

전반사 렌즈를 이용한 LED 등명기 광학계 설계

(A Optical System Design of LED Marine Lanterns Based on a TIR Collimator Lens)

고동현* · 이윤철**

(Dong Hyun Go · Yoon Chul Lee)

Abstract

In this paper, we propose the optical system design for a medium sized LED marine lanterns which simplifies the multi-layer structure into a single structure. In order to satisfy the target fixed intensity(35,000cd) and vertical divergence($-2.5^{\circ} \sim -4.0^{\circ}$, $+2.5^{\circ} \sim +4.0^{\circ}$), we use the total internal reflection collimator lens. And a Monte Carlo simulation has been utilized to optimize a condition of a LED package, TIR lens and outside lens. The computer simulation results indicated that this LED marine lanterns can produce of a fixed intensity(35,382cd) and vertical divergence($-3.1^{\circ} \sim +2.5^{\circ}$). Using the this optical system, we achieve the target value of LED lanterns.

Key Words : Marine Lanterns, TIR Lens, Optic Design, LED Lighting, Optimization

1. 서 론

1.1 연구의 배경

선박의 안전한 항해 및 운항능률 향상을 위하여 각종 항로표지가 이용되고 있으며, 특히 우리나라는 서해안과 남해안의 해안선이 복잡하고 섬들이 많은 관계로 항로표지의 중요성이 많이 부각되고 있다. 그중 좌·우 측방 한계 표시 및 항행위해요소 표시 등의

용도로 사용되는 등명기는 항만, 연안 해역 및 내륙 수로에서 통항 선박의 안전을 위하여 그 수요가 점진적으로 늘고 있다[1]. 2003년에 최초로 제작된 해상용 발광 다이오드(Light Emitting Diode, 이하 LED) 등명기는 소형급인 렌즈 직경 200mm 형태로 제작되었으며, 그 수량도 1개사에서 생산한 약 240대정도로 소량이었으나, 2014년에는 7개사 약 1900대(정기검사 포함)로 증가하였고, 제품의 종류도 다양해졌다[2]. 하지만 국내 등명기 시장은 소형급 등명기가 주를 이루고 있으며, 렌즈 규격 400mm의 점멸식 15~20 헤리 급 중형 등명기 제품군이 없는 상황으로 해당 규격에 대한 등명기는 주로 수입에 의존하거나 회전식 중형 등명기를 사용하는 실정이다. 회전식 등명기의 경우 점멸식 등명기에 비해 등질 코드의 다양성이 떨어져 범용 적으로 사용하는데 어려움이 있으며, 해외에서 수입되는 대부분의 점멸식 등명기는 적층

* Main author : Korea Photonics Technology Institute, Lighting Solution R&BD Center, Researcher

** Corresponding author : Korea Photonics Technology Institute, Lighting Solution R&BD Center, Senior Researcher

Tel : 062-605-9365, Fax : 062-605-9369

E-mail : chals@kopti.re.kr

Received : 2015. 9. 2

Accepted : 2015. 9. 23

형 구조로 되어 있어서 해양 환경에서 중요시 되는 방수 성능 부분에서 단일 구조보다 불리한 면이 있어 이를 개선 할 수 있는 기술력 높은 중형급 등명기 개발이 필요하다.

1.2 연구의 목적 및 방법

이 논문에서는 적층형 구조의 등명기 광학계를 단일 구조로 변경한 15~20 해리 급의 항로표지용 400mm 점멸식 중형 등명기를 개발하기 위해, 해외 선진사의 중형급 점멸식 등명기를 분석하고, 국내 해상용 등명기 표준규격서[3]를 참고하여 목표 부동광도와 수직 발산각을 정하였다.

개발 목표를 만족하는 광학계를 설계하기 위해 광학 설계 프로그램인 Synopsys社의 LightTools를 사용하였으며, 소비전력 300W 이하로 부동광도 35,000cd를 만족 할 수 있는 이론적으로 최적화된 전광선속을 산출하고, 광학계에 의한 광손실을 20%를 고려한 최종 목표 전광선속을 계산하여 각 패키지 (Package, 이하 PKG)당 전광선속을 정하였다. 그리고 PKG와 전반사(Total Internal Reflection, 이하 TIR) 렌즈, 외부 렌즈의 최적 조건을 찾고, 최종적으로 PKG와 TIR 렌즈를 배열하고 목표기준 만족 여부를 확인하였다.




