

## 베이퍼챔퍼 제조기술을 적용한 LED 투광등기구의 열 특성 비교에 관한 연구

(A Study on the Thermal Characteristics Comparison of the LED Floodlight Luminaire using Vapor Chamber Manufacturing Technology)

서진국\* · 유영문\*\*

(Jin-Kook Seo · Young-Moon Yu)

### Abstract

The purpose of this paper is to analyze thermal characteristics of the heat sinks to maximize the thermal diffusivity for LED floodlight. The 2 kind of samples were prepared by vapor chamber manufacturing technology using the heat pipe principle. It was analyzed the maximum temperature reduction effect and the thermal diffusion from the heat source depending on the types of chambers with 3 kind of working fluids. As a result, it was confirmed that thermal conductivity 23% increased, GVC-R type than IVC-R type.

Key Words : Vapor Chambers, Working Fluids, Temperature Reduction, Thermal Diffusion, Heat Sink for LED Floodlight

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경

LED투광등기구(LED Flood-lighting Luminaire)는 빛을 모아 일정한 방향으로 비추어 주는 LED등기구로, 에너지절감, 친환경, 고효율 조명기기로서 기

존의 메탈램프, 나트륨램프, 고압 수은램프 등을 대체하기 시작하고 있으며, 광원부, 방열부, 구동회로부 크게 3가지 분야로 활발한 기술 개발이 이루어지고 있다.

첫째, 광원부 기술 분야에서는 에피, 칩, 패키징의 경우 '14년 180lm/W급 고효율 고효율 LED 패키지가 양산단계에 있으며, Phosphorless White LED 에피 성장, 내부 양자 효율 향상 기술, Low-cost 나노패터닝, 나노기반 LED 공정 등 다양한 기술 향상이 이루어지고 있다. 둘째, 방열부 기술 분야에서는 기존 알루미늄 이외 마그네슘, Heat pipe, Fan기술 등 광원으로부터 발생하는 열을 최대한 낮추는 기술이 중점적으로 개발 진행되고 있다. 셋째, 구동회로부 기술 분야에서는 고효율(100W급 이상) SMPS는 삼성전

\* Main author : Pukyong National University/SEKI Hi-TECH, INC.

\*\* Corresponding author : LED-Marine Convergence Technology R&BD Center, Pukyong National University

Tel : 051-629-7770, Fax : 051-629-7780

E-mail : ymyu@pknu.ac.kr

Received : October 20, 2014

Accepted : November 13, 2014

기, 인벤토닉스, 민웰 등 컨버터 전문업체에서 고효율제품으로 기술 개발이 이루어지고 있다. 하지만 현재는 고효율 LED조명에 적용할 수 있는 방열 기술 수준은 선진국(미국, 일본 등)에 비해 원천기술이 취약한 편이므로 기술 개발을 활성화할 필요가 있다.

LED 조명의 방열 성능을 향상시키기 위하여 Metal PCB를 사용하거나 Via-hole PCB[1], Heat sink의 발열 성능 예측 및 최적 설계[2], Fan과 heat sink를 이용한 LED 전조등의 냉각성능 해석[3]등 LED의 접합온도( $T_{Junction} = T_J$ )를 낮추기 위해 자연대류 냉각기술과 강제대류 냉각기술, 수냉식 냉각시스템 등 다양한 냉각 방식 등 많은 연구가 집중되고 있지만, 방열 문제를 해결하기에는 아직 미흡한 실정이다[4].

고출력 LED투광등기구의 기술개발에서 고효율 성능을 얻기 위해 고성능 방열설계 및 경량화 양산 기술, 조명제어 등 많은 연구가 진행되고 있으나, 능동형 방열 기법이나 기존의 저가형 양산 기법들에 의존하여 중량 문제를 해결하지 못하거나 소음, 진동과 같은 한계를 극복하지 못하고 있다. 또한 LED 투광등기구의 방열 및 기계적 냉각부품에 대한 원가 절감을 할 수 있는 기술 개발이 필요하다. 통상의 LED투광등기구에서는 열분산 효과가 두드러지지 못하여 고효율화가 이루어지지 못하고 있다. 수은등 및 메탈할라이드를 LED로 교체시 전기에너지 사용 절감 효과만이 고려될 뿐, 밀폐 구조로 설계되기 때문에, 효과적인 방열이 어렵고 개방된 구조를 사용하는 경우에는 방수 및 방진 문제로 제품의 신뢰성이 저하된다.

