

CFD전산모사를 이용한 Al 6063 Heat Sink 최적화 설계와 열전도성 Polycarbonate와의 방열성능 비교 분석

(Optimization of Al 6063 Heat Sink using CFD Simulation and Comparative Analysis of Thermal Dissipation Properties with Thermal Conductive Polycarbonate)

허인성* · 이세일 · 이아람 · 유영문**

(In-Sung Her · Se-Il Lee · A-Ram Lee · Young Moon Yu)

Abstract

In the LED lighting applications, because LED packages are the origin of heat generation, there are thermal design problem on heat sinks. In the thermal design, it is important to consider the total volume and the total weight of heat sink simultaneously. In this study, an Al 6063 heat sink was optimized using Computational Fluid Dynamics(CFD) simulation tool for the cooling of 30W LED module, and then the cooling performance and the total weight of heat sinks with Al 6063 and Thermal Conductive Polycarbonate(TCP) were compared under the same conditions. As the result of simulation, an Al 6063 heat sink was optimized with 22 ea. of fins and 1.6 mm of fin thickness. LED Junction Temperature of the TCP Heat Sink was 5.6°C higher, but total weight of it was 47 % less than the Al 6063.

Key Words : LED Lamp, Heat Sink, Polycarbonate, Heat Conduction, Junction Temperature

1. 서 론

LED는 친환경, 장 수명, 고효율의 장점을 가지고 실내·외 등 다양한 분야에서 기존 조명을 대체하고 있다[1-2]. LED 패키지의 출력이 높아지면서 LED 가로등, LED 투광등, LED 스포츠 조명 등 높은 광 출력을 내는 제품들이 개발되고, 높아진 광 출력만큼 발열량도 높아져 LED 접합온도가 상승하게 된다. 접합온도의 상승으로 P-N 접합 부분에서 생성되는 열이 외부로 원활하게 방출되지 못하고, 칩 내부에 남은 열이 전자와 정공의 비발광 재결합을 증가시켜 광 효율 하락 및 LED의 수명과 신뢰성, 내구성에 큰 악영향을 미친다[3-4].

* 주저자 : 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터
선임연구원
** 교신저자 : 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터
센터장/교수
* Main author : Pukyong National University,
LED-Marine Convergence Technology
R&BD Center, Senior researcher
** Corresponding author : Pukyong National
University, LED-Marine Convergence
Technology R&BD Center,
Director/Professor
Tel : 051-629-7770, Fax : 051-629-7780
E-mail : ymyu@pknu.ac.kr
접수일자 : 2014년 4월 9일
1차심사 : 2014년 4월 12일, 2차심사 : 2014년 6월 15일
심사완료 : 2014년 6월 17일

이러한 문제를 해결하기 위해 heat sink 및 heat pipe 등 자연대류 냉각기술과 fan을 이용한 강제 대류 냉각기술, 수냉식 냉각 시스템 등 다양한 냉각 방식을 적용하고 있으나, 제작비용이 상승하고 제품의 부피와 무게가 증가함에 따라 LED조명의 장점을 퇴색시키고 있다[5].

LED 조명의 방열성능을 향상시키기 위하여 PCB via-hole 특성 분석[6], heat sink의 방열 성능 예측 및 최적 설계[7], fan과 heat sink를 이용한 LED 전조등의 냉각성능 해석[8]등 다양한 분야의 연구가 진행되고 있다. 기존 사용하던 방열체 분석과 설계 최적화 기술에 대하여 LED의 접합온도를 낮추기 위해 많은 연구가 집중되고 있다. 하지만 LED 조명의 성능은 광효율 만으로 한정 지을 수 없다. 방열부의 크기와 무게가 높아지면 냉각성능이 개선되지만 제품 사이즈와 무게가 증가하는 상관관계가 있다. 최근 필립스사는 LED MR 16 제품을 Al 재질에서 열전도성 폴리카보네이트(TCP)로 교체하여 제품을 출시하였고, 제품 질량 감소와 함께 내구성을 유지할 수 있었다.