2. 이론 및 고찰

2.1 광학계 선정

400mm 점멸식 중형 LED 등명기 설계를 위하여 표 1 과 같이 이미 개발 완료된 해외 제조사(Sealite社, Zenilite社, Pinch aben社)의 중형 등명기 제품을 파악 하고, 특징을 분석한 결과 대부분의 제품들이 렌즈 적층형 구조로 이루어져 있음을 확인하였다.

제품 개발 시, 해상용 LED 등명기 사양에서 가장 중요한 요소는 부동광도이고, 이 광학적인 요소를 만족 하기 위한 설계 방안으로 기존의 등명기 구조에 TIR 렌즈 적용을 제안하였다[4].

Table 1. LED marine lantern products

제조사	Sealite	Zenilite	Pinch aben
모델명	SL-300	ZL-370A	LED Max
제품 사진			

2.2 전반사 렌즈

광학적인 요소인 부동광도와 수직 발산각 개발 목표를 만족하기 위해 사용하는 TIR 렌즈의 구조는 그림 1 과 같으며, 렌즈 중앙의 굴절면 곡률과 렌즈 외곽의 전반사면 형태, TIR 렌즈의 전체 길이 등을 제어하여 최적화를 진행하였다. LED PKG에서 방출되는 빛은 발산각이 작은 경우, 광선 추적선 A와 같이 전반사 렌즈 중앙의 굴절면을 통과하여 수직 방향으로 향하게 되는데, 굴절면은 식 (1)의 Snell's law에 기초하여 제어 가능하다. 여기서 θ_i 는 입사각, θ_r 는 굴절각이며, n 은 매질에 대한 매질의 상대굴절률이다.

$$\frac{\sin\theta_i}{\sin\theta_r} = \frac{n_r}{n_i} = n \tag{1}$$

발산각이 큰 빛의 경우, 광선 추적선 B와 같이 렌즈 내부 벽면의 굴절면을 통과하고 다시 렌즈 외곽의 반사면 곡선을 통해 반사되어 수직 방향으로 발산 하게 되는데, 반사면에서 일어나는 내부 전반사는 식 (2)의 임계각(Critical angle, θ_c) 계산식에 의해 제어 가능하다.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_t}{n_i}\right) \tag{2}$$

수직 방향으로 방출되는 LED PKG의 광속이 다른 각도의 광속보다 비교적 높기 때문에, 해당 렌즈의 조명 성능은 주로 렌즈 중앙의 굴절면에 의해 결정되며, 전반사가 이루어지는 렌즈 외곽의 반사면 곡선 또한 조명 성능을 개선하는데 매우 중요하다[5].

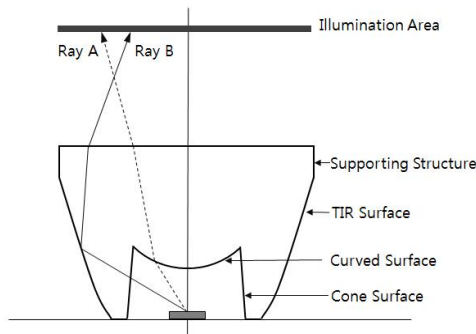


Fig. 1. Schematic diagram of a TIR lens

3. 중형 등명기 광학계 설계

개발목표인 표 2를 만족하는 15~20 헤리 급의 항로 표지용 400mm 점멸식 중형 등명기의 단일 광학계 설계를 위해 표 3의 디자인 프로세스에 따라 광학계 시뮬레이션을 진행하였다.

Table 2. Target specifications of LED marine lanterns

평가 항목	단위	개발 목표
부동광도	cd	35,000
수직 발산각	°	-2.5~-4.0 +2.5~+4.0

Table 3. Optical system design process

시스템 및 LED PKG 전광선속 설정 - 시스템 효율을 고려한 전광선속 계산 - 등명기의 크기 제한을 고려한 PKG의 수량 및 광속 설정
TIR 렌즈 최적화 - TIR 렌즈 변화에 따른 부동광도 최적화 - TIR 렌즈 변화에 따른 수직 발산각 최적화
외부 렌즈 최적화 - 외부 렌즈 변화에 따른 부동광도 최적화 - 외부 렌즈 변화에 따른 수직 발산각 최적화
LED PKG 및 TIR 렌즈 Array - 최적화된 PKG와 TIR 렌즈 배열
목표 기준 만족 확인 - 설계된 등명기의 성능 확인

3.1 필요 전광선속 계산

개발 목표치인 부동광도 35,000cd를 만족하기 위한 등명기의 최소 필요 전광선속을 LightTools를 활용하여 계산하였다.

