《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 2, April 2020, pp. 81-87
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.2.081
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Study of a Searchlight Lens to Improve Optical Performance and Fabricability

Ye-Ji Jo and Mee-Suk Jung†

Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic University, 237, Sangidaehak-ro, Siheung 15073, Korea

(Received January 11, 2020; Revised January 23, 2020; Accepted January 23, 2020)

This study examines the design technology of searchlight optics featuring narrow beam angles and high luminous intensities. Halogen and xenon lamps, which are conventional searchlight sources, are vulnerable to vibration and shock, and are large and heavy, making them difficult to transport. In addition, the parabolic mirror located at the rear of the searchlight has the disadvantages of poor performance and low light efficiency, due to the assembly error produced during manufacturing. To solve this problem, a 1-kW halogen lamp is replaced by a 150-W high-power COB LED, and a high-efficiency TIR lens is designed to meet the target performance. Afterward, the TIR lens array is proposed to solve the surface error generated during optical injection. After a prototype is manufactured based on the designed optical system, the optical performance is confirmed to be excellent, by comparing it to that of a commercial halogen-lamp searchlight.

Keywords: Optical design, Lens design, Lighting optics, LED
OCIS codes: (220.3620) Lens system design; (220.4610) Optical fabrication; (220.4840) Testing

광학 성능 및 제작성 향상을 위한 탐조등 렌즈 연구

조예지 · 정미숙†

한국산업기술대학교 나노광공학과
㊀ 15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2020년 1월 11일 받음, 2020년 1월 23일 수정본 받음, 2020년 1월 23일 게재 확정)

본 연구에서는 좁은 지향각, 높은 최대 중심광도를 갖는 탐조등 광학계 설계 기술 연구를 진행하였다. 기존 탐조등 광원인 할로겐램프와 제논램프는 진동과 충격에 취약하며, 크기가 크고 무거워 운반에 많은 어려움이 있다. 또한 탐조등 후면부에 위치한 포물경은 제작 시 광원과 조립 오차에 따른 성능 저하와 낮은 광 효율의 단점을 지니고 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 1 kW 할로겐램프를 150 W급 고출력 COB LED로 대체하고 목표 성능을 만족하기 위한 고효율 TIR 렌즈를 설계하였다. 이후 광학계 사출 시 발생하는 표면 오차를 해결하는 방안으로 TIR 렌즈 어레이를 제시하여 제작 신뢰성을 확보하였다. 설계된 광학계를 바탕으로 시제품을 제작한 후 시중 할로겐램프 탐조등과 성능을 비교하여 광학 성능의 우수함을 확인하였다.

Keywords: 광학계 설계, 렌즈 설계, 조명 광학, LED
OCIS codes: (220.3620) Lens system design; (220.4610) Optical fabrication; (220.4840) Testing

I. 서 론

탐조등은 해안, 선박, 항공 등에 설치되어 재난방지 및 인명 구조 시 탐색용으로 사용되는 대표적인 특수조명이다. 항상 동작 상태를 유지하는 것이 아니라 긴급 상황 시 불규칙적으로 사용되므로 높은 내구성을 요구한다[1]. 종래의 탐조등은 일반적으로 그림 1과 같이 1 kW 이상의 할로겐(halogen) 및 제논(xenon)램프와 같은 단일 광원을 사용한다. 하지만 할로겐램프와 제논램프는 진동과 충격에 취약하며, 기구부가 무거워 운반에 많은 어려움이 있다. 따라서 탐조등의 높은 안정성과 수명을 위해서 고출력 LED를 이용한 탐조등 개발이 필수적이다.

탐조등은 원거리의 물체를 비추기 위한 조명 장치이기 때문에 광도가 강하면서 지향각이 최대한 작아야 한다. 종래의 탐조등은 해당 성능을 만족시키기 위해 주로 등기구 후면부에 포물경을 적용한다[2]. 하지만 포물경은 중심부로 방사되는 빛의 손실이 발생하여 광 효율이 매우 낮다. 또한 제작 시 광원의 중심점과 포물경의 중심점이 동일한 선상에 위치

†E-mail: msoptic@kpu.ac.kr, ORCID: 0000-0003-3430-876X
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

Fig. 1. Conventional searchlight.

하지 않을 경우 성능 저하가 우려된다. 따라서 전방향으로 빛을 방사하는 LED의 특성을 제어하면서 규격에 명시된 광학적 성능을 만족시키기 위한 광학계 연구가 필요하다.

따라서 본 논문에서는 기존 할로겐램프를 고출력 COB LED 광원으로 대체하여 중심광도 800,000 cd (국방규격 500,000 cd), 지향각 6° 이내의 높은 광 효율을 갖는 150 W 급 LED 탐조등 광학계 설계 방법을 제시하고, 제작 시 발생되는 사출 오차에 따른 성능 분석을 진행하고자 한다.

