

극저온에서 LED 응용에 관한 연구

하희주¹, 김진욱¹, 김선재¹, 길경석^{1,a}

¹ 한국해양대학교 전기전자공학부

A Study on the Application of LED at Ultra-low Temperature

Hee-Ju Ha¹, Jin-Wook Kim¹, Sun-Jae Kim¹, and Gyung-Suk Kil^{1,a}

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

(Received August 4, 2014; Revised August 11, 2014; Accepted August 13, 2014)

Abstract: The interest in development on luminaires which are available up to -52°C is surging as demands in vessels navigating a north pole route increase. A conventional incandescent lamp used in vessels is operated stably at -52°C , but many countries including Korea have eliminated the use of incandescent lamps gradually because of its low luminous efficacy. In this paper, therefore, to develop the LED luminaires with high-efficiency, long lifetime that enables to substitute for incandescent lamp, it has studied about cryogenic characteristics of LED packages, bulbs, driving circuit and power supply. This experiments were carried out according to standards IEC 60945-8.4.1. Temperature range is from -60°C to 25°C , and the light output depending on ambient temperature. It showed that, based on 25°C , light output of a CFL decreased by 80% of CFL at -20°C while each increased 12% of LED bulbs and 16~19% of LED packages at -60°C .

Keywords: Light emitting diode (LED), Ultra-low temperature, Light output, Ice class

1. 서 론

지구의 온난화로 인한 북극해 해빙의 가속화와 선박 건조 기술의 발달로 북극항로가 개척되고 있다. 한국에서 이집트의 수에즈 운하를 거쳐 로테르담에 가는 기존 항로에 대하여, 북극항로를 통해 운항할 경우 거리가 37% 감소하고 운항 일수도 10일 단축된다 [1]. 이러한 장점은 경제적 이익과 직결되기 때문에 현재 북극항로를 통해 운항하는 선박의 수가 증가하

고 있다 [2].

-35°C 이하의 북극항로를 운항하는 선박의 주요 광원은 백열등을 사용하며, 이는 형광등과 같은 방전등은 광효율의 저하는 물론 점등이 불가능하기 때문이다. 그러나 백열등은 광효율이 10 lm/W 정도로 낮고 수명도 1,000시간 이하로 짧아, 세계적으로 에너지 절약 정책을 시행하면서 백열등의 생산과 수입을 단계적으로 전면 금지하고 있어, 선박에서 백열등 적용이 어려워지므로 이에 대한 대책이 필요하다 [3].

LED는 기존 조명의 친환경 고효율 광원으로 수명이 35,000시간 이상이고, 진동 및 충격에 강한 내구성을 가지고 있어, 육상뿐만 아니라 해양산업 분야에 빠르게 적용되고 있다 [4,5].

본 논문에서는 북극항로를 운항하는 선박용 광원으

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

로 LED를 적용하기 위하여 ICE CLASS 관련 규격에 따라 LED package, 벌브, 구동회로 및 전원장치를 대상으로 극저온에서 전기·광학적 특성을 분석하여 가능성을 확인하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 ICE CLASS

ICE CLASS란 그림 1과 같이 북극해, 발트해, 캐나다 주변, 남극 지역과 같은 빙해역의 바다를 항해하는 선박들의 규격과 특징을 각 항로에 따라 나타낸 것이다. 주로 유빙과의 충돌 및 쇄빙을 위한 선체강도와 출력 등을 규정하고 있으며, 이 규정을 만족시키지 못한다면 빙해역을 운항할 수 없다 [6].



Fig. 1. Sailing routes of the north pole.

쇄빙선과 내빙상선은 ICE CLASS의 적용을 받는 선박이다. 쇄빙선은 'Icebreaker' 선급부호가 부기된 선박으로서, 빙해역에서 안정적인 운항이 가능하도록 동력 및 치수가 정해진다. 쇄빙선은 얼음으로 덮인 빙해역을 독자적으로 항해할 수 있는 능력을 보유한 선박이며, 해로를 개척하기 위하여 결빙지역의 얼음을 3m까지 뚫을 수 있다. ICE CLASS 관련 전기 설비와 관련된 내용은 다음과 같다.