이상의 문제점을 효과적으로 극복할 수 있는 방법으로 적정 온도로 열을 분산시킬 수 있는 히트파이프 원리인 베이퍼챔버 기술이 있다. 베이퍼챔버 기술은 밀폐된 구조내에서 열원으로부터 증발, 열매체에 의하여 열수송, 전도, 대류, 복사에 의한 열전달, 냉각으로 인한 응축으로 냉매가 선순환되는 기술이다. 이 방법의 장점은 내부의 열을 외부로 빠르고, 신속하게 전달할 수 있는 점에 있으므로 이를 적용함으로써 방열 효과를 향상시켜 LED투광등기구의 열관리를 최적화하고자 한다.

## 1.2 연구의 목적 및 방법

본 연구의 목적은 베이퍼챔버와 작동유체(Working Fluid)를 여러 가지 형태로 만들어 동일한 조건으로 각각의 온도분산 효과를 측정하여 계면간 접촉 열저항을 최대한 줄여 열전도율을 극대화할 수 있는 형태를 온도 측정값을 비교·분석하여, 전도에 의한 열전도계수와 대류에 의한 대류열전달계수 결과치를 비교하는 것이다. LED투광등기구는 고천정에 달리는 설치조건으로, 간헐운전이나 연속운전으로 인한 열충격 대한 대안 마련이 중요하다. 또한 전도와 대류에 의한 열전달이 원활히 이루어져야만 LED투광등기구의 광원부와 구동부에 안정적인 성능을 구현할 수 있으므로, 최고온도 저감효과와 최고온도와 최저온도간의 온도편차가 줄어드는 효과가 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 세기하이텍 방열기술연구소 실험실에서 LED투광등기구 100W급을 설치하여 온도 측정하였다. 그리고 온도 실험 측정값을 가지고 전도에 의한 열전도계수(k)와 대류열전달계수(h) 값을 구하여 비교·분석하였다.

## 2. 열전달 이론고찰

열전달은 열이동·전열이라고도 한다. 일반적으로 물체들 사이의 열전도·대류·열복사 등 3가지 열이동 과정을 총칭하지만, 좁은 의미로는 유체와 고체 표면 사이에서 열을 주고받는 현상을 가리키며 온도차에 의하여 일어나는 에너지의 이동이라 정의하고 있다[5]. LED모듈의 열전달 경로는 LED 패키지의 P-N접합부에서 시작되며 열전달의 대부분은 전도에 의한 열전달이며, 자연 또는 강제 대류에 의하여도 이루어진다. 열전도는 열에너지가 물질의 이동을 수반하지 않고 고온에서 저온으로 연속적으로 전달되는 현상을 말한다. 주로 고체 내부에서 발생되며, 물질의 종류에 따라 전도되는 속도가 다르다. 열전도에 대한 방정식은 Fourier's law로 표현할 수 있다.

Fourier의 열전도 법칙의 식은 (1), (2), (3)과 같다.

$$\text{전도열전달량} \propto \frac{(\text{면적})(\text{온도차})}{(\text{두께})} \quad (1)$$

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2)$$

$$q = Q/A = -k \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

열유속(heat flux,  $W/m^2$ )  $q$ 는 전달 방향에 수직인 단위면적당  $x$ 방향으로의 열전달률이며, 이 방향으로의 온도구배  $dT/dx$ 에 비례한다. 비례상수  $k$ 는 전도에 의한 열전도계수( $W/m \cdot K$ )로 전달 물질이 가지고 있는 특성 값으로, 음의 부호는 열이 온도가 감소되는 방향으로 전달되는 것을 의미한다. 대류열전달 방식은 유체와 표면간의 상호작용에 의하여 표면속도 0에서부터 유한한 유동속도  $u_\infty$ 까지의 유체영역이 발달하게 된다. 이때의 유동속도가 0인 부근의 표면온도  $T_s$ 로부터 유동속도  $u_\infty$ 의 온도  $T_\infty$ 까지의 유체영역이 존재하는데, 이곳에서 온도 구배에 의하여 표면과 유체사이에 대류열전달이 발생한다. 에너지 전달 방식은 경계층에서의 불규칙 분자운동과 유체의 집단운동에 의해서 나타난다. 대류 열전달은 자연대류와 강제대류로 나누어 볼 수 있다. 자연대류는 밀도차이에 의한 부력의 생성으로 대부분 수직방향으로 이루어지며 식 (4), (5)와 같이 나타낼 수 있다[6].

