

고출력 5 Watt LED기반 탐조등의 방열설계

이아람¹, 허인성², 이세일², 유영문², 김종수^{3,a}

¹ 부경대학교 과학기술 융합전문대학원 LED 융합공학전공

² 부경대학교 LED-해양융합기술연구센터

³ 부경대학교 이미지시스템공학과

Thermal Design of High-power 5 Watt LEDs-based Searchlight

A Ram Lee¹, In Sung Her², Se-Il Lee², Young Moon Yu², and Jong Su Kim^{3,a}

¹ LED Convergence Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

² LED-Marine Convergence R&BD Center, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³ Department of Image Science & Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received July 3, 2014; Revised July 15, 2014; Accepted July 17, 2014)

Abstract: The heat dissipation conditions of high-power 5 watt LEDs-based searchlight modules were optimized with varying LED bar's shape, materials, and ambient temperature. The LED junction temperature was estimated by using Computational Fluid Dynamics simulation. The optimal heat dissipation conditions were found as follows; LED bar' shape: $L=80$ mm, $W=4$ mm, $t=10$ mm, copper material, LED junction temperature of 116.6°C , ambient temperature of 50°C , total mass of 184 g, and shadowing area of 320 mm^2 . The difference between the junction temperatures of our fabricated and simulated LEDs-based searchlight modules is about 3°C , which confirms the validity of our thermal simulation results.

Keywords: Searchlight, Thermal simulation, LED junction temperature, High-power LED

1. 서 론

발광다이오드 (light emitting diode, LED)를 사용한 조명기기는 고효율과 장수명의 장점으로 일반조명 뿐만 아니라 선박용, 산업용, 군사용 등의 고부가가치 조명광원으로 연구 개발과 적용이 활발히 진행되고 있다. 특히, 질화갈륨 (GaN)기반의 고출력 LED는 광출력이 크게 향상되면서 차세대 광원으로 각광받고 있다 [1,2]. 그러나 LED는 입력전력 대비 85%가 열

로 변환되어, 광 출력의 증가에 따른 높은 전류로 인해 LED칩의 접합 온도 (junction temperature)가 상승하게 된다. 이는 단기적으로는 광 출력 및 광 효율의 저하와 장기적으로는 칩의 수명을 감소시키는 요인이 되어 LED 소자의 신뢰성을 저하시킨다. 따라서 고출력 조명에 LED를 적용할 때는 LED의 접합 온도를 낮추는 방열설계가 필수적이다 [3].

종래의 탐조등은 일반적으로 1 kW 이상의 할로겐 (Halogen) 및 제논 (Xenon) 램프와 같은 단일광원을 사용한다. 하지만 기존 광원들은 다량으로 발생하는 열로 인해 효율이 낮고, 수명이 짧아 이를 LED로 대체 시 저전력, 장수명, 고효율의 제품을 기대 할 수 있다 [4]. 탐조등은 수 km까지 빛이 도달하여야 하므로 광원의 빔 각을 최소로 하여 빛이 퍼지지 않도록

a. Corresponding author: jsukim@pknu.ac.kr

하여야 한다. 따라서 포물경 전면에 지지대를 이용하여 LED를 위치시키고, LED에서 방사되는 전방향의 빛을 포물경으로 반사시켜 빛을 모아주는 구조이다. 때문에 일반적인 방열판을 탐조등 구조에는 적용할 수가 없어 제한된 좁은 면적에서 방열대책이 필요하다. 탐조등에 사용될 방열대책으로 적용 가능한 냉각 방식은 자연대류에 의한 히트싱크 (heat sink), 냉각 팬을 사용한 강제대류 방식, 냉각액을 이용한 수냉식 냉각 (water cooling), 상변화에 의한 내부적인 순환을 이용한 히트파이프 (heat pipe), 전류의 극성에 따라 열을 흡수·방출하는 열전소자를 이용한 열전냉각 (thermoelectric cooling), MEMS (micro electro mechanical systems) 기술을 이용한 마이크로 채널 쿨러 (microchannel cooler), 대전된 두 전극 사이에 고압의 전기장을 형성시켜 발생한 이온풍 (ion wind) 을 이용한 냉각 방식 등이 있다 [5-9]. 그 중에서 자연 대류에 의한 히트싱크는 높은 신뢰성과 적은 비용으로 냉각방식 중 가장 많이 쓰이는 방법 중 하나이다.

