

잠수함용 LED 등기구의 제작과 평가

김선재¹, 김세진¹, 길경석^{1,a}, 안창환², 송동영³

¹ 한국해양대학교 전기전자공학과

² 인하공업전문대학 디지털전자과

³ 포항대학교 제철산업과

Fabrication and Evaluation of a LED Luminaire for Submarine

Sun-Jae Kim¹, Se-Jin Kim¹, Gyung-Suk Kil^{1,a}, Chang-Hwan An², and Dong-Young Song³

¹ Division of Electrical and Electronics Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

² Department of Digital Electronics, Inha Technical College, Incheon 402-752, Korea

³ Division of Steel Industry, Pohang College, Pohang 791-711, Korea

(Received September 3, 2013; Revised September 23, 2013; Accepted September 24, 2013)

Abstract: In order to develop a LED luminaire for naval-submarines which can replace a conventional one with two-compact fluorescent lamp (CFL) of 18 W, we analyzed the electrical and optical performance of the conventional luminaire. A LED luminaire was fabricated as compact as possible based on the analyzed data. The weight of the prototype LED luminaire is 1.8 kg, reducing up to 58% of the conventional one. The use of LED package for the submarine luminaire could reduce the power consumption from 38 W to 14.5 W with the same optical performance. The reason is that the optical efficacy of the LED luminaire improved by 2.47 times as 61.9 lm/W, compared to 25.1 lm/W for the conventional one.

Keywords: Naval-submarine, LED luminaire, Compact fluorescent lamp, Optical performance, Power consumption

1. 서 론

백열전구는 빛보다 열이 80% 이상 방출되기 때문에 효율이 낮은 광원이다. 2011년부터 호주에서는 백열전구의 판매와 생산이 중지되었으며, 영국을 비롯한 유럽 연합(EU) 회원국 또한 2012년 9월 1일부터 백열전구의 판매가 전면 금지되었다. 그 외, 중국을 비롯한 일본, 미국, 캐나다에서는 향후 2~3년 내 진행될 것이

며, 한국은 2014년부터 백열전구의 생산 및 판매가 전면 금지될 예정이다 [1,2].

기존 광원을 대체하기 위하여 조명산업 분야에서는 차세대 광원으로 LED (light emitting diode) 적용기술을 연구·개발 중에 있다. 세계적인 기술 동향에 맞추어 국내에서도 2008년부터 '저탄소 녹색성장 (green growth)'을 국가 비전으로 제시하여 친환경 녹색 성장, 에너지 절약 및 CO₂ 절감에 대한 적극적인 투자와 연구가 진행되고 있다. 이와 관련하여 국가 전력 수요의 26%를 차지하는 조명산업 분야에서 'LED 조명 보급 프로젝트', '스마트 LED 조명 시스템 개발' 등 LED 조명 관련 정책이 활발히 진행되고 있다. 산업연구원에 따르면 현재 사용되고 있는 국내 육상조명의 30%

a. Corresponding author; kilgs@kmou.ac.kr

를 90 lm/W 이상의 LED 조명으로 교체할 경우, 연간 1조 5,400억 이상의 전기요금이 절감된다고 한다 [3-5].

LED 조명기술은 육상뿐만 아니라 조선해양 분야에도 적용되고 있다. 국제 해사 기구 (international maritime organization, IMO)의 선박환경 규제 협약에 따라 친환경 고효율 선박 (green ship)에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 예로 기존 등기구의 효율을 개선하기 위하여 실내·외 광원을 LED로 대체하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 상선이나 민수선뿐만 아니라 함정에 대해서도 이루어지고 있다. 2011년 7월 방위산업청은 향후 건조되는 모든 해군 함정에 LED 조명을 적용하기로 하였으며, 현재 전력화된 함정들에 대해서도 단계적으로 기존의 백열전구와 형광등을 모두 LED 조명으로 교체하는 방안을 추진 중이라고 밝혔다 [6,7]. 특히, 공간이 협소한 잠수함에 설치되어 있는 기존 등기구는 부피가 크고, 무겁다. 또한 광원으로 사용 중인 백열등과 CFL (compact fluorescent lamp)은 LED와 비교했을 때 수명이 짧기 때문에 주기적인 교체가 필요하며, E26 또는 G13 베이스는 선박 운항 시 발생하는 진동에 취약한 단점이 있다 [8].

