

히트싱크 설치각도에 따른 방열성능의 최적조건 탐색

박주현¹⁾ · 조희성²⁾ · 정연국¹⁾ · 신기열^{*1)}

영남대학교 기계공학부¹⁾ · 에스엘주식회사 전자신뢰성연구팀²⁾

Experimental Study on the Optimal Condition of Heat Sink Cooling Performance by Installation Angles

Ju-Heon Park¹⁾ · Hee-Seong Jo²⁾ · Yeon-Guk Jeong¹⁾ · Ki-Yeol Shin^{*1)}

¹⁾School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Gyeongbuk 38541, Korea

²⁾Electronic Reliability Research Team, SL Cooperation, 77 Gongdan 6-ro, Jillyang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 38470, Korea

(Received 4 January 2023 / Revised 28 February 2023 / Accepted 9 March 2023)

Abstract : In this paper, experimental case studies were conducted to investigate the heat dissipation performance by changing the design shape and installation angle of the heat sink in an automotive LED lamp. Two different types of heating source, LED and film heater, were used for the experiment. The standard heat dissipation performance test procedure was conducted under the natural convection condition, and the effect of convection hole and the installation angles in the vertical and horizontal directions were compared. Results showed that convection holes were useful in reducing junction temperature to be lower than that of normal shape as 2.4 ~ 2.8 °C less. The vertical installation angle of horizontal direction showed the best heat dissipation performance. In addition, the heat source type was not a dominant factor of the heat dissipation performance according to changes in the installation slope angle.

Key words : Heat sink(히트싱크), Natural convection(자연대류), Installation angle(설치각도), Direction angle(설치 방향 각), Heat source(열원), Optimal design(최적설계)

Nomenclature

A	: area, m ²
h	: convection heat transfer coefficient, W/m ² · K
k	: thermal conductivity, W/m · K
L	: length, m
Nu	: Nusselt number
p	: wetted perimeter, m
Q	: heat transfer rate, W
Ra	: Rayleigh number
S	: distance, m
T	: temperature, K
Θ	: temperature difference, K

Subscripts

c	: correction
conv	: convection
opt	: optimum
s	: surface
∞	: surroundings

1. 서론

최근 자동차 업계의 동향을 따라 전구(Bulb), HID(High Intensity Discharge) 램프를 넘어 효율성이 높은 LED(Light Emitting Diode)를 사용하고 있다. LED는 램프 디자인의 자율성을 극대화 할 수 있다는 장점이 있으며 발열에 따른 수명이 중요한 요소이다. 이를 해결하기 위해 방열은 지속적으로 풀어나가야 할 문제이다.

*Corresponding author, E-mail: shinky@ynu.ac.kr

^{*}This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

헤드램프의 주요 광원으로 사용되는 LED 모듈 냉각을 위해서는 히트싱크의 최적설계와 방열성능에 대한 실험 진행 후 해석적 검증이 필요하다. 이를 위해서 다양한 연구가 수행되었다. 박근태 등¹⁾, 이동렬²⁾과 정원준³⁾은 방열 핀의 개수, 높이 등 형상 변화에 따른 방열성능의 변화에 대한 연구를 진행하여 핀에 대한 최적 형상을 확인하였다. 정태성과 강환국⁴⁾은 히트싱크의 수직 및 수평상태에 따라 나타나는 자연 대류 유동 특성을 전산모사 해석을 통해 분석하였다. 이를 통해 수평상태의 히트싱크는 수직상태의 히트싱크에 비해 상대적으로 유동율이 감소하여 약 10 ~ 15 %의 우수한 방열성능을 결과로도 출하였다. 우장미 등⁵⁾과 최병희와 김창오⁶⁾는 히트싱크 디자인에 따른 방열특성을 알아보고자 히트싱크의 온도 분포, 열 유속에 대한 수치해석을 진행하였다. 그 결과, 히트싱크의 구조 및 형상에 따른 냉각성능의 상관관계를 도출하였고 종합적으로 성능이 가장 우수한 히트싱크의 모델을 확인하였다. 장호성 등⁷⁾은 실험을 통해 히트싱크를 자연대류와 강제대류의 냉각 방식을 이용하여 방열성능을 검증하고 각각의 냉각 방식의 주요 설계인자를 도출하였다. 결과적으로 설계인자를 고려하였을 때 자연대류 냉각 방식이 강제대류 냉각 방식보다 우수한 방열성능을 가지고 면적이 커질수록 LED 온도는 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 300 cm²부터는 면적이 증가하더라도 방열성능의 효과가 점차 감소하였다. 김정현과 이교우⁸⁾와 정의대와 이영림⁹⁾은 히트싱크의 형상 변화에 따른 방열성능을 알아보고자 CFD를 통해 온도 분포를 알아보고 실험 결과와 비교 고찰한 결과 최적의 방열 성능을 보이는 히트싱크의 형상을 확인하였다. 구민예 등¹⁰⁾과 장병춘과 김가을¹¹⁾은 히트싱크의 압출형 제작 방식에 대해 방열성능이 우수한 히트싱크의 설계 가능성을 확인하고자 하였다. 방열율과 히트싱크 베이스 상의 기준 위치의 온도 등을 측정하고 열 유동 해석 프로그램과 실험 결과를 비교하여 압출형 제작 방식의 우수한 방열성능을 확인하였다. Baldry 등¹²⁾은 열전 냉각 캡과 함께 사용할 고성능, 소규모 히트싱크를 설계하기 위한 수치 모델을 개발하고 이를 실험적으로 검증하였다. Xu¹³⁾는 고효율 LED 램프의 냉각을 위해 높이가 균일하지 않은 열사이핀이 있는 직사각형 형상의 히트싱크에 대한 해석을 진행하였고, 3가지 유형에 대해 실험 및 수치적 해석을 통해 각각의 열 저항과 최대 열전달율을 분석하였다. Singh 등¹⁴⁾은 LED 헤드램프용 히트 파이프 기반 냉각 시스템의 설계, 기술 요구 사항, 장점 및 시스템 옵션에 대해 조사하였고, 다이캐스트 히트싱크와 비교하여 높은 효율성을 확인하였다. Chen 등¹⁵⁾은 LED 시스템을 모델링하기 위해 일반적인 평행판 핀 히