본 논문에서는 5 watt 고출력 LED 패키지를 탐조등 구조에 적용 시 LED의 높은 출력으로 인해 국소적인 열문제가 발생할 것을 고려해 방열바의 재질 및 주변 온도에 따라 LED 접합 온도를 낮추는 방열 조건을 찾고자 한다. 방열 성능은 CFD (computational fluid dynamics) 시뮬레이션을 이용하여 LED의 접합 온도를 예측하였고, 시뮬레이션 결과는 실험 데이터와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 실험 방법

2.1 탐조등 모듈의 구성

본 논문에서 고안된 LED 탐조등은 그림 1과 같이 작은 모듈을 구성하였고, 이 모듈의 수를 자유롭게 array하여 탐조등을 만들 수 있다.

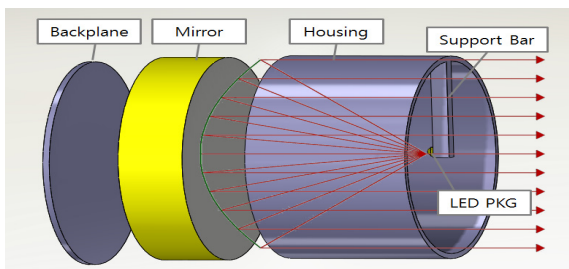


Fig. 1. LED module structure for searchlight.

모듈은 LED package, support bar, housing, mirror, backplane로 구성되어 있고, LED는 지지대 (support bar)에 부착되고, LED에서 발생된 빛은 Mirror를 통해 다시 반사되어 평행광이 발산된다.

2.2 탐조등 모듈설계 조건

탐조등 모듈에서 방열부는 그림 1의 LED의 지지대 (support bar)이며, 방열바라고 한다. LED에서 발생된 열은 방열바를 통해 하우징으로 전달되므로, 열을 빠르게 확산시킬 수 있는 소재의 방열바 설계가 중요하다.

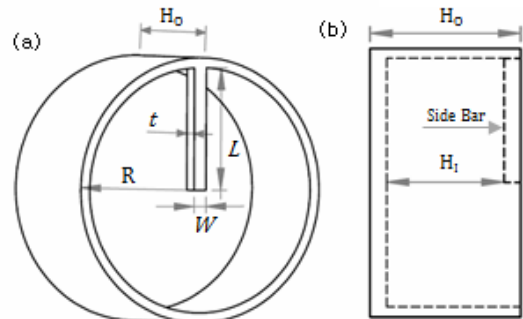


Fig. 2. Schematic of LED module. (a) front view, (b) side view.

따라서 그림 2 및 표 1과 같이 방열바의 길이(L), 넓이(W), 두께(t)에 따라 총 12개의 모델을 설계하였고, 방열바의 길이(L)에 따라 A type과 B type으로 나뉜다. Mirror와 LED 사이의 거리(H₀)는 LED의 초점거리로 고정되고, 바의 두께(t)가 증가하면 하우징의 바깥 높이 (H₀)가 증가하도록 설계하였다.

Table 1. Geometric parameters of LED modules.

Type	Model	L (mm)	W (mm)	t (mm)	HO (mm)	R (mm)	HI (mm)
A	# 1	40	4	5	40	40	44
	# 2	40	4	10	45	40	44
	# 3	40	4	15	50	40	44
	# 4	40	8	5	40	40	44
	# 5	40	8	10	45	40	44
	# 6	40	8	15	50	40	44
B	# 7	80	4	5	40	40	44
	# 8	80	4	10	45	40	44
	# 9	80	4	15	50	40	44
	# 10	80	8	5	40	40	44
	# 11	80	8	10	45	40	44
	# 12	80	8	15	50	40	44

2.3 시뮬레이션 조건

열 해석 시뮬레이션은 표 2와 같이 각 구성의 물성치를 입력하여 수행하였다. LED 칩의 발열량은 5 W 이고, 1 m³의 임의의 공간을 설정하여 기압은 1 atm, 수렴성 향상을 위해 100만 개 이상의 메쉬를 지정하였다. 주변 온도는 해석 조건에 따라 (25~50)°C로 설정하였으며, 방열바는 알루미늄과 열전도도가 높은 구리를 각각 적용하였다. 소프트웨어는 전산 유체 역학 (computational fluid dynamics, CFD) 소프트웨어인 ANSYS ICEPAK을 이용하여 정상상태 자연대류 조건에서 수행하였다.

