

유한체적법(FVM)의 시뮬레이션을 활용한 LED 벌브의 열 특성 고찰

(Investigation of the Thermal Characteristics of LED Bulb Utilizing Simulation of Finite Volume Method (FVM))

박경민* · 문철희**

(Kyoung-Min Park · Cheol-Hee Moon)

Abstract

Heat dissipation of the high power LED is a critical issue. To estimate the junction temperature of the LED chip is most important in characterizing the heat dissipation, but it is impossible to directly measure it. In this study, surface temperatures of the 12.8W LED bulb was measured for 5 points using a data logger and compared with the simulated results using a thermal simulator based on FVM (finite volume method) to secure a reliability of the simulation. Effects of some factors such as lens, emissivity and air inlet were investigated using simulation works and then the results were analysed.

Key Words : High Power LED, LED Bulb, Junction Temperature, Simulation, Surface Temperature

1. 서 론

LED(Light Emitting Diode)는 최근 들어 기존의 형광등, 백열전구, 할로겐전구 등의 조명시장을 완전히 대체하고 있다. LED의 발광효율은 LED의 동작온도에 큰 의존도를 가지며, 입력된 전력의 약 80%가 열로

변환되고 있으므로[1], 발광효율을 더 높이고 LED 칩 온도(더 정확히는 p-n 정션온도)를 낮게 유지하는 것이 기술적 이슈이다. 발생된 열을 외부로 충분히 방출시키지 못한다면 LED의 수명을 감소시킬 뿐만 아니라 방출 파장의 이동 등 다양한 문제점이 발생하므로 [2] 일반적으로 125°C의 방열 지표로 관리하고 있다 [3]. LED 벌브(LED 패키지를 사용한 조명제품)에서의 기본적인 방열 메커니즘은 칩에서 발생된 열이 MCPCB 혹은 세라믹 패키지로 이동하고, 부착된 히트싱크와 방열핀을 통하여 외부로 방출되는 것으로 되어 있다. 이에 관련된 연구들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

칩 단위 연구에서는 칩 사이즈에 따른 열저항 크기 변화 연구를 비롯하여 칩의 구조와 재질, 설계 등을 최적화하는 많은 연구가 있어 왔다[4].

패키지 단위 연구로는 칩과 하부의 배선 전극을 물

* 주저자 : 호서대학교 디지털디스플레이공학과 석사과정
** 교신저자 : 호서대학교 디지털디스플레이공학과 부교수
* Main author : Master of Engineering Candidate, department of display engineering, Hoseo university
** Corresponding author : Professor, department of display engineering, Hoseo university
Tel : 041-540-5923, Fax : 041-540-5929
E-mail : chmoon@hoseo.edu
접수일자 : 2014년 1월 17일
1차심사 : 2014년 1월 22일, 2차심사 : 2014년 3월 14일
심사완료 : 2014년 8월 19일

리적으로 그리고 전기적으로 연결하기 위한 재료인 TIM (thermal interface material)을 개선하기 위하여 기존의 솔더 페이스트에 탄소나노튜브를 혼합하여 열전도도를 높이는 등의 연구가 최근에 많이 진행되고 있다[5]. 또한 패키지 구조를 최적화하는 연구로서, PCB에서 전극으로 사용되는 Cu의 두께를 낮추어 칩의 온도를 최대 25%까지 감소시킬 수 있다는 연구결과와[6], LED 패키지의 칩 간 간격을 증가시키고 기판의 크기를 확대하여 열 저항을 감소시켰다는 연구결과들도 발표되어 있다[7].

벌브 단위에서의 방열 연구로는 히트 파이프를 이용하여 열 저항을 낮춘 구조와[8], 16개 쌍의 실리콘계 펠터어 소자를 이용하여 열저항을 낮춘 구조가 알려져 있으며[9], 히트싱크 구조에 따른 방열 특성 개선에 대한 연구결과 등이 알려져 있다[10].

