



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

# 함정용 LED 탐조등 설계 및 제작

Design and Fabrication of an LED Searchlight for Naval Vessels



指導教授 吉 暻 碩

2016年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 泰 成

本 論文을 金泰成의 工學碩士 學位論文으로 認准함

委員長：工學博士 全 泰 寅 ㉠

委 員：工學博士 吉 暻 碩 ㉠

委 員：工學博士 金 一 權 ㉠



2015年 12月

韓國海洋大學校 大學院

電氣電子工學科

金 泰 成

# 목 차

목 차 .....	i
그림 및 표 목차 .....	iii
Abstract .....	v
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 관련 이론 .....	3
2.1 탐조등 .....	3
2.2 초점 거리 .....	5
2.3 광도 산출 .....	11
제 3 장 설계 및 제작 .....	17
3.1 반사판 제작 및 광학 설계 .....	18
3.2 방열 시스템 .....	24
제 4 장 평가 및 분석 .....	30
4.1 측정계 .....	30
4.2 전기·광학적 특성 .....	31

제 5 장 결 론 ..... 36

참 고 문 헌 ..... 37



## 그림 및 표 목차

### <그림 목차>

그림 2.1	할로겐램프 탐조등 .....	3
그림 2.2	파라볼릭 반사관의 원리 .....	5
그림 2.3	초점위치에 따른 반사 .....	7
그림 2.4	초점위치에 따른 광선추적 .....	8
그림 2.5	초점거리에 따른 반사 .....	9
그림 2.6	초점거리에 따른 광선추적 .....	10
그림 2.7	광도 .....	11
그림 2.8	입체각 .....	13
그림 2.9	조도 .....	15
그림 3.1	반사관 직경 및 깊이에 따른 광선추적 .....	21
그림 3.2	실험 광원 .....	21
그림 3.3	광원 .....	23
그림 3.4	최적화 반사관의 광선추적 .....	23
그림 3.5	방열판 .....	24
그림 3.6	LED의 온도-전류 곡선 .....	25
그림 3.7	LED의 온도-광출력 곡선 .....	26
그림 3.8	LED의 온도-수명 곡선 .....	27
그림 3.9	시제작 LED 탐조등 .....	29
그림 4.1	측정계 .....	30
그림 4.2	광원 비교 .....	32
그림 4.3	빔각 계산 .....	33
그림 4.4	빔각의 중요성 .....	34

그림 4.5 LED 탐조등 광선방향 ..... 35

<표 목차>

표 2.1 할로겐램프 탐조등의 성능 비교 ..... 4  
표 3.1 반사판 사양 ..... 17  
표 4.1 LED 탐조등의 전기적 사양 ..... 31  
표 4.2 조도 측정 ..... 33



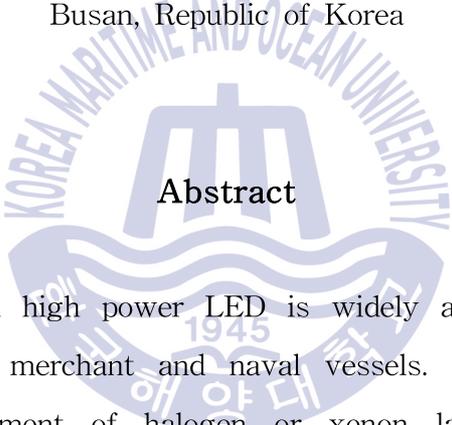
# Design and Fabrication of an LED Searchlight for Naval Vessels

*by Tae-seong Kim*

Department of Electrical & Electronics Engineering

The Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Busan, Republic of Korea



## Abstract

A commercialized high power LED is widely applied not only on land, but also on merchant and naval vessels. However, the light source for replacement of halogen or xenon lamp is still under development.

This thesis dealt with the design and fabrication of an LED searchlight for naval vessels to replace the searchlight equipped with a 1 kW halogen lamp. It has many advantages such as long lifetime, high luminous efficiency, instantaneous turn on and off, and high durability. In addition, it can withstand the vibration and impact caused by the rolling and pitching of vessels.

A simulation was carried out to investigate the influences of the

focal length, diameter, and depth of parabolic reflector on the light condensing. Based on the results, a reflector with a diameter of 315 mm and a depth of 25 mm, and a COB type LED were selected as the optimal combination. Further, to increase luminous efficiency and lifetime of LED, a water cooling system was used to keep the junction temperature below 25 °C. Finally, the LED searchlight can achieve a lifetime of 50,000 hours and a luminous efficiency over 100 lm/W.

Luminous intensity of the proposed searchlight was  $2.14 \times 10^6$  cd, which was improved 500% with only 26% of power consumption compared with the 1 kW halogen searchlight. Beam angle with a value of  $1.94^\circ$  also met the standard KDS-6230-1046.

In future, in case the light source gets more compact owing to the development of technology, the high performance LED searchlight with smaller size can be developed by reducing the diameter and depth of the parabolic reflector.

## 제 1 장 서 론

인류 문명의 시작과 함께 조명은 태양을 시초로 형광램프 및 할로겐램프 등이 상용화되었고, 2000년대 이후부터 LED(Light Emitting Diode)로 발전되어 왔다. 그동안 LED 조명의 대중화에 가장 큰 걸림돌이었던 가격이 낮아짐에 따라, 조명용으로 사용하기에 적합한 LED의 개발이 활발하게 이루어져 미래 조명기술로 부상되고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 세계 각국은 고유가 정책에 따라 에너지 자립도를 높이고 지구 온난화를 방지하기 위하여, 그린 IT기술을 기반으로 한 저탄소 녹색성장 산업에 많은 투자를 하고 있다. 이러한 저탄소 녹색성장의 핵심 사업 중 하나가 LED 산업이다<sup>[2][3]</sup>. LED 산업은 최근 산업용 및 가정용뿐만 아니라, 선박 환경에서의 적용을 위한 많은 시도가 되고 있다. 특히 항만, 조선 및 해양플랜트 등에서 저전력이고 보다 밝은 빛을 낼 수 있으며, 고효율성과 빠른 응답성, 수명 측면에서도 LED조명의 필요성이 증가하고 있다<sup>[4]</sup>. 또한 북미와 발트해 인근 유럽 국가는 국제해사기구(IMO ; International Maritime Organization)의 선박배출 온실가스 기준을 충족하지 못하는 선박에 대해 올해부터 연안 접안을 금지하는 등 배출가스 통제구역(ECA ; Emission Control Area) 출입 규제를 강화하고, 내년부터 건조되는 모든 선박에는 강화된 환경 규제가 적용됨에 따라 친환경 선박의 중요성이 증대되고 있다. 해양수산부는 유럽연합(EU)의 발표를 인용해 세계 친환경 선박기술의 잠재시장 규모가 오는 2030년까지 적게는 156조원, 많게는 174조원에 이를 것으로 전망하고 있어, 친환경 선박은 선택이 아닌 필수가 되었다. 선박용 LED 조명의 경우 특수한 환경에서 사용되기 때문에 육상용 조명과는 다른 요구사항을 가지며, 2005년부터 크루즈 및 요트에 LED조명을 적용하기 시작

하여 현재는 상선뿐만 아니라 함정에도 적용되고 있다. 특히 탐조등은 함정, 선박 및 해안 초소에서 물체 탐지·신호용으로 항상 동작 상태로 유지하는 것이 아니라 필요에 따라 불규칙적으로 사용된다. 따라서 긴급 상황 시 원활하게 동작하기 위해서 내구성이 높아야 하는데, 기존 탐조등 광원인 할로젠램프와 제논램프는 진동과 충격에 취약하며, 기구부의 크기가 크고 무거워 운반에도 많은 어려움이 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 문제점을 해결하기 위해 개발되어 있는 LED 탐조등의 경우에도 광원부에 많은 LED와 렌즈로 공정시간이 길며, 개별 광원이기 때문에 집광하기 어렵다는 단점이 있다. 하지만 최근 LED 광원이 소형화 및 대용량화되고 있어, 하나의 고출력 LED를 사용하여 제품의 경량화를 유도하고 광학부품의 크기 또한, 소형화 되고 있기 때문에 기존 탐조등에 비해 더 작고 효율 좋은 LED 탐조등의 개발이 가능하다<sup>[6]</sup>.

본 논문에서는 물체 탐지 및 신호전달용으로 많이 사용하고 있는 1kW 할로젠램프 탐조등을 대체하기 위하여, 하나의 COB형 LED와 파라볼릭 반사판으로 구성된, 함정용 LED 탐조등의 설계 및 제작에 관해 서술하겠다.

## 제 2 장 관련 이론

### 2.1 탐조등

투광기의 하나로 선박, 해양플랜트 및 군부대에서 많이 사용되고 있으며, 야간에 물체 탐지 및 그림 2.1과 같이 광원부 앞의 덮개를 조정하여 신호용으로도 사용되고 있다.



