

365 nm 및 385 nm SMD LED와 TIR 바형 렌즈를 이용하는 고밀도 고균일성 특성의 경화용 광원모듈 제작

정필홍¹, 김범진¹, 김영진¹, 전동규¹, 김호민¹, 김재현², 김형민², 이규성²,
Kawan Anil¹, 박응렬¹, 유순재¹ , 안민준³, 황도원³

¹ 선문대학교 전자공학과

² 선문대학교 디스플레이반도체공학과

³ 주식회사 알파플러스 부설연구소

Fabrication of High Density and High Uniformity Irradiation Light Source for Exposure Curing System Using 365 nm and 385 nm Wavelength SMD LED and High Transmittance Silicone Resin TIR Bar Type Lens

Pil Hong Jeong¹, Beom Jin Kim¹, Yeong Jin Kim¹, Dong Gyu Jeon¹, Hyo Min Kim¹, Jae Hyeon Kim², Hyeong Min Kim²,
Gyu Seong Lee², Kawan Anil¹, Eung Ryul Park¹, Soon Jae Yu¹, Min Jun Ann³, and Do Won Hwang³

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

² Department of Display Semiconductor Engineering, Sunmoon University, Asan 31460, Korea

³ Semiconductor Division, Institute of Alpha Plus Co., Ltd., Asan 31409, Korea

(Received January 30, 2024; Revised February 14, 2024; Accepted February 14, 2024)

Abstract: An irradiator is developed using two UVA wavelength ranges of SMD LEDs as a curing light source. This module has dimensions of 545×111×300 mm³ and is equipped with a TIR bar-shaped lens made of PDMS silicone resin. The developed irradiator offers high uniformity, with 89% in the centerline of the horizontal axis direction, for two different wavelength ranges of 365 nm and 385 nm. The radiation intensity from the light source module shows highly directional characteristics, and the irradiator provides a maximum irradiance of 1,634 mW/cm² at a working distance of 50 mm. During the initial 5 minutes of operation, the irradiance experiences a rapid decrease. However, this issue is addressed by optimizing the LED's current reduction characteristics and managing the Transistor's temperature rise in the constant current circuit. After continuous operation for approximately 60 minutes. The highest temperature, near the central part of the irradiating surface, reaches 69.7°C, while the lowest temperature, near the edges, is 41.1°C.

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

✉ Soon Jae Yu; sjy@sunmoon.ac.kr

Copyright ©2024 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.

1. 서론

자외선(UV) LED (light emitting diode)는 반도체·디스플레이·IT 제조 및 보건·의료, 건축 등의 청정생산 분야에서

경화, 몰딩, 살균, 표면처리 등의 목적으로 종래의 수은등을 대체하여 유용하게 이용할 수 있을 것으로 기대되고 있다 [1,2]. 그러나 UV LED의 낮은 출력특성과 렌즈 시스템에 일반적으로 사용하는 석영 재료의 성형 비용, 가공기술 등에 어려움이 있어 여러 응용에는 아직 한계가 있다 [3,4].

경화용 조사기 광원은 고균일성 특성은 물론 높은 조사 밀도 특성을 필요로 하는데, 특히 PCB (printed circuit board) 제작과 같은 정밀 공정에서 사용하는 광원의 경우에는 PCB 기판에 빔 입사각, 두 가지 이상 파장 에너지 영역의 광속 비율, 85% 이상의 균일성 및 1,500 mW/cm² 이상의 고밀도 조사 특성을 가지는 광원이 요구된다 [5,6]. 특히 종래의 생산 공정에서 광원으로 사용하던 수은등은 2022년부터 환경규제로 사용하기에 많은 제약이 있으며, 또 에너지 효율이나 광학적 렌즈 시스템의 이용 측면에서도 불편한 점이 많다 [7].

최근 UV 실리콘 재료 및 렌즈 몰딩기술이 발달하면서 지향각 8°의 고지향 특성과 2,000 mW 이상의 높은 방사속 특성의 LED SMD (surface mounted device) 제품이 출시되고 있다. 특히 자외선 영역의 반도체 웨이퍼 기술이 발달하면서 265 nm에서 385 nm 영역까지 수은등의 넓은 에너지 대역에서 대체 가능한 자외선 광 특성을 구현하는 것이 가능하게 되었다 [8].