최근 들어 LED 조명이 고출력화 됨에 따라 다양한 형태의 멀티 칩, 멀티 패키지 제품들이 출현하고 있으며, 히트싱크 등의 방열소자도 다양해지고 있다. 이와 같은 고출력 제품에서는 발생하는 열이 훨씬 높으므로 방열특성이 더욱 중요한데, 이는 칩, 패키지, 벌브 등에서의 열의 전도, 대류, 복사 등에 의한 방열 메커니즘에 대하여 깊은 고찰을 필요로 한다.

이와 같은 LED 제품의 방열특성 관리에 있어서는 LED 칩에서 전자와 정공이 재결합하여 빛이 발생하는 영역인 p-n 정션온도를 정확히 파악하는 것이 가장 중요한데 이는 직접적인 측정이 불가능하므로 다음과 같이 간접적으로 측정하는 방법들이 알려져 있다. 첫 번째 방법은 열전달 모델을 통한 정션온도 예측이다. 이는 LED의 순전압(VF)이 온도에 따라 달라지며 그 사이에 직선적인 관계가 있다는 점을 활용하여 정션온도를 예측하는 방식으로 과도열분석법이라 한다[11]. 두 번째 방법은 열 해석 시뮬레이션을 사용하여 정션온도를 예측하는 방법이다. 시뮬레이션의 경우 직접 소자를 제작하지 않고 다양한 변수로 정션온도를 예측할 수 있는 장점이 있지만 적절한 가정과 제한조건을 설정하지 않으면 결과의 신뢰성이 떨어지는 문제점이 있다.

본 연구에서는 유한체적법 (FVM; finite volume method)을 이용한 열 시뮬레이션 프로그램인

ANSYS 사의 ICEPAK V13.0 프로그램을 사용하여 LED 벌브에서의 정션온도를 예측하고 이를 낮추기 위한 방법 들을 제시하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 초당 600회의 샘플링이 가능하며, 동시에 8포인트의 온도를 측정할 수 있는 채널을 갖춘 장비인 데이터 로거(DT 9828)를 이용하여 LED 벌브의 표면 온도분포를 측정하였고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

2. 실험방법

본 연구는 그림 1에 나타난 바와 같이 COB(Chip On Board) 구조를 가지는 LED 벌브를 대상으로 하였다. 벌브 중 LED 패키지는 GaN 계 청색 LED 칩을 Ag 에폭시를 이용하여 기판의 배선전극인 Al 패드와 연결하였으며, 소자 보호를 위해 황색 형광체와 실리콘 혼합물로 봉지하였다. Cu 전극의 산화 방지와 봉지재 주형을 위하여 세라믹 재질의 측벽으로 LED 칩과 봉지재를 둘러싸고 있는 구조로 제작하였다. 패키지 하부에는 MCPCB (Metal Core Printed Circuit Board) 기판을 사용하였고 이를 하부의 히트싱크와 접착한 형태로 제작하였다.

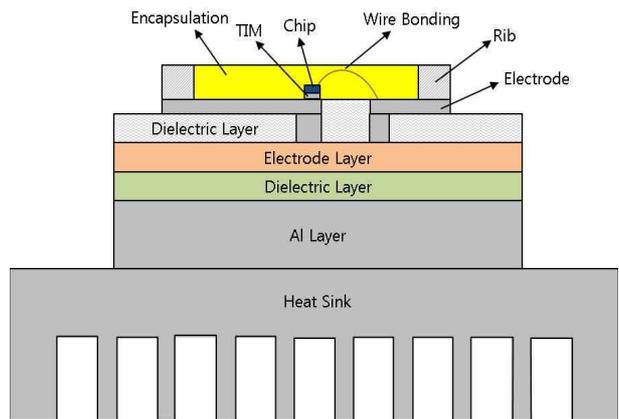


그림 1. LED 벌브의 단면 구조
Fig. 1. Schematic drawing of the LED bulb

그림 2는 Inventor 3D 모델링 프로그램을 통하여 모델링한 구조를 보여주고 있다. 그림 2에서 LED 벌브는 그림 1과 같은 단일 칩 패키지 21개로 구성되어 있

다. 히트 싱크 내부에는 LED 벌브를 구동시키기 위한 전원부가 존재하며 MCPCB와 히트싱크를 나사 체결로 접합하였다. 표 1에 본 연구에 사용한 LED 벌브의 구성요소별 재질, 규격과 열전도도를 나타내었다.

