한국기계가공학회지, 제12권, 제6호, pp.152-158 (2013.12) ISSN 1598-6721 (Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol.12 No.6, pp.152-158(2013.12)ISSN2288-0771 (Online)

분사냉각모듈 내에 부착된 히트싱크에 따른 고출력 LED의 냉각성능에 관한 연구

구건모*, 김경진**, 박상희***#, 최성대****, 허정욱*****
(*금오공대 기계공학과 대학원, **금오공대 기계시스템공학과, ***#금오공대 기계공학과,
****금오공대 지능기계공학과, *****농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부)

Cooling Performance Study of a Impinging Water Jet System with Heat Sink for High Power LEDs

G. M. Ku*, K. Kim**, S. H. Park***#, S. D. Choi****, J. W. Heo*****
(Received 25 November 2013; received in revised form 30 December 2013; accepted 30 December 2013)

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate cooling performance of high power LEDs from 100 to 200 W class by using a jet impingement cooling module. The numerical analysis of forced convection cooling inside cooling module is carried out using a multi-purpose CFD software, FLUENT 6.3. In the experiments, the LED cooling system consists of jet impingement module, heat exchanger, water reservoir, and pump. In the present study, the cooling performance of jet impingement cooling module is investigated to determine the effect of the heat sink types on the impinging surface, the space and length of fins. Numerical and experimental studies show the reasonable agreement of LED metal PCB temperature between those results and give the optimized design parameters such as the space of fin and the length of fin. Also, the pin fin type of heat sink is found to be more efficient than the plate type heat sink in jet impingement cooling.

Key Words : Light Emitting Diode(LED), LED Cooling(LED 냉각), Impingement Cooling(분사냉각), Heat Sink (히트싱크)

1. 서 론

빛의 혁명으로 불리는 전색 발광 LED의 시대가 도래하면서 LED의 응용범위가 날로 새로운 영역으로 넓혀지고 있다. 하지만 고출력 LED 구동 시 많은 양의 열이 발생하여 LED의 반영구적인 장점을 위협하는 요인이 되며 광출력 감소, Bond Wire 파손, 에폭시 렌즈 황변, Solder부 파괴 등의 기술적 문제점이 발생한다. 따라서 LED의 고출력, 고휘도, 반영구적인 수명을 유지하기 위해서는 적절한 냉각 기술이 반드시 필요하다.

LED의 방열기술로 자연대류를 이용한 냉각 fin의

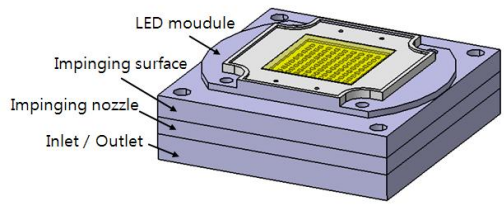
* Graduate school of Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology
** Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology
***,# Corresponding Author:
Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology
E-mail : parksh@kumoh.ac.kr
**** Dept. of intelligent Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology
***** National Academy of Agricultural science, Rural Development Administration

경우 경제적인 반면에 방열 성능이 낮고, 히트파이프는 그 성능은 검증이 되었지만 소형화가 어렵고 제작비용이 높다는 단점이 있다. 이 밖에 Peltier 효과를 이용한 열전냉각법, 초음파 가진을 통해 자연대류를 증가시키는 초음파 냉각 등 냉각방식이 있다. 열전냉각법은 무소음, 무진동, 소형화가 가능하다는 장점이 있지만 낮은 냉각효율 때문에 특수 용도로만 사용되며, 초음파 냉각법은 소음 및 진동 등으로 인해 널리 사용되지는 않고 있는 실정이다.