여기에서는 최근의 4차 산업기구나 미래 모빌리티 등 고부가가치 청정 제조기술의 중요한 공정기술 개발을 목표로, 최초로 SMD 타입 LED를 사용하는 고지향 특성 TIR (total internal reflection) 바 렌즈를 제작하고, 고밀도 조사특성 및 두 파장 에너지 대역의 LED를 일정한 세기의 비로 분포시켜 고 균일 특성을 가지는 선조사기 광원 및 조

사장치를 개발하였다 [3,9].

UVA (근자외선) 파장대역에서 투과율 93%, 굴절률 1.4의 PDMS (polydimethylsiloxane) 실리콘 수지를 이용하여 TIR 바 렌즈를 제작하고, Al 금속 회로기판을 사용하여 534×30 mm² 영역에, 365 nm와 385 nm 두 파장 영역의 LED SMD 광원을 균일한 조사 밀도가 되도록 배치하여 광원모듈을 제작하였다. 조사 밀도 디지털 제어를 위한 RS232C 통신 제어기술을 이용하는 조사장치를 제작하고, 광학적 및 열적 특성을 평가하였다.

2. 실험 방법

TIR 렌즈는 길이 534 mm, 높이 5.6 mm의 크기로 세로 방향 35°의 지향각을 가지도록 설계 제작되었으며, 광원모듈은 365 nm 파장 SMD LED 2열과 385 nm 파장 SMD LED 1열로, 합 3열을 배치하였다. ‘LightTools’ 시뮬레이션을 이용하여, 500×25 mm² 조사 영역에서 에너지 조사 밀도 3:1이 되도록 하여 각각 2개의 파장 영역에서 고균일성 특성을 가지도록 설계하였다.

설계한 광원모듈의 LED 배치를 그림 1에, 조사 밀도 분포 및 광원모듈의 가로축 조사 밀도와 세로축 (작업 방향) 조사 밀도 특성 및 각각의 조사 밀도 균일 특성을 그림 2에 나타내었다.

그림 1에서 365 nm 파장과 385 nm 파장 영역 LED SMD를, 가로 방향으로 위아래 부분에 각각 2열과 가운데에 1열로, 합 3열을 배치하였는데, LED 발열 특성과 두 에너지 영역의 조사 강도를 고려하여 가운데 열에 385 nm 파장을 배

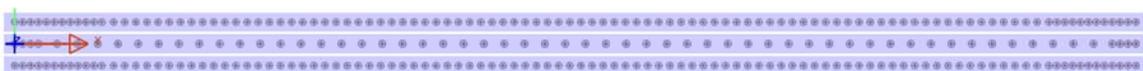


Fig. 1. LED arrays of the designed light source in which 365 nm SMD LEDs are positioned on the upper and lower strings, while 385 nm SMD LEDs are positioned on the center string along the horizontal axis.

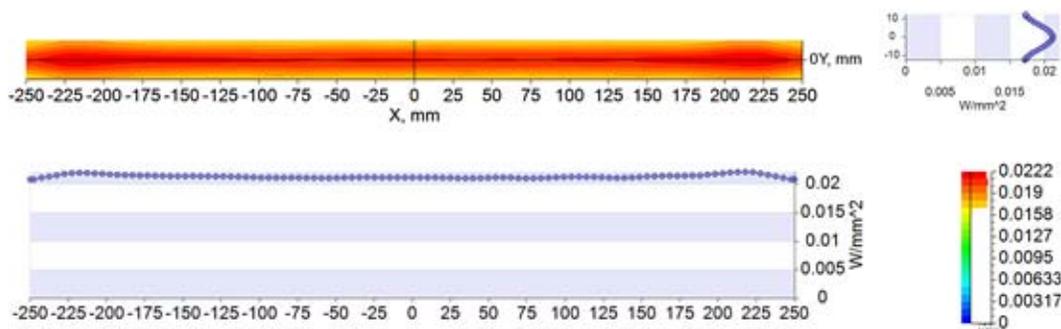


Fig. 2. Illuminance distribution of the designed light source for a 365 nm-wavelength LED.

