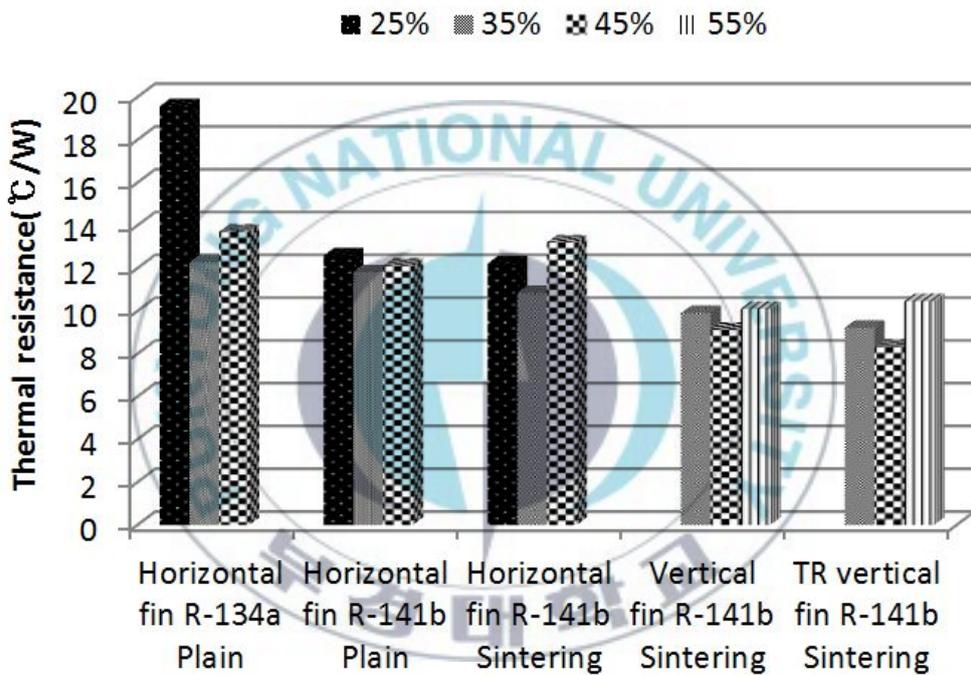


Fig. 45 Variation of VCTHP thermal resistance

제 5 장 결 론

최근 고유가 및 지구온난화에 대한 기후변화협약 등의 국제적인 대처 노력의 일환으로 저탄소 그린에너지 기술의 발전이 요구되고 있는 가운데 기존의 조명시스템의 고전력 소비를 저전력 조명으로 대체할 수 있는 LED 조명 기술이 각광을 받고 있다. 그러나 광효율은 지속적으로 증가하고 있는 추세이나 방열기술은 구조설계에 머무르고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 소결금속 비등 전열면을 이용한 베이퍼챔버형 히트파이프의 LED 조명등 방열 성능실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 수평핀 베이퍼챔버는 최적의 냉매와 충전 상태량 R-141b 35%에서 LED chip 온도가 R-134a 35% 보다 1.1℃ 낮게 유지되고, 열 저항이 11.81 ℃/W 로 측정되어 R-141b 냉매가 최적이다.

(2) 최적냉매인 R-141b를 작동유체로 선정하여 소결 코팅된 수평핀 베이퍼챔버에 적용하였을 때, 최적충진율 35%에서 LED chip 온도는 상용전구와 비교하면 45.6℃ 낮게 유지되어 소결공정이 방열에 효과적이다.

(3) 변형된 수직핀 베이퍼챔버에서 LED chip 온도가 77.3℃로 가장 낮게 유지되고 상용전구의 LED chip 온도보다 59.3℃ 낮게 유지되었다. 그러므로 자연대류에 적합한 방열형태의 핀은 변형된 수직핀이 최적이다.

(4) 상용전구와 VCTHP를 비교할 경우 VCTHP가 모든 조건에서 LED chip 온도가 낮게 유지되어 탁월한 방열성능을 보이므로 LED 조명 방열에 효과적이다. 따라서 소결금속 비등 전열면을 이용한 VCTHP의 LED 조명의 냉각시스템에 적용 시 방열성능이 우수함을 확인하였다.



참 고 문 헌

- [1] 장우진, LED 조명기술개론, 도서출판 아진, 2009.
- [2] 지철근, 조명기술과 조명 디자인, 동일출판사, 2011.
- [3] Ra. H. W, 2005, A Study on the Heat Transfer Characteristics of High Power Light Emitting Diode Package, Master thesis of Chonbuk National University.
- [4] 이장원, 친환경 고효율 LED 조명, 2010.
- [5] 日本ヒート・パイプ協會, 2001, 實用 ヒート・パイプ 第2版
- [6] G. P. Peterson, 1994, An introduction to heat pipes, John wiley & sons, Inc., New York.
- [7] G. F. Hewitt, G. L. Shires and Y. V. Polezhaev, 1997, International encyclopedia of heat & mass transfer, CRC Press, New York, pp. 551 ~ 555.
- [8] 赤地久輝, 루프形蛇行細管ヒートパイプ, 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.