첫째, 'Cold Endurance'이다. 이 시험은 러시아 선급 규격 10.5.4.2에 규정되어 있다. 저온 환경에서 동작하는 장비의 성능을 시험하며, 장비의 동작 상태와 파손 및 부식에 견디는 정도를 검증한다. 시험 챔버의 온도는 설계된 주위 온도보다 10℃ 낮거나 -40℃

로 설정한다. 평형 온도에 도달한 상태에서 6시간 동안 시험을 수행하며, 전원을 공급한 후 동작을 점검한다 [7].

둘째, 'Storage Test'이다. 이 시험은 IEC 60945-8.4.1에 규정되어 있고, 전원을 인가하지 않은 상태의 저온에서 제품이 온도 스트레스의 영향을 얼마나 받는지 알아보기 위한 것이다. 시험 챔버의 온도는 $-30\text{℃}\pm 30\text{℃}$ 를 유지하며, 시험 시간은 10시간~16시간이다 [8]. 본 논문에서는 시험의 목적과 시간을 고려하여 'Storage Test'에 따라 실험을 수행하였다.

2.2 LED package 및 방열 해석

실험에 사용된 광원은 500 mA, 3.2 V인 LED package로, 8개를 직렬로 연결하고 정전류 방식으로 구동하였다. 표 1은 실험에 사용된 LED package의 사양을 나타낸다.

Table 1. Specification of LED packages.

Section	CCT [K]	CRI	Luminous efficacy [lm/W]	V _f [V]
Cool-white	6,500	70	110	24.5
Warm-white	3,000	80	88	24.8

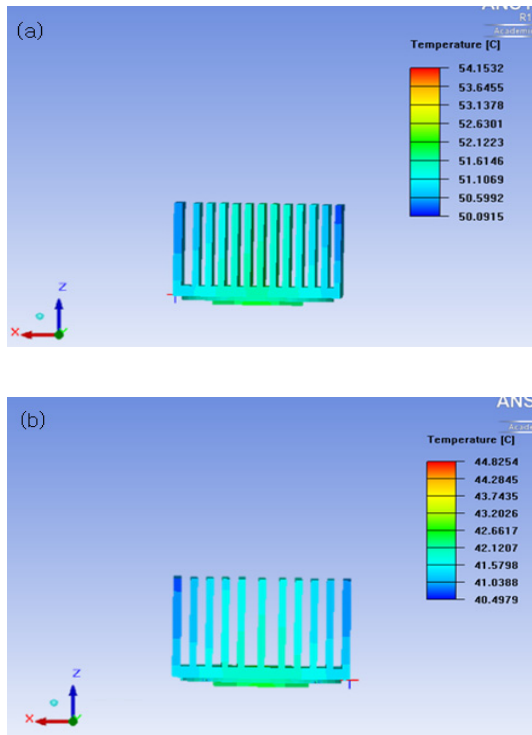
Table 2. Simulation condition.

Material	Thermal conductivity [W/m·k]	Dimension[mm] <L×W×T>
LED package	65	3.0 × 3.0 × 2.0
PCB	105	72.0 × 72.0 × 2.0
Al plate	100	73.0 × 73.0 × 2.0
Heatsink	100	85.0 × 75.0 × 5.0

LED는 소비전력 중 약 70~80% 이상이 열에너지로 전환되며, 광학적 특성은 온도에 크게 영향을 받기 때문에 열을 효과적으로 방열하는 기술이 매우 중요하다. 열해석 프로그램을 이용하여 본 LED package에 맞는 최적의 방열 구조를 설계하였다. 방열판은 무게가 가볍고 열전도성이 좋은 알루미늄 재질을 사용하여 표 2와 같은 크기 및 재질로 표 3의 조건으로 방열 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 3. Dimension of heatsinks.

Section	Height [mm]	Thickness [mm]	Gap [mm]	Number
Model 1	40	3	3	13
Model 2	40	3	4	11

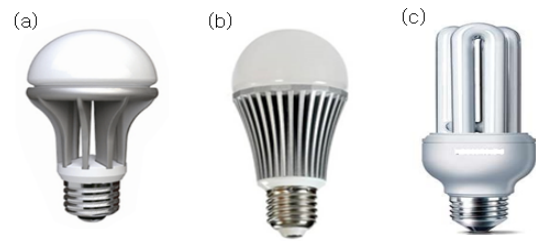
**Fig. 2.** Simulation. (a) Model 1 and (b) Model 2.