치하였다. 가로 방향으로서는 365 nm 파장의 LED SMD를 108개, 385 nm 파장의 LED SMD를 60개 배치하였다.

실제 제작에서 모듈의 회로기판을 세라믹 재료로 가로 축의 길이를 고려하여 세 부분으로 나누어 제작하였고, 케이스 내부에 SMPS, RS232C 제어 및 정전류 회로 [10] 모듈 기판을 설치하였다.

그림 2는 'LightTools' 시뮬레이션을 이용하여 설계한 365 nm 파장 영역의 LED 조사 밀도 분포 특성을 나타낸다. 조사면(작업 조사 영역)은 광원으로부터 50 mm 거리에 위치하며, 가로 방향(X)축 균일특성은, 세로(Y)축의 중앙에서 위아래 양쪽으로 각각 10 mm 떨어진 위치에서 가로 방향으로 96.9%를 나타내며, 세로 방향으로는 가로축 중앙 부분에서 89.5%를 나타낸다. 가로 방향의 중앙 부근에서 365 nm 파장 영역과 385 nm 파장 영역의 광을 합한

평균 조사 밀도는 $1,950 \text{ mW/cm}^2$ 으로 설계되었다. 또, 365 nm 파장 영역의 조사 밀도 분포 특성과 385 nm 파장 영역의 조사 밀도 분포 특성이 유사하게 나타났다.

이때 시뮬레이션에 사용한 LED SMD는 $3.5 \times 3.5 \text{ mm}^2$ 의 크기로, 365 nm 파장 영역에서 광속 2,000 mW, 385 nm에서 2,050 mW 특성을 가진다.

그림 3은 사용한 SMD 타입 LED 도면을 나타낸다. 여기에서 렌즈의 크기는 직경 2.9 mm, 높이는 2.8 mm 반구형 몰딩 형태로, 렌즈 직경이 출력에 비하여 작은 편으로 TIR 렌즈의 내부에 장착하기 수월하며, 높은 조사 밀도 특성을 얻기 위해 많은 수의 LED를 사용하기에 적절하였다.

그림 4는 제작한 광원모듈의 TIR 바 장착 렌즈 시스템의 단면, TIR 렌즈를 장착하는 지그 및 TIR 바 렌즈의 단면도를 각각 나타낸다.

렌즈 지그는 'Solid Works'를 이용하여 설계하였으며, 알루미늄 재질을 사용하여 가공하였다. LED SMD는 렌즈가 설치되어 있는 램프 형태의 소자로, TIR 바 렌즈를 사용하는 경우 이 SMD 렌즈의 크기 때문에 고지향 특성을 얻기 어려우므로 광원의 조사 분포 특성에서 고밀도 특성을 얻기 어려워진다. 따라서 LED SMD와 TIR 바 렌즈 사이에 여분의 공간을 만들지 않는 고도의 정밀한 TIR 바 렌즈의 장착 기술이 필요하다. 렌즈 시스템의 지그에 렌즈를 밀착

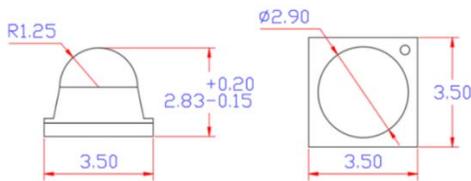


Fig. 3. Schematic drawings of the SMD LED used in the light source.