II. 본 론

2.1. 탐조등의 광학적 성능

탐조등의 광학적 성능은 중심광도 및 1 lux의 빛이 도달하는 거리로 나타내며 광 출력이 클수록, 지향각이 작을수록 광달 거리가 긴 특성을 가진다[3]. 이러한 광학적 성능에 관한 KS V 8469 국방 규격을 표 1에 나타내었다. 12인치 함정용 탐조등의 경우, 정격소비전력 1 kW 할로겐램프를 주로 사용하며 규격에 따르면 최대 중심광도 800,000 cd (500,000 cd in KDS)을 만족해야 한다. 또한 확산 방식일 경우, FWHM 6° 이하를 만족해야 한다. 본 논문의 LED 탐조등은 국방 규격에 제시된 30형, 1 kW 탐조등으로 중심광도 800,000 cd (국방규격 500,000 cd), 지향각(FWHM) 6° 이하를 기준으로 설계를 진행하고 표 2를 참고하여 15 m 거리에서 성능을 확인하였다.

2.2. 광원 선정

1 kW 할로겐램프를 대체할 수 있는 LED 사양을 모색하기 위해 종래의 탐조등 광학계인 포물경으로 성능을 비교하였다. 포물경의 가장 큰 특징 중 하나는 초점에서 나가는 빛을 반사시켜 축에 평행하게 내보낸다는 점이다[4]. 이러한 포물경을 설계하기 위해서는 직경과 초점을 정해야 한다. 본 연구에서는 표 3의 30형의 반사경 치수를 참고하여 직경 D는 350 mm, 초점 f_P는 150 mm로 포물경의 직경과 초점거리를 선정하였다.

광학 설계는 임의의 1 kW 할로겐램프와 원형 발광면을 가진 LED를 선정하고 포물경의 직경과 깊이에 따른 시뮬레이션을 통해 적합한 반사판을 적용하였다. 1 kW 할로겐램프를

Table 1. Optical performance specification of searchlight

Type	Rated power [W]	Max. luminous intensity [cd]	Full beam angle [°]
20	500	2.5×10^5	Diffusion type: 6° Concentration type: 2°
30	1,000	8.0×10^5	
40 / 50	1,000 / 2,000	1.8×10^6	
60	3,000	4.0×10^6	

Table 2. Light distribution measuring distance

Type	Measuring distance [m]
20	10
30	15
40 / 60	20
X type 50	70

Table 3. Specifications of reflectors

Type	Inside diameter [mm]	Outside diameter [mm]	Focal length [mm]
20	200	220	100 ± 5
30	300	330	150 ± 5
40	400	430	200 ± 5
50	500	530	250 ± 5
60	600	640	250 ± 5

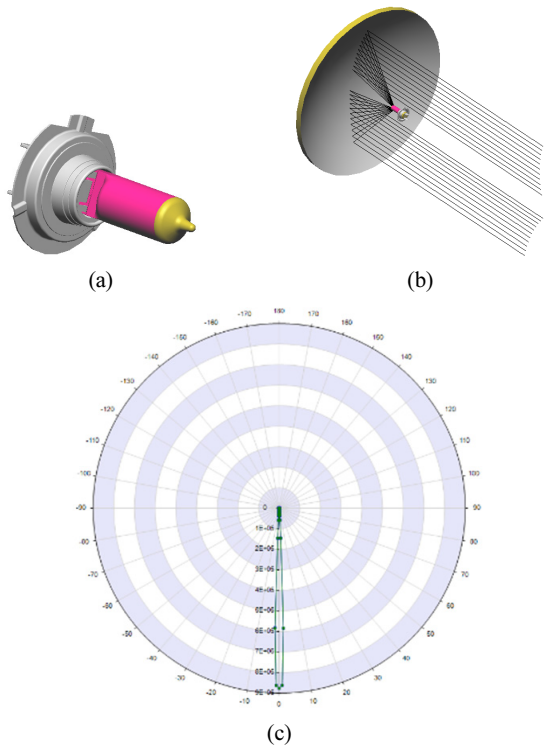


Fig. 2. Simulation results of the parabola reflector and the halogen lamp. (a) Halogen lamp. (b) Parabola reflector. (c) Intensity slice chart.

광원으로 포물경을 설계한 결과, 그림 2와 같이 지향각은 4.0°, 최대 중심광도는 888,260 cd, 광 효율은 18%로 확인되었다. 최소의 소비전력으로 이와 유사한 성능을 가지는 LED의 사양을 선정하기 위해 광량을 순차적으로 증가시킨 후 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 그 결과, 그림 3과 같이 150 W 이상에서 1 kW 할로겐램프와 유사한 성능을 나타내는 것을 확인하였고 이를 본 연구의 LED 사양으로 선정하였다.