그림 2.1 할로겐램프 탐조등

Fig. 2.1 Searchlight with a halogen lamp

탐조등은 할로겐램프(Halogen lamp)나 제논램프(Xenon lamp)를 광원으로 사용하고 있다. 제논램프는 점광원에 가깝고 할로겐램프에 비해 광효율이 1W당 20~40lm으로 우수하지만 전극 사이의 방전을 이용한 방전등으로, 점등시 수 분 동안의 안정화 과정이 필요하기 때문에 긴급한 상황에서 순시점등이 어렵다는 단점이 있어 물체 탐지에 주로 사용한다. 할로겐램프는 백열램프의 한 종류로 제논램프에 비해 광효율은 낮지만 순시

점등이 가능하여 윙 브릿지(Wing bridge)에서 물체탐지와 신호전달용으로 사용되고 있다.

기존광원은 빛을 전 방향으로 방사하기 때문에 등기구 후면부에 반사판을 적용하여 먼 거리를 비출 수 있게 사용하고 있지만, 빔각이 제한적이고 발열량이 많으며, 필라멘트와 유리로 광원이 구성되어 있어, 선박의 롤링(Rolling) 과 피칭(Pitching)으로 인한 진동 및 충격에 취약하다<sup>[7]</sup>. 이를 해결하기 위해 LED 탐조등의 개발이 활발히 진행되고 있으나, 개발되어 있는 LED 탐조등도 광원부가 여러 개의 LED와 렌즈로 구성되어 있어 광원부의 크기가 크며 렌즈로 인해 빔각이 제한적이다. 기존의 탐조등의 단점을 보완할 수 있는 LED 탐조등을 개발하면 낮은 소비전력에 고집광이 가능하며, 향상된 광학적 성능 및 장수명을 기대할 수 있다<sup>[8]</sup>. 표 2.1에 할로겐램프 탐조등의 성능을 비교해 보았다.

표 2.1 할로겐램프 탐조등의 성능 비교

Table 2.1 Performance comparison of searchlights with halogen lamp

	용량[kW]	중심광도[cd]	1 lx가 되는 거리[m]
Halogen Lamp	1	$1.0 \times 10^6$	1,250
	2	$2.7 \times 10^6$	1,500
	3	$3.0 \times 10^6$	1,730

할로젠램프의 용량에 따라 요구하는 중심광도와 1lx가 되는 거리가 다른데 표 2.1을 참고하여 1kW 할로젠램프를 목표로 용량과 성능을 결정하고 설계하였다. 빔각은 KDS 6230-1047에 따라 2.0°이하를 만족해야하며 측정 방법은 최대조도의 10%인 두 지점과 탐조등과의 사이각으로 구할 수 있다.

## 2.2 초점 거리

파라볼릭 반사판은 초점거리에 따라 광선의 모양이 달라져 사용목적에 적합한 초점거리를 선정해야한다. 본 절에서는 파라볼릭 반사판의 초점 거리에 따른 광선의 모양에 대하여 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 파라볼릭 반사판(Parabolic reflector)은 지향성이 강한 포물면 형태로 전파신호용 안테나, 태양광 집광시설에서 전파신호나 빛을 파라볼릭 내부 금속판의 반사를 통해 한 점으로 모으는 역할을 한다<sup>[9],[10]</sup>. 본 논문에서는 이러한 특징을 반대로 이용하여 그림 2.2와 같이 한 점에서 나오는 빛을 파라볼릭 반사판을 통해서 평행하게 보낼 수 있다<sup>[11],[12]</sup>.

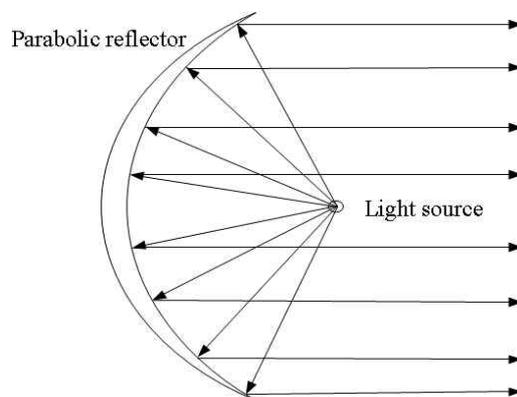


그림 2.2 파라볼릭 반사판의 원리

Fig. 2.2 Principle of a parabolic reflector

현재 개발된 LED 탐조등의 경우 개별광원에 렌즈를 부착하거나 프레넬 렌즈를 사용하여 빛을 집광하는 구조로 되어 있는 경우가 많다. 하지만 주로 사용하는 렌즈의 경우 줄일 수 있는 각도가 제한적이어서, 빔각 설정에 한계가 있다. 동일한 빔각에서라도 피조면과의 거리가 짧으면 조사 면적이 작지만 거리가 멀어질수록 조사 면적이 커지기 때문에 먼 거리를 비춰야하는 탐조등에는 적합한 빔각을 선정할 필요가 있다. 하지만 파라볼릭 반사판을 LED 탐조등에 적용하면 광원에서 나가는 빛을 먼 거리까지 평행하게 보낼 수 있어, 탐조등의 목적인 먼 거리를 밝히는 것에 적합한 등기구가 될 수 있다.

파라볼릭 반사판의 경우, 광원과 반사판 사이의 초점거리와 반사판의 반경 및 깊이에 따라서 빔각을 조절할 수 있으며 초점거리는 식 2.1을 통하여 계산할 수 있다.

$$y^2 = 4 \times f \times x \text{ [mm]} \quad (2.1)$$

반사판의 반경( $y$ )과 깊이( $x$ )가 정해져 있다면, 식 2.1에 대입하여 초점거리( $f$ )를 구해 중심 광도를 높일 수 있다<sup>[13]</sup>. 하지만 탐조등에 적용할 때에는 초점거리 보다는 먼저 반사판의 직경과 깊이를 고려하여 설계하고 초점거리에 따른 빔각을 확인하는 순서로 진행되어야 한다.

LED에서 나오는 빛이 보통 120°로 방사되기 때문에 그 빛이 전부 반사판 내부에 방사되어야 광원의 최대광속을 사용할 수 있다. 따라서 LED 광원의 크기, 빔각 및 반사판의 직경을 고려하여 LED의 빛이 반사판 내부로 100% 들어가는 최대 초점거리를 선정하여야 한다.

파라볼릭 반사판은 광원의 초점위치와 초점거리에 따라서 광선방향과 빔각이 달라진다. 초점위치는 KDS-6230-1046에 광원의 중심점과 파라볼

릭의 중심점이 동일한 선상에 있어야 한다는 것으로 백열램프의 필라멘트 중심이 반사경의 초점위치에 있도록 설계 되어야 한다고 명시되어 있어, 광원과 반사판의 중심을 맞춘 설계는 중요하다는 것을 알 수 있다<sup>[14]</sup>. LED 탐조등의 초점위치를 맞추는 것은 반사판의 중심과 일직선상에 광원을 위치한다는 의미도 있지만 LED가 점광원이 아닌 면광원이기 때문에 광원의 크기가 최대한 작아져서 점광원과 같아져야 효과적이다 라고 해석할 수도 있다.

그림 2.3과 같이 광원의 위치를 (a), (b), (c)로 구분하여 (b)를 중심으로 위·아래로 30 mm씩 이동하여 초점 위치에 따른 시뮬레이션을 실시하였다.

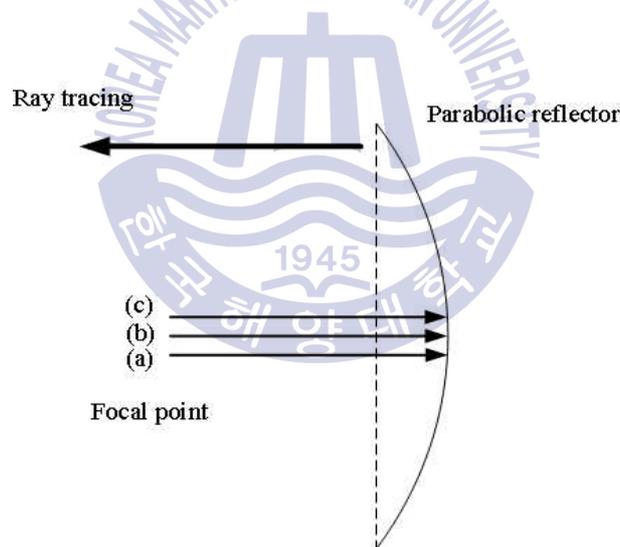
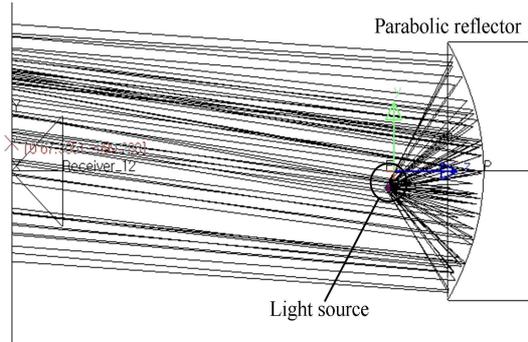