따라서 본 논문에서는 기존 등기구의 전기·광학적 특성을 분석한 후, 낮은 소비전력과 높은 광효율을 갖는 잠수함용 LED 등기구를 제작하였으며, 조도 시뮬레이션 분석을 통해 시제품의 평균조도를 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 측정

잠수함용 LED 등기구를 설계하기 위하여 기존 잠수함용 등기구의 광학적 성능을 분석하였다. 36 W 기존 등기구를 배광측정기 (goniophotometer)에 설치하였으며, 간격 θ 는 1° , ϕ 는 30° 로 각각 설정하였다. 측정은 에이징 (aging)을 포함하여 2시간 동안 진행하였으며, 배광측정시스템의 구성은 그림 1과 같다.

측정 대상과 광 검출기 간의 간격은 16.5 m이며, 중간에는 배플 (baffle)을 설치하여 빛의 간섭을 방지하였다. 배광측정 시스템은 광 검출기를 사용하여 조도를 측정된 뒤 광도로 변환하여 거리 및 각도별 가중치를 연산하게 된다. 이 때 정밀한 광도를 측정하기 위하여 광원 및 등기구를 점광원으로 근사하여 조도의

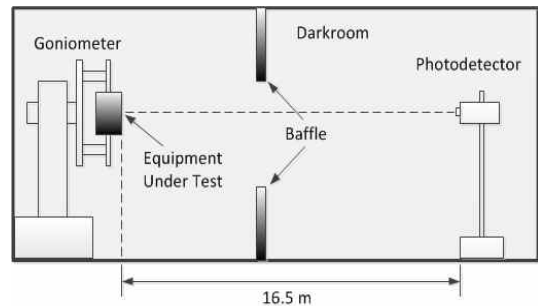


Fig. 1. Optical performance measurement system.

역사승 범칙이 적용될 수 있도록 충분한 거리가 유지되어야 한다 [9].

2.2 기존 등기구의 특성 분석

잠수함에 설치되는 광원은 백열등 및 CFL이 많이 사용되고 있다. CFL을 사용하는 등기구는 설치 장소에 따라 주등과 보조등으로 분류되며, 주등의 구조와 외형은 그림 2와 같다.

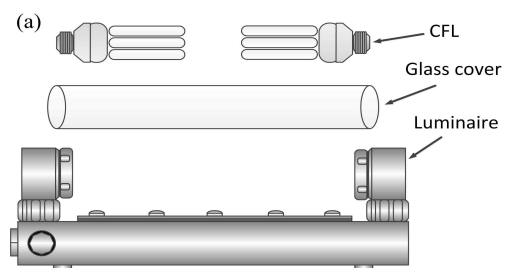


Fig. 2. A conventional CFL luminaire (a) combined structure, (b) photograph.

주등은 13 W 또는 18 W를 개별적으로 2개씩 사용하며, 승무원이 많이 머무는 장소에 설치된다. 보조등은

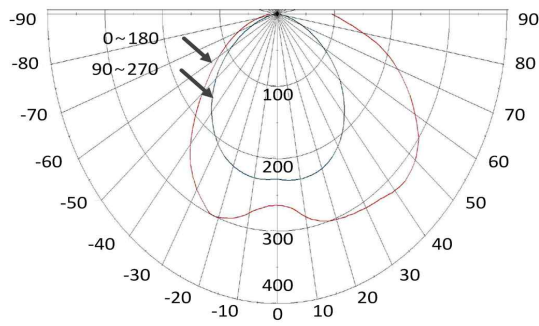


Fig. 3. Luminous distribution curve of the conventional CFL luminaire.