본 논문에서는 열전도도 14W/m·K의 TCP 재질을 LED 조명의 최적 설계된 heat sink에 적용하여 Al재질의 heat sink와 방열성능 및 무게특성을 비교 분석하였다.

2. 이론고찰

2.1 열전달

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[9].

LED모듈의 열전달 경로는 LED 패키지의 P-N접합부에서 시작되며 열전달의 대부분은 전도에 의한 열 전달이며, 자연 또는 강제 대류에 의하여도 이루어진다. 열전도는 열에너지가 물질의 이동을 수반하지 않고 고온에서 저온으로 연속적으로 전달되는 현상을 말한다. 주로 고체내부에서 발생하며, 물질의 종류에

따라 전도되는 속도가 다르다. 열전도에 대한 전달률 방정식은 Fourier's law로 표현할 수 있다. 같은 온도 분포 $T(x)$ 를 가지는 1차원 평면 벽에 대한 방적은 식 (1)과 같다.

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

열 유속(heat flux, W/m²) q_x'' 는 전달 방향에 수직인 단위면적당 x방향으로의 열 전달률이며, 이 방향으로의 온도구배 dT/dx에 비례한다. 비례상수 k는 열전도율(W/m·K)로 알려진 전달 물성 값이며 벽 재질의 특성 값이다. 음의 부호는 열이 온도가 감소되는 방향으로 전달된다는 것을 의미한다.

대류열전달 방식은 유체와 표면의 상호작용에 의하여 표면속도 0에서부터 유한한 유동속도 u_∞ 까지의 유체영역이 발달하게 된다. 이때의 유동속도가 0인 부근의 표면온도 T_s 로부터 유동속도 u_∞ 의 온도 T_∞ 까지의 유체영역이 존재하는데 이곳에서 온도 구배에 의하여 표면과 유체사이에 대류열전달이 발생한다. 에너지 전달 방식은 경계층에서의 불규칙 분자운동과 유체의 집단운동에 의해서 나타난다. 대류열전달은 자연대류와 강제대류로 나누어 볼 수 있다. 자연대류는 밀도차이에 의한 부력의 생성으로 대부분 수직방향으로 이루어지며 식 (2), (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = hA(T_s - T_\infty) = hA\Delta T \quad (2)$$

$$q'' = h(T_s - T_\infty) = h\Delta T \quad (3)$$

여기서 h 는 열전달 계수, T_s 는 물질의 표면온도, T_∞ 주변온도를 나타낸다.

2.2 Fin의 성능

유효표면적을 증가시켜 표면으로부터 열전달을 증가시키는데 fin을 사용한다. 하지만 fin은 열전달에 대한 전도저항을 의미하므로 fin을 사용하면 열전달률이 무조건 증가한다고 확신할 수는 없다. fin유효는 fin이 없을 때의 열전달률에 대한 fin 열전달률의 비로써 식

(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_{c,b}\theta_b} \quad (4)$$

여기서 $A_{c,b}$ 는 fin 바탕의 횡단면적이며, θ_b 는 $T_b - T_\infty$ 를 나타낸다.

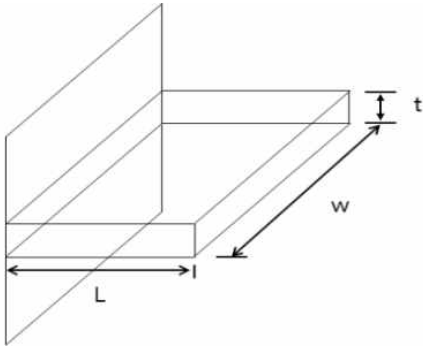


그림 1. Straight-fin 구조
Fig. 1. Structure of straight-fin

fin 효율은 fin의 열성능을 측정하는 방법이다. 그림 1은 일반적인 직선 fin을 나타내며, 직선fin의 fin 효율은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 L_c 는 $L + (t/2)$ 이다.

$$\eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c} \quad (5)$$

위의 두 식에서 열전도율이 높은 구리를 heat sink에 적용하였을 때 fin의 유효를 분명하게 높일 수 있다. 하지만 LED 조명의 heat sink의 대부분은 Al 재질이며 가격이 저렴하고 무게가 적게 나가는 부가적인 이유를 가지고 있다.