분석 조건은 외부 대기온도 25°C, 자유 대류계수 5 W/m²이다. 방열 성능은 표 3과 같이 방열핀의 두께를 일정하게 하고 핀 간격을 변화시켰으며, 그림 2는 시뮬레이션 결과이다 [9,10].

모델 1과 모델 2의 최고 온도는 접합부에서 각각 54°C, 44°C이고, 최저 온도는 방열핀 가장자리에서 50°C, 40°C로 모델 2가 모델 1보다 최고 온도가 10°C 낮았다. 시뮬레이션 결과를 통하여, 방열효과가 가장 좋은 모델 2의 방열판을 적용하여 LED package의 극저온 구동에 따른 실험을 수행하였다.

2.3 LED 벌브 및 CFL

실험에 사용된 벌브는 그림 3과 같으며, 표 4에 각각의 사양을 나타내었다. LED-A 벌브는 40 mA LED

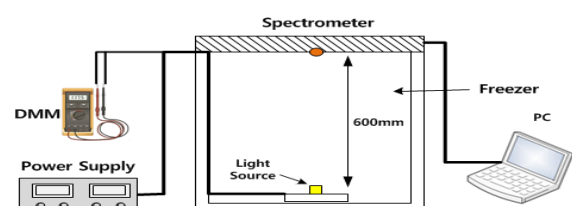
**Fig. 3.** Photographs of bulbs (a) LED-A, (b) LED-B, and (c) CFL.**Table 4.** Specification of bulbs.

Model	Rated power [W]	CCT [K]	CRI	Luminous flux [lm]
(a) LED-A	8	5,000	80	670
(b) LED-B	12	3,000	70	750
(c) CFL	15	4,000	80	800

package 21개가 직렬로 연결되었고, 연색성이 80 이상, 광효율은 83.7 lm/W이다. 소비전력은 8 W, 광속은 670 lm이며, 컨버터 없이 동작한다. LED-B 벌브는 60 mA LED package 17개가 직렬로 연결되고, 연색성이 70 이상, 광효율은 62.5 lm/W이다. 소비전력은 12 W, 광속은 750 lm이며 정전류 컨버터가 내장되어 있다. CFL은 연색성이 80, 광효율은 53 lm/W이고, 소비전력은 15 W, 광속은 800 lm이다.

2.4 실험계

실험은 그림 4와 같이 -60°C~25°C의 극저온 냉동고를 이용하여 수행하였다. 광원으로부터 600 mm 지점에 스펙트럼 분석기 (Avaspec - 3648)를 설치하여 주위 온도에 따른 광출력을 측정하였다. 본 실험은 ICE CLASS 관련 IEC 60945-8.4.1에 따라 각각의 주위 온도에서 12 시간 저장 후, 전원을 인가한 다음 20분 후 측정하였다.

**Fig. 4.** Experimental setup.

3. 결과 및 고찰

3.1 LED package

그림 5는 LED package의 주위 온도에 따른 광출력을 나타낸 것으로, 주위 온도가 낮아질수록 광출력이 증가한다. 25℃를 기준으로 -60℃에서 warm-white는 1.9배, cool-white는 1.7배 광출력이 증가하였다. 주위 온도가 낮아질수록 LED의 광출력이 증가하는 것은 저온에서 전자의 이동도가 증가하여 캐리어의 방사적 재결합율이 증가함에 따라 내부 양자효율이 증가하였기 때문으로 생각된다 [11].

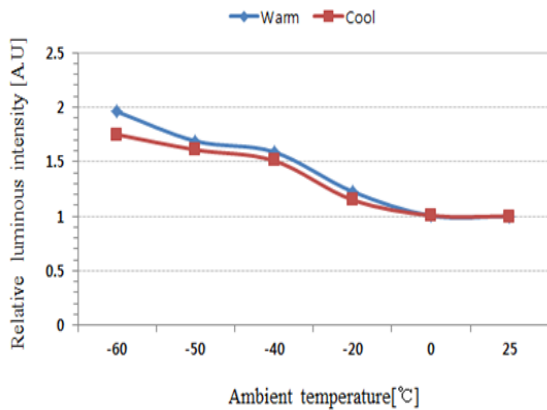


Fig. 5. Light output of LED packages.

LED의 온도 변화에 따른 전기적 특성을 알아보았다.