Table 1. Specification of the conventional CFL luminaire.

Power consumption [W]	38
Luminous flux [lm]	953
Luminous efficiency [lm/W]	25.1

설치 장소에 따라 13 W 1개를 사용한다. CFL은 E26 베이스의 리셉터클 (receptacle)에 설치되기 때문에 잠수함 운항 시 발생하는 진동에 의해 조임이 약해져서 접촉 불량과 원인이 될 수 있으며, 외부가 유리 커버로 보호되기 때문에 충격에 의해 쉽게 파손된다. 또한 광원으로 사용되는 CFL은 방전등이기 때문에 최고 밝기에 도달할 때까지 시간이 걸리며, LED에 비해 수명이 짧기 때문에 자주 교체를 해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 CFL (18 W) 2개가 사용되는 주등으로 실험을 수행하였다. 소비전력은 안정기 손실까지 포함하여 약 38 W로 측정되었다. 배광 분포는 그림 3과 같으며 중심 광도는 약 265 cd, 지향각은 80°이다. 0°~180°에서 측정된 중심 광도가 90°~270°에서 측정된 것 보다 약 30 cd 낮게 분석되었다. 이는 기존 등기구의 광원 (CFL)이 설치되어 있는 수평 구조에서 발생하는 5~7 cm 정도의 간격과 2개의 CFL 광원의 제작 과정 및 사용 시간에 따라 각각의 광량 및 배광에 차이가 있기 때문에 그림 3과 같이 좌·우 비대칭 현상이 나타나는 것으로 판단된다.

2.3 기구부 제작

측정 결과로부터 기존 잠수함용 등기구의 단점을 개선하기 위하여 LED 등기구를 제작하였으며, 구조는

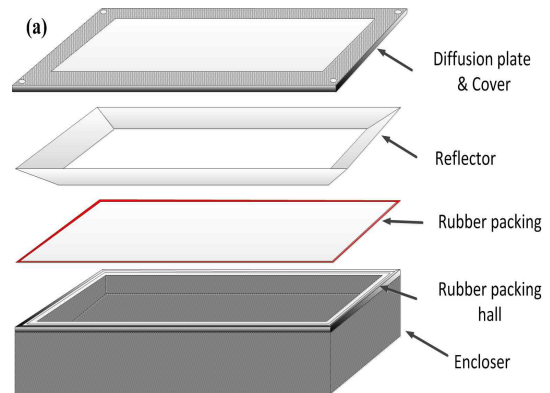


Fig. 4. A prototype LED luminaire (a) combined structure, (b) photograph.

그림 4에 나타난 것과 같다. 잠수함 내부에 설치되는 환경을 고려하여 기존 등기구의 브라켓 위치와 동일하게 설계함으로써, 별도의 고정장치 없이 설치자가 현장에서 직접 교체할 수 있도록 하였다. 철판 제작된 기존 등기구를 알루미늄 다이캐스팅으로 대체하여 무게가 58% 감소되었다. 이로 인해 작업자가 LED 등기구를 천장 또는 벽에 설치하는 것이 용이할 것으로 판단된다. LED의 빛을 효율적으로 분산시키기 위해 반사판을 설치하였으며, 승조원들의 눈부심을 줄이기 위해 투과율 60%의 확산판을 사용하였다. 또한 기존 등기구의 유리 커버를 플라스틱 확산판으로 대체하였기 때문에 외부 충격으로부터 강한 내구성을 가질 것으로 예상된다. IP56의 방수·방진 구조를 위해 외함 상단부에 고무 패킹이 고정될 수 있는 홈을 파고, 그 위에 고무 패킹을 설치하였다. 커버를 고무 패킹 위에 덮고 볼트로 단단히 고정시킴으로써 방수·방진의 구조를 완성하였다.