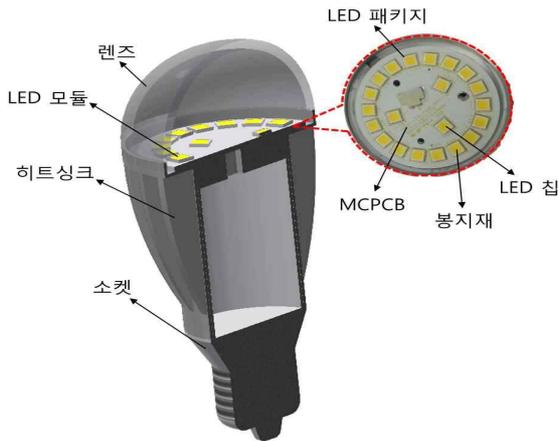


그림 2. LED 벌브의 시뮬레이션 모델링
Fig. 2. Simulation modeling of the LED Bulb

표 1. LED 벌브의 기본 사양
Table 1. General specification of the LED bulb

	재료	치수(mm)	열전도도 (W/(m.K))
LED 칩	GaN	1.2×0.7×0.28(T)	130
봉지재	Si+형광체	4×4×0.7(T)	0.17
TIM	Ag에폭시	1.2×0.7×0.01(T)	2.5
솔더	Au-Sn-Cu	5×5×0.02(T)	60
세라믹담	LTCC	5×5×0.7(T)	4.0
MCPCB 표면	LTCC	5×5×0.7(T)	1.0
전극패드	Al	Φ52×0.03(T)	235
배선전극	Cu	Φ52×1.0(T)	386
유전층	Prepreg	Φ52×0.035(T)	2.0
MCPCB 코어	Al	Φ52×0.085(T)	235
히트싱크	Al	Φ60×60.2(T)	235
렌즈	PMMA	Φ60×30(T)	0.2
소켓	PBT	Φ36(상),Φ26(하) ×85.2(T)	1.0



그림 3. 시뮬레이션 캐비닛 설정조건
Fig. 3. Cabinet condition for the simulation work

그림 3은 본 연구의 시뮬레이션 작업을 위하여 캐비닛을 설정한 조건을 보여준다. 본 연구팀은 기존의 시뮬레이션 경험을 토대로 시뮬레이션에서 기본 경계조건이 해석 결과에 영향을 미치지 않도록 해석 영역을 충분히 크게 설정하여 대류의 계산이 원활하게 이루어지도록 캐비닛 크기를 조절하였다[12].

시뮬레이션에서 외부 온도는 20℃, 압력은 대기압, 대류의 조건은 자연대류로 설정하였다. 중력방향은 -Z방향으로 $-9.8m/s^2$ 값을 적용하였다. 자연대류의 경우 Rayleigh 수가 10^9 이상일 경우 난류를 적용하며 이하일 경우에는 층류로 가정하는 것이 일반적이지만 본 연구에서는 Rayleigh 수가 8×10^6 로 계산되었으므로 층류를 가정하였다. 또한 자연대류에서는 유체의 밀도 차이와 중력에 의한 대류현상이 일어나는데 강제대류와 같은 특별한 유체의 흐름이 없어서 상대적으로 복사의 영향이 크게 나타난다. 복사의 경우 DO(Discrete Ordinates) 복사 모델을 적용하였다.

시뮬레이션을 위한 메쉬는 Hexahedron 메쉬를 생성하였으며, 물질간의 경계면과 물질과 유체의 경계면에는 메쉬를 더 많이 생성하여 결과의 신뢰성을 높일 수 있도록 Non-conformal 메쉬를 사용하였다. 본 연구에서는 시뮬레이션과 써모커플을 이용한 측정 결과를 비교한 결과 LED 칩으로 공급된 전력의 75%가 열로 발생한다고 가정하여 12.8W 중에서 9.6W가 열로 발생하는 것으로 열원의 크기를 입력하였다. 또한 본

연구에 사용한 LED 벌브는 21개의 칩을 사용하고 있으므로 단위 칩 당 0.457W의 전력이 공급되는 것으로 가정하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 시뮬레이션 일치도 확보

시뮬레이션에 앞서 LED 벌브 표면의 온도를 써모커플을 이용하여 측정하였고 이를 시뮬레이션 해석 결과와 비교하여 시뮬레이션 해석 결과의 신뢰성을 확보하고자 하였다. 이를 위하여 데이터 로거를 이용하여 렌즈를 제거한 LED 벌브의 표면을 그림 4에서와 같이 5군데 즉, 봉지재 표면(A), MCPCB 표면(B), 히트싱크 상부(C), 방열핀(D), 히트싱크 하부(E)에 대하여 온도를 1시간 동안 측정하였다.