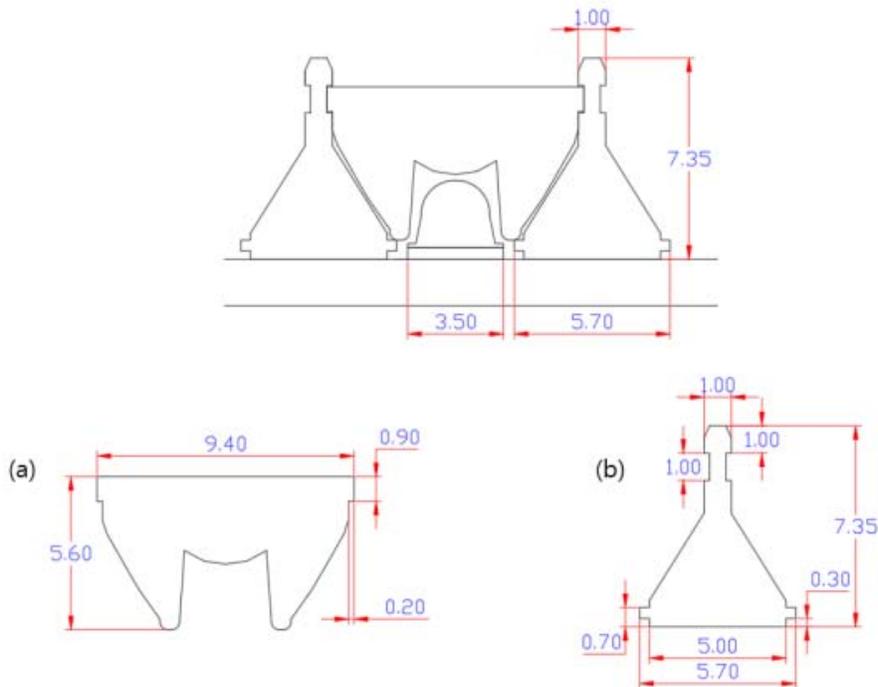


Fig. 4. Schematic drawings of the (a) designed TIR lens and (b) jig used for supporting the TIR lens in the light source.

시키기 위해 지그와 TIR 렌즈의 형태에 각각 요철을 구성하여 고정밀도 특성을 얻을 수 있도록 하였다.

LED SMD 램프에 TIR 렌즈를 장착하여 제작한 광원모듈과 LED 구동 SMPS (switching mode power supply) 전원, RS232C 연결 제어방식 MCU (micro controller unit) 회로기판 및 방열판을 케이스로 구성하여 경화용 조사장치를 제작하였다. 설계한 조사장치는 가로 545 mm, 세로 (높이) 111 mm 및 깊이 300 mm의 크기로, 광원부는 534×90 mm² 크기 금속 세라믹 회로기판과 TIR 바 형태의 렌즈 시스템, 12개의 23 병렬 정전류 회로로 구성된다. 방열을 위해 크기 535×44×107 mm³의 방열판, 케이스를 두께 2 mm의 Al 재료를 사용하여 열이 광원부에 집중되지 않도록 하였으며, 56.5 CFM (cubic feet per minute)의 공기를 배출하는 60×60 mm² 크기의 FAN을 설치하여 강제 공랭이 가능하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

제작된 경화용 조사장치를 그림 5에 나타냈다. 전면부에 534×30 mm²의 광 방사창이 위치하고 후면부에 공랭 팬이 위치하여, 뒷면에서 공기가 흡입하여 방열판과 SMPS (switching mode power supply) 전원을 냉각시킨 후, 윗면과 아랫면의 살창구조로 배출된다.

TIR 바 렌즈의 집속 특성을 확인하기 위해 경화기의 작동거리와 동일한 50 mm 떨어진 조사면에서 램프의 광학 특성을 시뮬레이션 조사하였다. 사용한 LED SMD는 지향각 특성이 65°로, 1,300 mA의 정격 전류에서 2,360 mW의 방사속을 가지는데, TIR 렌즈를 장착시켜 동일하게 SMD 상태에서 1,300 mA 전류로 구동하는 것으로 가정 시뮬레이션 하여 평균값 1,083 mW/cm², TIR 렌즈를 장착한 상태에서는 평균값 1,950 mW/cm²로 SMD 반구형 몰딩 상태 렌즈에 비하여 TIR 바 렌즈 장착 모듈에서 1.8 배 높은 조사 밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

세라믹 회로기판에 제작한 광원모듈 장치를 60분간 동작시켜 조사 밀도 세기의 시간 변화를 조사하였다. 그림 6은 'ORC (MODEL UV-LED)' 측정기를 사용하여 측정된 시간 변화 값이다. 초기 5분 동작에서 조사 밀도 값이 1,673 mW/cm²에서 급격하게 1,425 mW/cm²으로 감소하여 안정된 값을 나타낸다.

