

Design of a Bar-type TIR Lens Having a Freeform Surface for Forming a Line Beam Using an LED Light Source

Jin-Hee Seo, Jeong-Su Lee, Seo-Young Kim, You-Jin Jeong,

Hye-Jin Park, Deuk-Young Nam, and Mee-Suk Jung[†]

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

(Received October 30, 2017; Revised November 6, 2017; Accepted November 10, 2017)

In this paper, we have studied a method of forming a line beam using a UV LED. The existing linear-type UV LED curing optical system is composed of several cylindrical lenses, but problems such as optical system alignment, enlargement of the module, efficiency, etc. may arise in the future. As an alternative to these problems, a bar-type TIR lens having a freeform surface only in the y-axis direction is designed, to verify that it shows advantages in maximum illuminance, uniformity of illuminance, and flux efficiency.

Keywords: Illumination Optic, TIR, Freeform Surface

OCIS codes: (220.2945) Illumination design, (220.3620) Lens system design, (220.4298) Nonimaging optics

LED 광원 사용 시 line beam 형성을 위한 자유 곡면 bar type의 TIR lens 설계

서진희 · 이정수 · 김서영 · 정유진 · 박혜진 · 남득영 · 정미숙[†]

한국산업기술대학교 나노-광공학과
☎ 15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2017년 10월 30일 받음, 2017년 11월 6일 수정본 받음, 2017년 11월 10일 게재 확정)

본 논문은 UV LED를 이용한 line beam 형성 방법에 대한 연구를 진행하였다. 기존의 linear type UV LED 경화기 광학계는 여러 개의 cylindrical lens로 구성되어 있는데 추후 광학계의 align, 모듈의 대형화, 효율 등에서 문제가 발생할 수 있다. 이런 문제점들의 해결을 위한 대안으로서 cylindrical lens와 마찬가지로 Y축 방향에 대해서만 자유 곡면을 가지는 bar type의 TIR lens를 설계하여 최대조도, 조도 균일도, 광속 효율 등에서의 이점이 있음을 검증하였다.

Keywords: 조명 광학, 내부전반사, 자유 곡면

OCIS codes: (220.2945) Illumination design, (220.3620) Lens system design, (220.4298) Nonimaging optics

I. 서 론

UV 경화는 접착제, 코팅, 잉크와 같은 것들을 자외선을 이용하여 굳혀주는 작업이다. 그 원리는 UV resin속에 함유된 미량의 광 개시제가 자외선 조사를 받아 화학반응을 일으켜 UV resin의 주성분인 단량체와 중간체의 결합반응이 유도되어 견고하고 딱딱한 중합체(polymer)로 변하는 특성을 가지고 있기 때문이다^[1].

최근 디스플레이 및 반도체 산업의 발달로 인해 시장이 커짐에 따라 LCD, LED 및 wafer의 코팅, 접착공정에서 사용되는 UV 경화기의 필요성도 증가하고 있다. 특히 디스플레이

이 생산 공정에 많이 사용되는 linear type UV LED 경화기는 생산성 향상 및 경화 시간 단축을 위해서 높은 조도 및 line beam의 조도 균일도 제어를 위한 광학계 설계가 필수적이다^[2].

일반적으로 linear type UV LED 경화기의 광학계는 line beam을 형성하기 위해서 2~3개의 cylindrical lens가 사용된다. 여러 개의 cylindrical lens를 이용하여 linear type UV LED 경화기 제작 시 광학계의 align, 모듈의 대형화, 효율 등에서 문제가 발생할 수 있으므로 이런 문제점들의 해결을 위해 새로운 형태의 광학계 개발이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 기존의 여러 개의 cylindrical lens로 구성된 linear type UV LED 경화기 광학계를 배광 제어와

[†]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.

line beam 형성의 역할을 동시에 하는 1매의 bar type의 TIR lens로 간소화하여 조사거리 5 mm, 조사영역 100 mm × 1.5 mm에 대하여 최대조도 3,500 mW/cm² 이상, 조도 균일도 85% 이상 가지는 것을 목표로 광학계를 설계하였다.