그림 4. LED 벌브의 데이터 로거 측정 위치
Fig. 4. Data logger measuring points of the LED bulb

그림 5는 5개 측정 포인트에서 1시간 후에 측정된 온도 수치와 시뮬레이션에서 얻어진 값을 비교한 그래프이다. 봉지재 표면 온도(A)의 경우를 보면, 시뮬레이션과 측정결과가 각각 100.3°C와 104.7°C로 약 4%의 오차율을 보였으며 다른 부분에서도 측정과 시뮬레이션 해석 결과가 최대 5% 이내의 오차율을 보였다. 따라서 본 연구에서 선택한 LED 벌브의 열 시뮬레이션 가정은 실제 측정한 값과 일치도를 가지고 있다고 판단되어 이후의 시뮬레이션 작업을 수행하였다.

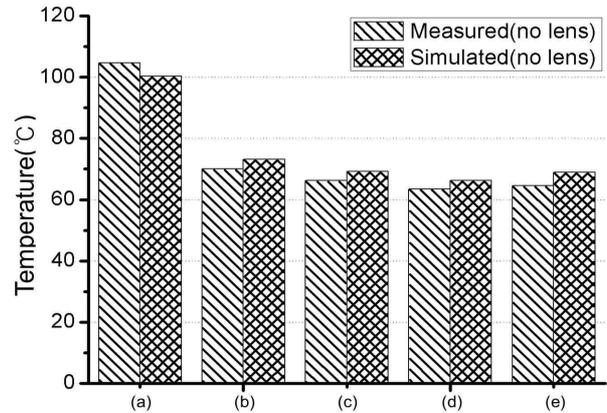


그림 5. 데이터 로거 측정과 시뮬레이션 결과 비교
Fig. 5. Comparison of the data logger measurement and simulation results

3.2 LED 벌브 구조에 따른 정선온도 시뮬레이션

3.2.1 렌즈의 영향

LED 벌브의 구성을 살펴보면 MCPCB 기판에 LED 칩이 실장되어 있고 칩을 보호하기 위한 봉지재가 주형되어 있다. 그 외부에는 LED 벌브를 보호하고 발생된 빛을 산란시키기 위한 렌즈가 부착되어 있는데 이 렌즈가 방열 측면에서 어떠한 영향을 미치는지 데이터 로거 측정결과와 열 시뮬레이션 예측 결과를 비교하였다.

그림 6은 LED 벌브에서 렌즈의 유무에 따라 그림 5의 5개 측정 포인트에서의 표면 온도를 비교한 것이다. 데이터 로거 측정치와 시뮬레이션 결과 모두, 렌즈를 채용한 경우에 비하여 렌즈를 제거한 경우 봉지재의 표면 온도가 약 10°C 감소함을 알 수 있었다. 이는 렌즈를 채용한 LED 벌브의 경우 칩에서 발생된 열이 렌즈로 밀폐된 구조로 인하여 밖으로 원활하게 빠져나가지 못하면, 시간의 경과에 따라 렌즈 내부의 공기가 뜨거워지고 이로 인하여 LED 칩의 온도가 더 상승하는 것으로 해석할 수 있다. 물론 렌즈를 채용한 경우에도 칩에서 발생한 열이 렌즈 내부에서 공기의 열전도를 통하여 렌즈로 전달되고 다시 렌즈의 표면에서 렌즈 주변의 공기로 열의 전도, 대류, 복사에 의하여 이동한다. 하지만 렌즈가 없는 경우에는 칩에서 발

생한 열이 주변 공기로 바로 대류에 의하여 이동할 수 있지만, 렌즈로 차단된 형태에서는 렌즈 내부에서 열의 대류는 기대할 수 없으므로 이러한 차이가 정선온도의 상승을 초래하는 것으로 생각할 수 있다.

