

단일 LED를 사용한 3W MR16 조명등 방열 설계에 관한 연구

이영림^{1*}, 황순호¹

¹공주대학교 기계자동차공학부

Study on Thermal Design of a 3W MR16 Light with Single High-Power LED

Young Lim Lee^{1*} and Soon Ho Hwang¹

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요약 신성장 동력 산업으로 분류된 LED 조명제품은 고효율 에너지 제품으로 기존 광원보다 조도가 높고 수명이 길어 많은 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 기존의 할로겐 MR16 조명등이나 다수의 LED를 사용한 MR16 조명등을 대체할 단일 LED를 사용하는 MR16 조명등을 개발하고자 하였다. 이를 위해 LED 패키지 MCPCB 장착 기초 실험, 3차원 방열 수치해석 및 시제품에 대한 방열 성능실험을 수행하여 성공적으로 고효율 단일 LED MR16 조명등을 개발하였다.

Abstract LED lights as a newly-growing industry are highly energy-efficient and have drawn lots of attention due to higher illuminance and longer life compared to other light sources. In this study, MR16 lights with one high-power LED were considered for the replacement of the previous halogen lights or LED lamps with many LEDs. Thus, fundamental experiments of LED on a MCPCB, 3-dimensional numerical analysis for heatsink design and performance tests of the prototype lights have been done and the MR16 LED lights have been successfully developed.

Key Words : LED Lights, MR16, Thermal Design, CFD

1. 서론

신성장 동력으로 분류된 LED 조명 제품은 기존 광원보다 조도가 높고 수명이 길어 에너지 효율의 상승 효과가 높기 때문에 세계 정책에 따른 환경 및 에너지 문제를 해결하기 위한 중요한 요소라 할 수 있다.

일반적으로 LED 기술은 적은 전력 소비, 긴 수명, 진동과 충격에 강하며 색상 효율이 높고 자외선 및 적외선 방출이 없는 장점을 가지고 있는 반면 방열 문제로 인한 취약한 단점을 가지고 있다. 선행연구에 따르면 LED 고발열 문제는 LED 광출력 효율에 직접적인 영향을 미치고 고효율 LED의 경우 이러한 문제가 더욱 대두된다[1]. 이 밖에도 온도 상승에 따른 색온도 변이 및 LED 수명

감소 등의 문제점들이 발생한다[2].

LED 조명등이 약 3000 lm/lamp 이상의 광속을 가지는 백열등이나 형광등과 경쟁하기 위해서는 많은 광속이 필요하다. 이에 따라 1W 이상의 고효율 LED가 개발되고 있고 다수의 고효율 LED를 조합하여 필요한 광속을 얻고 있는 실정이다. 따라서 입력 전류의 85% 이상이 대부분 열로 변환되는 고효율 LED의 특성으로 인해 방열 문제가 필연적으로 대두된다. 이러한 방열 문제를 해결하기 위해서 주로 자연 및 강제대류, 히트 파이프, 액체 냉각 기술 분야에서 많은 연구가 이루어져 왔다. Christensen과 Graham[3]은 다수의 고효율 LED를 10cm × 10cm 히트싱크에 장착하고, LED간의 간격과 대류열전달계수를 변화시키면서 1차원 열저항 모델과 3차원 유한요소법을 사용

본 논문은 2009 이공계전문가서포터즈기술지원 사업으로 수행되었음.

*교신저자 : 이영림(ylee@kongju.ac.kr)

접수일 09년 02월 01일

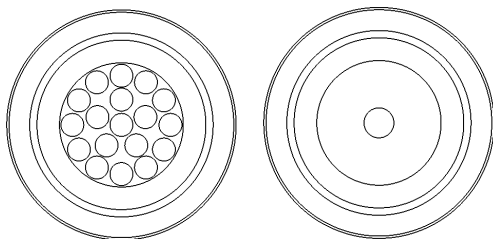
수정일 (1차 10년 03월 25일, 2차 10년 04월 02일)