II. 본 론

2.1. LED

LED는 그림 1과 같이 lambertian 배광분포를 가지고 있어 그에 따라 LED의 발산각이 100° 이상으로 매우 크고, LED 중심부에서 방출되는 빛이 주변부에 비해 그 밀도가 높아 중심부에 높은 휘도를 나타내는 특성을 가진다³⁾.

위와 같은 배광분포와 특성을 가지는 LED를 광원으로 사용하려면 사용 목적에 맞게 배광을 제어하는 것이 중요하다. 따라서 linear type UV LED 경화기에서 line beam 형성을 위해서는 lens나 reflector와 같은 광학계를 활용하여 적절한 배광을 얻어야 할 필요성이 있다.

2.2. UV LED modeling

본 논문에서는 UV LED 경화기에 사용하기 위해 파장 365 nm, 0.76 W의 1.1 mm × 1.1 mm 크기를 가지는 LG Innotek사의 LEUV-V518A6을 광원으로 선정하였다. 그림 2는 LEUV-V518A6 모델이며, 해당 제품의 배광분포는 그림 3과 같다. Source modeling은 광학 설계 프로그램인 Lighttools를 이용하여 진행하였다. Source modeling은 광학 설계 프로그램인 Lighttools를 이용하여 진행하였다.

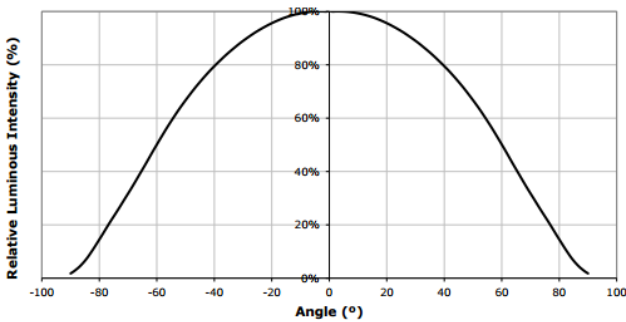


Fig. 1. LED light distribution.

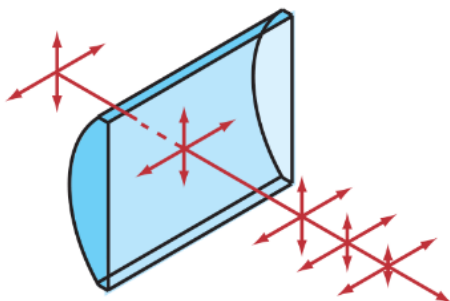


Fig. 2. LEUV-V518A6 of LG Innotek.

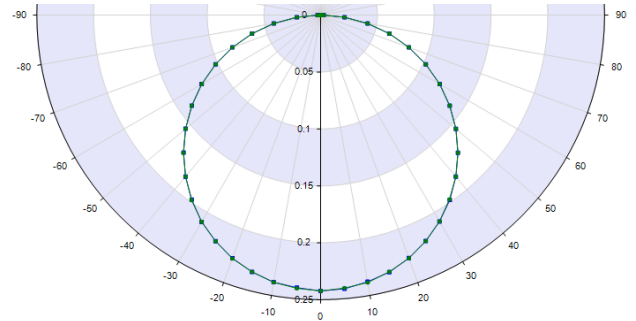


Fig. 3. UV LED light distribution.

2.3. Cylindrical lens에 대한 이론적 접근

일반적으로 linear type UV LED 경화기의 광학계는 LED 광원의 넓은 배광 분포를 제어하기 위해 집속 광학계를 통해 focusing 시켜 line beam 형성의 역할을 해야 한다. 이를 위해 광학계에서는 한 축으로만 곡률을 가지며 곡률을 가지고 있는 축으로 입사하는 빛은 focusing 되고, 곡률을 가지고 있지 않는 축으로 입사하는 빛은 상대적으로 길어지는 모양을 가지도록 해야 한다⁴⁾.

따라서 그림 4에서 보는 바와 같이 X와 Y축의 곡률 반경을 한 축에만 가지는 cylindrical lens를 이용하여 LED 광원의 배광 제어를 통해 line beam 형성을 하고자 한다.