그림 6은 주위 온도와 LED의 순방향 전압의 관계를 나타낸 것이다. 전류는 500 mA로 일정하게 구동하였고, 25℃에서 -60℃로 주위 온도가 낮아짐에 따라 warm-white와 cool-white의 순방향 전압은 각각 1.73 V 및 2.11 V 증가하였다. LED의 순방향 전압은 반도체의 재료 특성과 제작 공정에 따라 달라지며 주위 온도 변화에 따라 warm-white와 cool-white의 순방향 전압과 전압 변화율이 각각 달라진다. 극저온에서 전원장치의 동작 특성을 분석하기 위하여 LED package에 구동회로를 연결하여 실험을 수행하였다.

그림 7은 LED package의 주위 온도에 따른 광출력을 나타낸 것이다. 25℃를 기준으로, -60℃에서 warm-white는 1.8배, cool-white는 1.6배 광출력이 증가하였다. 주위 온도와 순방향 전압의 관계는 그림

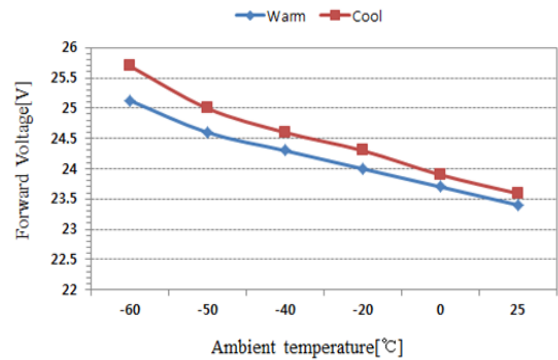


Fig. 6. Forward voltage of LED packages.

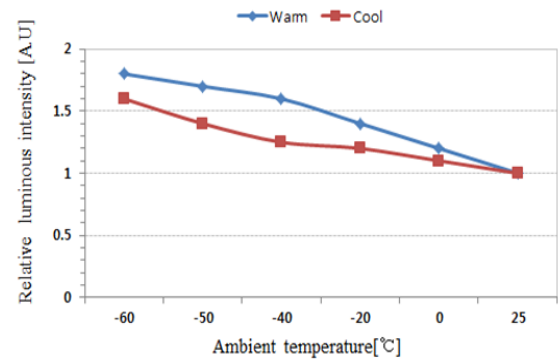


Fig. 7. Light output of LED packages with a driver.

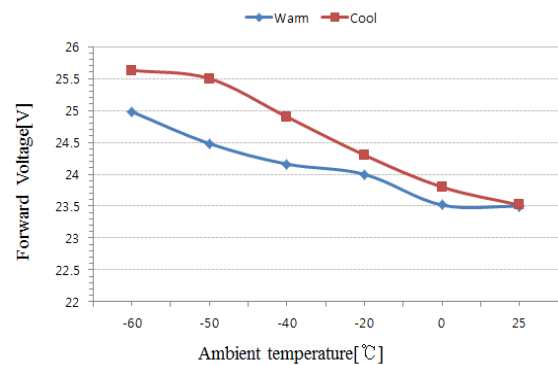


Fig. 8. Forward voltage of LED packages with a driver.

8과 같다. 전류는 500 mA로 일정하게 구동하였고, 25℃에서 -60℃로 주위 온도가 낮아짐에 따라 warm-white와 cool-white는 각각 1.49 V 및 2.11 V 증가하였다. 구동회로를 사용한 그림 7 및 그림 8은 LED package만을 연결한 그림 5 및 그림 6과 유사한 경향으로 캐리어의 집중과 분배가 변화하여 광출력이 증가하고, 주위

온도가 낮아질수록 확산 전압이 감소하여 순방향 전압이 상승한 것으로 판단된다.

3.2 LED 벌브와 CFL

그림 9는 LED 벌브와 CFL의 주위 온도에 따른 광출력을 나타낸 것이다. CFL은 25℃를 기준으로, -20℃에서는 전 광속이 80% 이상 감소하였으며, -25℃ 이하에서는 점등되지 않았다. 그 이유는 CFL의 경우 방전영역에서 동작하며, 저온에서는 수은 증기압이 감소하여 방전 에너지의 방사가 적어짐으로 형광체에 의한 빛의 방출이 줄어들기 때문에 주위 온도가 낮아질수록 오히려 광출력이 감소하는 것이다 [12].