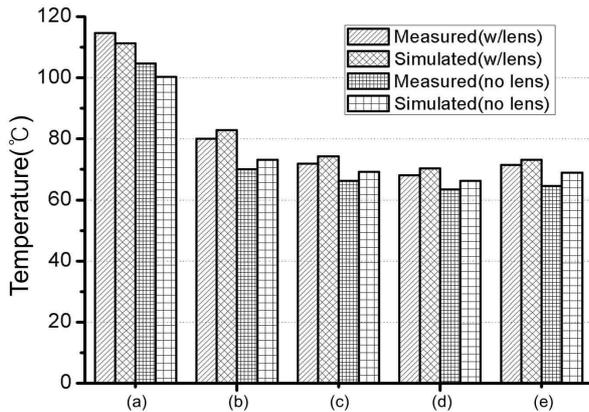


그림 6. LED 벌브에서 렌즈 유무에 따른 표면 온도 비교
Fig. 6. Comparison of the surface temperatures of the LED bulbs with and without a lens

본 연구에서는 그림 7 (a)의 LED 벌브의 렌즈 측면에 그림 7 (b)와 같이 유체의 흐름이 발생할 수 있게 공기 유입구를 만들었는데 그 결과 봉지재의 표면 온도가 약 5°C 감소함을 확인하였다. 이는 렌즈 측면에 도입한 공기 유입구로 인하여 렌즈 내부에 가두어졌던 뜨거운 공기가 외부로 빠져나가는 유체의 흐름이 생성되었기 때문인 것으로 이해할 수 있다.



그림 7. LED 벌브 형태 (a) 표준 형태 (b) 공기 유입구 도입
Fig. 7. Photographs of the LED bulb. (a) standard (b) air inlets at the sides of the lens

3.2.2 히트싱크 방사율에 따른 변화

LED 벌브에 부착된 방사형 히트싱크를 이용한 방열 구조는 자연대류에 의한 방열이 지배적이지만 복사에 의한 열전달 또한 방사형 히트싱크의 방열 성능에 복합적인 영향을 끼치는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 방사형 히트싱크의 방사율을 달리하였을 때 LED 칩의 정선온도에 영향을 미치는 영향 정도를 확인하기 위하여 열 시뮬레이션을 이용하였다. 여기서 히트싱크의 표면 거칠기는 무시하고 방사율만을 변경하여 칩의 정선온도와 봉지재 표면 온도를 예측하였다.

일반적으로 LED 벌브에 부착된 히트싱크의 재질은 알루미늄이다. 알루미늄의 상온에서의 방사율은 표면 처리를 하지 않았을 때 약 0.1인데, 본 연구에 사용된 히트싱크의 경우 알루미늄 표면에 약 100 μ m 두께의 산화피막을 형성하는 아노다이징 처리를 하였으므로 다음과 같은 방법으로 방사율을 평가하였다. 우선 열화상 카메라에서 방사율을 여러 가지로 달리하면서 온도분포를 구하였고, 이를 히트싱크 표면에 부착한 써모커플을 통하여 얻어지는 온도분포와 비교하였다. 이와 같은 방법으로 얻어진 히트싱크 표면의 방사율 값은 0.9로 평가되었고 이를 시뮬레이션의 기초 입력 수치로 사용하였다.

본 연구에서 대상으로 삼은 LED 벌브는 이와 같이 표면 방사율이 0.9인 히트싱크를 채용하고 있으므로 그림 8에서는 표면처리를 하지 않은 알루미늄의 방사율인 0.1부터 표면 처리한 경우에 얻어진 방사율인 0.9까지 방사율을 변경시키면서 정선온도와 봉지재 표면 온도에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 분석하였다. 분석결과에 따르면, 정선온도의 경우 방사율이 0.1인 경우에는 131°C였던 것이 방사율이 0.9인 경우에는 119°C로 12°C 만큼 감소함을 알 수 있었다. 봉지재 표면 온도의 경우에는 방사율이 0.1인 경우에 114°C였으나 방사율이 0.9인 경우에는 102°C로 이 또한 12°C 만큼 감소함을 알 수 있었다. 모든 경우에 있어서 봉지재 표면 온도는 정선온도보다 약 16°C 낮게 평가되었는데 이는 본 연구팀이 다른 논문에서 발표한 결과와 일치한다[13].