게재확정일 10년 04월 09일

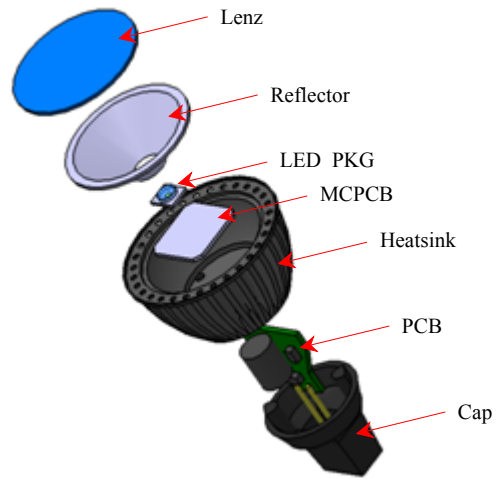
하여 LED 정선온도를 살펴보았다. 또한, Lu 등[4]은 루프 히트파이프(loop heat pipe)를 이용하여 열부하나 히트파이프 경사 각도에 따른 초기 냉각 성능, 온도 균일도 및 열저항과 같은 방열성능을 실험적으로 고찰하였다. Liu 등[5]은 마이크로 제트(micro jet)를 이용하여 강제 냉각 기술을 연구하였는데 개발된 마이크로 제트의 최적화를 통하여 LED 기판(substrate)온도를 추가적으로 23℃감소시킬 수 있음을 보였다. Eo[6]는 LED 방열 설계에 있어서 가장 중요한 히트 싱크 설계를 위한 다양한 수치해석을 수행하였다. Lee 등[7]은 대용량 알루미늄 히트싱크를 브레이징을 통해 제작하고 이를 실리콘 접합 히트싱크와의 열성능을 비교하였다.

본 연구에서 고려된 MR16 조명등은 색감이 중요시되는 장소에 포인트 조명등으로 많이 사용된다. MR16의 출력은 보통 3W이상으로 사용되나 고출력으로 갈수록 방열문제로 인해 신뢰도가 떨어진다. MR16의 LED 칩에서 발생한 대부분의 열은 MCPCB(metal-core printed circuit board)를 통하여 조명등 케이스 즉, 히트싱크로 전달되어 대기로 방출된다. 현재까지 MR16 조명등에 장착되는 LED 패키지는 방열 및 무게 면에서 우수한 저출력 패키지가 주종을 이룬다. 현재 국내에서 판매되는 제품의 대부분이 저출력 칩을 이용하고 있다. 하지만 한 개의 조명 기구에 여러 개의 패키지를 사용하면 공간상의 제약으로 인하여 조도를 높이는데 한계가 있기 때문에 고출력 칩의 개발이 필요하다. 그림 1은 여러 개의 저출력 패키지를 사용한 조명등과 하나의 고출력 패키지를 사용한 조명등에 대한 개략도를 보여준다.

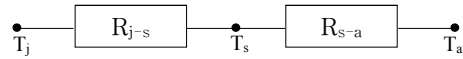
본 연구에서는 다수의 저출력 LED 대신 단일 고출력 LED를 이용한 3~5W급 MR16 조명등을 개발하고자 하였다. 주로 MR16의 방열 구조 및 방열 성능 설계에 대한 연구가 이루어졌는데 1차원 열저항 해석, 3차원 CFD 해석, LED 패키지 단품 방열 성능 실험, 조명등 시제품 방열 성능 실험 등을 수행하였다. 그림 2에 본 연구에서 개발할 고출력 단일 LED MR16 조명등의 구성도를 나타내었다.



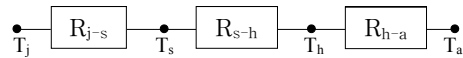
(a) 저출력 LED (b) 고출력 LED
[그림 1] MR16 LED 조명등 개략도



[그림 2] MR16 구성도



(a) LED without heatsink



(b) LED with heatsink

[그림 3] 1차원 열저항 모델

2. 수치해석 및 실험 방법

2.1 수치해석

1차원 열저항(thermal resistance) 모델은 정선온도 예측이나 대략적인 히트싱크 용량을 결정하는데 매우 유용하다. 그림 3에 이와 같은 열저항 모델의 구성도를 나타내었다. 여기서 T는 온도, R은 열저항, j는 junction(LED chip), s는 soldering point, h는 heatsink 그리고 a는 ambient를 각각 나타낸다. 그림 3(a)의 열저항모델을 이용하면 MCPCB에 장착된 LED의 정선 온도를 예측할 수 있고. 그림3(b)의 열저항 모델을 이용하면 LED가 히트싱크에 장착된 경우 히트싱크 열저항에 따른 정선 온도 변화를 예측하고 이를 통해 정선온도 한계내에서 사용가능한 대기온도 범위 등을 알수 있다.