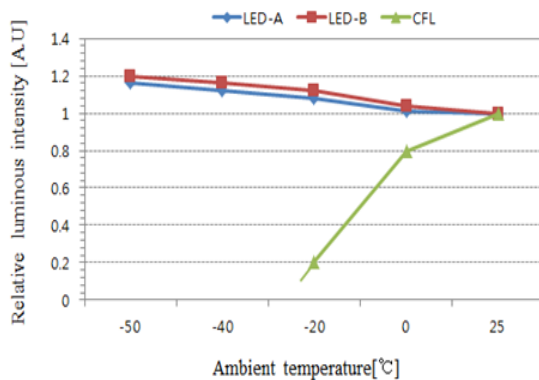


Fig. 9. Light output of bulbs.

반면, LED-A 벌브의 경우, 25℃를 기준으로 -60℃에서 1.17배, LED-B 벌브의 경우, 1.24배 광출력이 증가하였다. 그리고 컨버터 유무에 따라 비교해 볼 때 LED 벌브의 점등 및 동작에 문제가 없었다.

4. 결론

본 논문에서는 ICE CLASS 관련 IEC 60945-8.4.1에 따라 극저온에서 LED package, 전원장치 및 LED 벌브의 전기·광학적 특성을 분석하였다.

25℃를 기준으로 -60℃에서 warm-white와 cool-white LED package의 광출력은 1.9배 및 1.7배 증가하였고, 구동회로를 연결했을 때 warm-white와 cool-white의 광출력은 각각 1.8배 및 1.6배 증가하였다. 또한, 순방

향 전압은 1.73 V 및 2.11 V 각각 증가하였으며, 구동회로 사용 시 순방향 전압은 각각 1.49 V 및 2.11 V 증가하였다. CFL은 -20℃ 이하에서 광출력이 80% 이상 감소하였으며, 그 이하 온도에서는 점등되지 않았다. 그러나 LED 벌브는 25℃에서 광출력에 비해 -60℃에서는 1.1배~1.9배 증가하였다.

본 실험으로부터 LED는 극저온에서 광출력이 1.1~1.9배 향상되며, 점등에 문제가 없음을 알 수 있었다. 따라서 LED는 -50℃ 이하의 북극 항로를 운항하는 선박용 광원으로 충분히 적용 가능하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구 결과 (NIPA-2014-H0301-14-1016)와 미래창조과학부 및 한국연구재단 BK21 플러스 사업의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

- [1] C. D. Nam and J. M. Kim, *Asia Navigation Conference*, 1 (2010).
- [2] S. W. Hong, *International Area Studies Review*, **13**, 557 (2010).
- [3] D. G. Kim, I. G. Kim, S. Y. Yu, W. Kwon, and G. S. Kil, *Journal of the Korean Society for Railway*, 1530 (2011).
- [4] I. G. Kim, D. G. Kim, G. S. Kil, H. G. Cho, and K. L. Cho, *J. KIEEME*, **25**, 743 (2012).
- [5] S. J. Kim, D. G. Kim, I. K. Kim, G. S. Kil, and D. T. Song, *J. KIEEME*, **26**, 773 (2013).
- [6] *Ice Classed Ships Main Engines, Man Diesel & Turbo*
- [7] Russian Maritime Register of Shipping ; Rules for Technical Supervision During Construction of Ships and Manufacture of Materials and Products for Ships Volume 2, Electronic Version of Printed Document Approved on 27.06.13.
- [8] International Standard IEC 60945 ; Maritime Navigation and Radio Communication Equipment and Systems, *4th ed.*, 2002.
- [9] Y. Guo, K. L. Pan, G. T. Ren, S. J. Chen, and F. Yuan, *IEEE*, 1411 (2012).

- [10] L. Liu, G. Q. Zhang, D. Yang, K. Pan, H. Zhang, and F. Hou, *Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT-HDP), 2010 11th International Conference on, IEEE*, 1366 (2010).
- [11] G. Weling, J. Xuejiao, Y. Fei, C. Bifeng, G. Wei, L. Ying, and Y. Weiwei, *Journal of Semiconductors*, **32**, (2011).
- [12] Illuminating Engineering Society of North America, *IESNA Handbook, 9th ed.* (New York, 2000) p. 6.