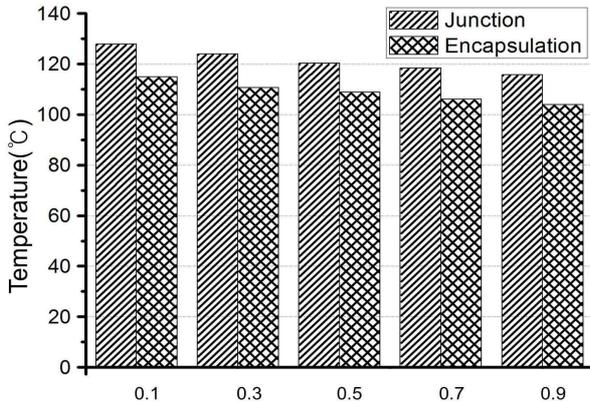


그림 8. 히트싱크 방사율에 따른 정선온도와 봉지재 표면 온도의 변화

Fig. 8. Change of the junction temperature and encapsulant surface sink temperature with the emissivity of heat sink

본 연구에 사용된 LED 별브는 히트싱크의 표면을 아노다이징 처리하므로 흑체 효과를 내어 복사열의 전달이 향상되므로 이와 같이 LED 칩의 정선온도가 12°C 만큼 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

3.2.3 히트싱크에 공기 유입구 설치

일반적으로 LED 칩에서 발생하는 열이 방열되는 주된 방열 메커니즘은 칩에서 발생된 열이 열 계면 물질(TIM)을 통해 기판인 MCPCB를 거쳐 별브에 부착된 히트싱크로 이동하여 히트싱크의 방열핀으로 방열되는 구조를 가진다. 하지만 이러한 방법의 방열 구조에는 히트싱크 표면적, 비열 등 재료 물성에 의하여 한계가 생기게 된다.

본 연구에서는 시뮬레이션을 이용하여 히트싱크에 공기 유입구를 설치하는 효과에 대하여 연구를 진행하였다. 공기 유입구로 인하여 히트싱크 내부에 빈 공간이 생성되며, 이를 통하여 MCPCB에서 전달된 열을 바로 외부로 방출시키고자 하는 것이 기본적인 아이디어이다.

그림 9에서 (a)의 경우에는 히트싱크 내부 공간에 빈 공간을 만들어 유체의 흐름을 발생시키고 이를 히트싱크 측면에 도입한 공기 유입구를 통하여 외부로 방출시키고자 하였다. 홀의 크기는 $\varnothing 3\text{mm}$ 이며, 개수는 총 23개이다. 그림 10은 이에 대한 개념도로서 공

기 유입구를 도입하면 히트싱크 내부에 갇혀 있던 뜨거운 공기가 대류현상에 의해 외부의 차가운 공기와 교환되는 구조로 방열이 됨을 알 수 있다.

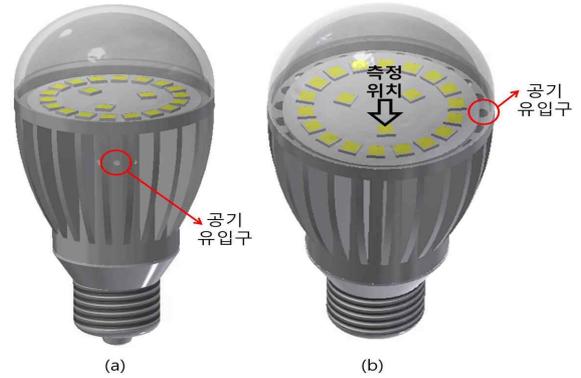


그림 9. 공기 유입구를 도입한 히트싱크의 모습

(a) 히트싱크 옆면 (b) 히트싱크 상단
Fig. 9. Introduction of air inlets at (a) the side (b) the top of the heat sink