한편, 3차원 CFD 해석을 위해 유체유동은 3차원, 압축성 및 정상상태로 가정하였다. 자연대류에서 층류 및 난류를 결정하는 무차원수는 Rayleigh number로서 다음과 같이 정의되는데 본 연구의 경우 약 107이므로 층류유동으로 가정하였다.

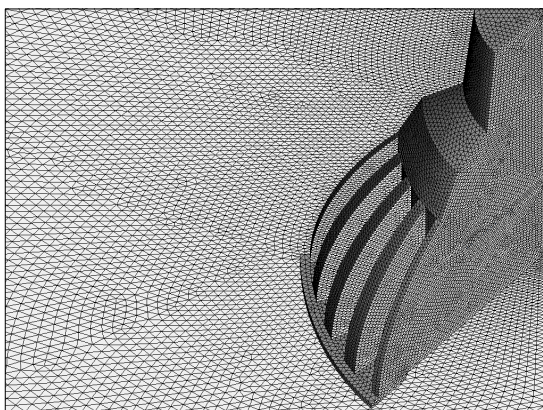
$$Ra = \frac{g\beta}{\nu\alpha}(T_s - T_\infty)L^3 \quad (1)$$

여기서, T_s 벽온도, T_∞ 대기온도, ν 동점성 계수, α 열확산 계수, β 열팽창 계수, L 은 특성 길이를 나타낸다. 자연 대류에서는 물체의 온도가 높지 않아도 복사(radiation) 효과가 상대적으로 매우 크므로 복사를 고려하기 위해서 DO(discrete ordinate)모델[9]을 사용하였다.

그림 4에 MR16의 유동 및 열전달 해석을 위한 격자시스템을 나타냈다. 전체 조명등을 고려하기 보다는 기하학적 대칭을 이용하여 1/8모델만 고려하였는데 이는 해석에 필요한 격자수를 줄이는데 매우 효율적이다. 사용한 격자는 사면체(tetrahedral) 격자이고 격자 수에 무관한 해(grid independent solution)를 얻기 위하여 약 70만개의 셀을 사용하였다.

표 1에 3W MR16 조명등 개발을 위하여 본 연구에서 고려한 방열 해석 경우를 나타내었다. 방열 핀 역할을 하는 알루미늄 케이스는 그림 5와 같이 세 가지 형상을 고려하였고 이 외에도 핀 개수, 환기 구멍 및 pcb가 장착되는 트레이 두께 등과 같은 추가적인 형상 변경을 통하여 방열 성능 변화를 살펴보았다. 한편 5W급 MR16 조명등 개발을 위해서는 방열 성능이 더욱 개선되어야 하는데 이를 위해 그림 6과 같이 형상을 획기적으로 변경하였다. 표2에 방열 해석을 위한 경우를 나타내었다.

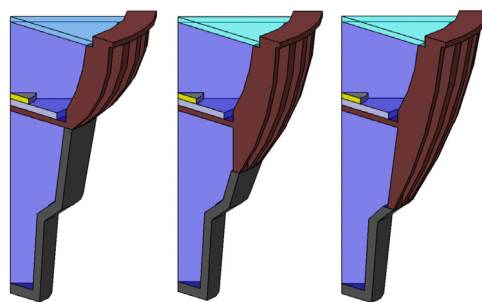
MR16의 3차원 모델링에는 Catia[8]를 사용하였고 유동 및 열전달 해석을 위해서는 상업용 소프트웨어인 Fluent[9]를 이용하였다.



[그림 4] 격자 시스템

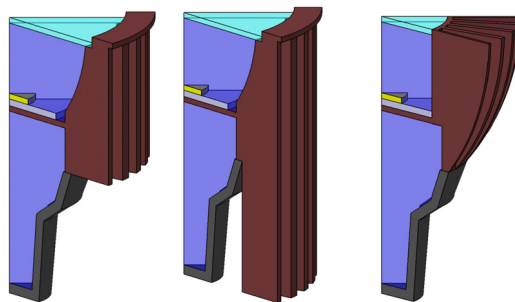
[표 1] 3W 조명등 설계를 위한 방열 해석 모델

Model no.	Shape	Fin no.	Additional modifications
1	shape 1	32	-
2	shape 2	32	-
3	shape 3	32	-
4	shape 2	40	-
5	shape 2	32	vent hole
6	shape 2	32	tray thickness (2 mm)