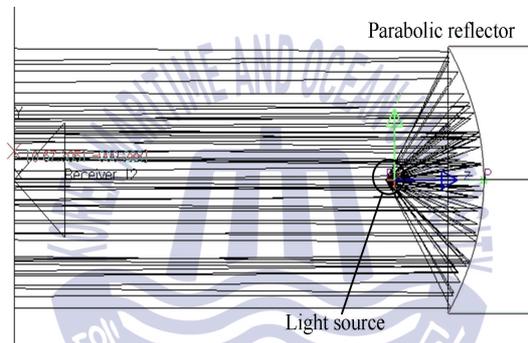
그림 2.3 초점위치에 따른 반사

Fig. 2.3 Reflection against the position of focal point

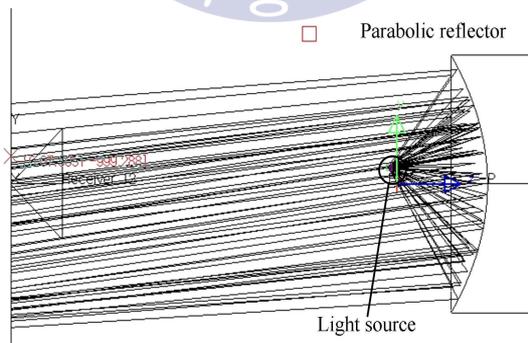
초점위치에 따른 시뮬레이션 결과 그림 2.4의 (b)와 같이 초점위치가 반사판의 중심점이 일직선상에 놓여있을 때 광선이 직진성 있게 나가는 것을 확인할 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

그림 2.4 초점위치에 따른 광선추적

Fig. 2.4 Ray tracing against the position of focal point

그림 2.4는 초점위치를 이동시켜 시뮬레이션 한 결과로 중심을 벗어나면 광선이 위와 아래로 나가기 때문에 탐조등의 기능을 제대로 수행할 수가 없다<sup>[15]~[17]</sup>. LED의 경우는 광원의 크기가 최대한 작아야 한다는 것을 알 수 있다.

광원의 초점위치와 함께 초점거리도 매우 중요하다. 광원의 빔각을 고려하여 초점거리를 선정하고, 광원에서 나오는 빛이 반사판 내부로 전부 조사되어야 광속의 100%를 사용할 수가 있다. 그렇기 때문에 광학 설계시 광원에 따른 반사판의 최대 초점거리를 선정한 후에 그 범위 내에서 최적의 초점거리를 찾아야 한다. 초점거리는 반사판의 직경 및 깊이와 광원의 직경에 따라 상이하게 나타나는데 반사판과 광원사이의 초점거리에 따른 광선의 모양을 확인하기 위해 그림 2.5와 같이 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션시 반사판의 크기는 1kW 할로겐 램프 탐조등을 대체하기 위하여 KS V 8469의 반사판의 직경과 초점거리를 기준으로 하였다.

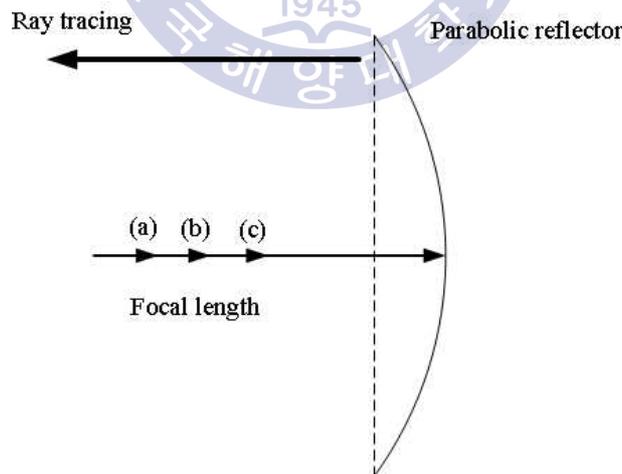


그림 2.5 초점 거리에 따른 반사  
Fig. 2.5 Reflection against the focal length

최적의 초점거리 150 mm인 (b)를 중심으로 광원의 위치를 반사판과 먼 쪽으로 30 mm 이동시킨 (a), 가까운 쪽으로 30 mm 이동시킨 (c)로 3가지 위치에 따른 파라볼릭 반사판의 집광정도는 그림 2.6과 같다.

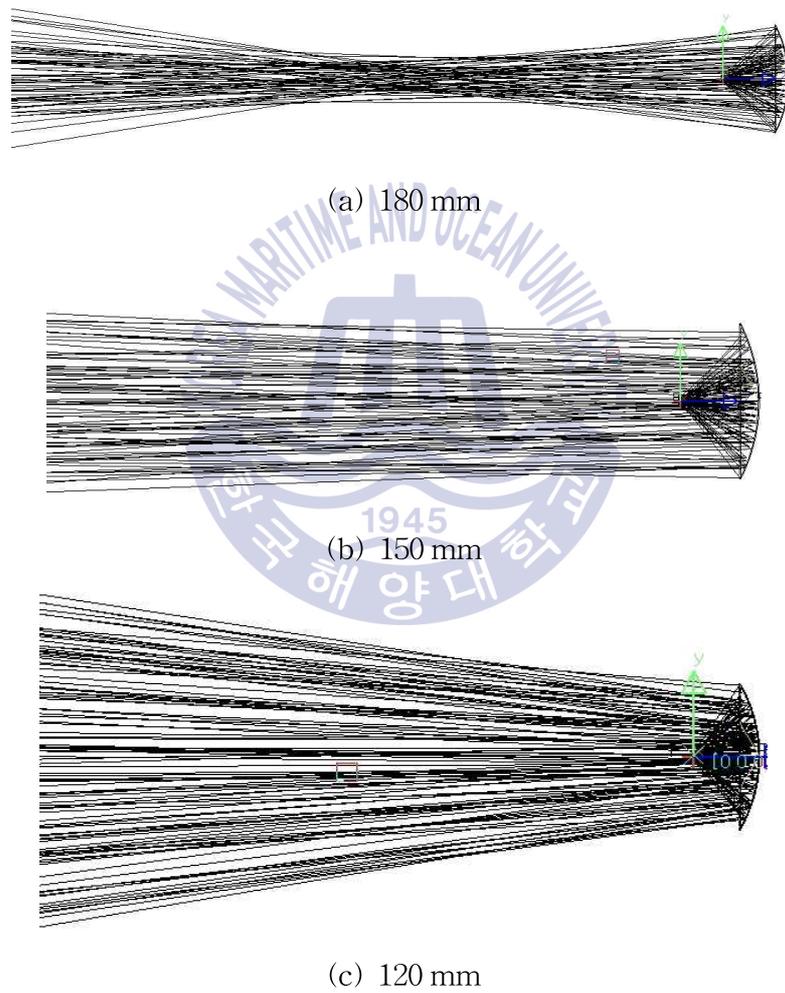


그림 2.6 초점거리에 따른 광선추적

Fig. 2.6 Ray tracing against the focal length

시뮬레이션 결과는 그림 2.6과 같이 광원을 반사판과 먼 거리로 30 mm 이동시킨 (a)의 경우 탐조등의 빔각이 좁아져 목표로 하는 위치보다 가까운 곳에서 광선이 모이다 퍼지게 되고 반사판과 가까운 거리로 30 mm이 이동시킨 (c)의 경우 광선이 처음부터 퍼져 버리기 때문에 먼 거리까지 빛을 보내기가 어렵다<sup>[18]</sup>. 본 논문에서는 그림 (b)와 같이 광선이 퍼지지 않고 평행하게 나가는 것을 목표로 광학 설계를 하겠다.

### 2.3 광도 산출

일반조명기구는 광학적 성능을 조도를 통해 비교하지만 탐조등의 경우 사용 목적과 설치 위치가 다르기 때문에 광학적 성능을 확인하기 위해선 중심광도가 필요하다. 1kW 할로겐램프 탐조등의 대체 가능여부도 중심광도를 기준으로 판단할 수 있다. 광도란 광원으로부터 어떤 방향을 향해 단위입체각 안에 방출되는 광속의 크기에 따라 그 방향에서의 광도를 결정하는 것이며, 그림 2.7에 나타내었다.

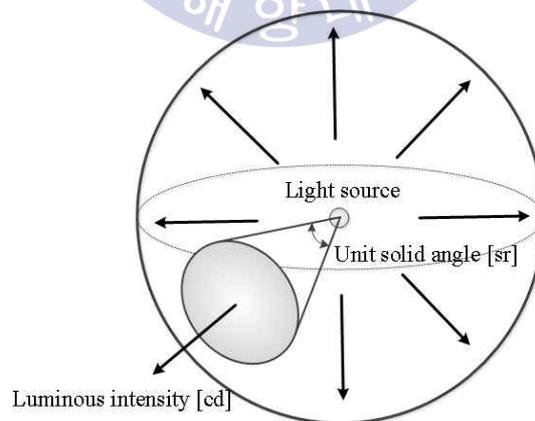


그림 2.7 광도

Fig. 2.7 Luminous intensity

광도( $I$ )는 어떤 방향의 단위 입체각( $\omega$ )내에 포함되는 광속( $F$ )으로 정의할 수 있으며, 단위는 칸델라[cd]를 사용한다. 1 cd는 점광원을 중심으로 하여 반지름 1 m의 구면에서  $1 \text{ m}^2$ 의 면적을 통해 나오는 광속이 1 lm일 때를 말하며 광속, 입체각 및 조도를 이용하여 계산할 수 있다.