- [9] 西尾茂文, 氣泡驅動型熱輸送管, 伝熱研究論文集, Vol. 3, No. 142, pp. 53-56, 1997.
- [10] Luca Rossi, Frantisek Polasek, Thermal Control of Electronic Equipment by Heat Pipes and Two-Phase Thermosyphon, 11th International Heat Pipe Conference, Keynote Lecture, Japan, 1999.
- [11] 西尾茂文, 振動型細管ヒートパイプの動向, ヒートパイプ技術, Vol. 17, No. 2, pp. 8-15, 1998.
- [12] Nishikawa, K., and Ito, T., 1982. "Augmentation of Nucleate Boiling Heat Transfer by Prepared Surfaces," in Heat Transfer in Energy Problems, T. Mizushima and W.J. Yang, Eds., Hemisphere Publishing Corp., New York, pp. 111-118.
- [13] Nishikawa, K., Ito, T., and Tanaka, K., 1983. "Augmented Heat Transfer by Nucleate Boiling at Prepared Surfaces," Proceedings of the 1983 ASME-JSME Thermal Engineering Conference, Vol. 1, pp. 387-393.
- [14] 김근배, 소결벽의 분말 특성이 따른 히트파이프의 열수송한계, 대한기계학회 춘계학술대회, 2005.

[15] American Society of Mechanical Engineers, AMSE SEC. VIII div.

1.

[16] Lumileds, thermal design consideration for luxeon power light sources, application brief AB05.



謝 辭

연구실에 처음 들어왔을 때가 생각이 납니다. 교수님 책상에 종석이와 마주 앉아 상담을 하고 두 명 책상 하나 만들어 주라는 말이 회상되어 떠오릅니다. 지난 2년 동안 저와 많은 시간은 함께해 주신 많은 분들에게 감사의 글로 제 마음을 대신하고자 합니다.

부족한 저를 제자로 받아주시고 한결같은 마음으로 지도와 격려, 사랑을 아끼지 않으셨던 김종수 교수님께 가장 먼저 고개 숙여 깊은 감사의 인사를 드립니다. 그리고 논문 심사를 위해 애써주시고 학문적인 조언을 해주신 오후규 교수님, 금종수 교수님, 최광환 교수님, 윤정인 교수님, 정석권 교수님, 김은필 교수님, 손창호 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

그리고 우리 실험실의 기둥역할을 해주신 많은 관심과 사랑을 주신 하수정쌤, 꼼꼼하게 챙겨주시고 학문적인 역량을 향상시켜주신 용하선배, 항상 피곤해해서 이제는 건강 챙겨야되는 상일쌤, 연구실에 꽃을 피우는 분위기 메이커 연우쌤, 오랜 시간 함께하고 행복과 슬픔을 함께 나누는 만두 종석이, 많은 짐을 짊어지고 있는 정웅이, 진정한 카트라이더 상진이, 질긴인연 군대후임 준하, 운전하면서 해설하는 비키세요 재영이, 실험실 유일한 홍일점 언화, 연구과제를 수행하면서 많은 도움을 주신 아리투스 안성준 선배님, 김정훈 선배님, 소결지엔티 사장님, 민하이텍 사장님 모두에게 감사의 인사를 드립니다.

고등학교 친구들 창한, 승필, 성진, 상훈 그리고 죽곶넷 멤버들 태욱, 성문, 재무 너희들이 있었기에 든든하고 고맙게 생각한다. 마지막으로, 항상 저를 자랑스러워하시는 부모님, 언제나 곁에서 함께해주고 바른길

로 이끌어 주시고 끝없는 사랑과 관심을 쏟아주시던 부모님께 깊은 감사를 올리며, 앞으로 그 관심과 사랑을 조금씩 갚아 나가겠습니다. 그리고 있는 듯 없는 듯 하지만 멀리 있어도 마음이 의지되었던 우리 형에게도 고맙고 마지막으로 내조를 잘해준 여자친구 지수에게도 고마운 마음을 전하고 싶습니다.

때론 힘들었지만 좋은 추억이 더 많았던 연구실 생활 이제는 이곳을 떠나지만 가슴 한편에는 영원히 남아있을 겁니다. 그 동안 모두에게 받았던 사랑에 깊이 감사드리고, 소중한 귀중한 시간이었습니다.



2014년 2월 겨울
히 준 배상