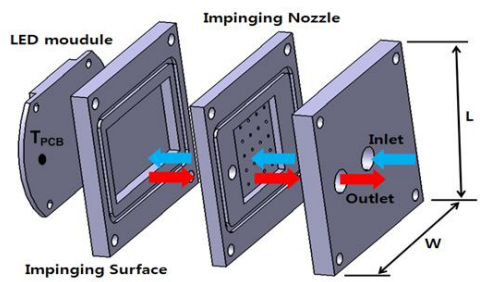
따라서 저소음, 저진동, LED의 수명연장 및 신뢰성과 안정성을 향상시키는 우수한 냉각방식에 대한 추가적인 연구가 필요하다. 본 연구에서는 LED 모듈의 냉각방법으로 액체의 강제대류를 이용한 것으로서 액체를 고속으로 고온 면에 충돌시키며, 액체냉각방식 중에서도 높은 냉각 성능과 소형화가 가능하다는 장점 때문에 LED 모듈 등 전자기기냉각 등에 적용이 가능한 분사냉각모듈을 고려해 보았다. 분사충돌냉각 방식은 강판냉각, 가스터빈 블레이드 냉각, 전자장비 냉각, 박막액정표시장치(TFT-LCD)의 제조 등의 산업에 광범위하게 응용되고 있다. 이런 분사충돌냉각 방식을 이용한 선행연구는 다음과 같다.

Liu 등[1-2]은 평면에 충돌하는 완전 발달된 원형제트에 의한 대류열전달계수를 측정하여 분사충돌제트에 의한 열전달효과를 연구하였다. Glynn 등[3]은 분사노즐의 직경이 0.5mm～1.5mm이며 Re = 1000～20000 범위, 분사제트와 충돌면 사이의 무차원 거리비가 1～4인 경우에 공기와 물 제트의 열전달 성능을 실험적으로 수행하였다. Naphon 등[4]은 개인용 컴퓨터 CPU의 방열을 위해 충돌표면에 사각 fin형의 히트싱크와 액체 충돌제트를 이용하여 유량과 사각 fin 사이의 간격에 따른 열전달 특성을 실험적으로 연구하였다.

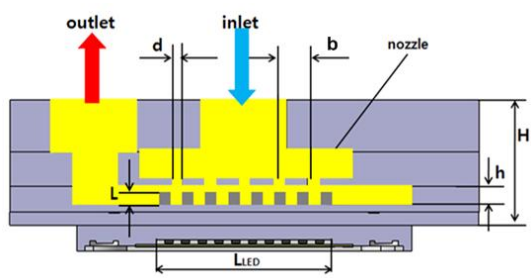
현재 분사충돌제트에 관한 연구는 주로 레이놀즈수, 노즐과 충돌면 사이의 거리, 노즐 형상, 제트 방향, 다중제트 등이 유동과 열전달에 미치는 영향을 다루고 있는데, 아직 충돌면의 형상에 따른 특정 형상의 히트싱크가 부착된 액체충돌 냉각시스템의 열전달 효과를 규명한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 물을 작동유체로 사용한 분사냉각모듈을 구성하여 고출력 LED의 냉각성능을 분석하였다. LED 인가전력, 충돌표면상 여러 형태의 히트싱크 형상을 변화시켜 그에 따른 LED 메탈 PCB의 온도 변화를 실험과 전산해석



(a) External view



(b) Exploded view



(c) Sectional view

Fig. 1 Schematic diagrams of impinging jet cooling module of high power LED

으로 분석하여 최적의 냉각시스템 구성변수를 찾아 구성된 분사충돌 냉각모듈의 성능을 검증하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1(a), (b), (c)는 본 연구의 대상인 LED 분사냉각모듈 시스템의 개략도를 보여주며, 실험에서 사용한 고출력 LED 모듈은 Fig. 2에 나타나있다. LED 소자 및 메탈 PCB를 포함하는 LED 모듈의 전체 크기는 56×40×1.5