이러한 급격한 조사 밀도 감소는 LED 동작에 따른 열 발생과 이에 따른 온도 상승에 관련이 있는 것으로 판단된다. 이러한 조사 밀도 감소 특성을 개선하기 위하여, LED 온도 상승에 따른 LED 발광 효율 감소와 PCB 온도 상승에

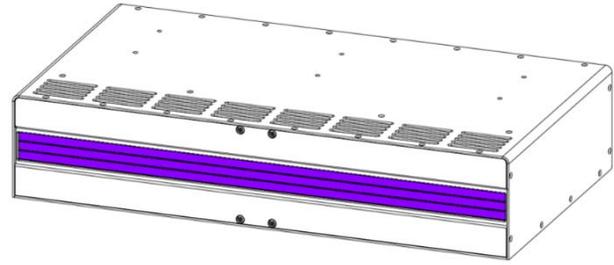


Fig. 5. A schematic drawing of the assembled light source system.

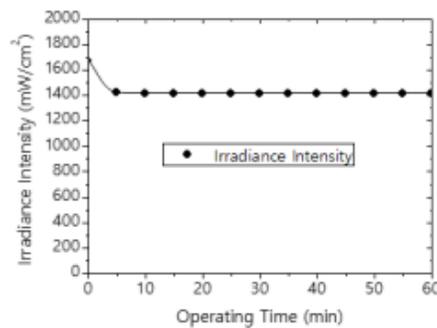


Fig. 6. Measurement of the accumulated irradiance intensity of the light source as a function of time.

따른 정전류 회로에서의 전류 값 감소 및 이에 따른 LED 출력 감소를 조사하였다.

그림 7에 전류 1,300 mA로 60분 동안 연속 동작시키면서 측정된 PCB 온도 변화와 전류 변화를 함께 나타냈다.

PCB 온도는 5분 동작으로 급격하게 55°C까지 올라가는 것을 알 수 있는데, 따라서 LED 온도가 25°C에서 55°C까지 올라가는 것으로 예측된다. 이때 LED의 온도 상승에 따른 발광 효율의 감소는 초기 값에 약 10.5%에 해당하는 것으로 계산된다 [11]. 'LightTools' 시뮬레이션으로 LED 온도 상승에 따른 조사 밀도 감소를 감안하여 계산하면, 조사 밀도의 감소는 148 mW/cm²이 된다. 그림 6에서 조사 밀도의 전체 감소값이 248 mW/cm²이므로, 이 감소값은 59.7%에 해당한다. 따라서 PCB의 온도 상승에 따른 LED 온도 상승 이외에 또 다른 조사 밀도의 감소 원인을 조사하였다.

그림 7에서 LED 전류값의 감소와 회로기판의 온도 상승이 동작 시간에 따라 동시에 대칭적으로 변화하는 점으로 미루어, LED 전류값과 PCB 회로기판의 온도 상승이 상관한다는 점을 알 수 있다 [10]. 또 이러한 전류값의 변화와 PCB 온도 변화 모두 그림 6에 나타낸 조사 밀도의 변화와 매우 유사한 추이를 보인다. 이러한 특성은 조사 밀도의 감소가 LED 전류의 감소와 PCB 회로기판의 온도 상승에 기

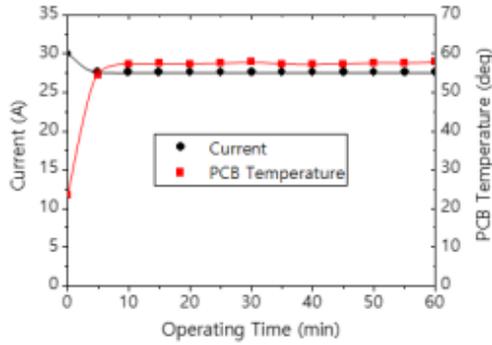


Fig. 7. Measurement of the input current and PCB temperature of the light source as a function of time.