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (4)$$

$$q'' = h(T_s - T_\infty) = h\Delta T \quad (5)$$

여기서  $h$ 는 대류열전달계수( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ),  $A_s$ 는 표면적( $m^2$ ),  $T_s$ 는 표면온도( $^\circ C$ ),  $T_\infty$ 는 대기온도( $^\circ C$ )를 나타낸다. 본 이론을 사용한 이유는 베이퍼챔버와 히트싱크 계면 간에는 전도에 의한 열전달이 이루어지고, 히트싱크와 외부 공기 사이에는 대류에 의한 열전달이 이루어지기 때문에 사용하게 되었다.

### 3. 실험방법

두 가지의 형태의 베이퍼챔버는 다음과 같다. 첫째,

가스켓 형태의 베이퍼챔버(Gasket type Vapor Chamber, 이하 GVC)와 둘째, 삽입형태의 베이퍼챔버(Insert type Vapor Chamber, 이하 IVC)이다. GVC, IVC, General Type 세 종류를 선정하였다.

GVC, IVC에는 작동유체(열전달 매개체)로 Aceton, R134a(CH2FCF3), DI Water(De-ionized Water)의 세 종류를 사용하였다. 작동 유체의 체적비는 베이퍼챔버 내부 용적에 20%로 삽입하여 실험을 진행하였다.

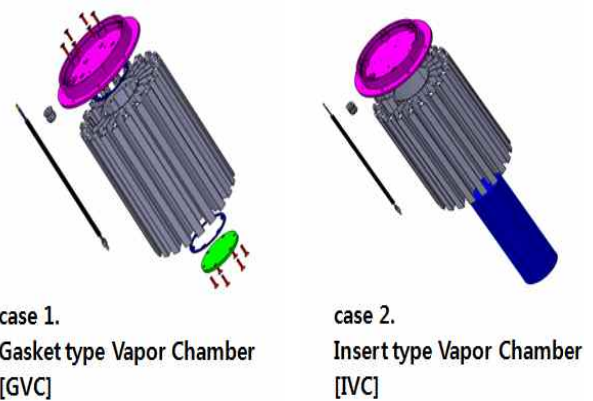


그림 1. 베이퍼챔버 제조방법에 따른 베이퍼챔버의 종류  
Fig. 1. The types of the vapor chamber depending on the manufacturing method

제작한 각각의 Mock-up에 대하여 표 1과 같이 온도 측정 위치를 설정하여 위치별로 온도를 측정한 후, 각 베이퍼챔버 및 작동 유체별, 각각의 측정 위치별 온도를 비교 · 분석하였다.

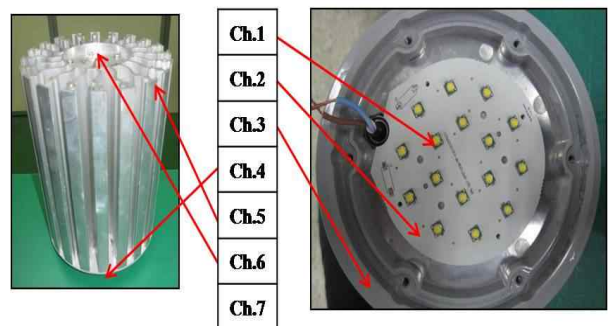


그림 2. 온도 측정 위치  
Fig. 2. Temperature Measurement Points

표 1. 온도 측정 위치

Table 1. Temperature Measurement Points

Number	Measurement Points
Ch.1	$T_{sp}$ (LED Solder Point)
Ch.2	PCB Side
Ch.3	Bracket Side
Ch.4	Heat Sink Bottom
Ch.5	Heat Sink Top
Ch.6	Chamber Top
Ch.7	Ambient