광속은 광원으로부터 나오는 빛의 총량을 말하는 것으로 단위시간당 빛의 양이며, 단위로는 루멘[lm]을 사용한다. 그 값이 클수록 더욱 밝다는 것을 의미하며, 1 lm이라는 것은 1 m 떨어져 있는 초 하나에서 나오는 빛의 양과 같다. 광속( $F$ )는 식 2.2를 통해 입체각( $\omega$ )과 광도( $I$ )의 곱으로 계산할 수 있다.

$$F = \omega \cdot I \quad [\text{lm}] \quad (2.2)$$

입체각은 하나의 점에서 본 어떤 면적을 말하는 것으로 반경  $r$ 의 구면을 원뿔이 잘라낸 면적이며, 그림 2.8에 나타내었다. 점  $O$ 를 기점으로 하여  $S$ 면을 저면으로 한 원뿔을 생각하고, 이것이 반경  $r$ 의 구면 위로 절취하는 면적이  $S$ 일 때,  $S$ 면에 대한 입체각은  $S/r^2$ 으로 표현된다. 단위로는 스테라디안[sr]을 사용한다.

$$\omega = \frac{s_1}{r_1^2} = \frac{s_2}{r_2^2} \quad [\text{sr}] \quad (2.3)$$

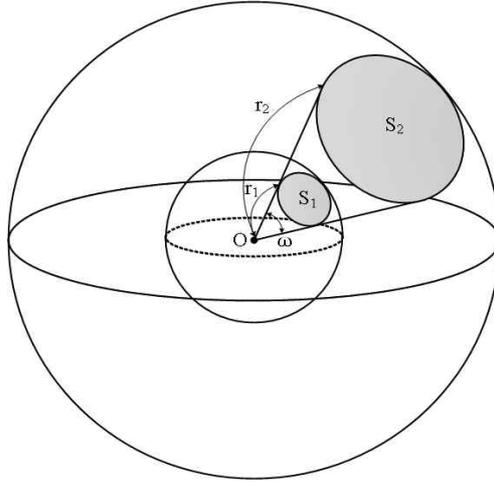


그림 2.8 입체각

Fig. 2.8 Solid angle

입체각은 광원에서 원뿔모양으로 방사되어 나오는 빛을 추적하는 것으로 식 2.4를 통해 계산하면 반경 1m인 단위구는  $4\pi \text{ m}^2$ 의 표면적을 갖는다는 것을 알 수 있다.

$$\omega = \frac{4\pi r^2}{r^2} = 4\pi \text{ [sr]} \quad (2.4)$$

반면 일정한 각도를 가지는 광원의 입체각은 식 2.5를 통해서 계산할 수 있다.

$$\omega = \int_{\theta=0}^{\theta} \int_{\eta=0}^{2\pi} \sin\theta \cdot d\eta \cdot d\theta \quad (2.5)$$

위의 식 2.5에서  $\theta$ 는 광원의 전체 빔각의 절반을,  $\eta$ 는  $360^\circ$ 를 말하는데 각  $\theta$ 가 중심선을 기준으로 한 바퀴 회전을 하게 되면 식 2.6과 같이 정리할 수 있다.

$$\omega = 2\pi \int_{\theta=0}^{\theta} \sin\theta \cdot d\theta = 2\pi(1 - \cos\theta) \text{ [sr]} \quad (2.6)$$

위에서 설명한 광속( $F$ )과 입체각( $\omega$ )을 통해 식 2.7로 광도( $I$ )의 계산이 가능하다<sup>[19]</sup>.

$$I = \omega \times F \text{ [cd]} \quad (2.7)$$

광도를 산출하기 위한 또 다른 방식으로 조도를 이용하여 구하는 방식이 있다. 조도는 광원에 의해 비춰진 면의 밝기 정도를 말하며, 단위면적당 피조면의 입사광속으로 정의한다. 단위로는 렉스[lx]를 사용한다. 1 lx란  $1 \text{ m}^2$ 의 면적 위에 1 lm의 광속이 균일하게 비춰질 때를 말하며 조도( $E$ )는 식 2.8을 통해서 광속( $F$ )을 단면적( $A$ )으로 계산할 수 있다.

$$E = \frac{F}{A} \text{ [lx]} \quad (2.8)$$

일반적인 조명기구의 경우 조도로 광학적 성능을 비교하며 사용위치와 목적에 따라 조명기구를 배치해야 효과적인 조도로 조명환경을 구성할 수 있다.

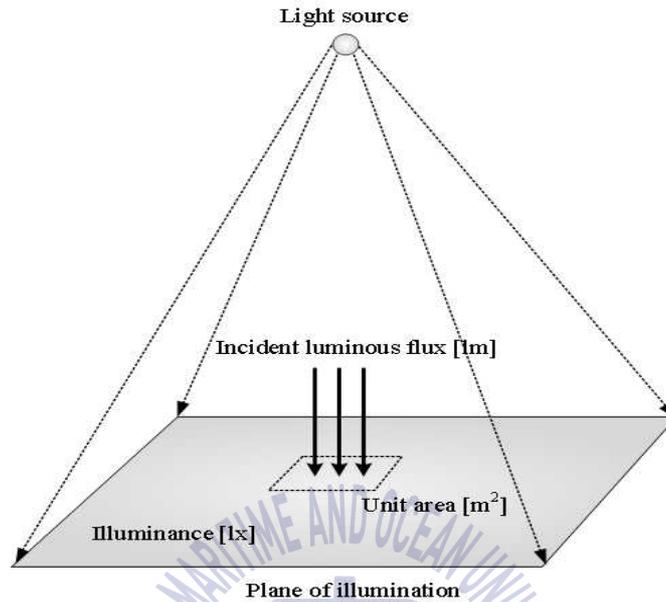


그림 2.9 조도

Fig. 2.9 Illuminance

이렇게 구해진 조도( $E$ )에 거리 역자승의 법칙을 사용하여 광도를 구할 수 있다. 거리 역자승의 법칙이란 입사 방향에 대해서 수직인 평면내의 조도는 광원과 피조면 사이 거리의 제곱으로 나누어지는 방향으로의 광도와 동일하다는 것이다. 즉, 광원의 밝기는 거리의 제곱에 반비례한다는 것으로 조도를 구하는 식 2.8을 이용하여 수식으로 나타내면 식 2.9로 정리할 수 있다.

$$E = \frac{F}{A} = \frac{4\pi \cdot I}{4\pi r^2} = \frac{I}{r^2} \text{ [lx]} \quad (2.9)$$

위 식을 광도를 구하는 식으로 변환하면 식 2.10으로 정리된다.

$$I = E \times r^2 \text{ [cd]} \quad (2.10)$$

위 식에서 광도( $I$ )는 조도( $E$ )와 측정거리의 제곱( $r^2$ )의 곱으로 구할 수 있다.

본 논문에서는 함정용 LED 탐조등의 중심조도를 10 m거리에서 측정하고 식 2.10을 통해 중심광도를 계산하여 광학적 성능을 평가하였다.



### 제 3 장 설계 및 제작

합정용 LED 탐조등을 설계하기 위해서 가장 중요한 부분은 광학 설계와 방열 시스템의 설계이다. 광학 설계는 먼저 임의의 광원으로 파라볼릭 반사판의 직경과 깊이에 따른 시뮬레이션을 통해 적합한 반사판을 선정하고, 여러 종류의 광원을 반사판에 적용 실험하여 최적의 광원을 적용하는 순으로 광학설계를 하였다. 파라볼릭 반사판의 직경은 KS V 8469에 탐조등 반사판 치수를 기준으로 설계하였다. 그 내용은 표 3.1에 나타내었다 [20].

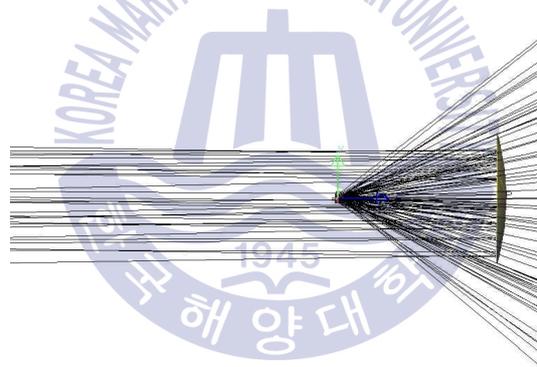
표 3.1 반사판 사양  
Table 3.1 Specifications of reflector

정격전력[W]	유효지름[mm]	바깥지름[mm]	초점거리[mm]
500	200 이상	220 이상	100±5
1,000	300 이상	330 이상	150±6
1,000~2,000	400 이상	430 이상	200±6

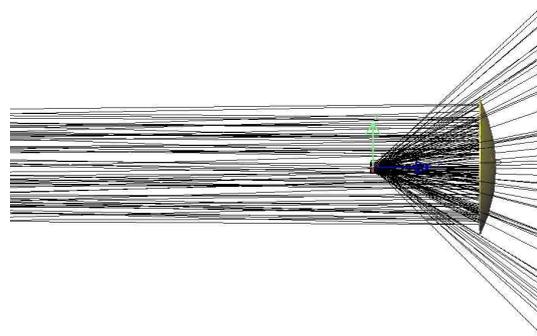
방열 시스템 설계는 수냉식을 적용하여 LED 성능저하 및 수명단축의 직접적인 원인이 되는 발열에 대한 문제를 해결하고 방열판의 크기 및 무게를 줄일 수 있도록 설계 하였다.