트싱크의 열적 특성과 PET(Photo-Electro-Thermal) 이론을 결합한 모델을 제안하였고, 제안된 모델은 병렬 플레이트 핀 방열판을 사용하여 LED 시스템의 열 및 광학 특성을 연구하기 위한 모델링 도구로서 적합함을 확인하였다. Soliman 등¹⁶⁾은 편형 히트싱크의 냉각 시스템에 의해 냉각된 태양 전지의 성능을 실험적으로 조사하였다. 그 결과, 히트싱크 냉각 시스템을 사용한 태양 전지의 성능과 히트싱크를 사용하지 않고 자연대류만으로 냉각된 태양 전지의 성능을 비교하였다.

이상의 선행연구결과에서 각 실험과 해석에 사용된 냉각핀의 설계조건에 대한 방열성능의 결과에도 불구하고 최적조건을 위한 정량적 데이터는 여전히 부족하다. 따라서 히트싱크는 설치 방향각과 설치각도에 따른 방열성능의 영향을 실험적으로 정량화하는 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 히트싱크 방열성능 표준시험 조건에서 설치각도(수직/수평)를 세부적(0 ~ 180 °) 30 ° 간격으로 나누고 각각의 경우에 대한 실험을 진행하였다. 또한 열원의 종류에 따른 경향을 파악하기 위해 필름 히터(Film heater)를 부착한 히트싱크에 대한 실험을 진행하여 LED 열원과 필름히터 열원의 방열성능의 차이와 함께 최적조건을 파악하고자 한다.

2. 연구내용

2.1 이론적 배경

일반적인 LED 방열을 위한 냉각핀 형상은 Fig. 1과 같이 동일한 두께를 가진 핀을 일정한 거리의 간격으로 배치한 구조를 가지며 방열성능에 대한 해석과 선행연구 결과를 쉽게 찾아 볼 수 있다. 또한 열원의 위치에 따라 특별한 경우 핀의 길이를 열원 중심부로부터 방사형으로 작아지게 설계하는 경우도 있다.

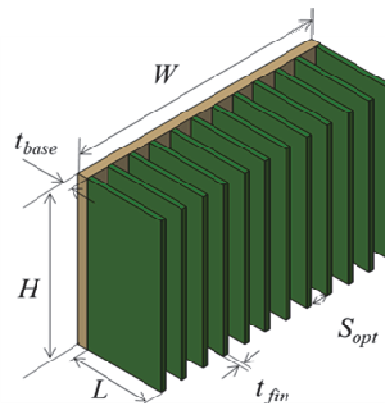


Fig. 1 Dimensional definition of the plate fin heat sink

냉각핀에 대한 1차원 정상열전도방정식을 베이스판과 냉각핀에 적용하면 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \quad (1)$$

$$\theta(x) = T(x) - T_\infty \quad (2)$$

$$m^2 = \frac{hp}{kA} \quad (3)$$

냉각핀에 대하여 핀 해석의 이론 효율식을 적용하면 핀에서의 방열량을 다음 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{fin} = hPL\theta_B \frac{\tanh(mh)}{mL} \quad (4)$$