2.4 구동회로

LED 모듈의 구동회로를 정전류 방식으로 설계하였다.

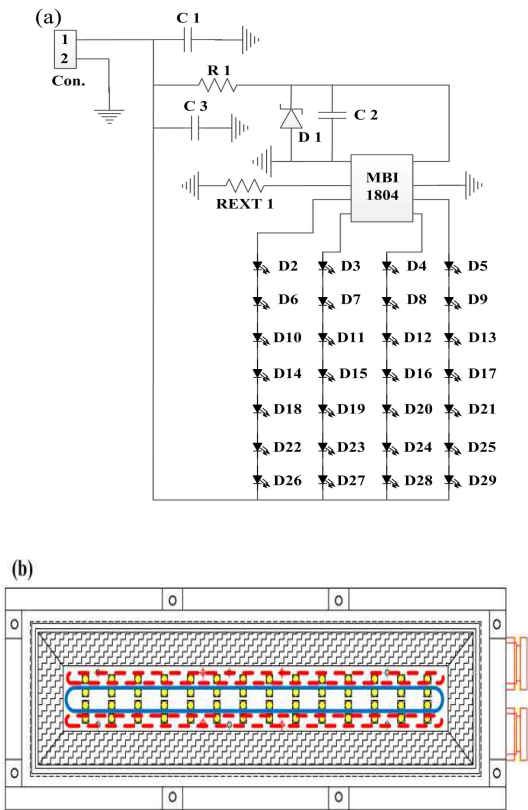


Fig. 5. LED light source (a) configuration, (b) LED array.

이것은 입력전압이나 주변온도와 무관하게 일정한 전류가 인가되기 때문에 LED 소자의 수명과 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 또한 순방향 전압 (forward voltage)은 접합 온도의 상승에 따라 점차 감소하므로 LED 소자의 안정적인 동작을 위해서는 정전류로 구동하는 것이 효율적이다. 따라서 각각의 LED 소자에 동일한 전류를 인가한 후, 균일한 광 특성을 나타내기 위하여 그림 5(a)와 같이 총 7개의 LED 소자를 직렬로 구성하였다. 구동 IC는 MBI 1804를 사용하였으며, 4개의 채널에서 60 mA (Max. 240 mA)의 출력전류가 LED 소자로 인가된다. 광원부의 배열은 그림 5(b)와 같이 LED 소자 7개를 직렬로 연결하여 하나의 모듈로 구성한 후, 4개 모듈을 MBI 1804에 설치하였다. 상기와 같은 구조로 동일하게 설계하여 총 56개의 LED 소자로 광원부를 제작하였다. 잠수함에서는 DC 220 V가 사용되기 때문에, 그림 6과 같이 전압원은 DC-DC 컨버터를 적용하여 LED 전원부를 구성하였다. 또한 전원의 투입 및 차단 시 발생되거나, 다른 시스템에서 유입될 수 있는 과도 전압으로부터 광원부를 보호하기

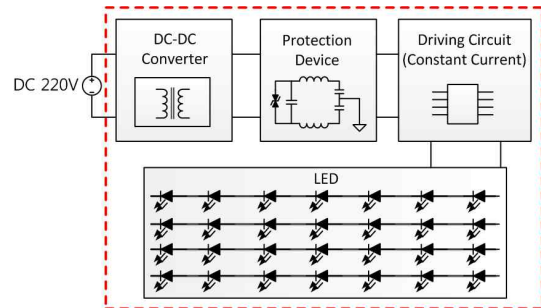


Fig. 6. Configuration of the prototype LED luminaire.

위하여 TVSS (transient voltage surge suppressor) 및 EMI 필터를 설치하였다.

3. 결과 및 고찰

상기 제작된 잠수함용 LED 등기구를 “한국산업표준 (KS) LED 조명규격의 국방규격 대체 방안 및 합정용 LED 조명 국방규격(안)”을 기준으로 하였다 [10].