### 3.1 반사판 제작 및 광학 설계

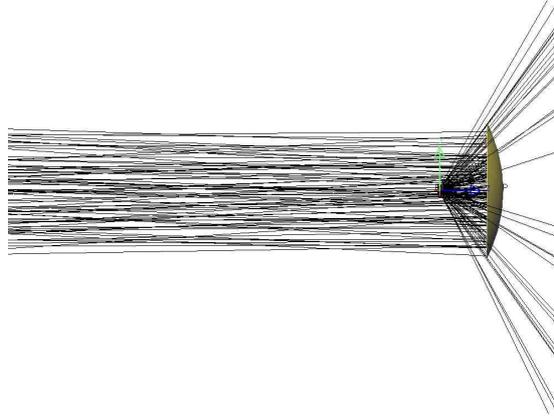
30 mm의 광원으로 파라볼릭 반사판의 크기와 깊이에 대한 시뮬레이션을 통해 파라볼릭 반사판을 선정하고, 이에 적합한 광원으로 광학 설계를 하였다. 먼저 파라볼릭 반사판의 직경과 깊이에 따른 집광여부를 알아보는 시뮬레이션을 하였다. 파라볼릭 반사판은 KS V 8469을 기준으로 300 mm ~ 330 mm 사이에서 15 mm 간격으로 3가지 직경과 15 mm ~ 35 mm 사이에서 10 mm 차이인 3가지 깊이를 조합하여 총 9가지를 선정하였고, 초점거리는 광선이 평행하게 나가는 지점으로 선정하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과는 그림 3.1과 같다.



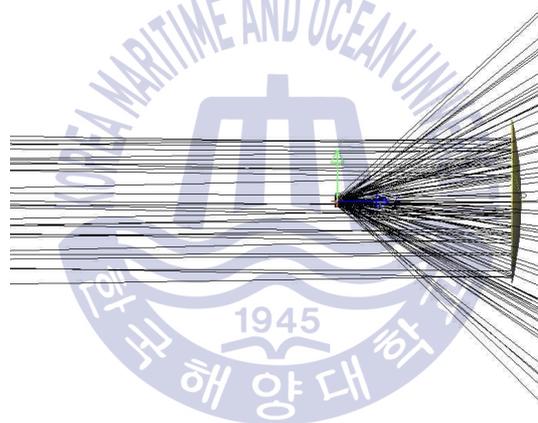
(a) 300 mm - 15 mm



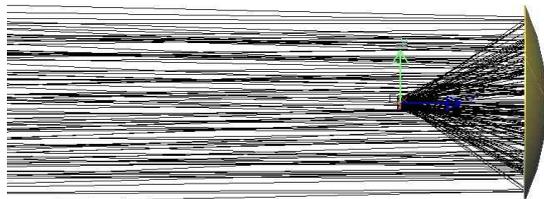
(b) 300 mm - 25 mm



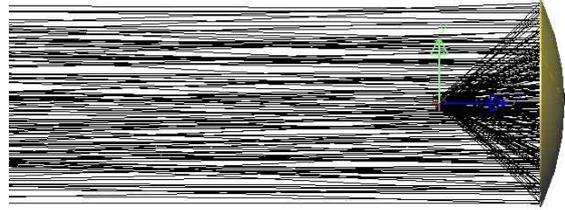
(c) 300 mm - 35 mm



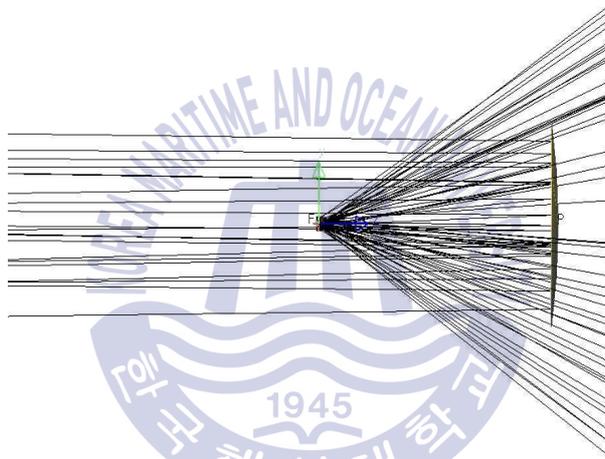
(d) 315 mm - 15 mm



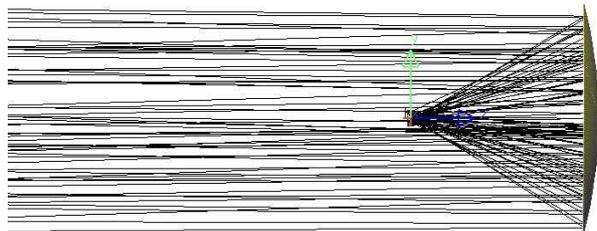
(e) 315 mm - 25 mm



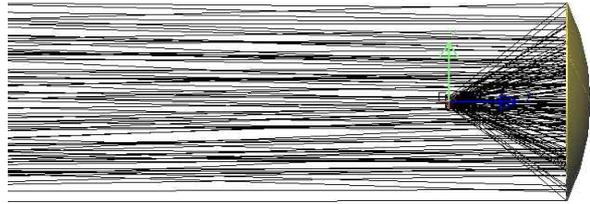
(f) 315 mm - 35 mm



(g) 330 mm - 15 mm



(h) 330 mm - 25 mm

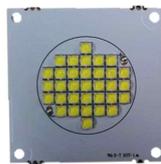


(i) 330 mm - 35 mm

그림 3.1 반사판 직경 및 깊이에 따른 광선추적

Fig. 3.1 Ray tracing against the reflector diameter and depth

시뮬레이션 결과 직경 300 mm에서는 깊이에 관계없이 3가지 모두 광선이 벗어났으며, 315 mm와 330 mm에서는 깊이 15 mm에서 광선이 벗어나는 것을 확인할 수 있었다. 결론적으로 직경 315 mm의 깊이 25 mm, 35 mm와 직경 330 mm의 깊이 25 mm, 35 mm의 반사판이 탐조등에 적용가능하다고 판단하였고, 선정된 4가지 반사판중 상용화 되어 있는 제품을 가공하여 제작할 수 있는 반사판으로 직경 315 mm에 깊이 25 mm인 반사판을 제작하였다. 제작한 반사판에 사용하기 적합한 광원을 선정하기 위해서 시뮬레이션에서 적용하였던 직경 30 mm의 광원을 기준으로 그림 3.2와 같이 3가지 광원을 선정하여 실험하였다.



(a) 330 W, 직경 32 mm



(b) 300 W, 가로·세로 32 mm



(c) 100 W, 직경 23 mm

그림 3.2 실험 광원

Fig. 3.2 Light source for experiment

실험결과 (a)의 경우 33개의 광원을 32mm직경에 배열하여 제작하였는데 각각의 광원으로 인해 조도가 균일하게 나타나지 않았으며 광원간의 이격거리 때문에 집광이 제대로 이루어지지 않았다. (b)는 광원이 사각형의 형태이기 때문에 원형인 반사판을 제대로 활용하기 어려웠다. (c)는 광원의 직경이 23mm로 그 크기가 작아 집광은 잘 이루어 졌지만 최대출력이 100W이고 총광속이 17,000lm으로 1kW 할로젠램프를 대체하기가 어려웠다. 그래서 그림 3.3과 같이 광원의 직경이 작고 높은 출력을 가진 COB(Chip On Board) 형태로 결정하였다. 보통 광원의 크기가 작으면 그만큼 광학적 성능도 낮기 때문에 상용화 되어있는 광원 중에서 최대한 크기가 작으며 1kW 할로젠램프를 대체할 수 있는 광학적 성능을 가진 광원을 선정하였다.



그림 3.3 광원

Fig. 3.3 Light source

선정한 광원의 크기는 가로·세로 28 mm, 광원부의 직경은 22 mm이고 240 W 급이며, 114 lm/W의 효율을 가진다. 114 lm/W의 효율을 내기 위해서는 LED의 동작온도가 25 °C를 유지해야 한다. 선정된 광원을 가지고 Light Tools를 이용하여 시뮬레이션을 실시하였고 파라볼릭 반사판과의 초점거리를 조절하여 그림 3.4와 같은 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

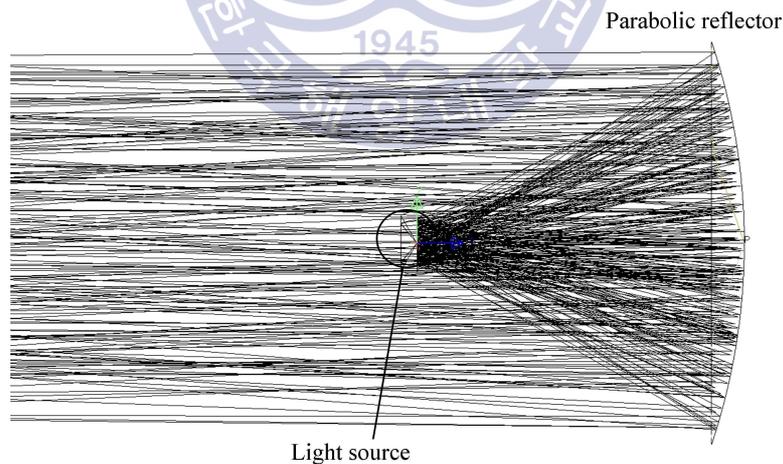


그림 3.4 최적화 반사판의 광선추적

Fig. 3.4 Ray tracing of an optimal reflector

반사판의 직경과 깊이를 시뮬레이션을 통해 결정하고, 그 결과에 적합한 광원을 선정하여 광학 설계를 하였다. 그 결과, 광원은 작을수록 반사판의 직경은 큰 것이 집광정도가 높은 것으로 나타났는데, 탐조등을 소형화하려면 파라볼릭 반사판의 직경을 줄이면서 깊이를 늘이는 방법을 선택하여야 한다.