150 W의 고출력을 가지는 광원을 선정하기 위해 본 연구에서는 COB LED를 사용하였다. COB LED란 여러 개의 CSP chip을 하나의 PGB 기판 위에 패키징한 것을 의미하며 발광부에 LED chip이 집약적으로 설계되어 비교적 작은 면적에서 고출력의 조명을 소형으로 제작이 가능하다[5]. 렌즈의 크기를 작게 하기 위해서는 광원의 크기를 작게 하는 것이 요구된다. 광원의 크기를 작게 하려면 CSP chip을 밀착시켜야 되고 숫자를 줄여야 한다. CSP chip의 숫자를 줄이는 것은 필연적으로 단위 광원당 입력되는 전력의 양이 증가한다는 의미가 된다. 이런 사항을 고려하여 COB LED의 크기를 줄이고, 광량의 손실을 최소화할 수 있도록 표 4의 성능과 그림 4의 광학 특성을 가지는 C type의 CSP chip을 선정하여 패턴 디자인을 진행하였다.

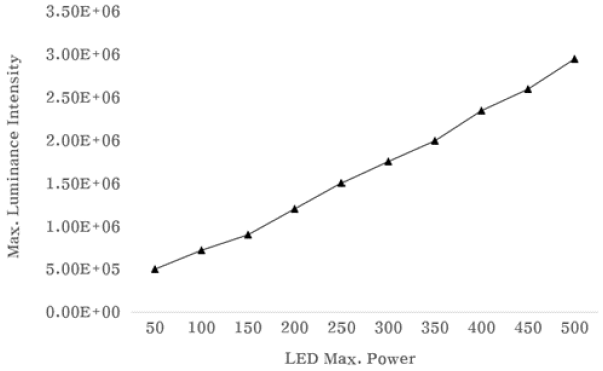


Fig. 3. Analysis of the parabola reflector and LED.

Table 4. Specification of the CSP chip

	A	B	C
Size	1.3 × 1.3	1.6 × 1.6	1.8 × 1.8
Forward current (I_f)	350 mA	350 mA	350 mA
Max. current	650 mA	1,000 mA	1,500 mA
Max. power	2.2 W	3.6 W	4.6 W
Flux @ I_f	≥140	Typ. 140	≥150

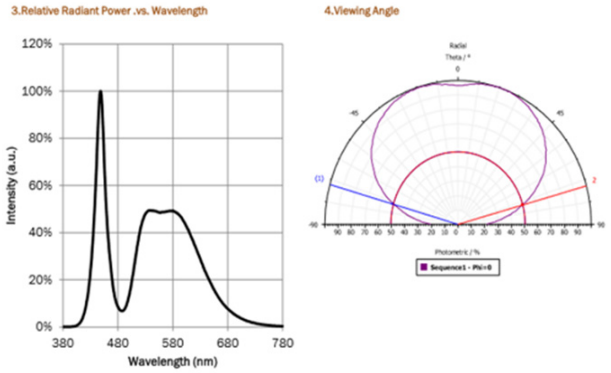


Fig. 4. Optical properties of the C-type CSP chip.

2.3. 광학계 선정

종래의 탐조등은 전방향으로 빛을 방사하는 광원을 제어하기 위해 2.2절과 같은 큰 포물경을 사용한다. 하지만 포물경 탐조등의 경우 제작 시 광원과 조립 오차에 따른 성능 저하와 낮은 광효율의 단점을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 높은 효율의 TIR 렌즈를 설계하여 목표 성능을 충족하고자 한다. TIR 렌즈를 이용한 광학계는 대부분 단일 광학계로 제작되어 있으며, 렌즈의 입사면, 출사면, 전반사면으로 나눠 설계가 된다. 광원으로부터 작은 각도로 방출되는 광속은 렌즈 중앙의 형상으로 제어되며, 큰 각도로 방출되는 광속은 내부 전반사 형상을 통해 제어된다[6]. COB LED의 발산각을 제어하는 TIR 렌즈의 표면은 그림 5와 같이 정의된다. COB LED의 중심을 기준으로 θ_i 이상 큰 각도로 방출되는 광선은 전반사면(3. TIR Surface)에 의해 제어되어 target plane의 가장자리에 도달한다. 하지만 θ_i 이하 작은 각도로 방출되는 광선은 전반사면에 도달하지 못하게 된다. 따라서 해당 발산각을 제어하기 위해서는 입사면(1. Enter Refractive Surface)을

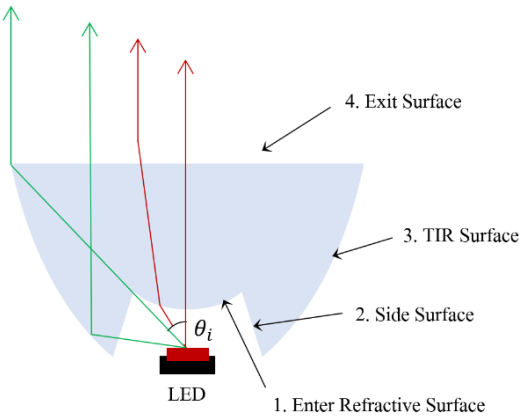


Fig. 5. Surfaces of the TIR lens.

