고출력 LED 램프 용 방사형 히트싱크의 형상 및 표면코팅이 LED 냉각성능에 미치는 영향에 대한 연구

김 효 성,¹ 박 상 희,^{*2} 김 동 주,² 김 경 진³

¹금오공과대학교 기계공학과 대학원

²금오공과대학교 기계공학과

³금오공과대학교 기계시스템공학과

THE EFFECTS OF RADIAL HEAT SINK GEOMETRY AND SURFACE COATINGS ON THE LED COOLING PERFORMANCE FOR HIGH POWER LED LAMP

H.S. Kim,¹ S.H. Park,^{*2} D. Kim² and K. Kim³

¹Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh Nat'l Institute of Technology

²Dept. of Mechanical Engineering, Kumoh Nat'l Institute of Technology

³Dept. of Mechanical System Engineering, Kumoh Nat'l Institute of Technology

The purpose of this study is to investigate the cooling performance of radial heat sink used for high power LED lightings by natural convection cooling with surrounding air. Experimental and numerical analyses are carried out together. Parametric studies are performed to compare the effects of geometric parameters in radial heat sink such as the number of fins, fin height, fin length, and thickness of fin base as well as the surface coatings of radial heat sink. In this study, the cooling of 60 W LED lamp is examined with radiative heat transfer considered as well as natural convection. Numerical results show the optimum condition when the number of fin is 40, heat sink height is 120 mm, fin length is 15 mm, and fin base thickness is 3 mm. The difference in temperature of the LED metal PCB is within 1 °C between numerical analyses and experimental results. Also, the CNT coating on the heat sink surface is found to increase the cooling performance significantly.

Key Words : LED(Light Emitting Diode), 히트싱크(Heat Sink), 자연대류(Natural Convection), 복사(Radiation), 냉각성능(Cooling Performance)

1. 서 론

최근 LED(Light Emitting Diode)는 급격한 성능 향상과 가격 하락으로 인해 기존의 단순 표시 조명에서 벗어나 형광등, 백열등, 메탈할로겐라이드 등과 같은 전통적인 조명을 대체할 수 있는 새로운 조명 대체장치로 급속도로 그 영역을 확장하고 있는 중이다. LED를 이용한 제품은 기존의 조명에 비해 에너지 절감 효율이 약 60% 이상 뛰어나며, 기존 조명의 약

5배 이상의 장수명을 가진다. 특히 최근 불거지고 있는 환경 유해물질에 대한 규제 등의 법제 조항의 강화와 에너지 효율성에 대한 관심도가 늘어나면서 에너지 고갈문제를 해결할 고효율 광원으로서 LED 조명 기술이 크게 대두되고 있다[1].

LED 조명기구에는 기존 광원의 조도를 얻기 위하여 고출력의 MCP(Multi-Chip Package) LED를 사용하는 것이 효과적이다. 하지만 이러한 LED의 고출력화에 따라 LED 칩의 단위면적당 발열량이 크게 증가하면서 LED 칩의 오작동과 더불어 성능 및 수명을 급격히 저하시키는 요인의 하나로 작용한다. 따라서 LED의 신뢰성을 유지하기 위해서는 LED 패키지에 반드시 히트싱크와 같은 냉각장치를 부착하여 LED 칩의 온도를 허용 작동범위 내로 유지시켜야 한다[2,3].

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 COB구조의 60W급 MCP

Received: December 12, 2012, Revised: February 20, 2013,

Accepted: February 21, 2013.

* Corresponding author, E-mail: parksh@kumoh.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/ksce.2013.18.1.063>

© KSCFE 2013

Fig. 1 Schematic of high power LED lamp with radial heat sink

LED를 부착한 램프에 적용되는 방사형 히트싱크의 최적설계 인자를 전산해석을 통해 도출하고 방사형 히트싱크의 냉각 성능을 연구하고자 한다. 원통형 베이스와 사각 원으로 구성된 방사형 히트싱크 주위의 자연대류에 의한 열전달 및 복사 열전달을 수치적으로 해석하였고, 방사형 히트싱크 주위에서의 공기의 유동형태와 LED 메탈 PCB의 온도분포를 살펴보았다. 핀 개수, 히트싱크 높이, 핀 길이, 핀 베이스 두께 등 방사형 히트싱크의 형상인자가 LED 메탈 PCB의 온도에 미치는 영향을 알아보았다.