### 3.2 방열 시스템

LED는 전체 소비전력의 85%가 열 손실로 발생하기 때문에 방열설계를 제대로 하지 않으면 온도 상승으로 인한 광출력 저하 및 수명 단축의 문제점이 발생한다<sup>[21],[22]</sup>. 그리고 탐조등은 점등 후 사람이 직접 탐조등을 조작하기 때문에 안전성을 위해서도 방열성능이 높아야 한다. LED 조명기구를 설계할 때 방열성능을 고려하여 제작하는데, 기존의 LED 조명기구의 경우, 그림 3.5와 같이 자연냉각방식인 공랭식 방열 시스템을 많이 사용하고 있다. 공랭식 방열 시스템은 광원부의 크기에 맞게 방열판과 방열핀을 설계하여 광원부의 발열을 방열핀으로 전달하고 공기의 대류현상을 이용하여 방열시키는 구조이다<sup>[23]</sup>.



그림 3.5 방열판  
Fig. 3.5 Heat sink

하지만 공랭식 방열시스템을 적용하기 위해서는 방열판 및 방열핀의 크기를 고려하여 설계하여야 한다<sup>[24]</sup>. 방열성능 향상을 위해서 방열판의 면적을 크게 하고 방열핀의 크기와 개수를 조절하여 공기와 닿는 면적을 크게 하면 방열성능은 향상되지만 소형화 및 경량화가 어렵고, 선정된 광원이 COB형태이므로 적용할 수 있는 방열판의 면적 또한 제한적이다. 공랭식 방열시스템의 방열성능을 높이기 위해 방열판의 소재 및 방열핀의 두께와 모양에 관련된 많은 연구가 진행되고 있지만, 결론적으로 방열판의 크기가 커지게 되고 그만큼 무게도 증가 한다<sup>[25],[26]</sup>. 그림 3.6의 그래프를 보면 온도가 80℃를 넘어가면 입력전류가 감소하게 되는데, LED는 전류구동형 소자이기 때문에 온도가 상승함에 따라 점차 입력전류가 감소하여 광출력이 저하되고 온도가 105℃를 넘어가게 되면 결국에는 구동되지 않을 수 있다.

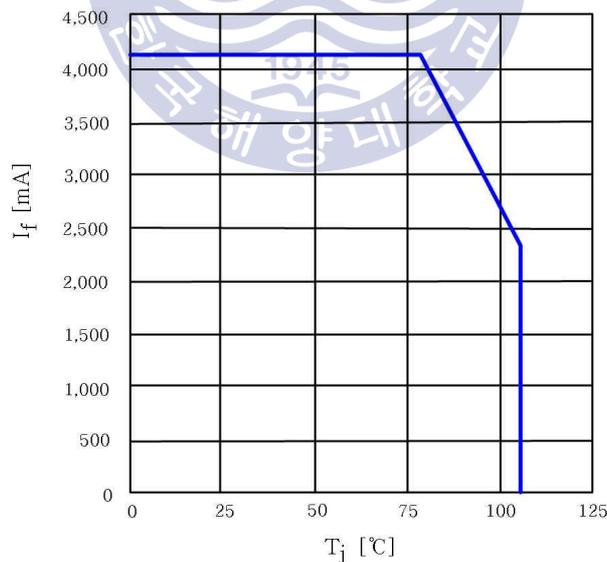


그림 3.6 LED의 온도-전류 곡선

Fig. 3.6 Junction temperature-forward current curve of an LED

선정한 COB와 공냉식 방열 시스템의 방열성능 실험결과, 광원 점등 후 수 분 내에 80 ℃가 넘어가기 때문에 시제품에 적용하기 어렵다고 판단하였다.

그림 3.7은 온도에 따른 광속의 비율을 나타내고 있다. [a.u] 단위는 상대단위로 하나의 값을 기준으로 다른 값들을 비율로 나타내는 것이다. 그래프에서 25 ℃까지 광원의 최대광속을 100%를 사용할 수 있다고 보았을 때 온도가 100 ℃가 되면 최대광속의 80%밖에 사용하지 못한다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 탐조등을 최대광속으로 사용하기 위해서는 광원부의 동작온도가 25 ℃이하로 유지되어야 한다.

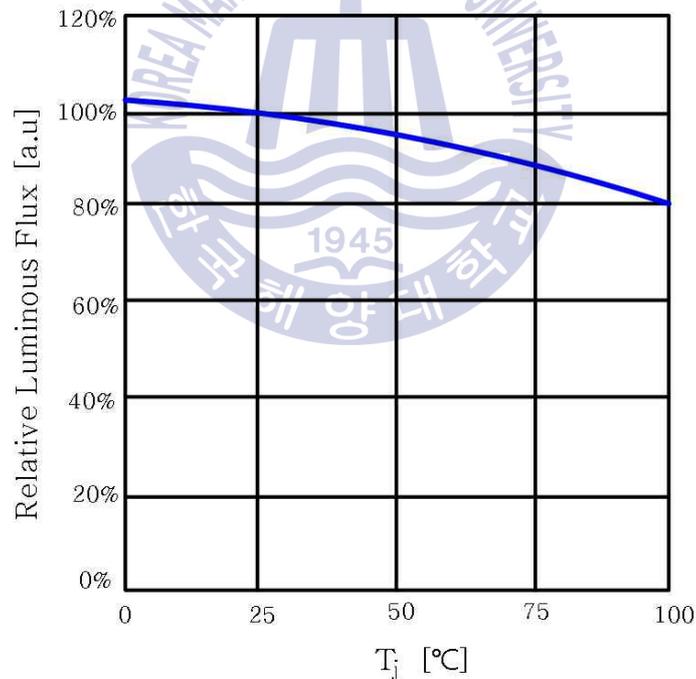


그림 3.7 LED의 온도-광출력 곡선

Fig. 3.7 Junction temperature-relative luminous flux curve of an LED

LED의 장점중 하나는 반영구적으로 사용 가능하다는 것이다. 평균 수명을 60,000 시간으로 보았을 때 접합온도의 상승에 따라 수명이 단축되는 현상을 그림 3.8에 나타내었다. 그래프를 보면 접합온도가 일정 온도이상으로 상승하게 되면 수명이 점차 줄어들었다.

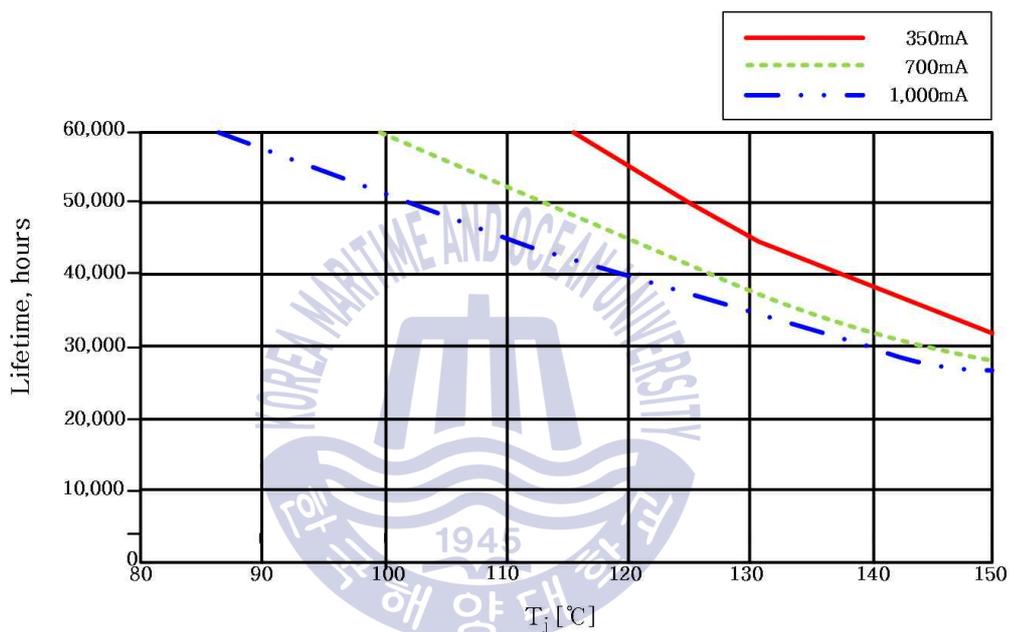


그림 3.8 LED의 온도-수명 곡선

Fig. 3.8 Junction temperature-lifetime curve of an LED

1 A의 전류로 구동되는 LED를 예로 들면 85 °C가 넘어가면 점차 수명이 감소하고 140 °C에서 부터는 수명이 절반 이상으로 감소한다. 위의 그래프로 접합온도가 LED 수명에 미치는 영향을 확인할 수 있는데 본 논문에서는 탐조등이 4 A의 전류로 구동되지만 수냉식 방열 시스템으로 인해 접합온도가 25 °C이하로 유지되기 때문에 접합온도 상승으로 인한 LED의 수명 감소 문제를 해결할 수 있다고 판단된다.