핀 해석에서 사용되는 핀 사이의 최적간격과 핀 표면에서의 대류열전달계수의 값은 식 (5)와 같이 Bar-Cohen and Rohsenow의 이론 해를 이용하여 계산하여 사용할 수 있다.

$$S_{opt} = 2.714 \left(\frac{S^3 L}{Ra_s} \right)^{0.25} = 2.714 \frac{L}{Ra_s^{0.25}} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{hS_{opt}}{k} = 1.307 \quad (6)$$

또한 실험을 통한 방열성능 결과에서 다음과 같은 식 (7)을 이용하여 국부 대류열전달계수를 도출할 수 있다.

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (7)$$

본 연구에서는 표준형상의 히트싱크 제품을 다양한 설치방향각과 설치각도, 또한 열원의 종류에 따라 냉각 성능실험을 수행하고 다양한 조건에 따른 냉각성능과 핀 표면온도를 측정하여 방열성능을 비교하고자 한다. 이는 히트싱크 해석 및 최적조건 파악에 유용한 자료가 될 것이다.

2.2 실험변수와 조건

히트싱크는 Fig. 1에서 나타낸 바와 같이 선택된 재료에 대하여 평판 크기와 핀의 높이, 간격, 개수 등의 설계 변수로 결정된다. 하지만 방열성능은 설치조건(각도)에 따라 영향을 받을 수 있다. 램프설계에서 LED 광원의 위치나 방향은 설계기준에 따라 고정되는 것이 일반적이다. 하지만 램프 내부의 방열공간이 제한될 경우에는 히트싱크 크기나 방열핀의 설치각도가 유동적일 수 있다. 설계자는 이러한 구조변경에 따른 방열성능의 차이점을 정량적으로 알고 설계하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 Table 1과 같이 히트싱크의 설치 방향각을 수

직, 수평성분으로 구분하여 설치각도(0 ~ 180 °)를 다양하게 설정하여 실험을 수행하였다. 히트싱크의 열원은 2가지로 구분하여 LED와 필름히터를 사용하였으며 열원에 따른 방열성능의 경향성을 비교 평가해 보고자 한다. 필름히터와 LED 열원은 열용량이 유사하지만 히트싱크와의 접합부 조건이 다름으로 인해 접촉열저항에는 차이가 있다. Table 1에서는 LED와 필름히터 광원이 히트싱크에 접합된 시편의 사진을 확인할 수 있다. LED 광원과 히트싱크 접합면 사이에는 PCB 회로기판과 접합재 등 다수의 열저항이 존재하는데 반해서 필름히터 열원은 보호필름을 직접 히트싱크에 접합함으로써 LED 열원실험에서 발생할 수 있는 접촉열저항의 변동성을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 실험에 사용된 히트싱크 시편은 Table 2와 같이 대류홀 유무에 따라 4가지 종류로 구분된다. 핀 사이의 대류열전달의 영향도를 분석하기 위해 Base plate에 대류홀을 추가로 가공하고 대류홀 형상의 크기와 수량에 따른 방열성능을 비교해 보았다.

2.3 실험방법

실험에 사용된 장치는 점등시험기와 두 개의 항온, 항습 챔버로 구성된 내열시험기로서 Fig. 2(a)에 나타내었다. 챔버 내부에는 실험에 사용할 시편들을 시험조건에 따라 설치한다. 내열시험은 설치된 LED와 필름히터의 전원 공급 조건과 전압전류량을 측정하기 위하여 점등시험기로 구동이 된다. 점등시험기는 디지털 전원공급기를 통하여 열원에 설정한 전력량을 정량적으로 공급한다. 열원이 가열되면 히트싱크에서 방열이 시작되고 Fig. 2(b)에 포함된 사진과 같이 히트싱크 표면과 LED 및 필름히터 열원 접합부(Junction) 부위에 설치된 열전대를 통하여 온도 변화를 측정하였다. 내열시험기 챔버 내부에서 자연대류 열전달 실험을 위해 PC(Poly Carbonate)로 제작된 시험막스를 사용하였다. Fig. 3에서는 시험막스 내부에 설치된 시편의 모습을 나타내고 있다. 히트싱크는 Aluminum 재질로 만들었고 핀 형상과 개수, 길이는 동일한 설계조건으로 제작하여 사용하였다. 다양한 설치 각도에 대한 시험을 위해서 히트싱크 고정 지그를 제작하여 사용하였다. Fig. 3(a)는 LED 히트싱크의 시험을 위한 지그이고 Fig. 3(b)는 필름히터 히트싱크의 시험을 위한 지그를 나타낸다. 표준시험 조건은 상온에서 챔버 내부의 온도를 70 °C 환경으로 설정하여 1시간 30분 동안 가열한 후 열원에 전원을 공급하여 점등상태 3시간을 유지하여 방열시험을 진행하는 조건을 사용하였다. 각 실험 조건에서 측정 데이터는 신뢰성을 높이기 위하여 변수에 따른 시편을 3회 이상 반복 실험하여 그 결과를 분석하였다.