또한 히트싱크를 이용한 냉각시스템에서 자연대류 열전달이 지배적이지만, 복사에 의한 열전달 또한 히트싱크의 냉각 성능에 복합적으로 영향을 미치는 요소이다. 지금까지의 히트싱크의 냉각성능에 관한 대부분의 연구에서는 복사 열전달이 무시되었다[4-6]. 본 연구에서는 연구대상인 방사형 히트싱크의 표면이 냉각성능 향상을 목적으로 코팅 처리되었으며, 이에 따라 복사 열전달을 중요한 변수로 판단하였다. 수치해석에서 도출한 방사형 히트싱크의 최적설계 인자를 토대로 방사형 히트싱크를 제작한 후 실험을 수행하였으며, 그 실험 결과를 전산해석의 결과와 비교하였다.

2. 수치해석 방법

본 연구에서는 LED 메탈 PCB와 방사형 히트싱크의 온도장 및 유동장 수치해석을 위해 CFD 상용코드인 FLUENT 6.3을 사용하였으며, 격자 생성은 GAMBIT을 사용하였다. 방사형 히트싱크 주위의 공기 유동장 해석 시 압력과 속도를 결합하여 유동장을 풀기 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 지배방정식의 대류항은 2차 정확도의 상류도식(upwind scheme)을 이용하여 이산화하였다.

자연대류 열전달과 함께 복합적으로 일어나는 복사 열전달

Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

을 고려하였고, 복사 열전달 해석을 위해 S2S(Surface to Surface) 모델을 사용하였다. 방사형 히트싱크 주위의 공기유동을 3차원, 정상상태, 층류 유동으로 가정하였다. Fig. 2는 수치해석 모델의 경계조건을 나타내는데, 열원인 LED 메탈 PCB에 60W의 열 발생량에 해당하는 균일 열 유속 조건을 사용하였으며, 계산영역의 외부 경계에는 대기압 상온조건(298K)을 주었다. 고체 표면에는 복사 열전달 해석을 위한 방사율이 필요한데, 코팅이 없는 경우에 0.33, CNT 코팅의 경우에 0.84를 사용하였다. 본 연구에서는 히트싱크와 LED 메탈 PCB의 온도를 함께 해석하였으며, 히트 싱크의 재질은 알루미늄, LED 메탈 PCB의 재질은 구리이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치 구성

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 실험장치의 개략도이다. 실험

Fig. 3 Schematic of experimental apparatus

Fig. 4 Schematic of LED lamp with radial heat sink

장치는 시험부, 전원 공급부, 데이터 측정 및 처리부로 구분된다. 시험부는 내부의 유체가 외부 공기유동과의 접촉을 차단하기 위하여 두께 10 mm인 투명 아크릴로 가로 1 m, 세로 1 m, 높이 2 m의 밀폐공간을 제작하였다. 또한 아크릴 밀폐공간으로부터 외부로의 열손실을 최소화하기 위하여 아크릴 외부 표면을 두께 20 mm의 스티로폼으로 단열하였다. 밀폐공간 내부에 LED 램프를 설치할 수 있도록 알루미늄 프로파일을 사용하여 높이 1.6 m의 LED 램프 거치대를 이용하였다. 고효율 MCP LED의 전력공급은 VUPOWER AK-3005DD를 이용하였다. LED 램프의 온도 측정은 직경 0.3 mm의 Cu-Co(T-type) 열전대를 이용하였으며, 데이터 수집 제어장치인 Agilent 34970A (34908A board)에 연결하여 실험을 수행하였다. 내부공기 및 램프 온도는 전력공급 후 약 50분 후에 정상상태에 이르는 것으로 확인하였으며, 그 이후 약 2시간까지의 램프 온도가 측정·기록되었다.

본 실험에 사용된 MCP LED의 전체 크기는 56×40×1.5mm³이며, MCP LED에 공급되는 전압과 전류는 각각 DC 24V,

Fig. 5 Temperature distribution of LED lamp

2.5A이다. Fig. 4는 실험에 사용된 LED 램프의 개략도를 나타낸다. MCP LED와 방사형 히트싱크를 연결하는 원형 베이스 블록은 직경이 90 mm, 두께는 3 mm이고, 재질은 알루미늄이다. 방사형 히트싱크는 수치해석을 통해 도출한 최적설계인자를 토대로 제작한 것으로서, 크기는 전체 직경이 120 mm이고 높이는 120 mm이다. MCP LED와 베이스 블록, 방사형 히트싱크 사이의 접촉 열저항을 줄이기 위해 열전도성이 우수한 thermal grease를 얇게 도포한 후 M3 미터보통나사를 이용하여 체결하였다.