선정한 LED에 적합한 수냉식 방열 시스템을 선정하기 위해 식 3.1을 통해서 LED의 열량( $Q$ )을 계산하였다.

$$Q = 0.24 \times P_h \times t \text{ [cal/s]} \quad (3.1)$$

열손실( $P_h$ )은 LED중 소비전력의 85%가 열로, 15%는 빛으로 변환되기 때문에 250 W의 85%인 212.5 W로 열손실을 계산하였고 식 3.1에 대입하여 열량을 51 cal/s로 산출하여 방열 성능의 필요조건으로 정하였다. 수냉식 방열 시스템의 허용 가능한 열량은 식 3.2를 통해 계산하였다.

$$Q = C \times M \times \Delta T \text{ [cal/s]} \quad (3.2)$$

열량( $Q$ )는 물의 비열( $C$ ), 질량유량( $M$ )과 온도 차이( $\Delta T$ )의 곱으로 153.51 cal/s로 산출 되었다. 위 식에서 온도 차이는 수냉식 방열 시스템의 열저항 값에 LED의 열손실을 곱한 값이다. 산출된 결과를 보면 LED의 동작온도를 25 °C 이하로 유지하기에 충분하다는 판단을 하고 방열 시스템을 설계하였다.

광학 설계와 방열 시스템 설계를 바탕으로 그림 3.9과 같이 시제품을 제작하였다.



그림 3.9 시제작 LED 탐조등

Fig. 3.9 Prototype of LED searchlight

광원은 고정되어 있고 탐조등 뒤편의 레버를 이용하여 반사판을 앞·뒤로 이동하여 초점거리를 조절할 수 있고, 강화유리를 이용하여 광원부 덮개를 제작함으로써 내구성이 향상되고, 빛이 투과되는 과정에서 발생하는 손실을 10% 이하로 최소화 시켰다. 함정용 LED 탐조등이기 때문에 사용 환경을 고려하여 방수·방진에 대한 보호등급(IP등급)을 고려하여 고무패킹을 사용하여 나사 홀과 연결 부위를 설계하였다.

## 제 4 장 평가 및 분석

시제작 LED 탐조등의 평가는 전기·광학적 특성을 통해 1kW 할로겐램프와 비교하였다. 입·출력 전압과 전류를 통해 전기적 성능과 중심광도, 빔각 및 1lx가 되는 거리를 통해 광학적 성능을 비교하였다.

### 4.1 측정계

시제작 등기구의 광학적 특성을 분석하기 위해 실험을 실시하였다. 실험 결과를 통해 탐조등의 광학적 성능을 확인하고 1kW 할로겐램프 탐조등과 비교하여 대체 가능여부를 판단할 수도 있다. 그림 4.1과 같이 탐조등을 10m거리의 벽면에 조사하여 피조면의 중심조도 측정값으로 광도, 빔각 그리고 1lx되는 거리를 산출하여 비교하였다.

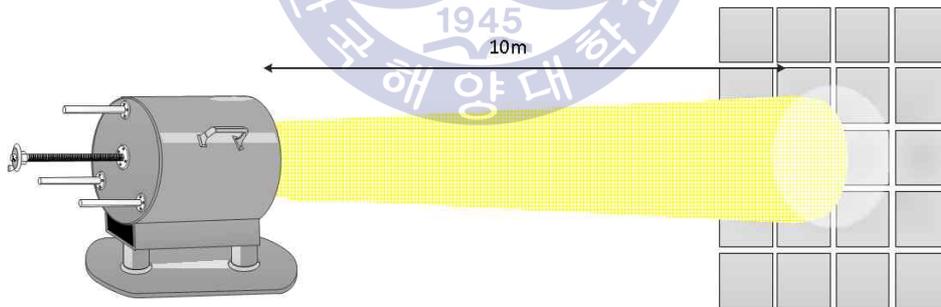


그림 4.1 측정계

Fig. 4.1 Measurement system

## 4.2 전기·광학적 특성

LED 탐조등의 입·출력 전압과 전류, 소비전력 및 수명을 표 4.1에 나타내었다.

표 4.1 LED 탐조등의 전기적 사양

Table 4.1 Electrical specifications of the LED searchlight

항목		전압[V]	전류[A]	소비전력[W]	수명[Hrs.]
광원	Halogen lamp	220	4.27	939.4	2,000
LED	입력	220	1.17	257.4	50,000
	출력	60.3	4.1	247.2	

LED는 할로겐램프와 달리 AC를 DC로 변환시켜주는 SMPS가 있는데 SMPS에 들어오는 입력 전압 및 전류는 220 V, 1.17 A이며, SMPS에서 나오는 출력 전압 및 전류는 60.3 V, 4.1 A이다. 입·출력 소비전력은 각각 257.4 W와 247.2 W로 SMPS에 의한 손실이 약 10 W이며 기존 1kW 할로겐램프 탐조등 대비 26%로 감소하였다. 수명은 25배가 증가하였는데 육상용 LED조명기구(통상적으로 50,000시간을 기준으로 수명을 예측하는데 선박용 LED조명기구는 특수한 환경에서 사용하기 때문에 환경적 요인을 고려하여 30,000 시간을 기준으로 수명을 판단한다. 하지만 탐조등은 항상 동작하는 것이 아니라 필요할 때만 사용하기 때문에 육상용과 같은 50,000 시간을 기준으로 수명을 계산하였다.

탐조등은 중심광도를 통하여 광학적 특성을 비교하는데 중심광도를 직접 측정하기 어려워 10 m거리에서 피조면을 향해 빛을 조사하였을 때, 반

사관의 위치를 이동시키며 초점거리를 찾아 중심조도를 측정하였다. 측정된 중심조도는 21,400 lx이고 식 2.10을 통해서 중심광도는  $2.14 \times 10^6$  cd로 산출되었다. 1 kW 할로겐램프 탐조등은 동일한 방법으로 실험하였고 중심조도는 4,000 lx로 측정되었다. 식 2.10을 통해 계산한 중심광도는 400,000 cd로 시제품이 약 5배 정도 광학성능이 우수하다는 것을 확인할 수 있다. 그림 4.2를 보면 할로겐램프 탐조등의 경우 LED 탐조등에 비해 피조면의 면적이 약 8배 정도로 크며 피조면 내에서의 조도차이가 크다는 것을 알 수 있다.



그림 4.2 광원 비교

Fig. 4.2 Comparison by light source

광원의 빔각은 탐조등을 피조면에 조사하였을 때 최대조도값을 중심으로 10%인 두 지점을 선정하고 탐조등과의 사이각을 계산하는 것으로 그림 4.3과 같이 실험을 하였다.

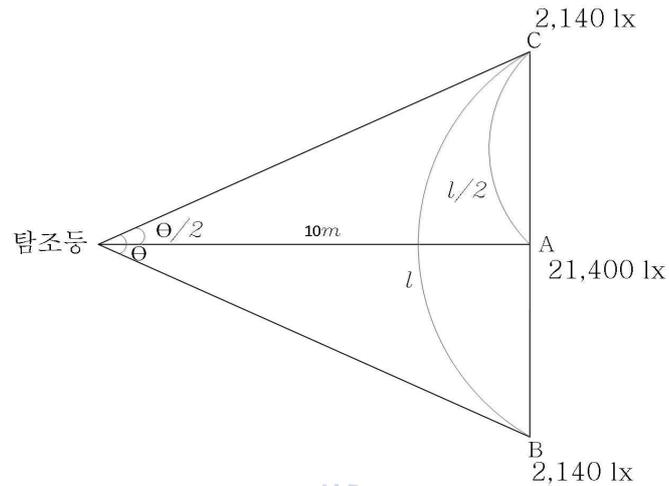


그림 4.3 빔각 계산  
Fig. 4.3 Calculation of the beam angle

탐조등에서 10 m 거리에 있는 최대조도의 위치를 A, 최대조도의 10%인 지점을 B, C라하고 두 점 사이의 거리  $l$ 을 측정하여 표 4.2에 나타내었다.

표 4.2 조도 측정  
Table 4.2 Measurement of the illuminance

조도 측정위치	조도 [lx]	거리 [m]
B : 최대중심조도의 10%	2,140	0.34
C : 최대중심조도의 10%	2,140	

그림 4.3에서 탐조등과 A, B지점을 피타고라스의 정의를 이용하여  $\theta$  값을 계산하면 식 4.1과 같이 정리 할 수가 있다.

$$\theta = 2\sin^{-1}\left(\frac{l}{20}\right) = 1.94 [^\circ] \quad (4.1)$$

산출된 빔각은 1.94°로 KDS-6230-1047에 탐조등의 2.0°이하가 되어야 한다는 조건을 만족한다. 그림 4.4에 거리에 따라 피조면의 변화를 나타내었다.