LED 조명의 방열성능을 개선시키기 위해서는 열전도율이 높은 재료의 금속을 적용하는 방법도 있으나 본 논문에서는 부가적인 성능 증, 가격 및 제품 무게의 효율적인 최적화 방향을 확인하기 위하여 금속대비 열전도도가 낮은 TCP의 특성을 비교 분석하였다.

3. 실험방법

heat sinke의 최적화를 위하여 heat source 30W의

LED모듈에 Al 6063 재질을 적용하여 Base 두께와 fin 두께, 간격, 높이를 최적화 설계하였다. Al 6063과 TCP의 재질을 heat sink에 적용하여 동일한 조건에서 열 해석 시뮬레이션을 적용하였고, 재질에 따른 방열 특성을 비교 분석하였다.

heat sink 최적화는 Heat Sink Designer 프로그램을 사용하여 시뮬레이션 하였다. 표 1은 heat sink 최적화를 위한 시뮬레이션 설정 값들이며, heat source는 LED모듈 설정 값으로써 power는 LED의 heat power, source의 width, length는 LED모듈의 크기로 설정하였다. space available는 heat sink의 설정 값으로 각각의 크기와 재질에 대하여 표 1과 같이 설정하였다.

표 1. heat sink 시뮬레이션 조건
Table 1. Condition of heat sink simulation

Heat Source	
Power (W)	30
Source Width (mm)	152
Source Length (mm)	111
Interface Material	PCM/10psi
Space Available	
Sink Width (mm)	152
Sink Length (mm)	136
height (mm)	31
Device Height (mm)	1.0
Fin Material	Al 6063
Base Material	Al 6063

그림 2는 열 해석 시뮬레이션에 적용된 3D 모델의 분해도이며, 열 해석은 Dassault Systemes社의 Solid Works-Flow Simulation 프로그램을 사용하였다. 각각의 구성은 위에서부터 heat sink, MPCB, LED 패키지로 구성하였다. 시뮬레이션은 heat power 30W로 설정하였고, 모든 조건은 동일하며 heat sink의 재질은 Al 6063과 TCP로 각각 설정하였다. 환경 조건은 해석공간 0.4m³, 공간내 기압 1atm, 외부온도 25℃ 물성온도 25℃로 설정하였다.

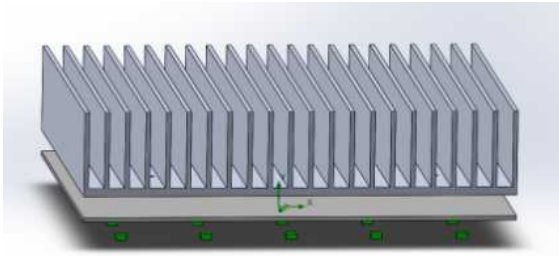


그림 2. 3D 모델의 모식도
Fig. 2. Schematic diagram of 3D model

표 2는 열 해석 시뮬레이션에 적용된 재료의 물성 값을 나타낸다. heat sink Al 6063의 열전도도는 209W/m·K, TCP의 열전도도는 14W/m·K으로 설정하였다. LED는 Sapphire 재질로 열전도도 23.1W/m·K, PCB는 Al 5052로 137W/m·K의 열전도도를 설정하였다. 시뮬레이션의 정확도를 높이기 위하여 LED와 PCB의 접촉부에는 solder(Au 80%/Sn 20%)의 접촉저항을 설정하였고, PCB와 heat sink의 접촉부에는 thermal pad의 접촉 저항(thermal contact resistance)을 설정하였다.