3.2 표면 코팅을 적용한 히트싱크

본 연구에서는 방사형 히트싱크의 방열 능력을 향상시키기 위하여 방사형 히트싱크의 표면에 각종 코팅물질을 분체 도장하여 방사형 히트싱크의 냉각성능에 미치는 영향을 알아보았다. 사용한 코팅물질은 총 6가지로 금장분체, 적색분체, 청색분체, 은장분체, 아노다이징 처리, 탄소나노입자 코팅이다. 코팅물질을 적용한 방사형 히트싱크를 부착한 LED 램프를 제작하여 온도측정 실험을 수행하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 유동장 및 온도장 분석

본 연구에서는 흰 개수가 40개, 히트싱크 높이가 120 mm, 흰 길이가 15 mm, 흰 베이스 두께가 3mm인 경우를 히트싱크 기본형상으로 하였으며, Fig 5와 Fig. 6에서는 이러한 방사형

Fig. 6 Flow velocity vector around the radial heat sink

히트싱크가 부착된 LED 램프 주위의 공기 유동과 방사형 히트싱크의 온도분포에 대한 전산해석 결과를 보여준다. 부착된 LED에서 발생한 열에 의해 외부에서 유입되는 공기가 가열되는 양상을 확인할 수 있다. Fig. 6(b)에서 자세히 보이는 바처럼 전체적인 유동장을 살펴보면 밀도차로 인해 발생한 부력에 의해 아래쪽에서 위쪽으로 향하는 유동이 발생하였으며, 층류유동에 해당하므로 복잡한 유동이 아닌 비교적 단순한 유동을 보였다. 방사형 히트싱크의 형상 변화 정도가 크지 않아 형상 변화에 따른 유동의 특이한 변화는 발견되지 않았다. 방사형 히트싱크의 상부 영역은 방사형 히트싱크의 끝단에서 멀어질수록 속도가 증가하며, 방사형 히트싱크의 중심축에 대해 비교적 대칭적인 유동이 관찰되었다.

Fig. 7 The effect of the number of fins on the temperature of LED metal PCB

Fig. 8 Temperature contours of the LED metal PCB with different numbers of fins

4.2 방사형 히트싱크의 형상에 의한 영향

다음으로 방사형 히트싱크 형상의 영향에 대한 수치해석 결과가 Fig. 7-12에 나타나 있다. 먼저 Fig. 7과 8은 흰 개수 (N)의 변화에 따른 LED 메탈 PCB의 온도 변화를 나타낸 것이다. 흰 개수가 증가할수록 LED 메탈 PCB의 평균온도가 감소하다가 흰 개수가 40개 이상이 되면, 오히려 LED 메탈 PCB의 온도가 완만하게 상승한다. 흰 개수가 증가할수록 LED로부터 발생한 열을 잘 냉각시키지만 흰 개수가 40개 이상이 되면 히트싱크의 냉각효과가 다소 떨어짐을 알 수 있다.

다음으로 히트싱크 높이(H) 변화가 LED 메탈 PCB의 온도 분포에 미치는 영향을 알아보았다. 방사형 히트싱크 내에 전 원회로를 실장하기 위한 최소 높이인 100mm부터 140mm까지

Fig. 9 The Effect of the fin height on the temperature of LED metal PCB

Fig. 11 The effect of the fin base thickness on the temperature of LED metal PCB

Fig. 10 Temperature contours of the LED metal PCB with different values of heat sink height

Fig. 12 Temperature contours of the LED metal PCB with different values of fin base thickness

히트싱크 높이를 변화시키며 해석을 수행하였는데, 이에 따른 메탈 PCB의 온도 변화가 Fig. 9와 10에 나타나 있다. Fig. 9에는 전산해석 결과가 실험결과와 비교되었는데, 두 결과가 1℃ 이내에서 서로 잘 일치함을 나타내어 본 연구에서 사용한 수치해석 방법이 유효함을 보여준다.

여기서 히트싱크 높이가 증가할수록 전열면적이 커짐으로 인해 LED 메탈 PCB의 온도가 감소함을 알 수 있다. 히트싱크 높이가 증가할수록 냉각효과가 커지지만 방사형 히트싱크의 전체적인 크기와 무게, 재료비 등 경제성을 고려할 경우 히트싱크 높이가 120 mm일 때 적절하다고 판단하였다.

Fig. 11과 12는 흰 베이스 두께(t_b) 변화에 따른 LED 메탈 PCB의 온도 변화를 나타낸 것이다. 베이스의 두께가 증가할수록 LED 메탈 PCB의 온도가 감소하는 경향을 보이지만, 그 차이가 1℃ 내외로 작은 값이므로 흰 베이스 두께 변화는 냉각성능에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다. 따라서 LED

램프의 무게를 고려할 경우 흰 베이스 두께가 3 mm이면 적절하다고 판단된다.

4.3 히트싱크의 표면 코팅에 의한 영향

방사형 히트싱크를 이용한 냉각 시스템에서 자연대류 열전달에 의한 냉각이 지배적이지만, 복사에 의한 열전달 또한 방사형 히트싱크의 냉각 성능에 복합적으로 영향을 미치는 무시할 수 없는 요소이다. 본 연구에서는 방사형 히트싱크의 표면을 코팅처리를 하므로 복사 열전달이 중요한 변수이다.