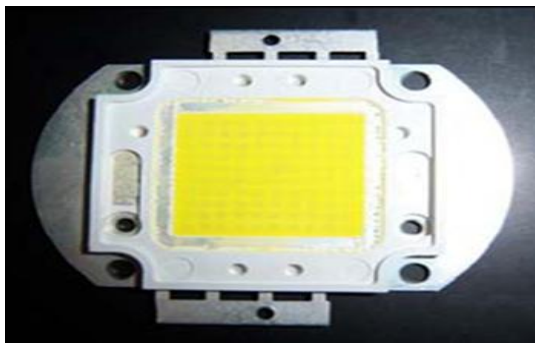


Fig. 2 Photographic view of LED module with metal PCB

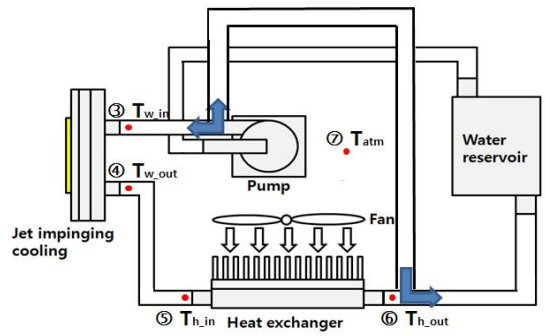


Fig. 3 Schematic of experimental apparatus for the measurement of cooling performance of impinging jet cooling module

mm이며, LED의 입력전력을 100, 150, 200 W로 증가시키며 실험을 수행하였다. 분사냉각모듈의 노즐부는 작동유체인 물을 고속으로 분사충돌제트의 형태로 LED 모듈이 뒷면에 장착된 냉각 대상면에 충돌하게 함으로서 열전달효과를 증대시키게 된다.

분사냉각모듈의 충돌제트 대상면에는 pin fin과 plate fin 형상의 히트싱크가 부착되었다. 냉각 대상면의 재질은 기본적으로 구리이며, 금속재료에 따른 메탈 PCB의 온도를 확인해 보기 위해 이를 알루미늄, 황동, 스틸 등으로 바꾸어 가며 실험을 수행하였다. 그리고 충돌대상표면을 제외한 노즐과 입・출구 구조물 등의 재질은 알루미늄으로 제작하였다. 히트싱크가 장착되는 냉각 대상면의 크기는 56×56 mm, 높이는 5 mm이며 특히 작동유체가 고속으로 충돌되는 영역의 크기는 40×26×3 mm이다. 노즐 구조물의 크기는 냉각 대상면의 크기와 동일한데, 노즐이 배열된 부분의 크기는 25×25×2 mm이다. 노즐 직경은 1 mm이며 총 25개의 노즐이 정방형으로 배치되었다. 또한 작동유체 입・출구 구조물의 크기는 56×56×6 mm이다.

Fig. 3는 본 연구에 사용된 실험장치의 구성을 개략적으로 보여준다. LED가 장착된 분사냉각모듈, 펌프, 열교환기, 물탱크 등이 튜브로 연결되며 그 전원공급 장치는 VUPOWER AK-3005D를 사용하였다. 고출력 LED의 전원공급 장치는 DC POWER SUPPLY GPR-3520H를 사용하였으며 데이터 획득장치로 Agilent 34970A를 이용하였다.

소형 펌프를 구동하여 작동유체인 물을 튜브를 통해 분사냉각모듈로 보낸다. 분사냉각모듈을 통과하며 열을 얻게 된 물은 열교환기로 이동하여 상온으로 냉각되어 물탱크를 통해 다시 소형 펌프로 이동한다. 팬에 공급되는 전압과 전류는 각각 DC 12 V, 0.35 A이며 소형 펌프의 최대 유량 값은 2.7 ℓ/min이다. 본 실험에서의 유량은 고정 값이기에 펌프 최대유량의 절반인 1.35 ℓ/min 만 사용하기 위해서 Fig. 3에 나와 있는 것과 같이 펌프의 출수관 쪽에 물을 분배할 수 있는 Y자형 연결구를 설치하여 1/2의 물만 분사냉각모듈로 공급하고 나머지는 물탱크로 드레인 되도록 구성하였다.

3. 수치해석 및 방법

고출력 LED 냉각을 위한 분사냉각모듈의 유동전산해석에는 상용 CFD 패키지인 FLUENT 6.3이 사용되었다. 전산해석을 위한 수치모델과 격자 생성에는 GAMBIT이 이용되었으며, 전산격자 전체개수는 약 24만개이다. 본 연구에서는 해석결과의 정확도를 높이기 위해 실제 형상과 최대한 유사하게 모델링하였는데, 모듈 내 충돌제트 유동의 수치해석 조건으로 유동은 3차원 비압축성, 정상상태, 난류 유동으로 가정하였으며, 복사에 의한 열손실은 고려하지 않았다.