Table 2. Thermal simulation parameters of searchlight module.

Layer	Material	Conductivity (W/m · K)
Housing	Aluminum	167
Support Bar	Aluminum	167
	Cooper	387
PCB	Aluminum 5052	178
Substrate	Sapphire	10
Epi layer	GaN	30
Epoxy	Epoxy	0.8

2.4 LED 접합 온도 측정

LED의 접합 온도는 JEDEC (EIA/JESD51-1)의 규격에서 제시한 순방향 전압과 온도와의 상관관계인 비례상수 (K-factor)를 이용하여 전기적으로 측정할 수 있다 [10]. 본 실험에서는 Mentor Graphics사의 T3ster를 이용하여 주변 온도에 따른 LED의 접합 온도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 형상 및 재질에 따른 열 특성

그림 3과 같이 방열바의 형상 (#1~12)에 따라 재질을 알루미늄과 구리를 적용하여 시뮬레이션하였다. 그림 3(a)는 A type (#1~6)의 LED 접합 온도로, 최저 온도는 #6 구리에서 90°C이다. 그림 3(b)는 B type의 (#6~12)이고, 최저 온도는 #12 구리에서 85.9°C이다.

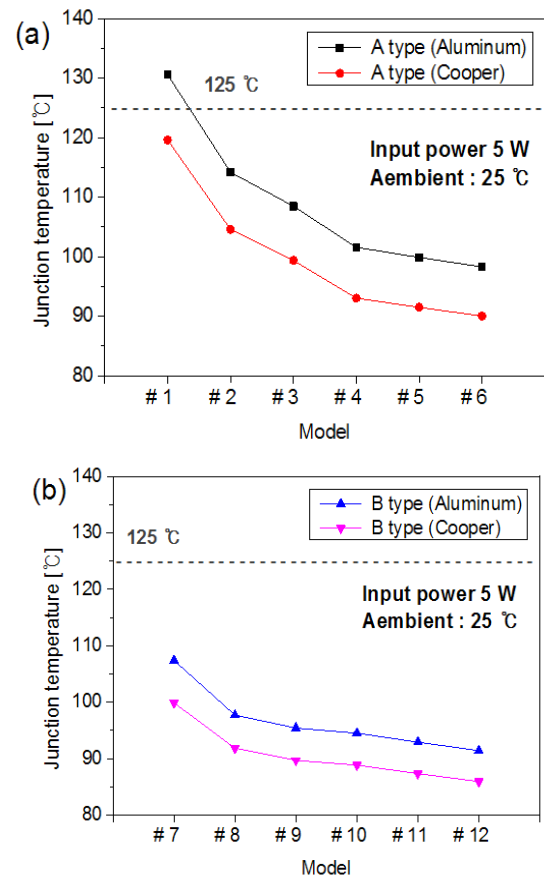


Fig. 3. The junction temperature for different model & materials. (a) A type (#1-6), (b) B type (#7-12).

모델의 번호가 증가할수록 방열바의 크기도 증가하여 접합 온도는 감소하였지만 온도의 감소폭은 1% 미만으로 점점 작아졌다. 하지만 재질을 알루미늄에서 구리로 변경 시 알루미늄과 평균 9.3%의 차이를 보여 구리를 적용 시 더 낮은 LED 접합 온도를 기대할 수 있다.