Table 1 Definition of installation direction parameter and test samples

Parameter	Slope angle						
	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
Vertical case							
Horizontal case							
Heat sink test sample with heat source and test directions	<p>Heat Sink(H/S) LED PCB</p>		<p>Film Heater</p>				

Table 2 Heat sink design shapes and position of convection holes

Heat sink design shapes				
Definition of convection holes	<p>Hole 0 Hole 1 Hole 2 Hole 4</p>			

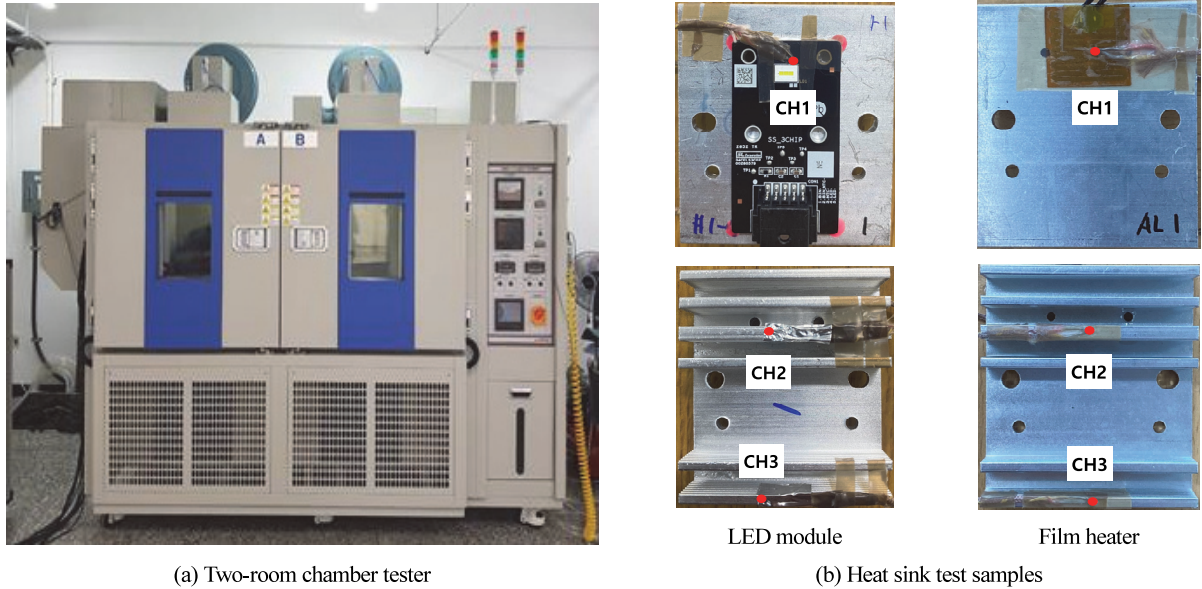


Fig. 2 Experimental test apparatus and test samples

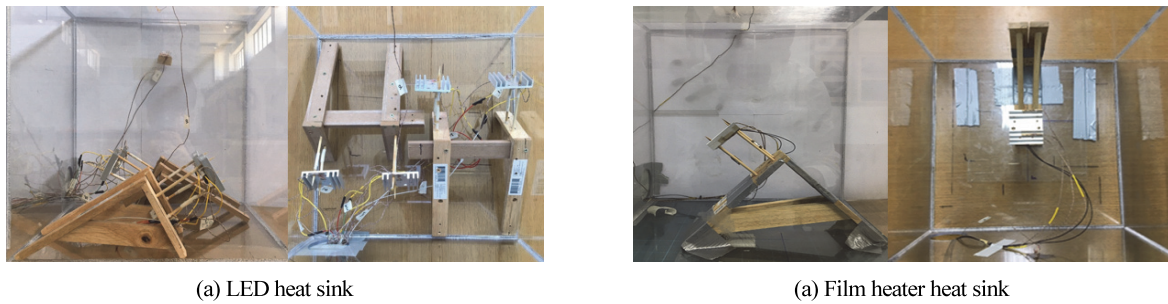


Fig. 3 Heat sink module test section

3. 연구결과

이상의 실험결과에서 측정된 데이터는 시험조건과 시편별로 구분하여 해석하였고 그 결과는 다음과 같다.