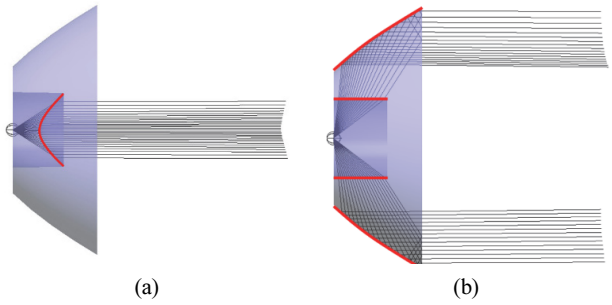


Fig. 6. Controlled surfaces according to the divergence angle. (a) Refractive surface ($0° < \theta_i < 40°$). (b) TIR surface ($40° < \theta_i < 90°$).

추가적으로 고려해야 한다. 본 연구에서는 그림 6과 같이 COB LED의 중심을 기준으로 $0° < \theta_i < 40°$ 범위는 입사면이 제어하도록 설계를 진행하였고 $40° < \theta_i < 90°$ 범위는 측면(2. Side Surface)과 전반사면이 제어하도록 설계를 진행하였다.

2.4. 1-Module TIR Lens 설계

2.2절에서 선정한 CSP chip 30개가 한 모듈에 집약적으로 배열되도록 패턴 디자인을 진행하였다. 그 결과, 소비전력 138 W, 발산각 120°, 광속 15,180 lm, 직경 14.3 mm을 가지는 그림 7(a)의 COB LED가 설계되었다. 해당 광원으로 TIR 렌즈의 최적 설계를 진행하였다. 렌즈 재질은 사출이 용이한 PMMA를 적용하였고 광학계 고정을 위해 직경 16 mm, 두께 3 mm의 실린더 다리와 두께 3 mm의 상판 취부를 추가하였다. 그 결과, 직경은 352 mm, 두께는 105 mm, 지향각은 4.55°, 최대 중심광도는 908,700 cd, 광 효율은 74.6%로 그림 7(b), 7(c)에서 확인할 수 있다.

2.5. TIR Lens의 사출 문제점

플라스틱은 유리 등의 재질에 비해 열변형이 심하므로 높은 치수정밀도를 내기 어려울 뿐 아니라 공정 변수가 많아 사출 조건을 제어하는데 많은 어려움이 있다. 특히 렌즈는 성능과 직결되는 표면 형상의 정밀한 제어가 요구되므로 사출 조건 결정에 따라 상당한 시간과 경험이 요구된다. 따라서 플라스틱 광학계의 제작을 위해서는 사출 시 형상 오차에 대한 예측이 필수적이다. 여러 형상 오차 중 가장 화두가 되는 문제점은 표면 오차이다. 표면 오차는 충진이 완료된 후 냉각과정에서 금형과 접촉하고 있는 렌즈의 표면과 렌즈 내부의 고화속도 차이로 인해 발생하는 것으로 예상한다[7]. 특히 TIR 렌즈는 다른 광학계와 달리 구조적인 측면에서 표면 오차를 발생시킨다. 그림 8에서 A와 B 영역의 큰 두께 편차는 순간적인 불균일성 유동과 수축 변형량으로 그림 9와 같은 표면의 평탄도를 감소시킨다. 이러한 표면 오차는 산란광을 증가시켜 최대 중심광도를 감소시키는 주 요인이므로 'surface flatness', 즉 출사면의 평면 편차에 따른 설계 분석이 필요하다.

본 논문은 렌즈의 크기와 출사면 평탄도에 따른 성능 변화와의 관계를 P-V를 통해 분석하였다. P-V (peak-to-valley)는 이상적인 광학 표면과 실제 광학 표면의 차이를 측정하는 데 사용되는 매개 변수이다. P-V는 광학 표면의 가장 높은 지점과 가장 낮은 지점의 높이 차이를 측정한다. 출사면의 평탄도를 감소시키기 위해 그림 10에서 임의 값 P_1, P_2를 지정한 후, $\overline{P_0P_1}$과 수평면이 이루는 각도 θ_{P1}과 $\overline{P_2P_3}$과 수평면이 이루는 각도 θ_{P2}를 산출하였다. 2.4절 1-Module TIR Lens의 출사면 직경을 기준으로 $-50 \leq \Delta R \leq +50$ 범위 내에서 직경을 변화하여 설계를 진행하였다. 이후 각각의 설계가 갖는 최대 중심광도(C)와 θ_{P1}, θ_{P2}를 적용한 후의 최대 중심광도(C')를 비교하였다. 두 값의 관계를 식 (1)의 최대 중심광도 변화량으로 나타내었다. 그림 11에서의 분석 결과, P-V에 따른 변화량은 크기가 감소할수록 적은 것을 확인할 수 있으며, 이는 설계 데이터와 사출 후 데이터의 성능 변화가 적은 것을 의미한다. 하지만 동시에 출사면의 직경 320 mm 기준으로 지향각 6° 이하를 만족하기 어려운 문제점이 발생한다.

