

365 nm 파장대역 고투과율 실리콘 수지 TIR 렌즈 및 고지향성 노광기 광원모듈 제작

성준호^{1,a}, 유순재¹, Kawan Anil^{1,2}, 정미숙³

¹ 선문대학교 전자공학과 광전자반도체연구실

² 주식회사 라이트전자 연구소

³ 한국산업기술대학교 나노-광 공학과

Fabrication of 365 nm Wavelength High Transmittance Silicone Resin TIR Lens and High Directivity Light Source Module for Exposure System

Jun Ho Sung^{1,a}, Soon Jae Yu¹, Kawan Anil^{1,2}, and Mee Suk Jung³

¹ Department of Electronic Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

² Institute of Research and Development, Lite Co., LTD., Seoul 08511, Korea

³ Department of Nano-optical Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung 15073, Korea

(Received January 29, 2018; Revised March 2, 2018; Accepted March 6, 2018)

Abstract: A high directivity TIR (total internal reflection) lens in the UV-A region was designed using a silicone resin, and a UV light source module with a maximum irradiation density of 150 mW/cm² was fabricated. The beam angle of the TIR lens was designed to be 8.04° and the maximum diameter of the TIR lens was \varnothing 13.5. A silicone resin having a UV transmittance of 93% and a refractive index of 1.4 at a wavelength of 365 nm was used, and the lens was manufactured using an aluminum mold, from which silicone could be easily released. The module was fabricated in a metal printed circuit board of COB (chip on board) type using a 0.75×0.75 mm² UV chip. A jig was used to adjust the focal length between lens and chip and to fix the position of the lens. The optical characteristics such as illumination distributions of the lens and module were designed using 'LightTools' optical simulation software. The heat dissipation system was designed to use a forced-air cooling method using a heat-sink and fan.

Keywords: TIR lens, High directivity, Ultraviolet, Light source, Exposure system

1. 서론

자외선(UV) LED는 디스플레이, IT 제조 및 보건·의료, 건축 등의 청정 생산 분야에서 경화, 몰딩, 살균, 표면 처리 등의 특성으로 유용하게 이용할 수 있

다 [1-3]. 그러나 UV LED의 낮은 출력 [4]과 렌즈 시스템에 일반적으로 사용하는 석영 재료의 성형 비용이나 가공기술에 어려움이 있어 응용에 한계가 있다. 특히 노광기용 광원은 높은 분해능을 가지기 위해 평행광 특성의 고지향성 광원을 필요로 하며 [5,6], PCB (printed circuit board) 제작에 사용하는 노광기 광원의 경우에는 8° 이하의 높은 지향성을 가지는 광원이 요구된다.

종래의 노광기 광원에서 사용하던 수은등은 2020년부터 환경규제가 시작될 가능성이 있다 [7]. 또 에너지

a. Corresponding author; sjh9291@sunmoon.ac.kr

Copyright ©2018 KIEEME. All rights reserved.
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

효율이나 광학적 렌즈 시스템의 이용 측면에서 불편한 점이 많다 [6].

UV LED 램프는 최근에 실리콘 렌즈 몰딩기술이 발달하면서 50° 정도의 지향각과 1,000 mW 이상의 높은 방사속이 얻어지는 제품이 출시되고 있다. 점광원 특성의 LED를 이용하여 고지향성 광원 및 광원모듈의 기술 개발이 이루어진다면, 회로기판용 노광기에서 광원 램프의 비용 문제를 크게 개선할 수 있을 것이다. 다만 8° 이하의 높은 지향성을 얻기 위해서는 렌즈나 칩의 크기 같은 제한 요소들을 고려해야 한다. 또 최근에 개발되고 있는 비정질 불소 중합체(amorphous fluoropolymer) 같은 고투과율의 몰딩재료 기술 [8]은 노광기 광원 렌즈 시스템의 규모를 획기적으로 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구에서는 365 nm 파장 영역에서 투과율 93%, 굴절률 1.4의 PDMS (polydimethylsiloxane) 실리콘 수지를 이용하여 고지향성 TIR (total internal reflection) 렌즈를 설계하고, 알루미늄(Al)으로 금형을 만들어 렌즈를 제작하였다. 또 $0.75 \times 0.75 \text{ mm}^2$ 크기의 UV LED Chip을 사용하여 $900 \times 50 \text{ mm}^2$ 크기의 COB (chip on board) 형태의 자외선 광원모듈을 제작하고 광학적 및 열 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

렌즈 설계는 'LightTools' 광학 시뮬레이션 프로그램을 이용하였으며, PDMS 실리콘 수지 재료를 사용하여 8° 이하의 지향각을 갖도록 설계하였다.