표 2. 히트싱크 사양 및 실험 관련 데이터

Table 2. Heat Sink Specifications and Test related Data

입력Power(Q)	96W
길이(L)	20cm
히트싱크 단면적( $A_{heatsink} = A_1$ )	$4.88 \times 10^{-3} m^2$
베이퍼챔버 단면적( $A_{vapor\ chamber} = A_2$ )	$2.94 \times 10^{-3} m^2$
히트싱크 표면적( $A_{heatsink} = A_3$ )	$600 \times 10^{-3} m^2$
Al6063 열전도율( $k_{Al} = k_1$ )	$158 W/m \cdot ^\circ C$

본 실험에 사용된 Mock-up은 외부는 Al 히트싱크, 내부는 베이퍼챔버 구조로 구성되어 있으며, LED 모듈이 장착되는 LED 모듈 히트싱크로 구성되어 있다. 열전달계수는 뉴턴의 냉각법칙에 의하여 h값을 구하고, 열전도계수는 푸리에의 열전도 법칙에 의하여 열전도계수 k값을 구하였다. 일반적인 Al 히트싱크의 열전도율이  $150 \sim 200 W/m \cdot ^\circ C$ 임을 감안하여, 본 연구에 사용되어진 Al 6063계열 히트싱크의 열전도율은  $158 W/m \cdot ^\circ C$ 를 적용하였으며, 히트싱크 사양 및 실험 관련 데이터는 표 2와 같았다.

열원인 LED PCB의 직경의 지름은 80mm, 두께 1.6mm, LED 16EA, CREE XML PKG LM80 모델을 탑재하여 인가 전압 48V, 전류 2A로 96W의 소비전력으로 100W급의 LED투광등기구의 Mock-up을 제작하였다. Mock-up은 Al6063 재질로, 지름 160mm, 길이 200mm로 모두 동일한 조건으로 Mock-up을 제작하였다.

실험장치는 그림 2와 같이 구성하였으며, 전원 입력,

표시부, 온도를 측정하기 위한 계측부로 구성된다. 계측부는 T-type 열전대에서 측정된 온도를 표시하는 Hybrid Recorder(Yokogawa DA100, DS600, DU100, DT300)와 온도를 저장하기 위한 PC를 활용하였고, 실온의 자연 대류상태에서 진행하였다.

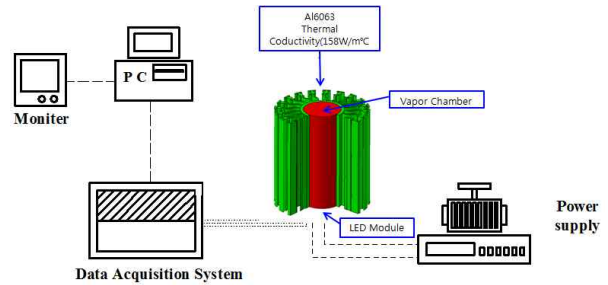


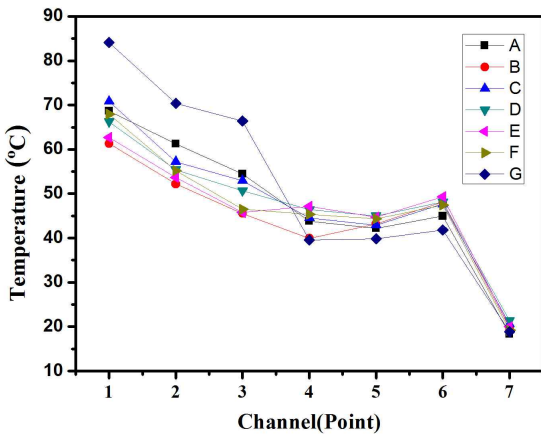
그림 3. 실험 장치도  
Fig. 3. Experimental Setup

#### 4. 실험 결과 및 고찰

베이퍼챔버와 작동유체의 종류에 따른 측정 온도를 2회 측정하여 평균 온도값과 측정된  $T_{sp}$  온도 변화, 측정된 최고온도-최저온도 간의 온도 차이를 각각 그림 3과 4, 5에 각각 나타내었으며, 각 측정 위치간의 온도 차이를 표 3에 정리하여 나타내었다.