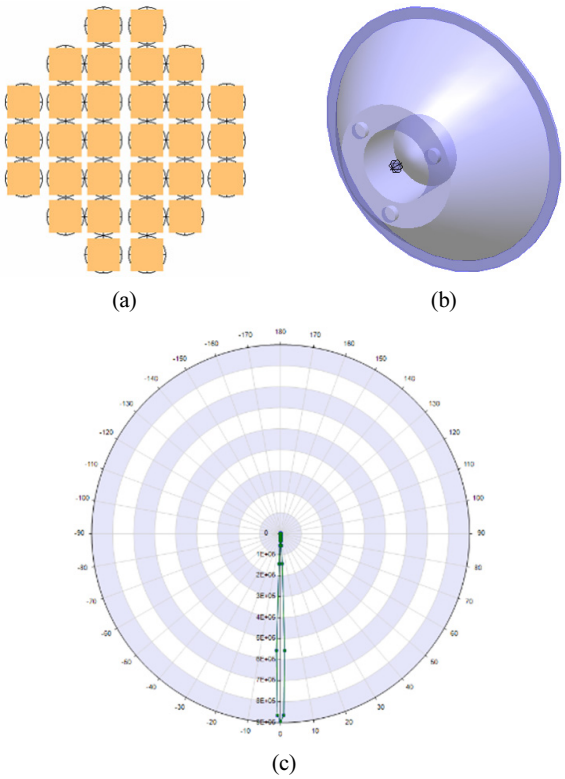


Fig. 7. 1-module TIR lens. (a) COB LED. (b) TIR lens. (c) Intensity slice chart.

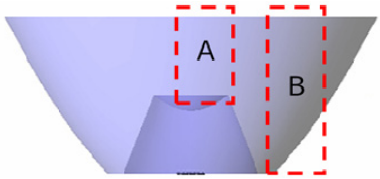


Fig. 8. Structural problems of the TIR lens.

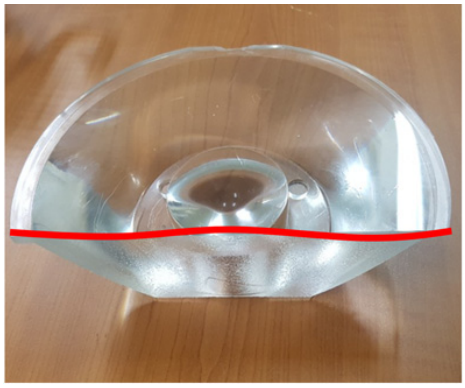


Fig. 9. Surface error of the TIR lens.

$$\triangle C = \frac{C - C'}{C}[\mathrm{cd}],\ (0 \le \triangle C \le 1) \quad (1)$$

여기서 C는 기존 최대 중심광도 값[cd], C'은 P-V 변화 후 최대 중심광도 값[cd]이다.

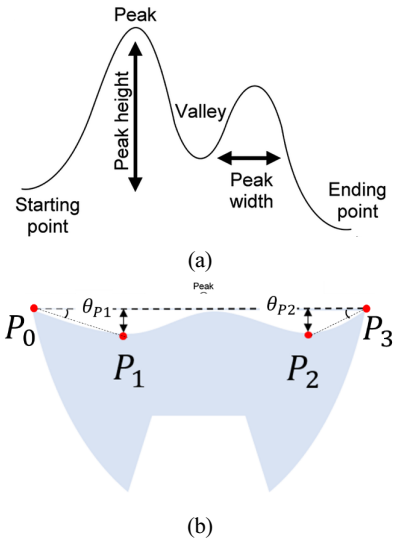


Fig. 10. (a) Peak-to-valley. (b) Peak-to-valley points of the TIR lens.

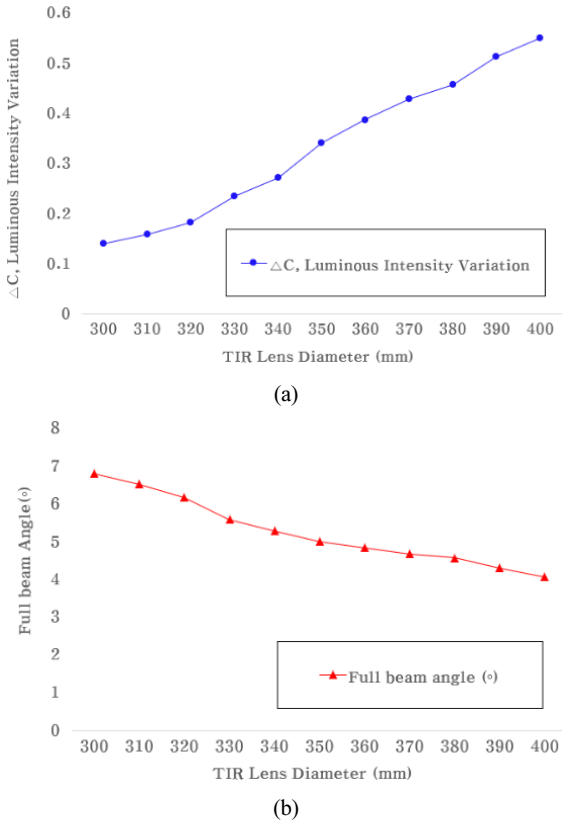


Fig. 11. Performance analysis by diameter. (a) Luminous intensity variation. (b) Full beam angle.