(a) shape 1 (b) shape 2 (c) shape 3

[그림 5] 3W 조명등 방열핀 형상

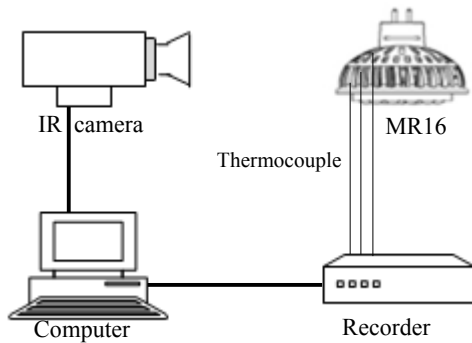


(a) shape 4 (b) shape 5 (c) shape 6

[그림 6] 5W 조명등 방열핀 형상

[표 2] 5W 조명등 설계를 위한 방열 해석 모델

Model no.	Shape	Fin no.	Additional modifications
7	shape 4	32	-
8	shape 5	32	-
9	shape 6	36	fin thickness (1mm)



[그림 7] MR16 방열 성능 실험 개략도

2.2 실험방법

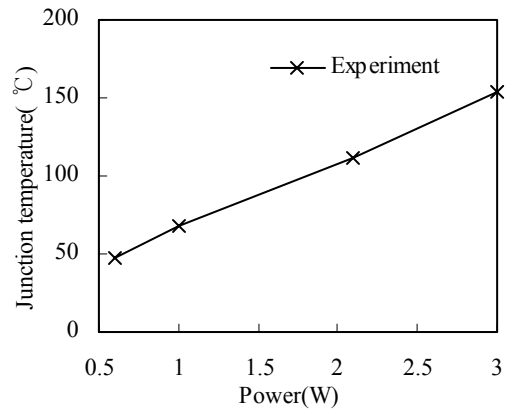
일반적인 FR-4 PCB 대신에 MCPCB를 사용하였을 때 LED의 열부하를 알아보기 위하여 그림 5와 같이 Cree사 [10]의 XR-E LED를 2cm×2cm MCPCB에 장착한 후 다른 히트 싱크없이 전류를 인가하여 그에 따른 보드 온도 변화를 살펴보았다. 이 때는 MCPCB 자체가 유일한 히트 싱크의 역할을 한다.

또한 개발된 MR16 조명등에 대한 방열 실험을 실시하였는데 방열 케이스 온도 및 보드 온도 등을 열전대 및 적외선 카메라를 이용하여 측정하였다. 적외선 카메라를 이용할 때는 정확한 온도 측정을 위하여 사전에 graphite를 측정 표면에 도포하였다. 그림 7에 방열 성능 실험 개략도를 나타내었다.

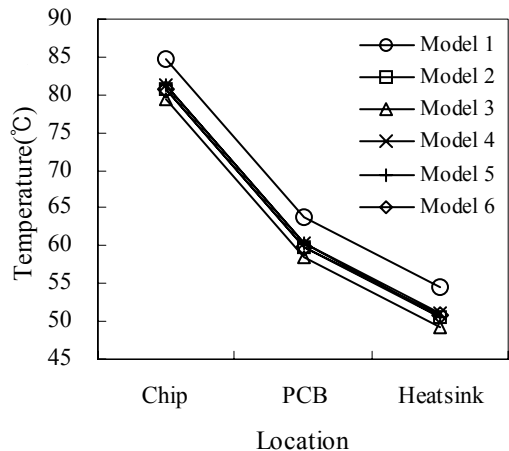
3. 결과 및 고찰

3.1 LED 패키지 방열 실험

그림 8에 3W LED를 MCPCB에 장착하고 어떤 히트 싱크도 사용하지 않았을 때 입력 전력에 따른 정선 온도 실험으로 측정하여 그래프로 나타냈다. 정선온도는 K타입 열전대로 측정된 MCPCB 온도를 기초로 하여 제조사 데이터 시트(data sheet)로부터 얻은 열저항(9℃/W)을 이용하여 그림 3의 1차원 열저항 모델에 의해 예측하였다. 정선온도는 인가한 전력이 증가할수록 거의 선형적으로 증가하며 3.0 W에서 한계 정선온도 150℃를 넘긴 153.8℃로 예측되었다. 따라서, 실온일 경우에는 정선온도 100℃에 해당하는 약 1.8 W까지 히트싱크없이 사용할 수 있다.