도움(Dome) 형태의 비구면 렌즈 설계는 시뮬레이션 결과, 8° 이하의 고지향 특성을 가지기 위해서는 렌즈의 높이가 크게 증가하였다. 동시에 높이가 증가하면서 렌즈의 광 투과율이 감소하기 때문에 광 효율이 47%로 떨어지는 현상이 나타났다.

광 효율을 최대화하기 위해 도움형 비구면 렌즈를 대신하여 임계각보다 큰 각도로 입사하는 빛이 매질의 경계 면에서 모두 반사되는 내부전반사 구조의 TIR 렌즈를 설계하였다. 설계된 TIR 렌즈의 형상, 지향 특성 및 조사 분포 특성을 그림 1~3에 나타내었다.

그림 1에 나타난 TIR 렌즈는 외경 $\varnothing 13.5$, 높이 5.75 mm의 크기를 가진다. 실리콘으로 채워지지 않은 렌즈 내부는 내경 $\varnothing 4.6$, 높이 3.8 mm를 가진다. 그림 1에서 LED는 렌즈 아래 부분의 정중앙에 위치하며 이때, 96.408%의 집속 효율과 8.04° 의 지향 특성을 나타낸

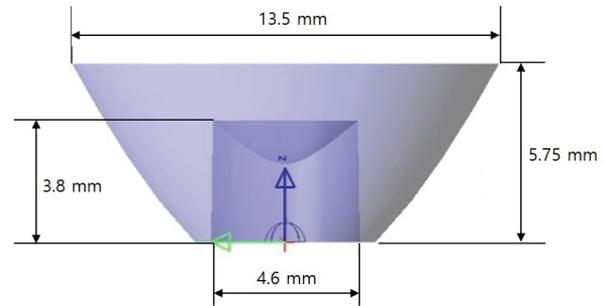


Fig. 1. Shape and size of the designed TIR lens.

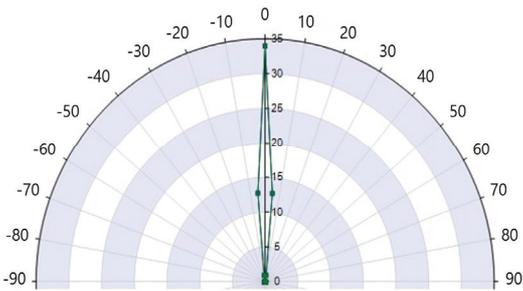


Fig. 2. Beam angle of the designed TIR lens.

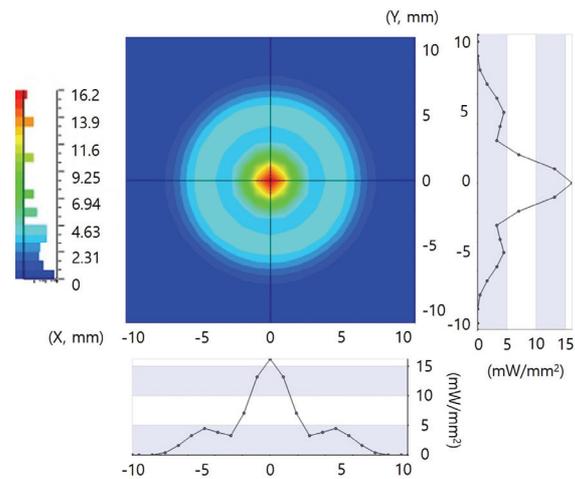


Fig. 3. Illuminance distribution of the designed TIR lens.