2.6. 광학계 재구성

2.4절의 경우 광원의 크기로 인한 최소 직경의 한계가 존재하므로 여러 매수의 TIR 렌즈를 사용하여 문제점을 해결하였다. 포물경의 직경 350 mm을 기준으로 성능을 확보한다고 가정할 때, 광학계의 매수에 따른 위치와 직경을 산출하였다. 너무 많은 LED와 렌즈를 사용할 경우 광원부와 모듈의 크기 및 무게 증가로 인해 이동성이 떨어지는 문제점이 발생하므로 최대한 원형으로 조사 면적을 조명하면서 목표 성능을 만족할 수 있는 광학계의 구성을 검토한 후 3개, 6개, 10개의 모듈로 이루어진 TIR 렌즈 어레이로 광학계를 재구성하였다.

2.7. 3-Module TIR Lens Array 설계

2.2절에서 선정한 CSP chip 30개가 3개의 모듈에 동일 개수로 배열되도록 패턴 디자인을 진행하였다. 그 결과, 소비전력 46 W, 발산각 120°, 광속 5,060 lm, 직경 8.6 mm을 가지는 그림 12(a)의 COB LED가 설계되었다. 해당 광원으로 TIR 렌즈의 최적 설계를 진행하였다. 렌즈 재질은 사출이 용이한 PMMA를 적용하였고 광학계 고정을 위해 직경 10 mm, 두께 3 mm의 실린더 다리와 두께 3 mm의 상판 취부를 추가하였다. 그 결과, 직경은 152 mm, 두께는 43 mm, 지향각은 4.91°, 최대 중심광도는 954,308 cd, 광 효율은 72.5%로 그림 12(b), 12(c)에서 확인할 수 있다.

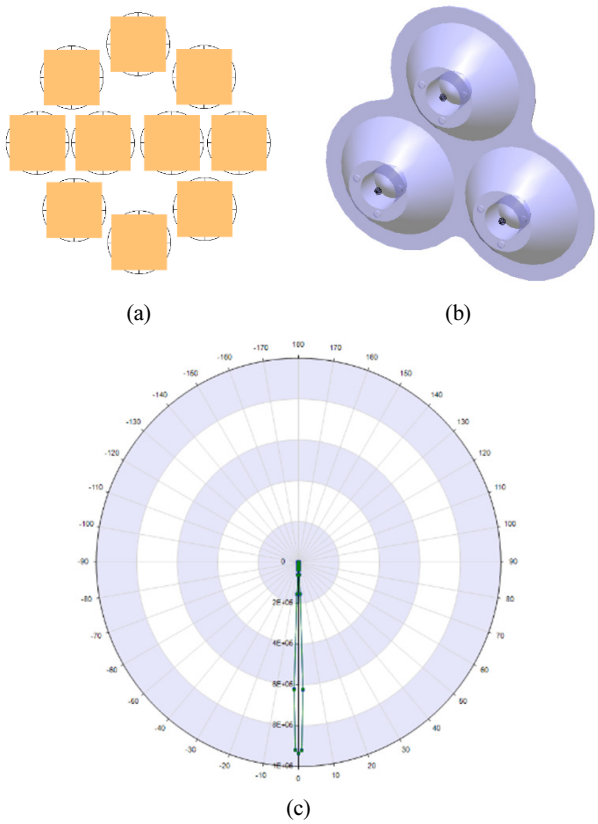


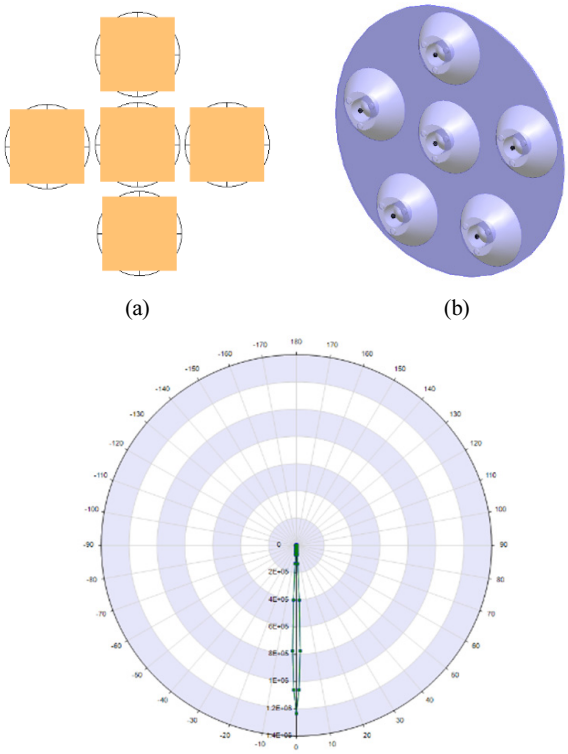
Fig. 12. 3-module TIR lens. (a) COB LED. (b) TIR lens array. (c) Intensity slice chart.