난류 모델로 선행연구[5]에서 많이 사용되고 실험 결과와 비교하여 비교적 정확한 k-epsilon 모델을 사용하였다. 전산해석 시 압력과 속도가 결합되는 유동장 해석을 위하여 SIMPLE 알고리즘을 선택하였다. 유동 및 에너지 지배방정식은 대류항과 에너지 방정식의 이산화 정확도를 높이기 위해 2차 상류도식을 이용하여 이산화 하였

다. 경계조건으로 냉각모듈의 작동유체 입구는 유속조건, 출구는 압력조건을 주었다. 그리고 전산유동해석영역은 Fig. 1(c)에 보이는 작동유체 입구에서 출구까지의 모듈 내의 전체 유체영역을 대상으로 하였으며, 알루미늄과 구리 재질인 모듈의 고체영역도 온도장 해석이 진행되었다. 본 해석에 사용된 메쉬의 개수는 plate fin의 경우 2381471개(L=20mm)~2412388개(L=17mm)로, pin fin의 경우에는 2259712개(7X7배열)~2410957개(9X9배열)로 하였다.

열원인 LED 장착 부분에서는 각각 100, 150, 200 W의 열 발생량에 해당하는 균일 열유속 조건을 주었다. 입구 유속조건은 실험에 적용된 펌프유량을 튜브 단면적으로 나누어 환산한 유속 값을 사용하였으며, 입구 유체온도로 실험 결과에서 얻은 입구온도인 300.5 K를 주었다. 수치해석 결과 값을 실험 결과 값과 비교하여 실험으로는 확인이 어려운 충돌제트시스템 내부의 유동분포 및 LED 메탈 PCB의 온도분포를 확인하는데 사용하였다.

4. 연구 결과 및 고찰

4.1 Pin Fin 길이와 간격에 따른 영향

분사충돌제트 냉각 대상면에 Fig. 4와 같은 사각형 pin fin 형태의 히트싱크가 부착된 경우, 노즐 25개, 유량 1.35 lpm을 유지한 상태에서 수치해석 값과 실험값을 비교분석하였다. 먼저 LED 입력전력을 200 W로 고정하여 pin fin의 길이와 간격의 변화가 LED 냉각성능에 미치는 영향을 전산해석 결과로 알아보았다. Fig. 4의 왼쪽 그림들은 히트싱크 pin fin의 배치와 함께 pin fin 끝 단면높이에서의 온도분포를 보여준다. 그리고 오른쪽 그림들은 메탈 PCB의 온도분포를 나타낸다.

Fig. 4(a)와 (b)와 같이 9×9로 정방 배열된 pin fin 의 길이가 0.5와 2.5 mm인 경우, 예상대로 짧은 길이의 히트싱크보다는 2.5 mm로 긴 경우에 더 낮은 히트싱크 온도분포를 보임을 관찰할 수 있다. LED 메탈 PCB의 온도분포에 대한 수치해석 결과를 보면, pin fin 길이가 0.5~2.5 mm로 증가함에 따라 PCB 최고온도는 58.9℃에서 54.5℃로 감소하였고 온도편차 역시 19.2℃에서 16.1℃로 감소하였다.