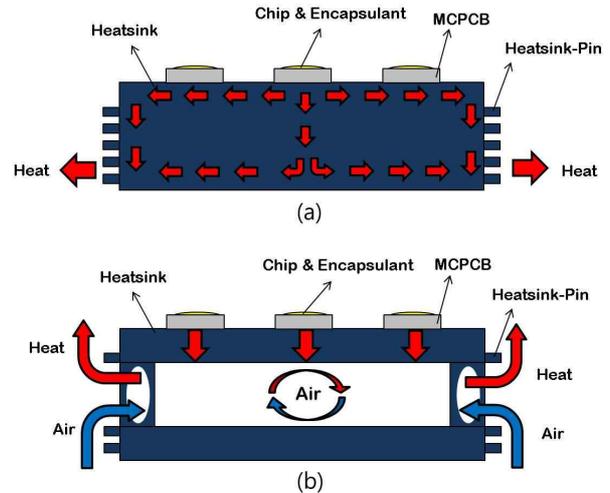


그림 10. 히트싱크 공기 유입구 구조 개념도 (a) 열전도에 의한 방열 (b) 대류에 의한 방열

Fig. 10. Conceptual drawing which shows the role of the air inlet (a) heat conduction (b) heat convection

그림 9에서 (b)는 3.2.1에서 살펴보았듯이 렌즈가 LED 별브의 방열에 악영향을 미치기 때문에 이를 해결하기 위한 구조로 히트싱크 상단에 공기 유입구를

설치하였으며, 홀의 크기는 $\varnothing 4\text{mm}$ 이며, 개수는 총 23개이다. 개수를 23개로 설정한 이유는 방열핀의 개수가 23개이므로 방열핀 사이에 공기 유입구를 설치하였다.

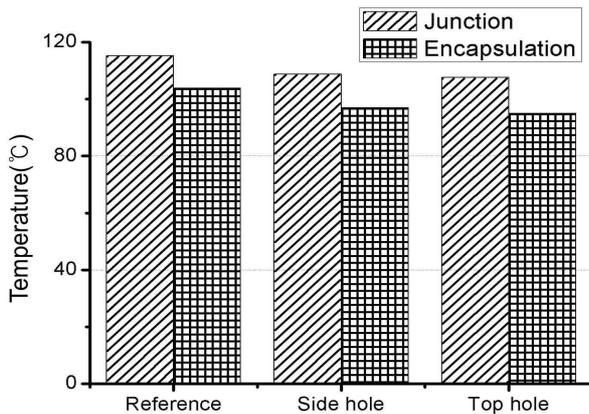


그림 11. 공기 유입구 도입에 따른 정선온도와 봉지재 표면 온도의 변화

Fig. 11. Change of the junction temperature and encapsulant surface temperature by introducing air inlets

위 그림 11은 그림 9에서 히트싱크의 측면과 상부에 공기 유입구를 도입한 경우 정선온도와 봉지재 표면 온도의 변화를 보여준다. 공기 유입구 도입 이전의 정선온도는 115°C 였던 것이 측면 홀 도입으로는 109°C , 상부 홀 도입으로는 107°C 로 감소함을 알 수 있었다. 봉지재의 표면 온도는 그림 11에서와 마찬가지로 모든 경우에서 정선온도보다 12°C 정도 낮은 값을 나타내었다.

4. 결 론

고출력 LED 별브에서 데이터 로거를 이용하여 5군데의 표면 온도를 측정하였으며 이를 유한체적법(FVM)을 기반으로 하는 열 시뮬레이션을 이용하여 예측한 값과 비교하여 시뮬레이션의 신뢰도를 확보하였다. 이를 바탕으로 LED 별브에서 정선온도에 미치는 인자들에 대하여 시뮬레이션을 통하여 예측한 결과는 다음과 같다.

첫째, LED 별브에서 렌즈를 채용하면 정선온도가

10°C 증가했으며, 렌즈에 공기 유입구를 채용하면 5°C 감소할 것으로 예측되었다.

둘째, 히트싱크 표면의 방사율을 0.1에서 0.9까지 증가시키면 정선온도가 131°C 에서 119°C 로 12°C 감소하였으며, 모든 조건에서 봉지재 표면 온도는 정선온도보다 16°C 낮게 예측되었다.