다. 지향 특성을 그림 2에 나타내었다. 이때, 시뮬레이션에 사용한 LED는 $1.1 \times 1.1 \text{ mm}^2$ 의 크기, 파장 365 nm, 총 광속 760 mW 및 방사각 120° 의 사양을 가진다. 또 조사거리 5 mm에서의 TIR 렌즈의 조사밀도 특성을 그림 3에 나타내었다. 중앙부의 최대 조사밀도는 $1,619 \text{ mW/cm}^2$ 으로 확인되었다.

이러한 단일 LED 램프 시뮬레이션 결과를 활용하여 노광기 광원모듈을 설계하였다. 광원모듈은 조사거리 120 mm에서 조사밀도 120 mW/cm² 및 균일성 90% 이상을 가지도록 동일하게 'Light Tools' 시뮬레이션을 이용하여 설계하였다.

설계된 모듈은 900×50 mm² 이내의 광원부 영역에 162개의 LED가 배치되었으며 500 mA의 정격 전류에서 350 W의 소비전력을 가진다. 렌즈는 경면 가공이 용이한 Al 금형으로 캐스팅 성형하여 제작하였다. Al 소재의 금형을 사용하였기 때문에 별도의 이형제 없이 실리콘 렌즈를 이형분리 할 수 있었다. LED 칩의 위치 및 렌즈 초점을 정중앙에 맞추기 위해 COB 회로기판에 LED와 렌즈의 위치를 표시하였으며, 위치를 고정할 수 있도록 지그를 제작하였다.

모듈 구동에는 450 W의 SMPS (switching mode power supply)와 18 병렬의 정전류 회로를 이용하였다. 모듈의 방열을 위해 규격 930×230×60 mm³, 두께 1.5T의 Al 케이스를 제작하여 열이 광원부에 집중되지 않도록 하였으며, 70 CFM (cubic feet per minute)의 공기를 배출하는 80×80 mm² 크기의 FAN을 설치하여 강제 공냉이 가능하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 TIR 렌즈의 지향 특성을 그림 4에 나타내었다. 8°의 지향각을 가지는 대칭성이 좋은 예리한 스펙트럼을 보여준다. 이때 방사속은 500 mA의 전류에서 295 mW이다.

다만 일부 샘플에서 지향각이 설계 값과 최대 4°의 오차가 발생하였다. 칩의 위치 및 렌즈의 초점거리 차이에 따라 이러한 지향각 차이가 발생할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다. 표 1에 위치에 따른

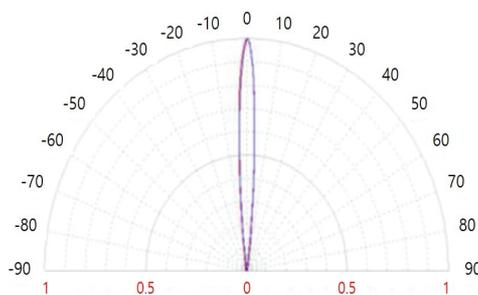


Fig. 4. Beam angle of manufactured TIR lens.

지향각 오차 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

노광기 광원 모듈 설계에 필요한 렌즈의 광학 특성을 확인하기 위해 노광기의 작동거리와 동일한 120 mm에서 램프의 광도 특성을 조사하였다. 측정에 사용한 칩은 0.75×0.75 mm² 크기의 수직 전극구조이며 365 nm 파장의 에너지를 가진다. 그리고 500 mA의 정격 전류에서 620 mW의 방사속을 보여 준다. 칩 상태와 반구형 몰딩 상태 및 TIR 렌즈를 장착한 광원을 각각 300 mA 전류로 구동하여 조사밀도 측정기 'UVI CURE PLUS II'를 사용하여 측정하였다. 칩 상태에서 1.39 mW/cm², 몰딩 상태에서는 1.42 mW/cm², TIR 렌즈를 장착한 상태에서는 53.25 mW/cm²로 칩 상태나 몰딩 상태에 비하여 TIR 렌즈 광원에서 38배 높은 조도가 얻어짐을 알 수 있다.