본 규격(안)에서 제시된 LED 등기구는 소비전력에 따라 정격 전력이 10 W 이하에 해당되는 것과 10 W 초과 20 W 이하에 해당되는 등기부로 분류된다. 본 논문에서 제작한 등기구는 후자에 해당되기 때문에 표 2의 기준으로 전기·광학적 특성을 평가하였다.

Table 2. Optical requirements for the luminaires.

Power consumption [W]	≤ 20
Luminous flux [lm]	≥ 620
CCT [K]	3,200 ± 200
CRI	≥ 70

3.1 전기·광학적 특성

LED 소자는 60 mA의 정전류로 구동시켜야 하므로 그림 5(a)의 출력저항 REXT 1을 계산하여 구동에 필요한 전류를 조절하였다. 출력저항을 2.3 kΩ, 4.7 kΩ, 9.4 kΩ으로 선정하여 인가전압의 변동에 따른 출력 전류를 측정하였다. 설계된 구동회로의 출력 특성은 그림 7과 같다. 출력저항이 증가함에 따라 전류값이 작아지면서, 낮은 인가전압에서 정전류 형태로 변화되었다. 2.3 kΩ에서는 24 V부터 약 130 mA의

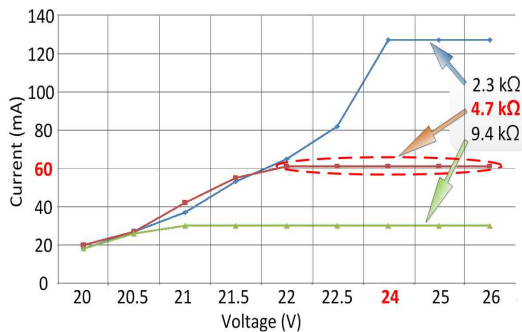


Fig. 7. Output characteristics of the driving circuit.

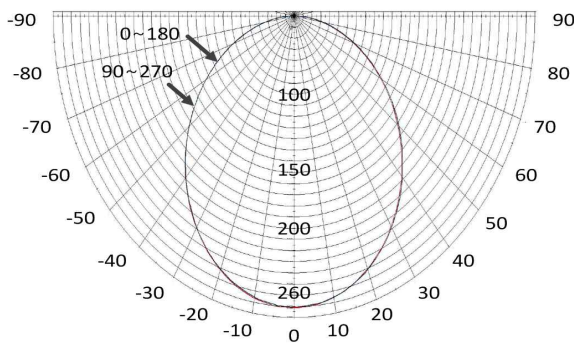


Fig. 8. Luminous distribution curve of the prototype LED luminaire.

전류가 일정하게 유지되었지만, 출력저항 값의 4배인 9.4 kΩ에서는 3 V 작은 21 V부터 30 mA로 지속되었다.

본 논문에서는 4.7 kΩ을 사용하여 60 mA의 전류를 인가하였으며, 정격전압 24 V를 기준으로 전압 변동을 고려하더라도 최소 22 V 이상부터는 일정하게 전류가 공급되기 때문에 LED 등기구의 안정적인 구동이 가능하다.

그림 8에 시제작 잠수함용 LED 등기구의 배광 곡선을 나타내었다. 그림 3과 비교하였을 때, 기존 등기구는 양 옆에 광원부가 설치되고 중앙이 약 5~7 cm 정도 이격되기 때문에 각 도별 중심 광도가 다르고, 좌·우가 비대칭 형태가 나타났지만, LED 등기구는 직사각형 형태의 PCB에 LED 소자를 등간격으로 배열했기 때문에 그림 8과 같이 좌·우 대칭이 균일한 “램버시안 (Lambertian)” 형태의 배광 곡선이 측정되었다. 시제작 LED 등기구의 광학적 특성을 표 3에 나타내었다. 실험 결과, 광효율은 기존 등기구 보다 약 2.5배 향상되었으며, 표 2에 제시한 국방 규격(안)을 만족하였다.