온도 측정 결과 그림 3과 4에서 알 수 있는 바와 같이 R-134a를 작동유체로 사용한 시료가  $T_{sp}$ 의 최고온도(Hot Spot)가 가장 낮게 형성되었으며, 일반적인 히트싱크의 온도가 가장 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. R-134a를 작동유체로 사용하는 GVC, IVC는 둘 다 최고온도(Hot Spot)가 낮게 형성됨을 알 수 있었다. DI Water와 Aceton은 베이퍼챔버 종류에 따라 온도 차이가 발생하기는 하지만 그 차이는 상대적으로 미미하다고 할 수 있었다. GVC에 R134a 주입한 Mock-up(GVC-R)의 온도가 가장 낮게 형성된 원인은, IVC방식과 비교했을 때 LED투광등기구 내부에 베이퍼챔버를 구성함으로써 계면간의 공극이 없어 열저항이 낮게 형성되었기 때문으로 판단된다.

또한 GVC-R의 경우 General방식에 비해 최소  $15^\circ C$ , 최대  $25^\circ C$ 까지  $T_{sp}$ 부위의 온도 저감 효과가 있는 것으로 나타났다.



- A. GVC-A(Gasket type Vapor Chamber+Aceton)
- B. GVC-R(Gasket type Vapor Chamber+R134a)
- C. GVC-W(Gasket type Vapor Chamber+DI Water)
- D. IVC-A(Insert type Vapor Chamber+Aceton)
- E. IVC-R(Insert type Vapor Chamber+R134a)
- F. IVC-W(Insert type Vapor Chamber+DI Water)
- G. General(Conventional Heat Sink)

그림 4. 베이퍼챔버와 작동유체의 종류에 따른 측정 온도 특성

Fig. 4. Measured Temperature Properties depend on the Types of Vapor Chamber and Working Fluid

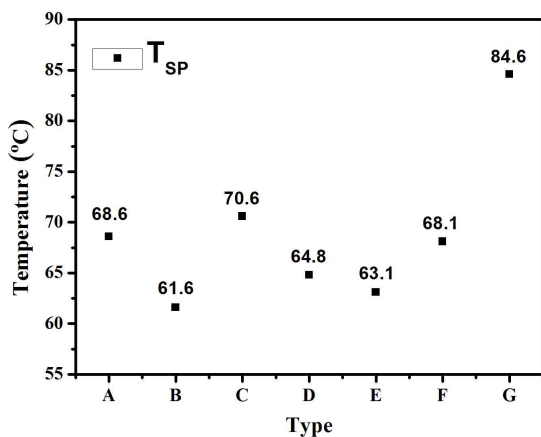


그림 5. 베이퍼챔버와 작동유체의 종류에 따른 측정 T<sub>sp</sub> 온도 변화

Fig. 5. Measured T<sub>sp</sub> Temperature Variations depend on the Types of Vapor Chamber and Working Fluid

그림 5에서 알 수 있는 바와 같이 최고온도가 가장 낮게 나온 GVC-R에 비하여 IVC-R이 온도편차(최고

온도-최저온도)가 작게 나타난 것은 IVC-R의 경우 베이퍼챔버 제조방식이 삽입형으로 초기에는 계면간 공극에 의한 접촉열저항으로 상대적으로 GVC방식에 비해 높지만 베이퍼챔버 성능이 원활하게 이루어지는 정상상태(Stead-State)에 이르러서는 LED투광등기구 전체적으로 열이 고르게 분산되는 것을 알 수 있었다. 또한 GVC-R이 IVC-R보다 T<sub>j</sub>값에 직접 영향을 주는 T<sub>sp</sub>가 낮게 형성됨을 알 수 있었다.