셋째, 정선온도가 115°C 였던 것이 측면 홀 도입으로 109°C , 상부 홀 도입으로 107°C 로 감소하는 것으로 예측되었다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력 양성사업으로 수행된 연구결과임.

References

- [1] Bladimir Ramos-Alvarado, Bo Feng, G.P. Peterson, "Comparison and optimization of single-phase liquid cooling devices for the heat dissipation of high-power LED arrays", Applied Thermal Engineering, Vol. 59, Issues 1-2, pp. 648-659, Sep. 2013.
- [2] Ting Cheng, Xiaobing Luo, Suyi Huang, Sheng Liu, "Thermal analysis and optimization of multiple LED packaging based on a general analytical solution", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, No. 1, pp. 196-201, Jan. 2010.
- [3] Lu Ma, Yang Yang, Jing Liu, "Cooling of high power LEDs through ventilating ambient air to front surface of chip", Heat Mass Transfer, Vol. 49, No. 1, pp. 85-94, Jan. 2013.
- [4] Lianqiao Yang, Jianzheng Hu, Lan Kim, and Moo Whan Shin, Member, IEEE, "Thermal Analysis of GaN-Based Light Emitting Diodes With Different chip Sizes", IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY, Vol. 8, No. 3, pp. 571-575, Sep. 2008.
- [5] Bo-Hung Liou, Chih-Ming Chen, Ray-Hua Horng, Yi-Chen Chiang, Dong-Sing Wuud, "Improvement of thermal management of high-power GaN-based light-emitting diodes", Microelectronics Reliability, Vol. 52, No. 5, pp. 861-865, May, 2012.
- [6] Chun-Jen Weng, "Advanced thermal enhancement and management of LED packages", International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 36, No. 3, pp. 245-248, Mar. 2009.
- [7] Byung-Ho Kim, Hye-Kyong Kwon, and Cheol-Hee Moon, "Variation of Junction Temperature According to chip Configuration for a High-Power LED Package", Korean J. Met. Mater., Vol. 51, No. 8, pp. 595-601, 2013.

- [8] Lan Kim, Jong Hwa Choi, Sun Ho Jang, Moo Whan Shin, "Thermal analysis of LED array system with heat pipe", *Thermochimica Acta*, Vol. 455, Issues 1-2, pp. 21-25, Apr. 2007.
- [9] Jen-Hau Cheng, Chun-Kai Liu, Yu-Lin Chao, Ra-Min Tain, "Cooling Performance of Silicon-Based Thermoelectric Device on High Power LED", *International Conference on Thermoelectrics*, pp. 53-56, Jun. 2005.
- [10] Yen-Fu Su, Shin-Yueh Yang, Tuan-Yu Hung, Chang-Chun Lee, Kuo-Ning Chiang, "Light degradation test and design of thermal performance for high-power light-emitting diodes", *Microelectronics Reliability*, Vol. 52, No. 5, pp. 794-803, May. 2012.
- [11] B. H. Kim and C. H. Moon, "Investigation of the Thermal Dissipation Characteristics of LED Package Using Mold Surface Temperature", *Japanese Journal of Applied Physics* Vol. 52, No. 10s, pp. 10MA04:1-4, Sep. 2013.
- [12] Y. T. Bang and C. H. Moon, "Enhancement of Upward Thermal Dissipation in a 16-chip LED Package Using Ceramic Barrier Ribs", *Electron. Mater. Lett.*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-5, Sep. 2013.
- [13] Y. T. Bang and C. H. Moon, "Effect of the epoxy mold on the thermal dissipation behavior of LED package", *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 26, No. 2, pp. 1-7, Feb. 2012.

◇ 저자소개 ◇



박경민(朴耿顛)

1987년 5월 14일생. 2013년 호서대학교 디지털디스플레이공학과 졸업. 2013년~현재 동 대학원 석사과정.



문철희(文喆熙)

1963년 12월 1일생. 1986년 서울대학교 금속공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1992년 동 대학원 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신 대학교 초청 연구원. 1996~2005년 삼성 SDI 근무. 2005년~현재 호서대학교 디지털디스플레이공학과 부교수.