Fig. 4(c)와 (d)에서는 7×7로 정방 배열된 pin fin 히트싱크에 대하여 pin fin 사이 간격 변화에 따른 영향을 보여준

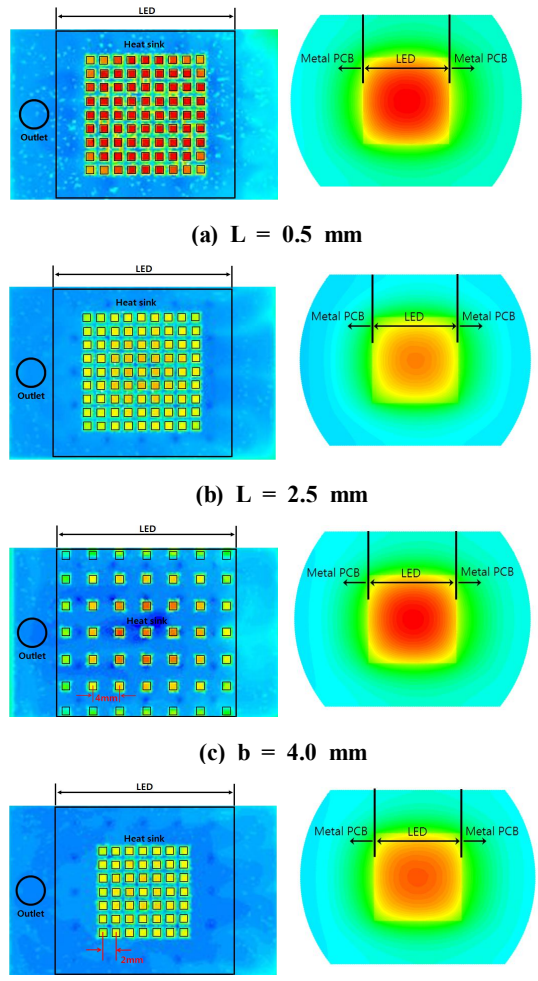
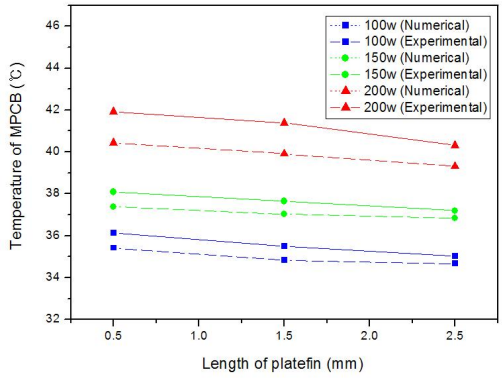
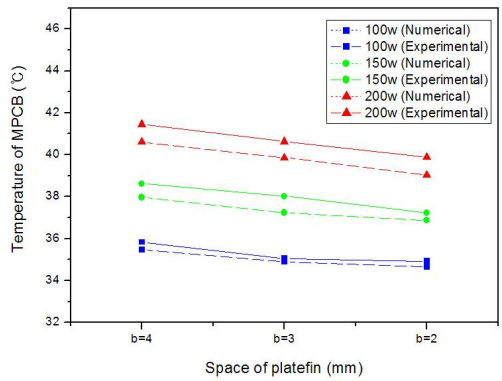


Fig. 4 Effect of the length (L) and space (b) of pin fins on the temperature of fins and LED metal PCB

다. 간격이 4 mm의 경우는 가운데 배열된 9개의 fin 부분에 열이 집중되어 외곽의 fin과 약 9℃의 큰 온도차가 발생하였다. 하지만 간격이 2 mm의 경우에는 히트싱크 전체적으로 균일하게 열이 분산되어 간격이 4 mm일 때보다 히트싱크 전체가 비교적 낮은 온도로 유지되었다. 이는 온도가 가장 높은 LED 광원 중앙 부분에 fin을 집중하여 배열함으로서 고온부에서의 열전달 표면적 증가에 따른 열전달 효과의 극대화에서 비롯된 것이라