개발 목표치의 최소 발산각인 5°(±2.5°)로 발산되는 가상의 PKG를 설정하고, 수평면 전체 영역인 360°로 균일한 배광이 형성 될 수 있게 72개의 가상의 PKG를 원형으로 등간격 배열하여 실험한 결과, 목표 부동광도 이상이 되는 PKG당 최소 광속은 335lm으로 총 24,120lm이 필요함을 확인하였다.

해당 전광선속은 광학계에 의한 손실율이 고려되지 않은 값이므로, 등명기에 사용되는 렌즈에 의한 광손실율을 20%로 가정하고, 목표 부동광도 35,000cd를 만족하기 위한 최소 전광선속을 28,944lm으로 계산하여 광학계 설계를 진행하였다.

개발에 사용될 PKG는 그림 2의 Cree社 XM-L2 모델(Cool White, U2 Group)로 사용 수량은 32개이며, 위에서 구한 최소 전광선속을 만족하기 위한 PKG 1개당 광속은 904.5lm으로 배광분포는 그림 3과 같다.

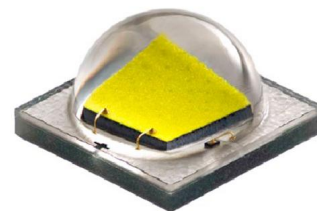


Fig. 2. Cree社 XM-L2 PKG

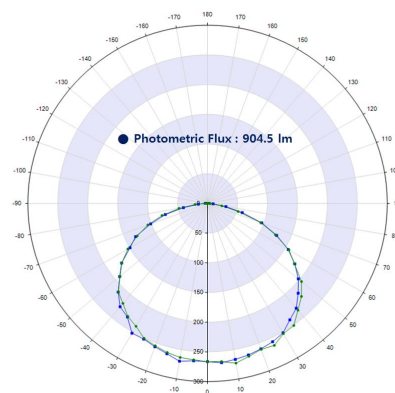


Fig. 3. Candela distribution of LED PKG

3.2 광학계 최적화

제작되는 렌즈의 재질은 TIR 렌즈와 외부 렌즈 모두 PMMA(Poly methyl methacrylate)이며, TIR 렌즈의 최적화 진행을 위해 그림 4와 같이 렌즈 중앙에 위치한 중심렌즈에서 LED PKG로부터 작은 각도로 방출되는 광속을 제어하고, 비구면 형상을 가진 렌즈 외곽의 반사면 곡선에서 LED PKG로부터 큰 각도로 방출되는 광속을 제어하였다[6]. 32개의 PKG가 수평면 360° 전체로 균일하게 발산하기 위해 수평 발산각이 11.25° 이상이 되면서 부동광도가 최적이 되는 방향으로 TIR 렌즈의 길이와 중심렌즈 곡률, 렌즈 외곽의 반사면 곡선, PKG의 실장 위치에 변화를 주어 최적화를 진행하였다.

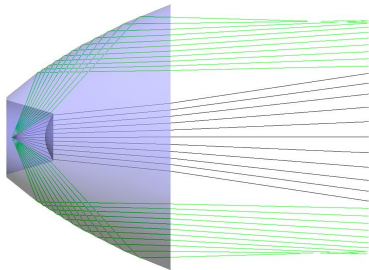


Fig. 4. Non-sequential ray tracing of TIR lens

최적화된 TIR 렌즈와 PKG를 그림 5와 같이 외부 렌즈 중심과 동일한 높이에 위치시키고, 외부 렌즈의 곡률 및 두께, 거리 등 TIR 렌즈와 외부 렌즈 간의 설계 변수를 조정하여 부동광도와 수직 발산각이 균형을 이루는 방향으로 외부 렌즈의 최적화를 진행하였으며, 광학계 최적화 결과를 표 4에 정리하였다.