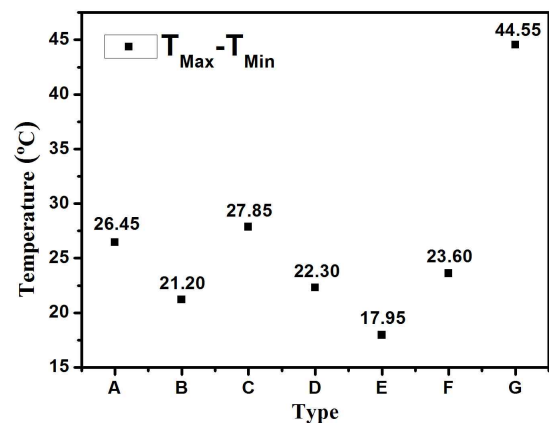


그림 6. 베이퍼챔버와 작동유체의 종류에 따른 측정 온도 차이(최고온도-최저온도)

Fig. 6. Measured Temperature Difference (Max. Temp. - Min. Temp.) depend on the Types of Vapor Chamber and Working Fluid

표 3. 측정 위치간 온도편차

Table 3. Temperature Differences between Measuring Points

T <sub>avg.</sub> (°C)	GVC A	GVC R	GVC W	IVC A	IVC R	IVC W	General
Δ T <sub>1</sub>	1.40	3.10	1.60	1.40	2.30	1.20	0.50
Δ T <sub>2</sub>	23.50	13.40	22.70	19.20	13.30	20.50	42.30
Δ T <sub>3</sub>	34.43	28.62	32.03	31.10	30.62	31.78	38.30

$$\Delta T_1 = channel(4-5)$$

$$\Delta T_2 = channel(1-6)$$

$$\Delta T_3 = ch.(1+2+3+4+5+6)/6 - ch.7$$

히트싱크 바닥(채널4, Heat Sink Bottom)과 히트싱크 상부(채널5, Heat Sink Top)의 핀(Fin)온도 차이

$\Delta T_1$ 과, LED 광원 모듈 중앙(채널1, PCB Center)과 베이퍼챔버 상부 중앙(채널6, Chamber Top Center)의 온도 차이  $\Delta T_2$ 의 결과값에 의하면, GVC-R과 IVC-R이 가장 좋은 것임을 알 수 있었다. 전체적으로 열확산이 잘 되는지를 가능할 수 있는  $\Delta T_3$ 에 대한 것은 IVC-R에 비하여 GVC-R이 좀 더 좋게 나온 것으로 분석되었다.

Fourier의 열전도법칙 식 (2)

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} = const$$

$$\int_0^L Q_{cond} dx = - \int_{T_1}^{T_2} kAdT$$
(6)

$$Q_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{L}, Q_{cond,x} = -kA_C \frac{dT}{dx}$$
(7)

뉴턴의 냉각법칙 식(4)

$$Q = hA_s(T_s - T_\infty)$$

단,  $Q = 96 W, L = 0.2m$

$$A_1 = A_{heatsink\text{단면적}}$$

$$A_2 = A_{vapor\ chamber\text{단면적}}$$

$$A_3 = A_{heatsink\text{표면적}}$$

$$k_{Al} = 158 W/m^\circ C = k_1$$

GVC-A의 경우,

$$\Delta T_1 = 1.40^\circ C, \Delta T_2 = 23.50^\circ C, \Delta T_3 = 34.43^\circ C$$

$$Q = \frac{k_1 A_1 \Delta T_1}{L} + \frac{k_2 A_2 \Delta T_2}{L} \approx W/m^\circ C$$
(8)

$$k_2 = (Q - \frac{k_1 A_1 \Delta T_1}{L}) \frac{L}{A_2 \Delta T_2}$$
(9)

위 식에 활용하여 k와 h값을 구한결과를 표 4에 나타내었다.