(a) Effects of plate fin length

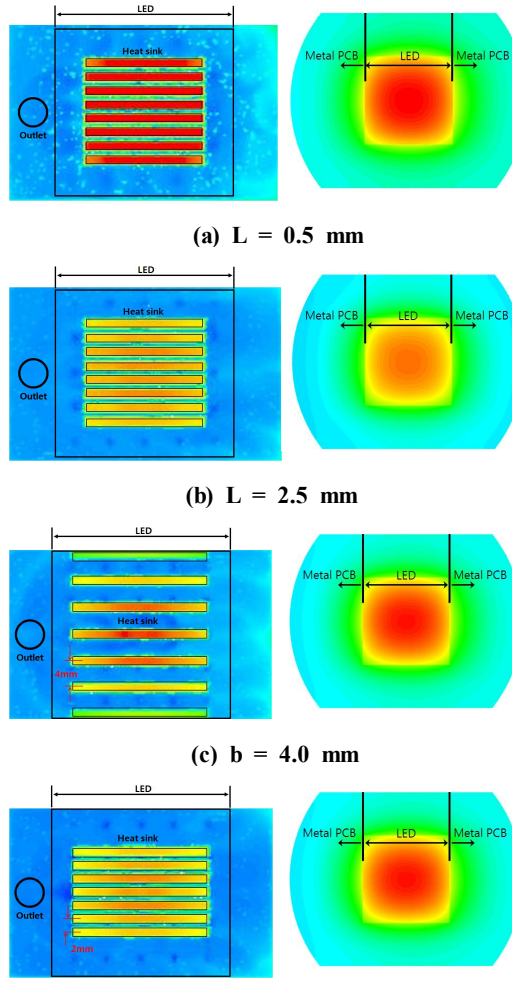


(b) Effects of plate fin space

Fig. 7 Effect of the length (L) and space (b) of plate fins on temperature of LED metal PCB

판단된다. 메탈 PCB의 온도분포를 보면 pin fin 간격이 4 mm에서 2 mm로 감소함에 따라 PCB 최고온도는 58.8℃에서 55.9℃로 감소하였고 온도편차는 19.7℃에서 16.8℃로 감소하였다.

Fig. 5는 LED 입력전력을 100~200 W로 증가시키면서 pin fin 길이와 간격에 따른 LED 메탈 PCB의 온도를 나타낸 것이다. 실험 온도측정 위치는 Fig. 1(b)에 표시되어 있으며, 이 실험 측정치와 수치해석 결과를 비교하여 볼 때 상당히 일치하는 경향을 보여 전산해석 정확도가 검증되었다고 볼 수 있다. 선행연구[5]와 같이 냉각모듈의 열저항을 계산하였을 때, 150 W를 기준으로 하여 pin fin 길이가 0.5에서 2.5 mm로 증가함에 따라 열저항이 0.047에서 0.039 ℃/W로 약 18% 감소하였다. 한편 pin



(a) L = 0.5 mm

(b) L = 2.5 mm

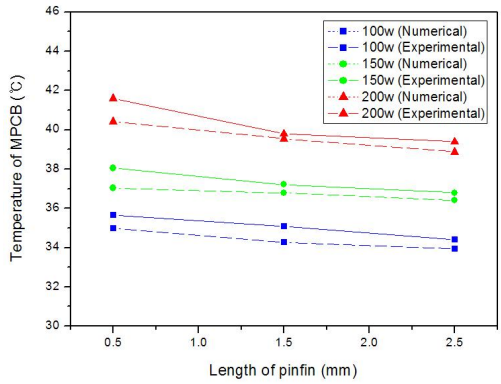
(c) b = 4.0 mm

(d) b = 2.0 mm

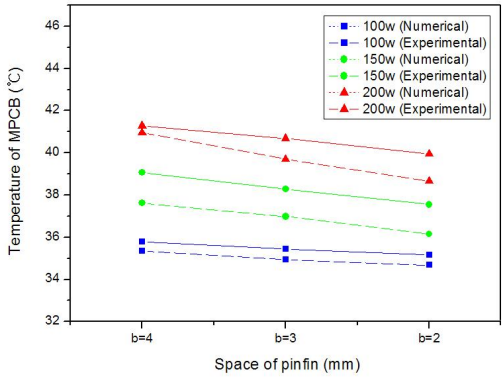
Fig. 6 Effect of the length (L) and space (b) of plate fins on the temperature of fins and LED metal PCB

fin 간격이 4에서 2 mm로 감소함에 따라 열저항은 0.051에서 0.045 ℃/W로 약 13% 감소하였다.

위 결과를 살펴볼 때 fin의 길이가 길어질수록 예상대로 히트싱크 전체 열전달 효과는 커졌다. Fin 사이의 간격에 대해서는 전산해석상으로는 간격이 작으면 작을수록 계속적으로 열전달 효과가 조금씩 증가하는 것으로 나왔지만, 간격 2 mm를 기점으로는 거의 변화가 없었다. 따라서 실제 가공의 경제성을 고려해 볼 때



(a) Effects of pin fin length



(b) Effects of pin fin space

Fig. 5 Effect of the length (L) and space (b) of pin fins on temperature of LED metal PCB

fin의 간격이 2 mm일 때가 최적 조건이라 판단된다.