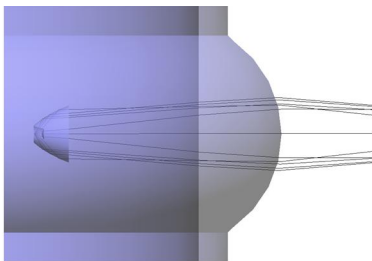


Fig. 5. Non-sequential ray tracing of optic system

Table 4. The results of simulation

	Fixed intensity	Vertical Divergence
TIR Lens	9,208 cd	-7.2°~+6.9°
Outside Lens	16,877 cd	-5.0°~+5.3°

3.3 PKG 및 TIR Lens Array 최종 확인

최종적으로 그림 6과 같이 외부 렌즈 내부에 PKG와 TIR 렌즈 32개를 배열하여 시뮬레이션을 진행하여, 부동광도 35,382cd, 수직 발산각 -3.1°~+2.5°로 개발 목표치를 만족함을 확인하였으며, 그 결과와 광도 분포를 표 5와 그림 7에 나타내었다.

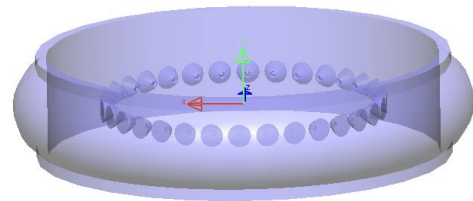


Fig. 6. PKG and TIR Lens Array

Table 5. The final simulation results of LED marine lanterns

평가 항목	단위	개발 목표치	결과
부동광도	cd	35,000	35,382
수직 발산각	°	-2.5~+4.0 +2.5~+4.0	-3.1 +2.5

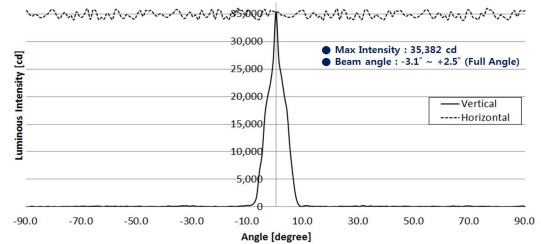


Fig. 7. Intensity distribution of LED flashing marine lanterns

기존 적층형 타입의 등명기 광학계 구조를 수직방향으로 소형화 한 단일 구조 광학계 등명기는 성능 면에서 기존 중형 등명기의 요구 성능을 만족하면서, 구

조적으로 단순화 및 경량화를 구현할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

TIR 렌즈를 활용하여 기존 중형 등명기의 적층형 광학계를 단일 구조의 광학계로 변경한 400mm 점멸식 중형 등명기를 설계하고, 목표 광학기준인 부동광도 35,000cd와 수직 발산각 $-2.5^{\circ} \sim -4.0^{\circ}$, $+2.5^{\circ} \sim +4.0^{\circ}$ 를 만족함을 확인하였다. 추후에 설계 결과를 바탕으로 등명기 시제품을 제작하여 공차 분석을 진행하고, 방수·방진 등의 환경 및 수명 시험 진행을 통해 신뢰성 검증을 수행할 계획이다.

본 연구는 전문연-중소기업 공동연구실지원 사업(N0001251), 광주녹색환경지원센터의 2014년도 연구사업비(14-2-70-71), 산업통상자원부 산업융합촉진사업(10053790)의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Ju-Seop Han, The Analysis on the Characteristics on Flasher Circuit of Domestic LED Lantern, The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 2014 Annual spring conference, 170-171, 2014.
- [2] Jae-hoon Jeong, A study on Trends and characteristics of LED lantern, The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 2015 Annual spring conference, 76-76, 2015.
- [3] Ministry of Oceans and Fisheries, Marine Lanterns (400mm Rotating) Standard.
- [4] Jin Pyo Hong, Development of LED HI-200 using High Power LED Package, The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 2010 Annual spring conference, 176-177, 2010.
- [5] Jae-Suk Yang, Influence of supporting structures on illumination performances of LED lenses, Luxpacifica, 2013.
- [6] Kwang-Woo Park, Optical Lens Design for Marine Lantern with Narrowing the Beam Angle Using a Large-Area COB-type LED, The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 2015 Annual spring conference, 9-9, 2015.

◇ 저자소개 ◇



고동현 (高東賢)

1987년 7월 13일생. 2013년 전남대 물리학과 졸업, 2015년 전남대 전기공학과 광원 및 조명시스템 전공 졸업(석사). 현재 한국광기술원 조명실용화연구센터 연구원 재직.



이윤철 (李玟徹)

1976년 8월 6일생. 현재 한국광기술원 조명실용화연구센터 선임연구원 재직.