Fig. 13에서는 코팅 물질에 따른 LED 메탈 PCB의 온도측정 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하였다. LED 램프의 온도가 정상상태에 도달한 후의 LED 메탈 PCB의 실험측정 온도가 금장분체 82.4℃, 적색분체 79.3℃, 청색분체 78℃, 은장분체 77.9℃, 아노다이징 처리 75.5℃, 탄소나노입자 코팅 71.6℃ 순으로 감소하였다. 금장분체, 은장분체, 적색분체, 청색

Fig. 13 Effect of coating materials on the temperature of LED metal PCB

분체 코팅처리는 LED의 냉각 효과가 상대적으로 적었으나, 탄소나노입자 코팅과 아노다이징 처리를 했을 때 방사형 히트싱크의 냉각성능이 상당히 향상되었다. 탄소나노입자 코팅이나 아노다이징 처리는 흑체 표면처리 효과를 내어 복사열 전달 효과가 커져 냉각효과가 향상된 것으로 예측된다.

전산해석은 탄소나노입자 코팅과 코팅하지 않은 히트싱크에 대해서만 수행하였으며, 그 결과 역시 Fig. 13에 나타나 있다. 전산해석과 온도측정 실험결과를 통해 방사형 히트싱크 표면에 탄소나노입자 코팅을 할 경우 LED 메탈 PCB의 온도가 10℃ 이상 감소하는 것을 확인하여 탄소나노입자 코팅의 냉각효과를 확인하였다.

5. 결 론

고출력 LED 램프에 사용되는 방사형 히트싱크의 냉각성능을 흰 개수, 히트싱크 높이, 흰 길이, 흰 베이스 두께 등 방사형 히트싱크의 형상인자를 변수로 하여 전산해석과 실험적 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 흰 개수가 증가할수록 LED 메탈 PCB의 온도는 감소하다가 흰 개수가 일정 이상이 되면 오히려 LED 메탈 PCB의 온도가 완만하게 상승함을 보였다. 따라서 흰 개수를 조정하는 경우에는 최적의 조건이 존재하고 최적 값보다 흰이 더 많으면 냉각성능이 다소 떨어짐을 알 수 있었다.
- (2) 히트싱크 높이와 흰 길이가 증가할수록 LED 메탈 PCB의 온도가 감소함을 보였다. 따라서 흰 높이 및 길이의 증가로 인한 전열면적의 증가는 방사형 히트싱크의 냉각 성능 향상에 도움이 되지만, 전체적인 시스템의 크기를 고려하

여 적절한 흰 높이와 길이를 선택하여야 한다.

- (3) 흰 베이스의 두께의 변화로 인한 LED 메탈 PCB의 온도 변화는 1℃ 내외로 작은 값을 보였다. 따라서 흰 베이스 두께는 다른 형상 인자에 비해 냉각성능에 그다지 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있었다.

전산해석을 통해 도출한 최적설계인자를 토대로 제작한 방사형 히트싱크 표면에 탄소나노입자를 코팅할 경우, LED 메탈 PCB의 온도가 코팅하지 않은 방사형 히트싱크의 LED 메탈 PCB의 온도에 비하여 10℃ 이상 감소하였다. 또한 전산해석 결과와 온도측정실험 결과를 비교하였을 때 1% 내외의 오차를 나타내었다. 따라서 적절한 코팅 재료 선택을 통해 방사형 히트싱크 냉각성능 향상을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비에 의하여 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 2002, Steigerwald, D.A., Bhat, J.C., Collins, D., Fletcher, R. M., Holcomb, M.O. and Ludowise, M.J., "Illumination with solid state lighting technology," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol.8, pp.310-320.
- [2] 2004, Arik, M., Becker, C., Weaver, S. and Petroski, J., "Thermal management of LEDs: package to system," *Proc. SPIE*, Vol.5187, pp.64-75.
- [3] 2008, Chi, W.-H., Chou, T.-L., Han, C.N. and Chiang, K.-N., "Analysis of thermal performance of high power light emitting diodes package," *Proc. 10th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore*.
- [4] 2008, Dialameh, L., Yaghoubi, M. and Abouali, O., "Natural convection from an array of horizontal rectangular thick fins with short length," *Appl. Therm. Eng.*, Vol.28, pp.2371-2379.
- [5] 2009, Yu, S.H. and Lee, K.S., "Analysis of natural convection around radial heat sink," *Proc. SAREK 2009 Summer Conference*, pp.1172-1176.
- [6] 2001, Güvenc, A. and Yüncü, H., "An experimental investigation on performance of rectangular fins on a horizontal base in free convection heat transfer," *Heat Mass Transfer*, Vol.37, pp. 409-416.