2.8. 6-Module TIR Lens Array 설계

CSP chip 30개가 6개의 모듈에 동일 개수로 배열되도록 패턴 디자인을 진행하였다. 그 결과, 소비전력 23 W, 발산각 120°, 광속 2,530 lm, 직경 6.1 mm을 가지는 그림 13(a)의 COB LED가 설계되었다. 해당 광원으로 TIR 렌즈의 최적 설계를 진행하였다. 렌즈 재질은 사출이 용이한 PMMA를 적용하였고 광학계 고정을 위해 직경 8 mm, 두께 3 mm의 실린더 다리와 두께 3 mm의 상판 취부를 추가하였다. 그 결과, 직경은 110 mm, 두께는 33 mm, 지향각은 4.86°, 최대 중심광도는 1,202,300 cd, 광 효율은 71.2%로 그림 13(b), 13(c)에서 확인할 수 있다.

2.9. 10-Module TIR Lens Array 설계

CSP chip 30개가 10개의 모듈에 동일 개수로 배열되도록 패턴 디자인을 진행하였다. 그 결과, 소비전력 13.8 W, 발산각 120°, 광속 1,518 lm, 직경 3.7 mm을 가지는 그림 14(a)의 COB LED가 설계되었다. 해당 광원으로 TIR 렌즈의 최적 설계를 진행하였다. 렌즈 재질은 사출이 용이한 PMMA를 적용하였고 광학계 고정을 위해 직경 6 mm, 두께 3 mm의 실린더 다리와 두께 3 mm의 상판 취부를 추가하였다. 그 결과, 직경은 80 mm, 두께는 23 mm, 지향각은 4.39°, 최대 중심광도는 1,505,900 cd, 광 효율은 71.3%로 그림 14(b), 14(c)에서 확인할 수 있다.



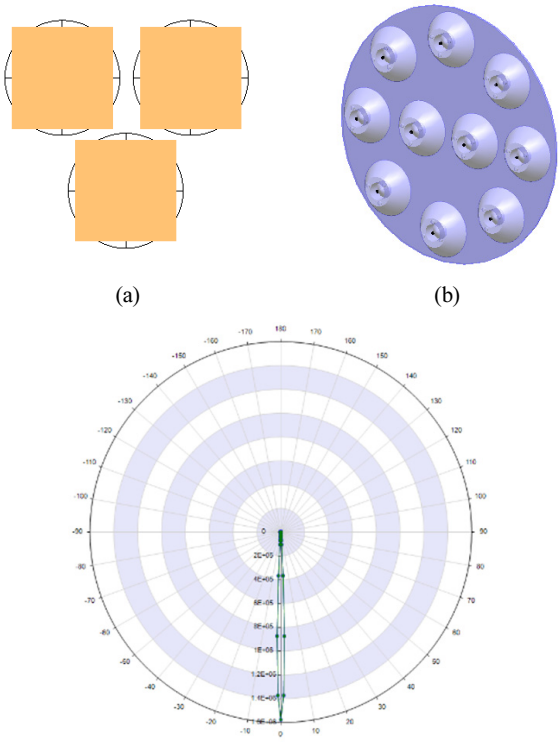
(a) (b) (c)

Fig. 13. 6-module TIR lens. (a) COB LED. (b) TIR lens array. (c) Intensity slice chart.

2.10. 광학계 제작 및 평가

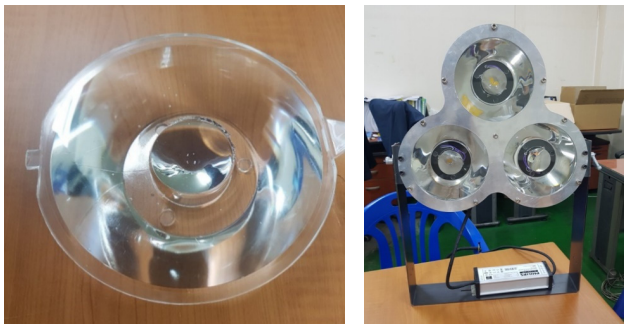
앞서 설계한 4개의 TIR 렌즈 모듈 중 사출이 불가능한 1-모듈 TIR 렌즈를 제외하고 렌즈의 매수가 가장 적은 3-모듈 TIR 렌즈 어레이 시스템을 시제작품으로 선정하였다. 그림 15(a)는 설계한 TIR 렌즈의 사출 후 이미지이며, 그림 15(b)는 방열판, 회로 등 기타 부품과 조립한 후의 이미지이다.

시제작 LED 탐조등의 성능을 확인하기 위하여 해당 규격에 명시된 조건 및 시험 방법에 따라 광학적 측정을 수행하였다. 평가는 한국광기술원을 통해 진행하였으며 본 논문의 탐조등과 시중에 있는 1 kW 탐조등을 15 m 거리의 벽면에



(a) (b) (c)

Fig. 14. 10-module TIR lens. (a) COB LED. (b) TIR lens array. (c) Intensity slice chart.