표 2. 열 시뮬레이션에 적용한 물성 값
Table 2. Applied to heat simulate physical properties

	Conductivity (W/m·K)	Density (kg/m ³)	Specific Heat (J/kg·K)
Al 6063	209	2,700	900
Al 5052	137	2,680	880
LED	23.1	3,980	761
TCP	14	1,430	1,050

4. 실험결과

4.1 Heat Sink 최적화

Heat Sink Designer 프로그램을 사용하여 fin 두께와 개수에 변화에 따른 LED모듈의 방열성능과 heat sink의 무게 특성을 비교 분석하였다. 그림 3은 base 두께 3.0mm에서 fin 개수와 두께에 따른 방열특성을 나타낸다. fin 개수 22개, 두께 1.6mm에서 가장 낮은

52.16°C의 온도 특성을 나타내었다. 표면적(A)이 가장 많이 나오는 fin 개수 30개, fin 두께 2.0mm에서는 61.28°C의 온도특성을 보였다. fin 개수 및 두께가 증가 할수록 방열성능이 감소하는 것을 확인하였다.

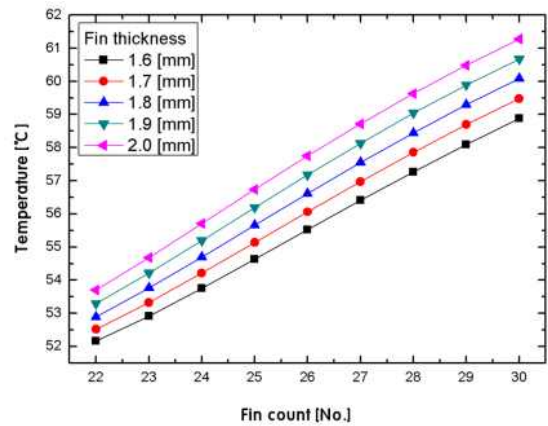


그림 3. heat sink의 fin 두께와 개수에 따른 온도 특성
Fig. 3. Temperature properties by fin thickness and count of heat sink

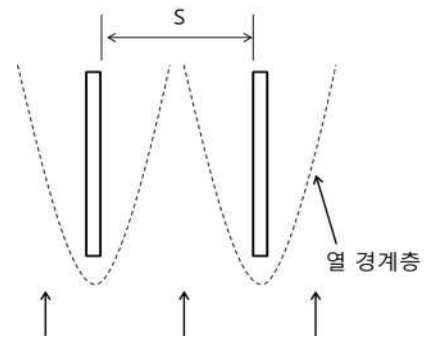


그림 4. heat sink의 fin 두께와 개수에 따른 온도 특성
Fig. 4. Temperature properties by fin thickness and count of heat sink

열 전도 특성을 고려하였을 때 heat sink의 방열 특성은 표면적 (A)의 증가와 함께 증가하여야 한다. 하지만 실험결과 표면적 (A)가 높아지더라도 방열성능은 낮아졌으며, 그 원인은 그림 4와 같이 유체와 고체 표면사이에 유체의 얇은 층이 형성되어 두 경계층이 만나기 때문이다. 경계층이 가깝게 형성되면 공기는 정체되어 흐르지 않아 자연대류 양은 감소하게 되므로 heat sink 설계시 열 경계층이 겹치지 않는 최적의

fin 간격 (S)을 분석하고 fin의 두께를 최소화 시켜 heat sink를 최적화 설계할 수 있다.