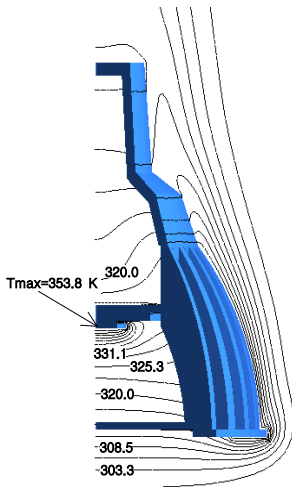
[그림 8] 출력에 따른 LED 정선온도 변화



[그림 9] 모델 변경에 따른 MR16 수치해석 온도 변화

3.2 방열 케이스 형상 변경에 따른 수치해석

단일 LED를 장착한 3W MR16 조명등의 방열 설계를 위하여 먼저 세 가지 다른 히트 싱크의 형상을 고려하였는데 주로 히트싱크의 길이를 변화시켰다. 또한 핀 개수, 에어 환기 구멍, PCB가 장착되는 트레이의 두께 등을 추가적으로 변경시켰다. 본 연구에서 고려한 LED의 경우 광속(luminous flux)은 정선온도가 110℃로 상승하면 정선온도 25℃ 대비 약 21% 감소한다. 따라서, 목표 정선온도는 대기 온도 40℃를 기준으로 할 때 110℃ 이하로 설정하였다.

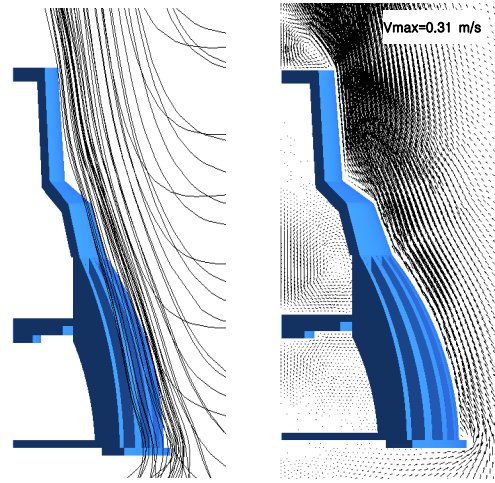


[그림 10] Model 2 주위의 온도 분포

그림 9에 수치해석을 통하여 예측한 결과를 나타냈는데 대기 온도 25℃기준으로 평균적으로 칩 온도는 81℃, MCPCB 온도 60℃ 그리고 히트싱크는 51℃내외로 예측되었다. 방열 성능은 shape 3, shape 2, shape 1 순으로 효율적이었고 shape 1은 shape 3에 비해 5℃ 정도 정선온도가 높은 것으로 판명되었다. 추가적으로 고려한 형상 변경은 방열 성능 개선 효과가 거의 없음을 알 수 있다.

따라서, 최종적으로는 두 번째 모델(shape 2)을 선택하였는데 이는 방열 성능 감소는 크지 않으면서 히트 싱크에 사용되는 알루미늄 소재를 절약하기 위함이다. 방열 해석에 의하면 최종 모델은 대기온도 45℃까지 정선온도를 약 100℃로 유지할 수 있다. MR16 최종 모델(shape 2)에 관한 주위 온도 분포를 그림 10에 나타내었다. LED 칩이 실장된 내부 공간의 공기 온도분포는 수직방향으로는 LED 칩에 근접할수록 증가하며 수평방향으로는 비교적 균일함을 보여준다.

그림 11은 최종 모델 주위의 유맥선 및 속도벡터인테 전형적인 자연대류로 인한 속도 분포를 보여 주고 있다. 조명등 주위의 가열된 공기는 수직방향으로의 유동을 형성하며 이는 주변의 공기를 수직 유동으로 끌어 들이는 유입(entrainment) 효과를 초래한다. 이러한 공기 유동이 히트 싱크의 핀 표면을 흐르면서 냉각 효과를 극대화하는데 이 때 핀 간격이 너무 좁으면 핀 아랫면으로부터 성장하는 경계층이 합쳐져서 공기의 유동을 저해할 수 있으므로 유의해야 한다. 본 연구에서는 핀 개수를 32개에서 40개로 증가시켜 방열 면적을 넓혀도 방열 성능의 개선 효과가 없었다.