Table 3. Comparison of optical characteristics between the conventional CFL and the prototype LED luminaire.

	CFL	LED
Luminous efficacy [lm/W]	25.1	61.9
CCT [K]	3,400	3,200
CRI	71	89

3.2 온도 분포

LED 소자는 정해진 제한 온도를 초과하면 수명 단축 및 성능 저하의 문제가 발생된다. 이것을 해결하기 위하여 여러 가지 형태의 방열기구가 설계된다. 본 논문에서 사용된 LED 소자의 온도 특성은 60 mA의 전류에서 약 78°C이다. LED 소자 56개가 부착된 PCB(FR-4)를 등기구 내부에 설계된 방열판에 설치하고, 상기와 같은 조건으로 시뮬레이션 (ANSYS ICEPAK 14.5)을 수행하였다. 그 결과 그림 9(a)와 같이 접합 온도는 약 75°C이지만, PCB 주변 온도는 49°C로 분석되었다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 열화상 카메라 (i50/FLIR)를 사용하여 LED 등기구의 구동 시 발생하는 온도를 측정하였다. 실내 온도 25°C에서 점등 30분 후, 온도 분포를 측정한 결과 그림 9(b)와 같이 47.4°C로 시뮬레이션 결과와 유사하게 측정되었다.

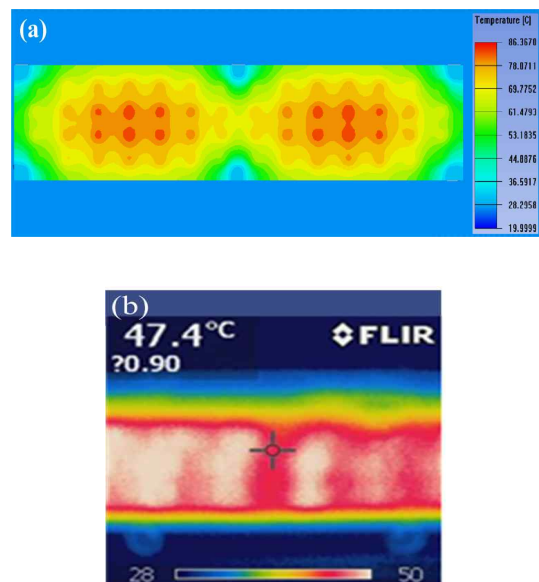


Fig. 9. Thermal distribution (a) simulation, (b) thermo-graphic image.

3.3 조도 분포

잠수함 내부에 LED 등기구 설치 시 나타나는 평균 조도를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 잠수함의 내부는 원 기둥을 눕혀 놓은 형태로서, 양 옆으로 각종 설비들이 배치되어 있다. 가로 5 m, 세로 2.3 m, 높이 2.2 m의 한 지역에 배전반, 배관 및 각종 설비들이 설치되어 있다. 천장은 반구형의 돛 형태로 하고, 설비들을 제외한 이동 통로의 폭은 약 0.8 m로 설정하였다. 이 지역에 각각 2개 씩 등기구를 배치하여 기존 등기구와 LED에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 10은 LED 등기구의 conical illuminance를 나타내는 것으로, 배광 측정을 통하여 분석한 것이다. 바닥면에서 천장까지의 높이 2.3 m에서 작업 면의 높이 0.85 m를 빼면, 피조면까지의 거리는 1.45 m이다. Simulation point에서 중심 조도는 114 lx이고, 측면 조도는 46 lx이다.

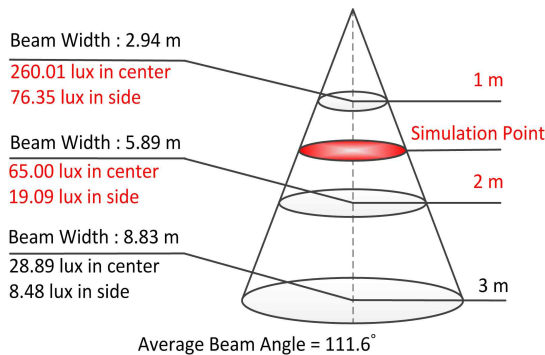


Fig. 10. Conical illuminance of the prototype LED luminaire.