그림 5에 광원모듈의 조사 분포 설계 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 광원모듈은 평균 121.34 mW/cm², 최대 127.13 mW/cm²의 조사밀도와 95%의 균일성을 가지는데, PCB 노광기용 광원에 적용하기에 충분한 것으로 평가되었다 [9].

실제 제작에서 모듈의 회로기판을 가로축의 길이를 고려하여 세 부분으로 나누어 제작하였고, 케이스 내부에 SMPS 및 정전류 회로 드라이버를 설치하였다. 제작한 광원모듈의 방사 특성을 평가하였다. 그림 6은 가로축 800 mm, 세로축 50 mm의 조사 영역에 입사하는 자외선 조사밀도 특성을 나타낸다. 이때 조사 영역은 모

Table 1. Result of beam angle error simulation.

Starting point	X-axis +0.3 mm	X-axis -0.3 mm	Z-axis +0.3 mm	Z-axis -0.3 mm
Angle 8.0755°	Angle 8.3117°	Angle 8.3084°	Angle 9.5007°	Angle 12.371°

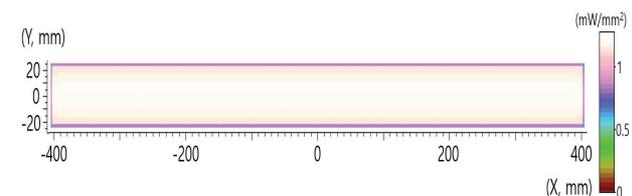


Fig. 5. Simulation of light source module.

(Unit : mW/cm²)

25	117.6	115.7	113.8	120.3	126.8	122.2	117.6	117.8	118.1
	124.6	129.2	130.8	135.4	141.2	135.5	133.5	128.6	124.5
0	133.5	142.7	147.9	148.2	148.6	148.9	149.5	145.2	135.0
	123.5	128.4	131.9	136.6	141.4	137.8	134.4	129.8	124.8
-25	113.6	114.7	116.0	125.0	134.1	126.7	119.3	119.1	118.9
		-400	-300	-200	-100	0	100	200	300
		X-Axis (mm)							

Fig. 6. Irradiation density of light source module.

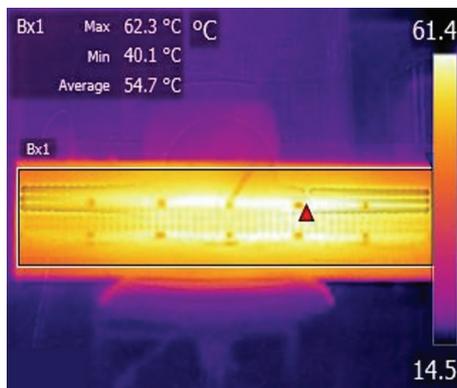


Fig. 7. Thermal image of the light source module.

들의 광원부에서 120 mm 떨어진 거리에 위치한다.

각각의 UV LED는 500 mA, 3.9 V로 구동하였으며, 모듈의 안정화를 고려하여 구동 30분 후에 측정하였다. 측정기는 'UVI CURE PLUS II'를 사용하였다. 조사밀도는 평균 131.5 mW/cm², 최대 150 mW/cm²으로 측정되었으며, 균일성은 86%로 나타났다. 최대 조사밀도가 설계 값과 20 mW/cm² 정도의 차이가 발생한 이유는, 칩의 위치와 렌즈 초점거리 차이 및 시뮬레이션에서 칩의 광선 추적 자료와 실제 칩의 광선 사이의 오차에서 비롯하는 것으로 생각된다. 또한 중앙부분의 집광도가 설계 값보다 높게 나타나는 현상도 동일한 이유인 것으로 생각된다. 제작된 광원모듈의 조사밀도 특성은 평균 조사밀도가 설계 값과 7.7%의 차이가 있지만, PCB 노광기용 광원에 적용하기에 충분할 것으로 평가된다 [9].