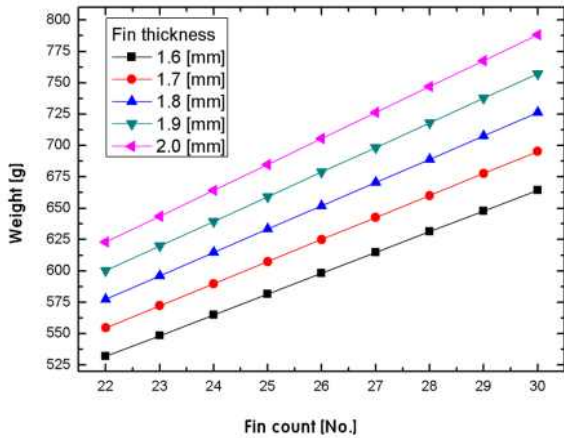


그림 5. heat sink의 fin 두께와 개수에 따른 질량 특성
Fig. 5. Weight properties by fin thickness and count of heat sink

그림 5는 fin 두께 및 개수에 따른 heat sink의 질량 변화를 나타낸다. fin 두께와 개수가 증가할수록 무게 또한 증가하므로 heat sink 설계시 주어진 열 부하에 대해서 온도상승은 동일하게 가져가면서 질량을 최소화 시킬 수 있도록 설계하여야 한다. 따라서 LED 조명 설계시 목표 광효율을 명확히 설정하고 질량, 방열 성능을 종합적으로 고려해야 한다.

4.2 TCP의 방열성능 분석

그림 6은 CFD 해석을 이용하여 heat sink 재질에 따른 열 해석 결과를 나타낸다. 열해석 조건은 LED와 PCB는 동일하게 설정하였고, heat sink의 물성값은 Al6063과 TCP로 바꾸어 주면서 해석하였다. TCP재질을 적용한 (A)의 Max 온도는 71.2°C, Al 6063의 재질을 적용한 (B)의 Max 온도는 65.6°C를 나타내었다. Al 6063은 TCP보다 우수한 방열 특성을 나타내었고 온도차는 5.6°C이다. Max 온도는 발열부로 LED의 P-N접합부이며, 최저점 온도는 heat sink fin 가장자리였다. 각 해석모델 내부의 온도차를 보면 TCP를 적용한 (A)는 71.2°C와 43.9°C의 온도로 약 27.3°C의

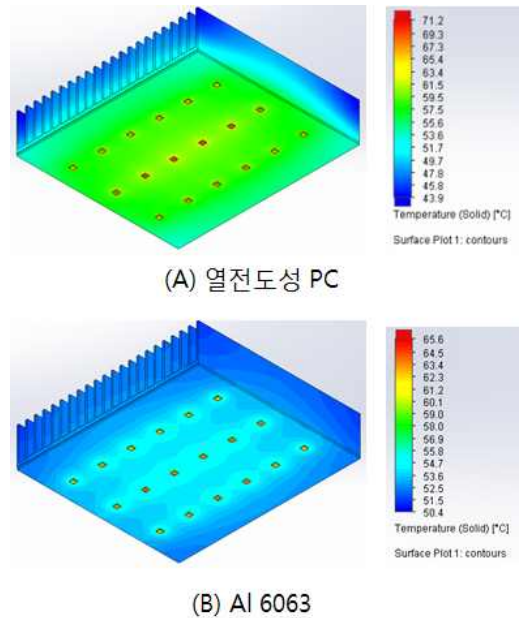


그림 6. heat sink 열 해석
Fig. 6. Thermal analysis of heat sink

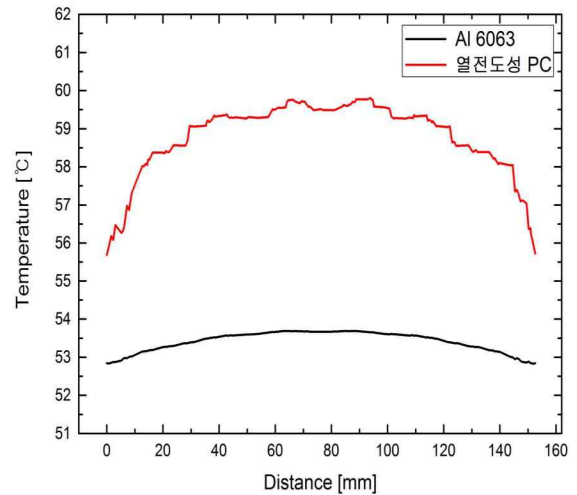


그림 7. heat sink Base 거리에 따른 온도 분포
Fig. 7. Thermal distribution depending on distance of heat sink base

온도차를 나타내었다. Al 6063을 적용한 (B)는 65.6°C와 50.4°C로 15.2°C의 온도차를 나타내었다.