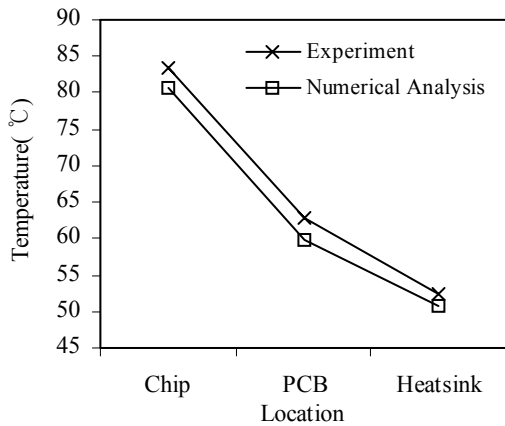
(a) streakline (b) velocity vector
[그림 11] 조명등 주위의 유맥선 및 속도벡터

3.3 MR16 방열 성능 실험

3W MR16의 전원을 가동시킨 후 약 2시간 후에 측정 온도가 일정하게 되어 정상상태에 도달하였다. 먼저 열전대를 사용하여 측정한 히트싱크 윗부분과 아랫부분의 온도는 각각 52.9℃와 51.9℃이다. 히트 싱크는 알루미늄 재질로서 고전도율로 인해 위아래의 온도 편차가 1℃ 내외이며 평균적으로 약 52.4℃이다. 또한 MCPCB 온도는 약 62.8℃로 측정되었다. 이것은 열저항 R_{th-a} 가 11.9℃/W이고 R_{th-h} 가 4.5℃/W임을 알려준다. 그림 3(b)의 1차원 열저항 모델을 통해 예측된 정선온도는 약 83.5℃이다. 그림 12에 수치해석의 검증을 위해 실험과 수치해석 결과를 비교하였는데 각 위치에서 실험과 수치해석 온도간의 차이는 약 5% 이내의 오차를 보여 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 13에 적외선 카메라를 이용하여 정상상태에서 측정한 히트싱크 및 PCB 온도 분포를 나타내었다. 히트싱크의 표면 온도분포는 비교적 균일하며 최대온도는 핀 사이의 골 부분에서 발생하고 최소 온도는 핀의 하단부의 산에서 발생한다. 접촉식 열전대와의 온도 차이는 약 2℃이며 LED 렌즈 부근에서의 온도분포는 신뢰도가 떨어졌다.

MR16 방열 실험을 통하여 개발한 3W MR16 조명등은 정선온도 110℃ 기준으로 사용 대기온도를 약 52℃까지 올릴 수 있다.



[그림 12] 실험과 수치해석의 온도 비교

[표 3] 5W 조명등 설계를 위한 방열 해석 결과

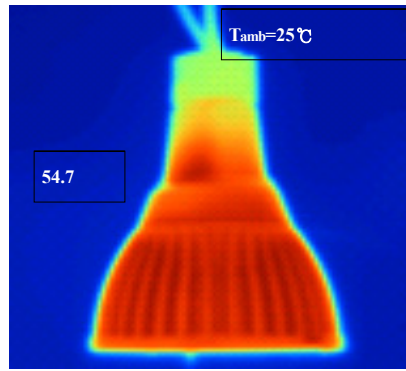
Model	T _{chip} (°C)	T _{pcb} (°C)	T _{heatsink} (°C)
7	105	70	54
8	96	61	46
9	118	79	64

3.4 5W LED 장착 방열 성능 수치해석

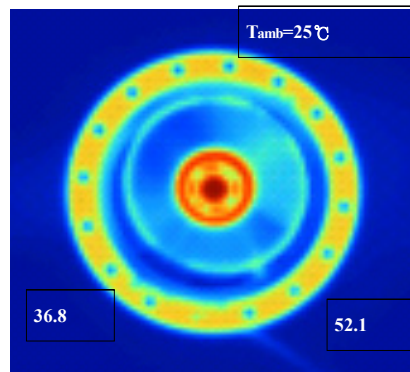
향후 개발할 5W LED에 3W용으로 개발한 히트싱크를 사용할 수 있는지 여부를 알아보기 위한 수치해석을 수행하였다.