3.2 타입 별 온도 분포

탐조등 모듈의 방열바의 길이(L), 넓이(W), 두께(t)에 따라 총 12개의 모델을 설계하였고, 열 해석 시뮬레이션을 통해 타입 별 온도 분포를 확인하였다. 그림 4(a)는 A type #1의 결과이며, 방열바의 길이가 $L=40$ mm이고, 방열바의 재질은 알루미늄이다. A type은 열이 한쪽으로 밖에 전도되지 않아 LED 및 방열바 끝에 열이 집중되는 현상이 일어나 LED의 접합 온도가 130.6°C이고, 하우징으로 열이 충분히 전

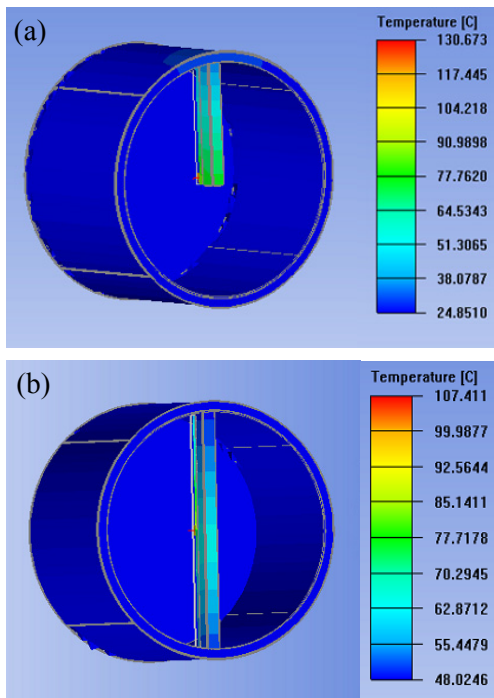


Fig. 4. Simulation results of thermal distribution. (a) A type #1, (b) B type #7.

달되지 않아 하우징의 온도가 24.5°C로 나타났다. 반면 그림 4(b)는 B type #7이고, 방열바 길이가 2배 길어진 $L=80$ mm로 열이 양방향으로 전도되어 LED 접합 온도가 A type #1보다 23.2°C 떨어진 107.4°C, 하우징으로 열 전달이 충분히 이루어져 하우징의 온도가 48.0°C로 나타났다.

3.3 주변 온도에 따른 열 특성

LED의 접합 온도는 주변 온도에 따라 변화하므로 외부 환경의 온도 변화를 고려하여야 한다 [11]. 따라서 모델 (#1~12)의 주변 온도를 (25~50)°C로 5°C씩 변화시켜 방열바의 재질에 따라 시뮬레이션 하였고, LED의 수명을 고려하여 최대 접합 온도는 125°C 이하로 설정하였다.

그림 5(a), (b)는 A type에서 인가전력 5 W, 방열바의 재질은 각각 알루미늄과 구리이다. 그림 5(a)는 주변 온도 50°C에서 모든 모델 (#1~6)이 LED 접합 온도 125°C를 넘어섰고, 그림 5(b)는 모델 (#4~6)이 주변 온도 50°C에서 각각 118.2°C, 116.2°C, 114.4°C로 접합 온도를 만족하였다.