인한다는 것을 의미한다고 할 수 있다.

실제 PCB 온도가 55°C로 상승함에 따라 전체 LED 전류 값은 30 A에서 27.6 A로 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 LED SMD의 I-L (전류-광 출력) 특성에서, 전류값의 변화에 따른 7.9%의 광속 값의 감소를 확인할 수 있으며, 이러한 광속 값의 감소는 전체 조사 밀도 감소값 248 mW/cm²의 96 mW/cm²에 해당한다는 것을 알 수 있다.

이러한 원인은 정전류 회로로 사용하는 transistor의 V_{BE} (베이스-이미터 전압)의 온도 특성에 따라 콜렉터 전류의 감소와 이로 인하여 LED 전류의 감소를 유발한다는 점을 확인하였다. 이러한 정전류 값의 변동 문제를 개선하기 위하여 정전류회로의 transistor의 위치를 PCB 기판상의 비교적 온도가 낮은 위치로 옮기고, 또 두 개 transistor 중 한 개 transistor를 선트레글레이터로 대체하여 온도 변화 대응 정전류 회로로 교체하였다. 전류밀도 감소 값은 초기 전류밀도 값의 5% 이내로 유지되었으며, 조사 밀도 감소 특성 또한 동작 초기 값에서 4% 이내로 유지되도록 개선하였다.

그림 8은 개선한 정전류 회로를 Al 금속기판에 장착하여 제작한 광원 조사 장치를 1,200 mA의 전류로 5분간 연속 동작시켜 광원부 방사 창을 촬영한 열화상 카메라 사진을 나타낸다. 광원부 중앙 부근에서 최고 69.7°C가 측정되며,



Fig. 8. Thermal imaging of the light source window surface measured by the FLIR camera.

방사면 끝 부근에서 최저 41.1°C, 평균 56.5°C의 온도가 확인되었다. 중앙 부근에서 방열 특성이 측면에 비하여 떨어지고, 또 이 부근에 설치한 SMPS 및 정전류 회로의 transistor 작동에 따른 발열이 높은 온도를 나타내게 되는 원인으로 판단된다.

광원모듈의 조사 밀도 균일성 특성을 개선하기 위하여 회로기판에서 위치에 따른 온도 차이, 또 이러한 온도 차이에 따른 조사 밀도의 차이를 조사하였다. 광원의 양쪽 끝 부분에서 중앙 부근에 비하여 22.3°C 낮게 나타남에 따라 발광 효율 변화에 따른 조사 밀도의 차이가 1.5% 발생할 수 있을 것으로 계산되었다.

표 1은 그림 8의 광원 조사장치를 5분간 동작시킨 후, 포화 상태에서 조사 밀도 분포 특성을 나타내었다. 작업거리 50 mm 떨어진 500×20 mm² 조사 영역에서 최대 1,634 mW/cm², 평균 1,400 mW/cm²의 조사 밀도와 89% 이상의 균일성을 가진다. 또 365 nm 파장과 385 nm 파장 영역의 LED를 각각 따로 구동하여 3:1 조사 밀도 비를 나타냈다(측정 표 생략).

조사 밀도의 평균값이 시뮬레이션 설계값과 550 mW/cm² 차이가 발생하였으나 SMD에서의 칩의 위치 오차나 칩과 TIR 렌즈 초점거리의 변동 및 시뮬레이션에 사용하는 칩의 광선 추적 자료와 실제 칩과 차이에서 비롯하는 것으로

Table 1. Irradiation intensity of the light source measured at a working distance of 50 mm within the working area of 500×20 mm².