Table 4. Results of simulation.

	CFL	LED
Avg. illuminance [lx]	71.8	80
Min. illuminance [lx]	38.7	40
Max. illuminance [lx]	95.9	114

시뮬레이션의 결과를 표 4에 나타내었으며, LED 등기구의 조도를 기존 등기구와 비교하면 평균 조도가 8 lx, 최대 조도가 20 lx 높게 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 CFL을 사용하고 있는 잠수함의 기존 등기구를 대체하기 위한 LED 등기구의 제작 및 평가에 대하여 기술하였다. LED의 직진성으로 잠수함의 협소한 공간에서 불쾌지수가 증가될 수 있기 때문에 투과율 60%의 확산판을 적용하여 최적의 전기·광학적 특성을 확보하였으며, 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. LED 등기구의 재질을 기존의 철에서 알루미늄 다이캐스팅으로 대체하여, 무게를 4.3 kg에서 1.8 kg으로 약 58% 감소시켰다.

2. 기존 등기구와 비교해 LED 등기구의 평균 조도가 약 10% 향상된 조건에서 소비전력은 62% 정도 감소하였다.

3. LED 등기구의 광효율은 기존 등기구 보다 약 37 lm/W 높게 측정되었다. 색 온도 및 연색 지수가 각각 3,200 K, 89로써 “LED 조명 국방규격(안)”의 광학적 특성을 만족하였다.

4. 본 논문에서 설계한 구동부에 60 mA의 전류를 인가하면 LED 소자의 접합 온도에 대한 측정 데이터가 약 78°C이고, 설계된 방열판에서 방열 시뮬레이션을 수행하면 약 75°C로 평가된다. 광원부의 PCB 주변 온도는 시뮬레이션 결과 49°C이고, 열화상 카메라로 측정된 온도는 47.4°C로써 그 차이가 1.6°C로 거의 동일하다. 따라서 LED의 접합 온도가 안정화되어 있어 열에 의한 광출력 저하가 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구 결과로 수행되었음(NIPA-2013-H0301-13-2009).

REFERENCES

[1] B. H. Song, I. W. Oh, and S. R. Lee, *J. IEEK*, **48**, 102 (2011).
 [2] L. Gu, X. Ruan, M. Xu and K. Yao, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **24**, 1399 (2009).
 [3] S. H. Choi, S. M. Song, and D. N. Kim, *J. AIK*, **27**, 65 (2011).
 [4] S. H. Cho, M. W. Lee, H. S. Choi, and H. Kim, *J. IEIE*, **26**, 8 (2012).

- [5] P. Mottier, *LEDs for Lighting Applications* (ISTE Ltd., and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and the United States, 2009) p. 3-11.
- [6] D. G. Kim and M. E. *Thesis*, p. 1-3, Korea Maritime University, Busan (2013).
- [7] I. K. Kim, Ph. D. *Dissertation*, p. 1-5, Korea Maritime University, Busan (2012).
- [8] J. K. Song, J. S. Park, and B. W. Yoon, *J. KIECS*, **7**, 485 (2012).
- [9] I. K. Kim, D. G. Kim, G. S. Kil, H. G. Cho, and K. L. Cho, *J. KIEEME*, **25**, 743 (2012).
- [10] United States Department of Defense, MIL-DTL-16377/53C - Fixtures, Incandescent and Light Emitting Diode (LED), Detail Lighting, Lantern, Hand, Portable and Bulk-head Mounted Watertight Symbols 100.2, 100.2L, 100.3, 100.3L, 101.2, 101.2L, 101.3, 101.3L, 102.2, 102.2L, 108 and 108L, 2005.