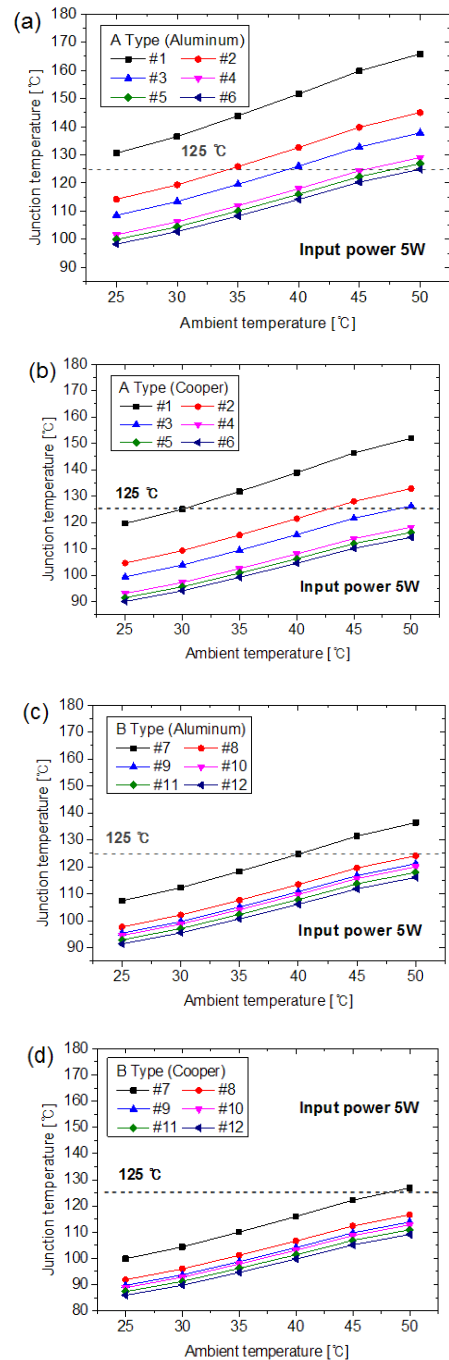


Fig. 5. The junction temperature for ambient temperature changes in different models. (a) A type, aluminum, (b) A type, cooper, (c) B type, aluminum, and (d) B type, cooper.

그림 5의 (c), (d)는 B type의 방열바의 재질을 각각 알루미늄과 구리로 적용하였고, 열해석 결과 모델 #7을 제외한 #8~12가 모두 LED 접합 온도 125°C 이하를 만족하였다.

3.4 모델 별 질량과 빛 가림 면적

LED 탐조등 모듈에서는 방열바의 면적이 넓어질수록 접합 온도는 감소하는 경향을 보인다. 하지만 면적이 넓을수록 반사되는 빛 가림 정도가 증가하고, 질량 또한 늘어나는 문제점이 생긴다.

따라서 표 3과 같이 방열바의 넓이 (W)와 길이 (H)를 곱하여 빛 가림 면적 (mm^2)을 구하고, 질량은 부피와 재질의 밀도를 이용하여 계산하였다.

Table 3. Mass & light shadowing area for different model.

A type						
Model	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5	# 6
Light shadowing area [mm^2]	160	160	160	320	320	320
Mass (Al) [g]	148	160	172	150	164	178
Mass (Cu) [g]	153	170	187	160	185	208
B type						
Model	# 7	# 8	# 9	#10	#11	#12
Light shadowing area [mm^2]	320	320	320	640	640	640
Mass (Al) [g]	150	164	177	154	171	189
Mass (Cu) [g]	160	184	208	175	213	251

질량은 모델과 재질에 따라 증가하는 경향을 보이며, 모델 #1에서 알루미늄일 때 148 g의 무게가 #12에서 구리일 때 251 g으로 103 g이 증가하였다. 질량은 재질에 따라 #12에서 최대 33% 증가하였고, 넓이에 따라 평균 1.97% 증가, 두께에 따라 평균 8.28% 증가하였다. 재질에 의한 질량 증가는 구리의 밀도가 알루미늄보다 더 높기 때문이고, 넓이보다 두께에서 더 많은 질량이 증가한 것은 두께 (t)가 증가할수록 하우징의 바깥 높이 (H_0)가 증가하기 때문이다. 이는 모듈 하나로는 적은 질량이지만, 여러 모듈을 적용할 경우 질량이 배수로 늘어나기 때문에 방열바의 두께를 무한히 증가시킬 수 없을 것이다.

방열바의 빛 가림 면적을 계산한 결과 A type이 ($160\sim320$) mm^2 , B type이 ($320\sim640$) mm^2 으로 모델 #4~6과 #7~9는 질량과 빛 가림 면적이 동일하게 나

왔다. 이는 동일한 모델로 볼 수 있으며, 열 특성이 더 좋은 #7~9 모델의 성능이 더 우수하다고 생각된다.

3.5 모듈 제작 및 LED 접합 온도 측정

열 해석 시뮬레이션 및 빛 가림 면적과 질량을 분석한 결과 B type의 #8이 가장 적합하다고 사료되어 그림 6과 같이 모듈을 제작하였다. LED의 접합 온도는 주변 온도를 ($25\sim50$) $^{\circ}\text{C}$ 로 변화시켜 T3ster로 측정하였다.