해석 결과 정선온도는 25℃일 때 약 124℃로서 대기온도 40℃라 가정하면 139℃가 되어 여전히 한계 정선온도인 150℃ 이하로 예측되었다. 하지만 상대적으로 높은 정선온도는 출력 저하 및 수명 단축을 가속화하여 비효율적이므로 추가적인 방열 설계의 필요성이 대두되었다. 따라서, 단일 5W LED를 장착하기 위한 세 가지 다른 히트싱크 형상을 그림 6과 같이 고려하였다.

표 3에 대기온도 25℃일 때 해석한 결과를 나타냈는데 모델 9는 여전히 방열 성능이 부족하고 모델 7은 대기온도가 약 30℃일 때까지 사용 가능하다. 핀의 길이를 최대로 확장한 모델 8은 대기 온도 40℃ 기준으로 정선 온도가 약 111℃ 정도로서 110℃ 대비 광속이 추가적으로 약 0.3% 감소하여 여전히 허용 가능할 것으로 사료된다. 하지만 5W 이상의 MR16 조명등을 개발할 때는 단일 칩보다는 2~3개의 칩을 사용하여 열밀도를 감소시키는 것이 효율적이라 추측된다.



(a) front view



(b) bottom view

[그림 13] 적외선 카메라로 측정한 온도 분포

4. 결론

본 연구에서는 LED 패키지 성능 실험, 3차원 방열 해석, MR16 성능 실험 등을 통하여 단일 LED를 사용하는 고효율 MR16 조명등을 개발하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 3W LED 패키지를 MCPCB에 장착할 경우 대기온도 25℃기준 약 1.8W에서 정선온도 100℃에 도달하였다.
- 2) 3차원 방열해석을 통하여 얻어진 최적의 3W용 히트싱크는 shape 2로 판명되었으며 성능 실험 결과 정선온도 110℃를 기준으로 사용 가능한 대기온도는 52℃이다.
- 3) 5W용 단일칩 MR16을 위한 히트싱크는 방열해석 결과에 의하면 shape 5로써 사용 가능 대기온도는 정선온도 110℃를 기준으로 약 39℃로 예측되었다.

따라서, 향후 5W 이상의 MR16을 개발할 때는 강제 대류, 히트파이프, 마이크로 제트(micro jet) 등의 추가적인 방열 수단을 고려하지 않는 이상 단일 LED로 사용하

기보다는 다수의 LED를 이용하여 열부하를 저감시키는 것이 더욱 효율적일 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] J. Hu, L. Yang and M. W. Shin, "Electrical, Optical, and Thermal Degradation of High Power GaN/InGaN Light-Emitting Diodes", Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 41, no.3, 035107, 2008.
- [2] N. Narendran and Y. Gu, "Life of LED-based White Light Sources, Journal of Display Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 167-70, 2005.
- [3] A. Christensen and S. Graham, "Thermal Effects in Packaging High Power Light Emitting Diode Arrays," Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 364-371, 2009.
- [4] X. Lu, T. Hua, M. Liu, and Y. Cheng, "Thermal Analysis of Loop Heat Pipe Used for High-power LED," Thermochemica Acta, Vol. 493, pp. 25-29, 2009.
- [5] S. Liu, J. Yang, Z. Gan and X. Luo, "Structural Optimization of a Microjet Based Cooling System for High Power LEDs," International Journal of Thermal Sciences, Vol. 47, pp. 1086-095, 2008.
- [6] 어익수, "COMSOL을 이용한 20W급 LED램프의 방열 해석," 한국산화기술학회논문지, 제10권, 제7호, pp.1484-1488, 7월, 2009.
- [7] 이영림, 황순호, 전의식, "대용량 알루미늄 브레이징 히트싱크 개발에 관한 연구," 산학기술학회논문지, 제10권, 제7호, pp. 1459-1464, 7월, 2009.
- [8] Catia, V5R17, Dassault Systems, 2006.
- [9] Fluent, Version 6.1, Fluent, Inc., Lebanon, NH 2005.
- [10] Cree, Inc, <http://www.cree.com>.

이 영 림(Young Lim Lee)

[정회원]



- 1995년 5월 : U of Texas at Austin 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 2000년 2월 : 삼성자동차삼성전자 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 교수

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학, 자동차공학

황 순 호(Soon Ho Hwang)

[준회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 기계설계공학전공 (공학학사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 석사과정

<관심분야>

열유체공학, 에너지공학