그림 7은 heat sink base와 fin 접촉부의 단면 거리에 따른 온도분포를 나타낸다. heat sink 단면의 길이

는 152mm로 그래프 x축의 76mm 부분이 중심을 나타낸다. TCP재질에서는 heat sink 중심부 온도 59.8℃, heat sink 외곽부 온도 55.6℃로 4.12℃의 온도차를 보였다. Al 6063 재질은 중심부 온도 53.6℃, heat sink 외곽부 온도 52.8℃로 0.86℃의 온도차를 보였다. Al 재질의 heat sink는 열전도 TCP 재질보다 LED 접합부 온도를 낮추었으며, 거리에 따른 온도차가 감소하였다. 열전도 TCP 재질은 PCB에서 heat sink base, fin 부분으로 이동하는 열전달 경로의 열저항이 높아짐을 확인하였다. 접합부 온도와 모듈의 온도분포는 LED 조명의 광효율과 신뢰성을 높일 수 있는 중요한 요소이다. 따라서 TCP 재질의 heat sink 설계시 fin 끝단의 높이를 조절하여 LED 모듈의 온도 분포를 고르게 해야 한다.

그림 8은 TCP와 Al 6063 재질에 따른 자연대류 냉각 하에서의 열 유동시뮬레이션 결과이다. 열의 유동은 바깥쪽에서 안쪽으로 공기가 유입되고, heat sink의 열에 의하여 온도가 상승하면서 밀도차에 의하여 수직방향으로 상승하였다. heat sink의 온도가 높은 Al 6063 재질의 유속은 TCP보다 소폭 빠르게 나타났다. 따라서 LED 조명의 방열설계시 열의 전도 특성과 대류특성을 고려하면 fin의 방향은 수직이 되어야 하고 공기층의 흐름을 방해하지 않는 적절한 fin 간격이 최적화되어야 방열성능을 향상 시킬 수 있다.

표 3은 각 재질에 따른 heat sink 물성치를 나타낸다. 동일한 형상을 갖는 만큼 재질에 따른 부피와 면적은 차이가 없다. 하지만 밀도차에 의한 heat sink의 질량은 TCP 재질의 경우 281.18g으로 Al 6063 재질의 530.90g과 비교하여 47%를 감소시킬 수 있었다.

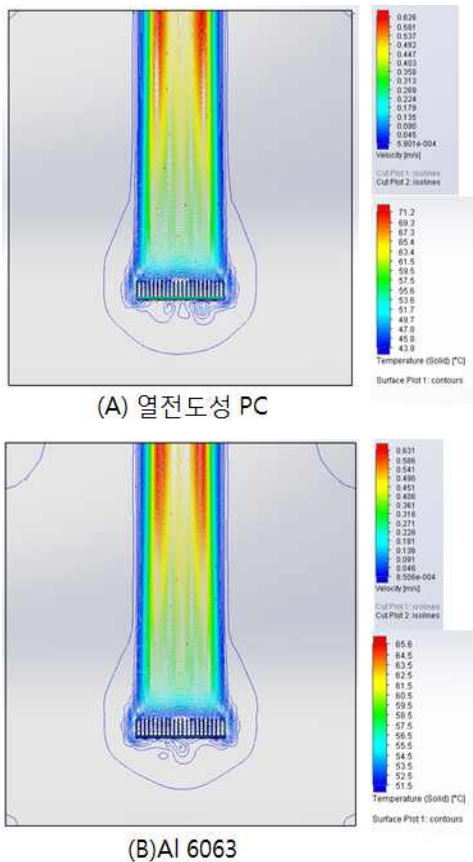


그림 8. 자연대류 냉각 하에서 heat sink 유동해석
Fig. 8. Flow analysis of heat sink in natural convection cooling