Fig. 4는 설치각도가 수평방향 90°인 실험에서 측정된 온도와 전류 공급량을 예시로 나타낸 것이다. 모든 시험은 표준시험 조건으로 가열과정과 등온(70°C)상태를 확인한 후 점등하여 3시간 동안 시험을 진행하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 시험에서는 1시간 30분 가열 후 목표 온도 70°C에 도달하였고 열원 가열 후 각 부위별 측정 온도가 방열성능에 따라 변화되고 있는 모습을 확인할 수 있다. 또한 동일한 시험 환경에서 다양한 시편의 설치 조건에 따른 반복 시험의 결과를 종합적으로 분석하여 각 변수에 대한 결과를 분석하였다.

3.1 설치방향각

Fig. 5에서는 냉각핀의 설치각도를 수직, 수평방향으

로 LED(Hole 0 ~ 4)와 필름히터(HT)에 대해 각각 30°와 45° 간격에 대하여 시험하고 측정된 열원 Junction 부위의 온도를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 수직방향의 설치각도에 따른 Junction 온도의 최대값을 대류홀의 유무와 열원에 따라 비교한 것이다. 수직방향 설치각도가 증가함에 따라 Junction 부위의 측정온도는 특별한 경향성이 나타나지 않지만 필름히터의 경우 90°에서 온도가 가장 높은 최악조건임을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 수평방향의 설치각도에 따른 Junction 온도의 최대값을 비교한 것이다. 수평방향의 경우 수직과 달리 설치각도가 90°에서 측정온도의 최소값을 가지는 최적조건이 존재하고 LED와 필름히터 모두 동일한 경향성을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 5에서 설치방향각에 따른 측정 온도를 비교하였을 때 수평방향 90°에서 냉각성능이 가장 우수하다는 것을 확인할 수 있다.

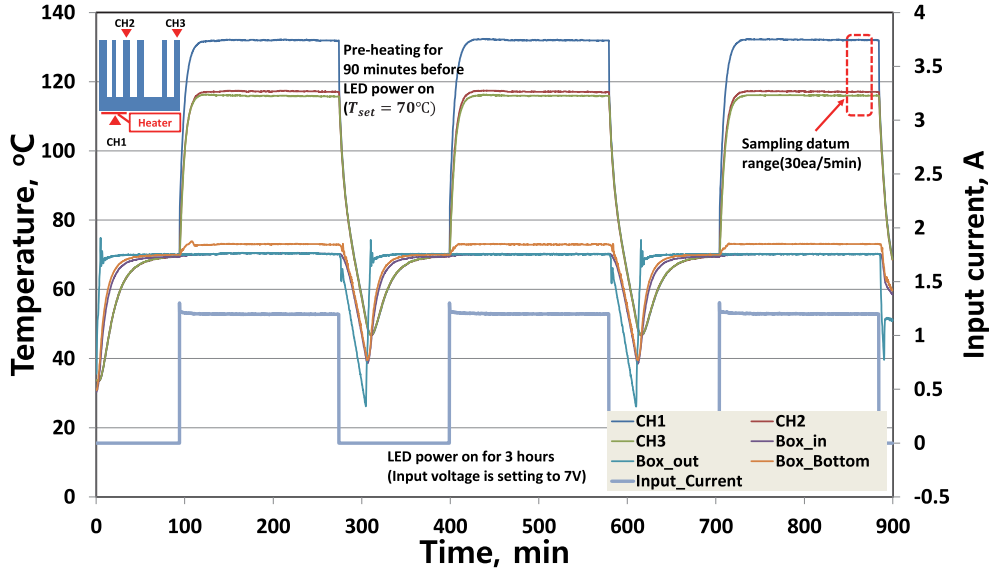
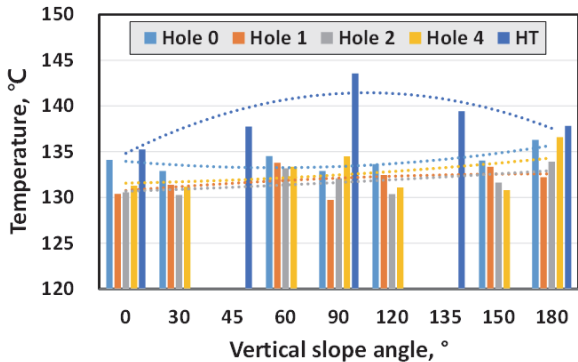
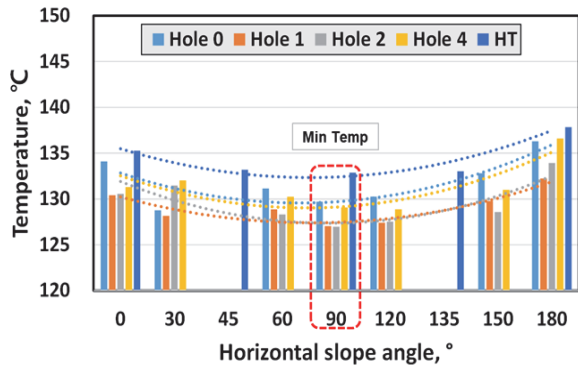