4.2 Plate Fin 길이와 간격에 따른 영향

앞서의 pin fin 경우와 마찬가지로 노즐 수는 25개, 유량은 1.35 lpm로 유지한 상태에서 LED 입력전력을 200 W로 고정하여 plate fin의 길이와 간격의 변화가 LED 냉각성능에 미치는 영향을 전산해석을 통하여 알아보았으며 그 결과는 Fig. 6에 정리되어있다.

Fig. 6(a)와 (b)는 8개 plate fin 의 길이가 0.5와 2.5 mm 일 때의 fin과 냉각 대상면의 온도분포를 나타낸 그림이며, Fig. 6(c)와 (d)에서는 7개 plate fin 사이의 간격이 4와 2 mm로 변할 때 fin과 냉각 대상면의 온도분포를

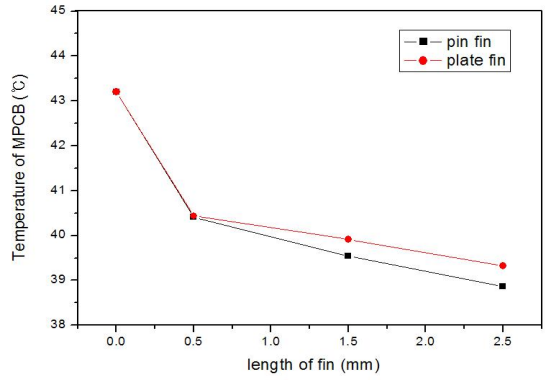


Fig. 8 Comparison of LED metal PCB temperature with pin fins and plate fins

나타낸다. pin fin의 경우와 비슷하게 fin 길이의 증가에 따른 온도 감소 효과를 보여준다. 또한 fin 간격이 4 mm인 경우는 중앙의 사각 fin 세 개 정도에 LED에서 발생된 열이 집중되고 있어 위아래 떨어져 있는 fin과는 확연한 온도차를 보여주고 있다. 이에 비해 간격이 2 mm의 경우에는 전체적으로 균일하게 열이 분산되어 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 7에서는 LED 입력전력을 100에서 200 W로 증가시키면서 plate fin 길이 및 간격에 따른 LED 메탈 PCB의 온도를 실험값과 비교하였다. 실험 결과 150 W일 때 plate fin 길이가 0.5에서 2.5 mm로 증가함에 따라 열저항은 0.0473에서 0.0413 ℃/W 로 약 12.7% 감소하였다. 한편 plate fin 간격이 4에서 2 mm로 감소함에 따라 열저항은 0.051에서 0.042 ℃/W로 약 18.3% 감소하였다.

Fig. 8에서는 히트싱크가 pin fin과 plate fin인 경우에 대한 메탈 PCB 온도의 수치해석 값을 비교하였다. fin이 없는 경우와 비교해서는 히트싱크가 존재함에 따라 냉각효과가 크게 나타남을 볼 수 있다. 또한 그 차이는 크지 않지만 plate fin보다는 pin fin인 경우가 냉각효과가 좀 더 크게 나타났으며, 이는 pin fin의 복잡한 형상에 따른 fin 및 냉각표면에서 열전달계수가 약 2.2W/m2K 정도 증가하기 때문인 것으로 보인다.