광원모듈의 열 특성 평가를 위해 상온에서 500 mA의 전류로 40분 동안 모듈을 구동한 후, 열화상 카메라를 이용하여 온도를 측정하였다. 최고 60.3°C, 최저 40.5°C, 평균 54.5°C의 온도가 확인되었다. 모듈 중앙부에서 최고 온도가 측정되었는데 중앙부의 방열 특성

이 측면에 비하여 떨어지고, 이 부근에 설치한 SMPS 및 정전류 회로에서의 발열이 원인인 것으로 생각된다. 구동 시간에 따른 온도 변화 특성을 조사하기 위해 모듈을 2시간 동안 연속적으로 구동한 후, 열화상 카메라를 이용하여 다시 온도를 측정하였다. 측정된 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 Bx1은 광원모듈의 온도 분포를 나타낸다. 측정된 온도는 최고 62.3°C, 평균 54.7°C로 확인되었다.

4. 결론

365 nm 파장대역에서 높은 투과율을 가지는 PDMS 실리콘 수지를 이용하여 TIR 렌즈를 제작하고 이 렌즈를 사용하여 COB 형태의 노광기 광원모듈을 제작하였다.

TIR 렌즈는 365 nm 파장에서 93%의 투과율, 굴절률 1.4의 PDMS 실리콘 수지를 사용하였으며, 외경 Ø13.5, 높이 5.75 mm의 크기로 'Light Tools' 시뮬레이션을 이용하여 설계하였다. 렌즈를 0.75×0.75 mm² 크기의 칩에 장착하였을 때 8°의 지향각을 나타내었다. 렌즈 제작은 Al 재료의 금형을 사용하였다.

광원모듈의 조사 분포는 광선 추적 자료를 이용하여 렌즈와 동일하게 'Light Tools'로 설계하였다. 900×50 mm² 크기의 광원부에 UV LED와 제작한 TIR 렌즈를 배치하여 모듈을 제작하였다. 광 조사밀도 특성은 작동 거리 120 mm에서 500 mA의 전류로 구동하여 최고 150 mW/cm²의 높은 조사밀도를 나타내었으며 동시에 86%의 높은 균일성을 나타내었다.

열 특성은 모듈을 상온에서 2시간 연속 구동하였을 때, 최고 62.3°C, 평균 54.7°C로 측정되었다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술 평가관리원(KEIT)의 지원을 받아 수행된 연구입니다 (No.10053149).

REFERENCES

- [1] M. Mori, A. Hamamoto, A. Takahashi, M. Nakano, N. Wakikawa, S. Tachibana, T. Ikehara, Y. Nakaya, M. Akutagawa, Y. Kinouchi, *Med. Biol. Eng. Comput.*, **45**, 1237 (2007). [DOI: <https://doi.org/>]

- 10.1007/s11517-007-0263-1]
- [2] I. S. Jang and J. Y. Kim, *Lighting · electrical equipment*, **19**, 14 (2005).
- [3] S. Y. Yu, E. H. Bong, S. K. Kim, and S. Kim, *Proc. KSPE 2011 Spring Conference* (KSPE, Jeju, 2011) p. 1059.
- [4] D. Morita, M. Yamamoto, K. Akaishi, K. Matoba, K. Yasutomo, Y. Kasai, M. Sano, S. I. Nagahama, and T. Mukai, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 5945 (2004). [DOI: <https://doi.org/10.1143/jjap.43.5945>]
- [5] H. M. Choi, Master, *Design of Parallel Exposure Optical System*, Korea Polytechnic University, Gyeonggi (2005).
- [6] *Philoptics, First Development of Exposure Machine using UV LED Light Source*, *etnews*, October 6, 2015.
- [7] *Mercury batteries and fluorescent lamps production prohibited from 2020*, JoongAng Ilbo, January 21, 2013.
- [8] S. Nagai, K. Yamada, A. Hirano, M. Ippommatsu, M. Ito, N. Morishima, K. Aosaki, Y. Honda, H. Amano, and I. Akasaki, *Jpn. J. App. Phys.*, **55**, 082101 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.082101>]
- [9] SEIMYUNG VACTRON, UV EXPOSURE, http://www.alluvkorea.com/uv_exposure (2018).