Fig. 4 Measurement temperature data from the vertical angle (90 °) of horizontal direction slope



(a) Vertical slope angle



(a) Horizontal slope angle

Fig. 5 Maximum measurement temperature(LED test: Hole 0 ~ 4, Film heater: HT)

3.2 대류홀 유무

Fig. 6은 LED(Hole 0 ~ 4)와 필름히터(HT)에 대한 실험 데이터의 평균값을 표준편차와 함께 나타낸 것이며 전체 실험데이터(Fig. 6(a)와 (c))는 90 ° 각도 시험조건에 대한 실험데이터(Fig. 6(b)와 (d))와 구분하여 비교해 보았다. 각 시편에 설치된 열전대는 3개이며 실험결과 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 시편에 대하여 반복실험(5회)을 통하여 열전대 온도를 측정하였다. CH1 지점의 측정 온도 데이터 중에서 최대값과 최소값을 제외한 3회 측정 온도의 평균을 해당 시편의 평균값으로 산출하였고, 측정온도의 산포정도를 나타내기 위하여 평균값 산출에 사용된 3회 측정데이터의 표준편차를 함께 표시하였다. Fig. 6(b)는 수직방향에서 90 ° 조건에 대한 실험데이터를 나타내는데 온도의 평균값의 최대차이는 대류홀이 1개(Hole 1)와 4개(Hole 4)인 경우로 4.8 °C에 해당된다. 또한 최대 표준편차를 가지는 경우는 대류홀이 2개(Hole 2)인 경우로 1.93 °C에 해당되며 최대 표준편차가 평균값의 최대차이보다 작은 값을 나타내기에 시험의 신뢰성을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 6(d)는 수평방향에서 90 ° 조건에 대한 실험데이터를 나타내고 이를 살펴보면 대류홀이 없는 것(Hole 0)과 1개(Hole 1)인 경우 온도의 평균값의 차이는 2.7 °C로 가장 큰 차이를 나타내었고 최대 표준편차를 가지는 경우는 대류홀이 4개(Hole 4)인 경우의 1.47 °C로 최대 표준편차가 평균값의 최대차보다 작은 값을 나타내기에 수직방향의 경우와 동일하게 시험의 신뢰성을 확인할 수 있다. 결과적으로 Fig. 6을 종합적으로 분석해보