표 3. 재질에 따른 heat sink 물성치
Table 3. Heat sink of properties depending on material

	부피 (mm ³)	면적 (mm ²)	무게 (g)
Al 6063	196,630	213,790	530.90
TCP			281.18

위 실험결과를 종합하였을 때 Al 6063 재질의 heat sink는 TCP 재질의 heat sink 보다 접합온도에서 발생하는 열이 고르게 전달되어 LED의 접합온도를 낮추고 광효율을 개선시킬 수 있었으나, 제품무게가 증가하는 것을 확인하였다. 또 heat sink 설계시 fin의 위치에 따른 온도분포가 모두 다르기 때문에 각각의 fin 높이를 적절하게 조절하면 LED의 접합온도를 고르게 맞추어 LED조명의 신뢰성과 내구성을 향상 시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 Al 6063 재질의 heat sink를 최적화 설계 하고, LED 조명에 적용하여 TCP 재질과 Al 6063 재질에 따른 방열특성을 비교 분석하였다.

1. Al 6063 재질은 heat sink base 3.0mm에서 fin 개수 22개, fin 두께 1.6mm일 때 방열성능이 최적 조건이 되었으며, fin 개수 및 두께가 증가하여 표면적이 상승하여도 열 경계층에 의한 자연대류 감소로 방열성능은 감소하였다.
2. Al 6063과 TCP의 재질에 따른 LED 조명의 방열 성능을 분석한 결과 열전도 209W/m·K의 Al 6063 재질의 방열성능은 TCP 보다 접합온도가 5.6°C 낮아짐을 확인하였다. 하지만 TCP를 적용하게 되면 heat sink의 무게를 기존대비 약 47% 감소시킬 수 있었다.

결론적으로, LED 조명 설계시 방열량과 제품 크기에 따른 heat sink fin의 최적화된 설계가 필요하며, 제품 성능향상과 무게감소 사이에서 TCP와 같은 새로운 방열재질의 특성을 고려하여 적용해야 할 것이다.

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업(과제번호 : 1037416, 해양 LED 융합기술지원 기반구축 및 상용화 기술개발)으로 지원된 연구임.

References

- [1] Moo-Whan Shin and Jae-Pil Kim, "LED Introduction packaging technology", Bookshill, pp. 283, 2009.
- [2] Seung-Min Lee, Se-Il Lee, Jong-Kyung Yang, Jong-Chan Lee and Dae-Hee Park, "Optimization of heat sink and Analysis of Thermal Property in 75W LED Module for Street Lighting", Trans. KIEE, Vol. 59, No. 3, pp. 609-613, 2010.
- [3] S. L. Chuang, "Kinetic model for degradation of light-emitting diodes," IEEE J. Quant. Electron., Vol. 33, no. 6, pp. 970-979, Jun. 1997.
- [4] N. Narendran, and Y. Gu, "Life of LED-based White Light sources", IEEE/OSA Journal of Display Technology, Vol. 1 No. 1, pp. 167-170, 2005.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.

- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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 ◇



허인성(許寅盛)

1978년 2월 25일생. 2002년 2월 원광대학교 공과대학 전기전자 공학부 졸업. 2005년 동대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 2013년 부경대학교 대학원 LED 융합과정 박사과정 중. 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터 선임연구원.



이세일(李世一)

1983년 10월 16일생. 2009년 2월 원광대학교 공대 전기전자 및 정보통신공학부 정보통신 졸업. 2011년 동대 대학원 정보통신학과 졸업(석사). 현재 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터 전임연구원.



이아람(李아람)

1986년 9월 6일생. 2010년 8월 부경대학교 이미지시스템공학과 졸업. 현재 부경대학교 과학기술융합 전문대학원 LED 융합공학 석사과정 중. 부경대학교 LED-해양 융합기술 연구센터 전임연구원.



유영문(劉永文)

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