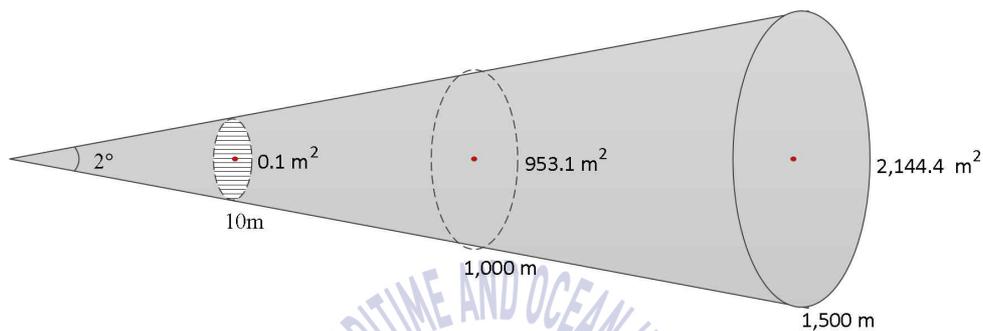


그림 4.4 빔각의 중요성

Fig. 4.4 Importance of beam angle

2°의 빔각을 기준으로 거리별 표면적을 계산하였을 때 10 m와 1,500 m는 약 21,000배의 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 조도는 면적에 반비례하기 때문에 거리가 멀어질수록 면적이 넓어져서 먼 거리를 조사하는 탐조등의 경우 빔각이 가지는 의미가 크다.

중심광도( $I$ )를 식 4.2에 대입하여 탐조등에서 1 lx가 되는 지점까지의 거리를 계산할 수 있다.

$$r = \sqrt{\frac{2.14 \times 10^6}{E}} = 1,463 \text{ [m]} \quad (4.2)$$

탐조등에서 1 lx가 되는 지점까지의 거리는 최대 가시거리를 의미하는 것으로 632 m로 계산된 1 kW 할로젠램프 탐조등에 비해 1,463 m로 약 2.3배가 향상되었다.

그림 4.5는 818 m 거리에 있는 탑을 탐조등으로 비췄을 때의 사진으로  
광선방향을 실제로 확인하였다.



그림 4.5 LED 탐조등 광선방향  
Fig. 4.5 Ray direction of LED searchlight

## 제 5 장 결 론

본 논문에서는 1kW 할로겐램프 탐조등을 대체할 수 있는 함정용 LED 탐조등의 설계 및 제작에 관하여 연구하였다. 기존에 개발되어 있는 LED 탐조등의 개별 광원과 렌즈를 이용한 방식이 아닌 하나의 COB형 LED를 파라볼릭 반사판에 반사시켜 집광하는 구조로 설계하였다. 파라볼릭 반사판의 직경, 깊이 및 광원과의 초점거리의 관계를 시뮬레이션으로 확인한 뒤 반사판을 선정 및 가공하여 LED 탐조등을 제작하였다. 광원의 직경이 작아질수록 반사판의 직경을 줄일 수 있었고, 반사판의 깊이가 클수록 직경을 줄일 수 있다.

시제작 LED 탐조등의 전기·광학적 성능분석결과, 1kW 할로겐램프 대비 소비전력은 247.2W로 74% 절감되었으며, 조도 1lx가 되는 거리는 1,463m로 2.3배 증가하였고, 탐조의 주요한 성능인 빔각은 1.94°로 산출되었다. 또한 중심광도는 기존 탐조등  $4 \times 10^5$  cd에 비해 5배 이상인 2,140,000 cd로 향상되었다.

함정에서 물체 탐지 및 신호용으로 사용하고 있는 1kW 할로겐램프 탐조등을 LED 탐조등으로 대체하면 소비전력 감소와 광학적 성능 향상은 물론이고 내구성과 장수명의 효과까지 얻을 수 있을 것으로 기대한다. 또한 광원의 직경이 작고 고효율 LED가 개발되면 탐조등의 소형화가 가능하여, 제논램프 탐조등의 대체도 가능할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 송석균, 고영욱, “LED조명 산업 동향”, 한국조명·전기설비학회지, 제24권 제6호, pp.29-37, 2014
- [2] 김문구, 박종현, “차세대 LED시장 현황 및 산업 역량 강화 방향”, 한국전자통신학회 2011년도 동계종합학술 발표회, pp.635-636, 2011
- [3] 허만일, 유왕진, “LED 조명산업을 통한 융복합기술의 활성화 방안에 관한 연구”, 조명·전기설비학회논문지 제26권 제4호, pp.1-5, 2012
- [4] 최광주, 정형용, 이대범, 현종필, 백동현, “LED조명의 필요성과 기술적인 개선방향”, 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.499-500, 2010
- [5] 김세진, “고출력 LED 탐조등의 설계에 관한 연구”, 석사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2014
- [6] 송상빈, “LED조명 부품기술 동향 및 전망”, 조명·전기설비, Vol.29, No.2, pp.22-34, 2015
- [7] 길경석, 김일권, 조향은, 권혁상, 조흥기, “합정용 노출·방수형 LED 조명기구의 설계 방안”, 한국마린엔지니어링학회지 제35권 제5호, pp.654-660, 2011
- [8] Y. K. Cheng, K. W. E. Cheng, “General study for using LED to replace traditional lighting devices”, ‘06 2nd International Conference on Power Electronics System and Application(ICPESA), pp.174-177, 2006
- [9] H. Hsuan, “Simulating the illuminance and the efficiency of the LED and fluorescent lights used in indoor lighting design”, OPTICS EXPRESS , Vol. 16, pp.18692-18701, 2008
- [10] 성태경, 이충식, 김종민, 정채봉, 김병철 “포물면 집광거울 방식의 태양광 집광채광시스템 개발” 대한설비공학회 설비공학논문집 제25권 제5호, pp.240-245, 2013

- [11] E. R. Vidal, D. Otaduy, D. Ortiz, F. Gonzalez, F. Moreno, J. M. Saiz, "Optical performance of a versatile illumination system for high divergence LED sources", Elsevier, Optik 125, p. 1657 (2014)
- [12] R. Winston, "Nonimaging optics", Schools of engineering & natural science university of California, 2008
- [13] 이충식, 김종민, 박연민, 성태경, 정채봉, 강승훈, 김병철, "다중 파라볼릭 반사경 방식을 이용한 추적식 집광시스템 개발", 한국태양에너지학회 논문집 제33권 제2호, pp.56-63, 2013
- [14] F. Yettou. B. Azoui. A. Malek., "Determination of adjustment tracking time in two types of solar cookers by ray-tracing method", 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, pp.822-827, 2013
- [15] S.Z hao. K. Wang. F. Chen. S. Liu., "Optical design of LED packaging for concentrated and uniform lighting", Electronic Packaging Technology and High Density Packaging (ICEPT-HDP), pp.1491-1494, 2012
- [16] IEEE, "Near-Field Line-Integral Representation of the Kirchhoff-Type Aperture Radiation for a Parabolic Reflector", Antennas and Wireless Propagation Letters, pp.273-276, 2003
- [17] Y. Liu, Y. Wu, B. An, Optical simulation analysis of high power LED package structure, International Symposium on Advanced Packaging Materials, Vol. 7, p. 99, 2011
- [18] N. N. Gorobets, V. I. Kiyko, V. N. Gorobets, "DEPENDENCE OF THE LATERAL AND CROSS-POLARIZED RADIATION REFLECTOR ANTENNAS ON THEIR SIZE AND FOCAL LENGTH", International Conference on Antenna Theory and Techniques, pp.434-437, 2013

- [19] 김동건, “합정용 LED 투광등 개발에 관한 연구”, 석사학위논문, 한국해양대학교대학원, 2012
- [20] KS V 8469, 선박용 탐조등, 한국산업표준, 2004
- [21] 박형석, 김동권, 김현정, 유재석, “기울어진 LED 조명용 히트 싱크의 자연대류 열전달 성능 측정”, 대한기계학회 춘추학술대회, pp.1528-1530, 2011
- [22] 김윤중, 스티븐김, 조광섭, “LED 조명기구의 방열 효율과 광속에 관한 연구”, 한국조명·전기설비학회 2011 추계학술대회 논문집, pp.109-112, 2011
- [23] 정태성, 강환국, “LED 조명용 히트싱크 냉각장치의 자연대류 해석”, 한국생산제조시스템학회 학술대회발표 논문집, p.86, 2011
- [24] 정태성, 강환국, “LED 조명용 히트싱크 방열기 설계를 위한 냉각성능 평가”, 한국정밀공학회지, pp.778-784, 2012
- [25] K. Ding, S. Feng, C. Guo, G. Zhang, C. Gao, “Structure Optimizati on of Heat Sink for High Power LED Street Lamp”, International Conference on Electronics and Optoelectronics, pp.V2 75-78, 2011
- [26] X. Luo, Z. Mao, S. Liu., “Thermal Design of a 16W LED Bulb Based on Thermal Analysis of a 4W LED Bulb”, Electronic Components and Technology Conference, pp.1906-1911, 2010