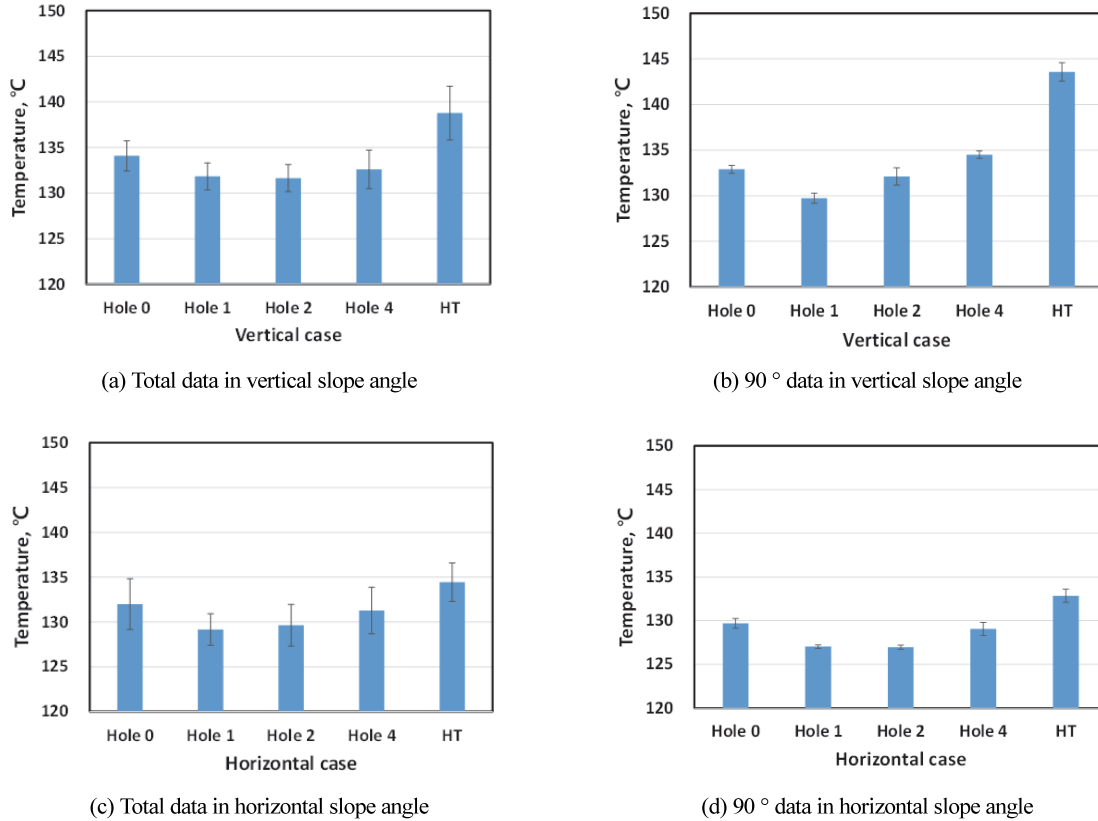


Fig. 6 Hole effect on average temperature (LED test: Hole 0 ~ 4, Film heater: HT)

면 대류홀의 개수가 1~2개에서 방열성능의 최적설계조건이 존재함을 확인할 수 있다. 또한, 대류홀 유무에 따라 수평, 수직의 설치각도와 무관하게 Junction 온도의 측정값이 최소가 되는 설계조건이 1~2개 사이에 존재함을 확인할 수 있다. 따라서 히트싱크 Base plate에 대류홀을 추가함으로써 방열성능을 개선할 수 있으며 또한 대류홀의 수량과 크기에 따른 최적조건이 존재함을 확인할 수 있다. 대류홀이 4개인 경우를 보았을 때 대류홀이 1~2개인 경우보다 온도가 높은 것을 살펴보면 히트싱크에 대류홀이 추가되는 경우 대류열전달 효과는 향상하지만 대류홀 개수가 증가하는 만큼 전도열저항이 증가하여 방열성능 개선에 한계가 있음을 알 수 있다.

이상의 실험적 연구를 통하여 설치각도와 대류홀 설계를 위한 히트싱크의 최적조건이 존재함을 확인할 수 있었고 열원이 달라져도 동일한 경향을 확인할 수 있다. 대류홀 유무에 따른 측정온도의 최대, 최소값의 편차는 수평각도에서 2.8 °C, 수직각도에서 2.4 °C로 측정되었고 대류홀의 최적조건에 따라 냉각성능이 크게 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 대류홀 유무에 따라서 4가지 다른 형상의 히트싱크에 대하여 설치방향각에 따른 방열성능을 실험적으로 비교해 보았고 열원에 따른 경향성의 차이가 있는지를 비교해 보았다.

- 1) 히트싱크의 설치각도를 수직, 수평으로 구분하여 시험한 결과 수평방향 90°의 조건이 자연대류 냉각에 가장 효과적인 방열성능을 나타내었다. 90°의 조건을 실제 히트싱크의 설치각도로 사용할 수는 없지만 실제로 사용되는 180°의 조건에 비해 열원 Junction 부위의 온도가 5.2 ~ 7.5 °C 더 낮게 측정되어 유의미한 결과로 판단할 수 있다.
- 2) 대류홀 유무에 따른 방열성능을 비교해 보았을 때 1~2개에서 대류홀 개수의 최적설계조건이 존재함을 확인하였고 열원 Junction 부위에서 최대온도가 2.4 ~ 2.8 °C 더 낮게 측정되었다.
- 3) LED와 필름히터 2가지 열원에 대해 비교해 보았을 때 열원이 달라지더라도 동일한 경향성을 보이며 동일하게 수평방향 90°의 조건에서 가장 효과적인 방열성능

을 나타내었다. 필름히터의 경우 LED와 동일하게 90°의 조건에서 실제로 사용되는 180°의 조건에 비해 열원 Junction 부위의 온도가 5.0°C 가량 더 낮게 측정되어 유의미한 결과로 판단할 수 있다.