표 4. 계산된 종류별 열전도도와 대류열전달계수  
Table 4. Calculated Thermal Conductivity and Convection Heat transfer Coefficient depending on Types

	GVC A	GVC R	GVC W	IVC A	IVC R	IVC W	General
열전도도 $k$ ( $W/m^\circ C$ )	262	548	269	321	446	303	158
열전달계수 $h$ ( $W/m^2^\circ C$ )	4.65	5.59	5.00	5.15	5.23	5.03	4.18

## 5. 결론

본 연구에서는 히트파이프 원리를 이용한 베이퍼챔버를 제작하여 방열 특성을 비교하였다. 접합온도 ( $T_{Junction}$ )에 영향을 미치는 LED Solder Point 온도 ( $T_{Sp}$ )가 일반적인 히트싱크보다 15~25°C의 온도 저감이 되는 효과가 있었고, LED투광등기구 형성하는 방열부의 온도 확산에 있어서 일반적인 히트싱크보다 약 13~28°C 만큼 평균 온도가 낮게 형성되는 것으로 분석되었다.

히트파이프의 원리에 의한 베이퍼챔버 기술로 인하여 LED 모듈에서 발생하는 열이 베이퍼챔버 상부면까지 수직상태로 신속한 열전달이 이루어지고, 베이퍼챔버와 히트싱크의 원주면으로 원활한 온도 전달이 되어, 최고온도와 최고온도-최저온도를 통해 Hot Spot 줄어 들고 온도 확산효과가 향상되는 것을 볼 수 있었다. 또한 전도에 의한 열전도 k는 IVC-R이 446  $W/m^\circ C$  이고, GVC-R은 548  $W/m^\circ C$  로 약 23% 향상되고, 대류에 의한 열전달 계수 h값은 IVC-R 5.23  $W/m^2^\circ C$  이고, GVC-R은 5.59  $W/m^2^\circ C$  로 약 7% 향상되는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 챔버의 종류와 작동유체별 열수송에 따른 냉각효과를 비교한 결과, R-134a의 GVC 타입이 가장 좋은 냉각효과가 있는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 산업통상자원부에서 시행한 광역경제권 선도산업 육성사업(과제번호:R0001130, 동남광역선도산업육성사업 기술개발)으로 지원된 연구임.

## References

- [1] Se-Il Lee, Seung-Min Lee and Dae-Hee Park, "Analysis of Thermal Properties in LED Package by Via hole of FR4 PCB", Trans. JIEE, Vol. 24, No. 12, pp. 57-63, 2010.
- [2] Hyeon-gyu An, "Prediction on Heat releasing Characteristics of Household LED Module and Heat sink Design", Master's Thesis in engineering, Kangwon National University Graduate School, 2011.
- [3] Man-Seok Ko, Ju-Han Lee, Sang-June Oh, Hyen-Seok Cho and Tae-Beom Seo, "Cooling Performance of LED Head Lamp with Heat Sink and Cooling Fan", Trans. KSME, Vol. 33, No. 12, pp. 933-1034, 2009.
- [4] Xiaobing Luo, Wei Xiong, Ting Cheng and Sheng Liu, "Design and Optimization of Horizontally-located Plate Fin Heat Sink for High Power LED Street Lamps", Electronic Components and Technology Conference, ECTC2009.59th, pp. 854-859, 2009.
- [5] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of heat and mass transfer", College of Engineering University of Notre Dame, 6th edition, pp. 1-11, 1996.
- [6] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, "Fundamentals of heat and mass transfer", College of Engineering University of Notre Dame, 6th edition, pp. 166-168, 1996.

## ◆ 저자소개 ◆



### 서진국(徐鎭國)

1977년 8월 14일생. 2002년 2월 인제대학교 공과대학 기계공학부 졸업. 2011년 부산대학교 공과대학원 기계부품시스템 공학과 졸업(석사). 2012~2015년 부경대학교 일반대학원 LED공학 융합과정 박사과정. (주)세기하이텍 방열기술연구소 연구소장.



### 유영문(劉永文)

1955년 4월 6일생. 1994년 고려대학교 대학원 재료공학과 졸업(박사). 1995년 일본 도호쿠대 금속재료 연구소 객원 연구원. 1984~2001년 한국화학연구원 책임연구원. 2001~2010년 한국 광기술원 LED사업단장(수석연구원). 2010년 부경대 석좌교수. 2010년~현재 부경대학교 LED-해양융합기술 연구센터 센터장(교수). 현재 부경대학교 과학기술융합 전문대학원 LED융합공학전공 주임(교수).