Position (mm)	Unit: mW/cm ²											Uniformity (%)
	250	200	150	100	50	0	50	100	150	200	250	
-10	1,233	1,361	1,296	1,282	1,323	1,363	1,327	1,334	1,303	1,239	1,338	95.0
0	1,317	1,529	1,475	1,523	1,461	1,439	1,430	1,595	1,627	1,634	1,559	89.3
10	1,253	1,304	1,358	1,301	1,312	1,461	1,348	1,483	1,472	1,516	1,419	90.5

생각된다. 균일성 특성은 설계값 96.9%에 비하여 약간 낮은 것으로 평가되는데, TIR 바형 렌즈의 장착 특성 때문이라고 생각된다. 또 가로축 균일성 특성에서 가운데 열에서 균일성이 낮게 나타난다. 이러한 이유는 가운데 열 가로 방향으로 385 nm가 365 nm 파장 영역의 LED에 비하여 픽업덤 장착된 특성이나 측정 오차 때문인 것으로 생각된다. 제작된 조사기 광원의 조사 밀도 및 균일성 특성은 회로기판(PCB) 경화용 조사기 광원에 적용하기에 충분한 것으로 평가되었다.

4. 결론

조사 에너지는 365 nm 파장 SMD LED 2열과 385 nm 파장 SMD LED 1열로, 합 3열로 구성하고, 세로축 상의 조사 에너지 비가 3:1이 되도록 설계하였다.

‘Light Tools’ 시뮬레이션을 이용하여, 길이 534 mm, 높이 5.6 mm의 크기로 세로 방향 35°의 지향각을 가지는 PDMS 실리콘 수지 TIR 바 형상 렌즈를 설계 제작하였다.

365 nm 및 385 nm 파장대역 SMD LED를 이용하여, LED SMD 위에 TIR 바 형상의 렌즈를 AI 지그로 고정시켜 534×30 mm² 크기의 광원모듈을 제작하였다.

광원모듈로부터 방사속은 세로축 방향으로 고지향성 특성을 가지며, 50 mm 떨어진 작업거리 500×20 mm² 조사 영역에서 최대 1,634 mW/cm²의 조사 밀도와 가운데 열에서 가로 방향 균일성 89.3%를 나타냈다.

조사기 광원모듈은 광학 특성 및 작동시험 결과로부터 PCB 경화용 조사기 광원에 적용하기에 충분한 것으로 평가되었다.

ORCID

Soon Jae Yu

<https://orcid.org/0009-0008-0085-829X>

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 한국산업기술진흥원(KIAT) 과 교육부의 부처협업사업[반도체전공트랙 인력양성사업] (P0022203) 지원으로 수행하였습니다.

REFERENCES

- [1] M. Mori, A. Hamamoto, A. Takahashi, M. Nakano, N. Wakikawa, S. Tachibana, T. Ikehara, Y. Nakaya, M. Akutagawa, and Y. Kinouchi, *Med. Biol. Eng. Comput.*, **45**, 1237 (2007). doi: <https://doi.org/10.1007/s11517-007-0263-1>
- [2] Y. Ou and P. M. Petersen, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **60**, 100501 (2021). doi: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ac1f47>
- [3] J. H. Sung, S. J. Yu, and A. Kawan, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 433 (2018). doi: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.6.433>
- [4] D. Morita, M. Yamamoto, K. Akaishi, K. Matoba, K. Yasutomo, Y. Kassi, 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 (2015).
- [7] J. H. Seo, J. S. Lee, S. Y. Kim, Y. J. Jeong, H. J. Park, D. Y. Nam, and M. S. Jung, *Korean J. Opt. Photon.*, **28**, 295 (2017). doi: <https://doi.org/10.3807/KJOP.2017.28.6.295>
- [8] S. Nagai, K. Yamada, A. Hirano, M. Ippommatsu, M. Ito, N. Morishima, K. Aosaki, Y. Honda, H. Amano, and I. Akasaki, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 082101 (2016). doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.082101>
- [9] K. Taki and K. Sawa, *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **31**, 753 (2018). doi: <https://doi.org/10.2494/photopolymer.31.753>
- [10] J. X. Li, X. M. Wang, and Z. Xu, *Proc. 2017 36th Chinese Control Conference (CCC)* (IEEE, Dalian, China, 2017) p. 6311. doi: <https://doi.org/10.23919/ChiCC.2017.8028359>
- [11] E. F. Schubert, *Light-Emitting Diodes 3rd Edition* (E. Fred Schubert, New York, 2018) p. 11.