후 기

본 연구는 에스엘주식회사의 산학공동 연구지원(연구과제번호: 220C000143, 221C000304)으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- 1) K. T. Park, H. J. Kim, J. S. Yoo, M. G. Lee and D. K. Kim, "Experimental Study on Effect of Inclination Angle on Natural Convection from Cylindrical Heatsinks from Plate Fins," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.39, No.4, pp.343-350, 2015.
- 2) D. Y. Lee, "A Study on the Cooling Performance of Heat Sink on LED," Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol.16, No.5, pp.1861-1866, 2014.
- 3) W. J. Chung, "Comparison of Cooling Performance According to Heat Sink Pin Structure in Inverter's IGBT Module," Transactions of KSAE, Vol.30, No.12, pp.931-937, 2022.
- 4) T. S. Jung and H. K. Kang, "Investigation of Natural Convective Heat Flow Characteristics of Heat Sink," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.37, No.1, pp.27-33, 2013.
- 5) C. W. Yu, K. H. Min, D. H. Seo, H. H. Son, H. J. Choi, S. J. Jo, C. W. Choi and H. S. Ko, "Heat Transfer Analysis for Development of LED Module Cooling System," The Korean Society of Mechanical Engineers Spring Conference Proceedings, pp.1629-1634, 2012.
- 6) B. H. Choi and C. O. Kim, "A Study on the Numerical Analysis of Heat Sink for Radiant Heat of Automotive LED Head Lamp," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.13, No.10, pp.4398-4404, 2012.
- 7) H. S. Jang, J. M. Lee, C. K. Hwang and K. Sa-kong, "Experimental Study on Optimization of Heat Dissipation System for Automotive LED Headlamp," The Korean Society of Mechanical Engineers Spring and Fall Conference Proceedings, pp.834-838, 2013.
- 8) J. H. Kim and G. W. Lee, "Effect of the Variation of Base Thickness on the Heat Release Performance of the Heat Sink," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.15, No.8, pp.4749-4755, 2014.
- 9) E. D. Jung and Y. L. Lee, "Study on the Thermal Performance of the LED Head Lamp for Passenger Cars," KSAE Fall Conference Proceedings, pp.1395-1396, 2014.
- 10) M. Y. Ku, H. C. Shin and G. W. Lee, "Effects of Symmetrically Arranged Heat Sources on the Heat Release Performance of Extruded-Type Heat Sinks," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.40, No.2, pp.119-126, 2016.
- 11) B. C. Chang and K. E. Kim, "A Study on Radiant Heat Characteristics of Heat Sink with LED Lamp for Bulb Type," Transactions of the Korean Society of Mechanical Technology, Vol.16, No.6, pp.2015-2019, 2014.
- 12) M. Baldry, V. Timchenko and C. Menictas, "Optimal Design of a Natural Convection Heat Sink for Small Thermoelectric Cooling Modules," Applied Thermal Engineering, Vol.160, Paper No.114062, 2019.
- 13) Z. Xu, "Heat Transfer Performance of the Rectangular Heat Sinks with Non-uniform Height Thermosyphons for High Power LED Lamps Cooling," Case Studies in Thermal Engineering, Vol.25, Paper No.101013, 2021.
- 14) R. Singh, M. Mochizuki, T. Yamada and T. Nguyen, "Cooling of LED Headlamp in Automotive by Heat Pipes," Applied Thermal Engineering, Vol.166, Paper No.114733, 2020.
- 15) H. Chen, S. Lin and C. Xiong, "Analysis and Modeling of Thermal Effect and Optimal Characteristic of LED Systems with Parallel Plate-Fin Heatsink," IEEE Photonics Journal, Vol.9, No.2, Paper No.8200411, 2017.
- 16) A. M. A. Soliman, H. Hassan and S. Ookawara, "An Experimental Study of the Performance of the Solar Cell with Heat Sink Cooling System," Energy Procedia, Vol.162, pp.127-135, 2019.