4.3 재질에 따른 영향

Fig. 9에는 분사제트 충돌 대상면의 금속재료에 따른 LED 메탈 PCB와 Interface의 온도를 각각 비교하였다. 메탈 PCB 온도는 낮은 순서로 구리(k=398W/mK), 알루

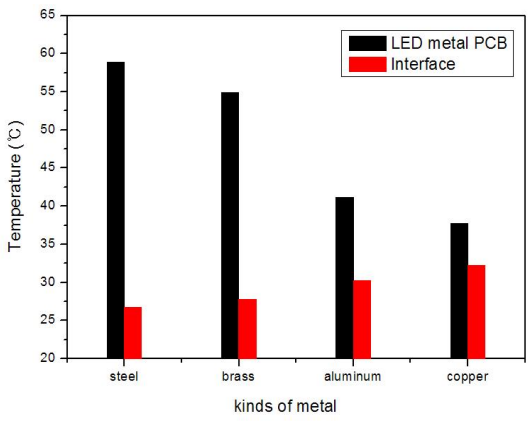


Fig. 9 Effects of materials of impinging surface structure on the temperature of metal PCB

미늄(k=237W/mK), 황동(Brass, k=121W/mK), 스틸(Carbon steel, k=80.2W/mk) 순이었으며, Interface의 온도는 메탈 PCB의 경우와 반대의 경향을 보였다. 즉 구리가 스틸보다 열전도도가 약 5배 정도 더 크기 때문에 메탈 PCB의 온도는 스틸보다 구리의 경우가 약 22℃ 정도 더 낮게 나타났으나 interface 온도는 구리가 스틸보다 약 7℃ 정도 더 높게 나타났다. 이것은 열전도도가 낮은 금속일수록 원활하게 열을 전달하지 못하기 때문에 고온의 충돌대상구조물과 접촉되어있는 LED 모듈과 열전달이 잘 이루어지지 않아 interface 온도가 상대적으로 낮아지게 된다. 그리고 충돌대상 구조물의 재질의 변화에 따라 메탈 PCB의 온도가 크게 변하는 것은 그 금속재질의 열전도도 및 열저항 변화에 가장 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

5. 결 론

고출력 LED에 적용한 분사냉각모듈의 냉각성능 연구를 위하여 LED 인가전력, 그리고 분사제트 충돌 대상면에 pin fin, plate fin의 두 종류의 히트싱크를 부착하여 fin의 길이 및 간격을 변화시키며 이에 따른 LED 메탈 PCB에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에서는 고출력 LED 인가전력 100~200 W 조건에서 분사냉각모듈 냉각 실험장치를 구성하여 온도측정 실험을 수행하였으며, FLUENT 소프트웨어를 이용한 수치해석도 실행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 예상대로 pin fin과 plate fin 두 히트싱크 형상 모두 fin 길이 증가에 따라 메탈 PCB 온도 및 열저항이 감소하였다. 히트싱크의 fin 간격이 작은 것이 LED 메탈 PCB 온도 감소뿐만 아니라 LED 온도 균일화에도 좋은 결과를 보였다.
2. 두 가지 히트싱크의 냉각성능을 비교하여볼 때, 차이는 크지 않지만 fin의 길이가 커짐에 따라 pin fin 형상이 모듈 냉각에 좀 더 유리함을 보였다.
3. 구조물의 재질을 변화시켜가면서 LED 메탈 PCB 온도를 측정하였고, 온도가 낮은 것부터 구리, 알루미늄, 황동, 스틸 순이었으며, 충돌대상구조물의 재질의 변화에 따라 LED 메탈 PCB의 온도가 크게 변함을 발견하였다.

후 기

본 논문은 농촌진흥청 국립농업과학 시험연구사업(프로젝트 번호 PJ907067)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Liu, S., Yang, J., Gan, Z., and Luo, X., “Structural optimization of a microjet based cooling system for high power LEDs,” International Journal of Thermal Sciences, Vol. 47, pp. 1086-1095, 2008.
2. Liu, S., Lin, T., Luo, X., Chen, M., Jiang, X., “A microjet array cooling system for thermal management of active radars and high-brightness LEDs,” Electronic Components and Technology Conference, pp. 1634-1638, 2006.
3. Glynn, C. and O'Donovan, T. S., Murray, D.B., “Jet impingement cooling,” 9th UK National Heat Transfer Conference, Manchester, 2005.
4. Naphon, P. and Wongwises, S., “Investigation on the jet liquid impingement heat transfer for the central processing unit of personal computers,” International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 822-826, 2010.
5. Lee, D. M., Park, S. H., Kim, D., and Kim, K., “A study on thermal performance of an impinging cooling module for high power LEDs,” Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 11, pp. 13-19, 2012.