(a) (b)

Fig. 15. 3-module TIR lens searchlight prototype. (a) Mold-injected TIR lens. (b) Searchlight prototype.

Table 5. Evaluation results of commercial products and prototypes

	Reflector searchlight (1 kW halogen lamp)	TIR searchlight (150 W COB LED)
Measuring distance [m]	15	15
Max. luminous intensity [cd]	403,054	818,735
Full beam angle [°]	5°	4°

(Test Results)

REPORT No. : KOPTI-TL18-1345

3. Test Result

1) Max. Luminous intensity

TEST ITEM	UNIT	RESULT
Max. Luminous intensity	cd	818 735

2) Beam Angle

TEST ITEM	UNIT	RESULT
Beam Angle (Horizontal)	°	4

Fig. 16. Prototype evaluation report.

조사하여 최대 중심광도, 지향각을 비교하였다. 표 5의 1 kW 할로겐램프 탐조등의 평가 결과, 최대 중심광도는 약 403,054 cd로 측정되었다. 이는 KS 8469에서 규정한 800,000 cd의 약 50% 수준으로 현재 사용되고 있는 탐조등은 KS 규격에 명시된 광학적 성능을 전혀 만족시키지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 시제작 LED 탐조등의 최대 중심광도는 약 818,735 cd로 시중 제품보다 약 2배 정도 광학 성능이 우수하다는 것을 그림 16에서 확인할 수 있으며, 동시에 한국산업규격, 국방규격에 규정된 광학적 기준을 만족시켰다. 또한 가장 성능이 낮은 3-모듈 TIR 렌즈 어레이의 성능 확보로 다른 시스템에서도 제작 신뢰성 확보가 가능하다고 판단된다.

III. 결 론

본 논문에서는 1 kW 할로겐램프 광원을 LED로 대체하여 목표 지향각, 최대 중심광도를 만족하는 탐조등 광학계 설계 기술 연구를 진행하였다.

탐조등은 긴급 상황 시 원활하게 동작하기 위해 높은 내구성을 요구하는데, 기존 탐조등 광원인 할로겐램프와 제논램프는 진동과 충격에 취약하며, 탐조등 후면부에 위치한 포물경은 제작 시 광원과 조립 오차에 따른 성능 저하와 낮은 광효율의 단점을 지니고 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 1 kW 할로겐 조명을 150 W급 COB LED로 대체하고 목표 지향각과 최대 중심광도를 만족하도록 전반사면과 입사면을 분리하여 TIR 렌즈 설계를 진행하였다.

또한 단일 모듈로 설계된 대구경 TIR 렌즈가 갖는 사출 문제점을 제시하고 이를 해결하기 위한 방법으로 TIR 렌즈 어레이 설계를 제안하였다. 3 모듈, 6 모듈, 10 모듈의 TIR 렌즈 어레이 설계를 진행하였고 모두 30형 탐조등 국방 규격인 목표 지향각 6° 이내, 최대 중심광도 800,000 cd 이상을 만족하는 것을 확인하였다.

이후 3-모듈 TIR 렌즈로 시제작을 진행한 후에 한국광기술원에 성능 평가를 의뢰한 결과, 지향각 4°, 최대 중심광도 818,735 cd로 시중에 있는 1 kW 할로겐램프 대비 약 2배 이상의 광학 성능을 갖는 것을 확인하였다. 이로써 TIR 렌즈 어레이를 이용한 탐조등이 성능과 제작성 면에서 뛰어난 이점 갖는 것이 입증되었으며 이는 차후에 좁은 지향각과 고광도를 가지는 조명 설계에 큰 역할을 할 것으로 보인다.

References

1. S. J. Kim, “A study on the design of a high power LED searchlight,” M.S. Thesis, Korea Maritime & Ocean University, Busan (2014).
2. T. S. Kim, “Design and fabrication of an LED searchlight for naval vessels,” M.S. Thesis, Korea Maritime & Ocean University, Busan (2016).
3. A. R. Lee, “Study on thermal properties of high-power LED searchlight,” M.S. Thesis, Pukyong National University, Busan (2014).
4. J. S. Lee, Y. J. Jo, H. H. Lee, M. S. Kong, D. H. Kang, and M. S. Jung, “A study of lens design technique for proximity exposure using a UVA LED,” Korean J. Opt. Photon. **30**, 146-153 (2019).
5. H. C. Song, “A study on the thermal radiation of 50 W COB LED module for high efficiency LED lighting,” M.S. Thesis, Chonbuk National University, Jeon-ju (2016).
6. J. S. Yang, “Study on design method of a LED lens with a single or multiple freeform surfaces for improving its luminous flux efficiency,” Doc. Dissertation, Inha University, Incheon (2017).
7. T. S. Kwak, H. Ohmori, and W. B. Bae, “A study on searching method of molding condition to control the thickness reduction of optical lens in plastic injection molding process,” J. Korean Soc. Precision Eng. **21**, 27-34 (2004).