Fig. 6. Fabrication of searchlight module (model #8).

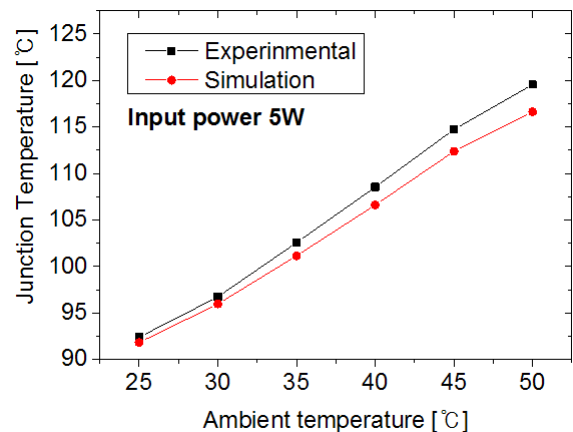


Fig. 7. Comparison of simulation & experimental results.

그림 7은 시뮬레이션과 측정결과를 비교한 그래프이다. 측정 결과 시뮬레이션과 동일하게 LED 접합 온도는 주변 온도와 함께 상승하였고, 주변 온도 50°C 일 때

시뮬레이션은 116.6°C, 측정값은 119.5°C로 최대 3°C 온도 차이를 보여 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션과 실험의 값의 차이는 방열바를 하우스징에 접합시킬 때 발생하는 접촉 열저항의 영향으로 주변 온도가 상승할수록 열전도의 차이가 발생해 측정값이 더 높게 나온 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 5 watt 고출력 LED로 구성된 탐조등의 형상, 재질 및 주변 온도에 따라 열 해석 시뮬레이션을 통한 방열 최적화 조건을 탐색하였다. 탐조등의 LED를 지지하는 구리 방열바의 길이 (L), 넓이 (W), 두께 (t)에 따라 방열 최적화 ($L=80$ mm, $W=4$ mm, $t=10$ mm) 조건에서 주변 온도 50°C일 때 LED 접합 온도 116.6°C, 빛 가림 면적 320 mm², 무게 184 g으로 최적화되었다. 시뮬레이션 결과는 동일 조건으로 제작된 탐조등의 결과와 편차 3°C 내외로 일치하며, 이는 열 해석 시뮬레이션의 타당성을 검증한다.

본 연구는 LED 탐조등 모듈의 온도 특성에 대한 실험 결과로, 향후 동일한 구조의 램프 방열 자료로도 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (과제번호: 10037416, 해양 LED 융합기술지원 기반구축 및 상용화 기술개발)으로 지원된 연구임.

REFERENCES

- [1] K. C. Yung, H. Liem, H. S. Choy, and W. K. Lun, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, 1266 (2010).
- [2] S. W. Kang, K. C. Chien, and W. C. Lin, *Journal of Applied Science and Engineering*, **15**, 97 (2012).
- [3] N. Narendran and Y. Gu, *IEEE/OSA Journal of Display Technology*, **1**, 167 (2005).
- [4] Daeyang, *Lighting for Marine Use*, **7**, www.daeyang.co.kr, 2013.
- [5] E. Shaukatullah, W. R. Storr, E. J. Hansen, and M. A. Gaynes, *IEEE*, 0-7803-3139-7/96 (1996).
- [6] L. Kim, J. H. Choi, S. H. Jang, and M. W. Shin, *Thermochimica Acta*, **455**, 21 (2007).
- [7] N. Wang, C. H. Wang, J. X. Lei, and D. S. Zhu, *IEEE (ICEPT-HDP)*, 2009.
- [8] T. Saenen and M. Baelmans, *International Journal of Thermal Sciences*, **59**, 214 (2012).
- [9] B. C. Kim, S. H. Lee, Y. S. Lee, and K. H. Kang, *Journal of Electrostatics*, **70**, 438 (2012).
- [10] S. I. Lee, S. M. Lee, and D. H. Park, *KIIEEE*, **24**, 57 (2010).
- [11] J. Wang, Y. X. Cai, X. J. Zhao, and C. Zhang, *Microelectronics Journal*, **45**, 249 (2014).