2.4. Cylindrical lens 설계

본 설계에서는 광학 설계 프로그램 Lighttools를 통해 조사거리 5 mm, 조사영역 100 mm × 1.5 mm에서 cylindrical lens를 이용한 line beam 형성 및 성능 확인을 구면 및 비구면

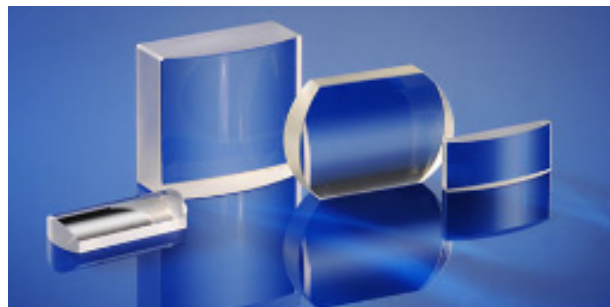


Fig. 4. Cylindrical lens.

렌즈의 각 매수 별로 진행하였다. 목표 조사영역을 고려하여 LED를 중심 간격 2.1 mm 기준으로 75개 array 하였고 렌즈 material은 투과도가 낮은 UV영역의 특성과 렌즈 형상에 따른 가공성을 고려하여 굴절률 1.46, 투과율 96% 가지는 moldable silicon으로 설정하였다.

2.4.1. 구면 cylindrical lens 설계

구면 cylindrical lens는 Y축에 대해서만 곡률 반경을 가지며 렌즈 길이 X축 160 mm, Y축 9.5 mm로 매수 별 설계를 진행하였다. Simulation 결과 1매, 2매로는 목표 조사영역에 비해 상대적으로 line beam이 넓게 형성되어 최대조도를 높이는 데에 한계가 있음을 알 수 있었으며 3매를 사용하는 경우 1매, 2매일 때 보다 좁은 line beam이 형성되어 목표 성능을 만족하였다.

그림 5는 동일 구면 cylindrical lens 3매의 광학계 layout이며 그림 6은 이에 대한 simulation 결과이다. 조사거리 5 mm, 조사영역 100 mm × 1.5 mm에 대하여 최대조도 5,162 mW/cm², 균일도 89.3% 임을 확인할 수 있다. 또한 광속 효율은 0.76 W LED 75개에 대한 광속 57 W 대비 목표 조사영역에서의 광속은 7.57 W로 13.2%임을 확인하였다.

2.4.2. 비구면 cylindrical lens 설계

앞에서 확인한 구면 cylindrical lens는 목표 성능 만족을 위해서 3매의 렌즈가 필요하다. 따라서 본 절에서는 렌즈의 매수를 줄이기 위해 비구면 계수를 도입하여 보다 많은 변수 제어를 통해 비구면 cylindrical lens 재설계를 진행하였다. 비구면 cylindrical lens는 X축 160 mm, Y축 6.5 mm의 길이를 가진다.

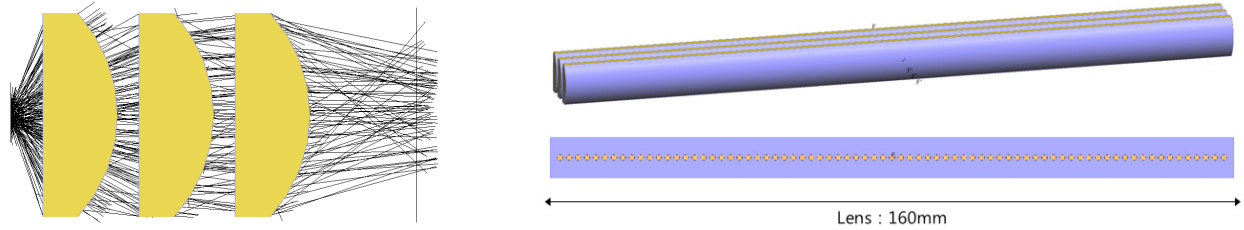


Fig. 5. Three spherical cylindrical lens optical system.

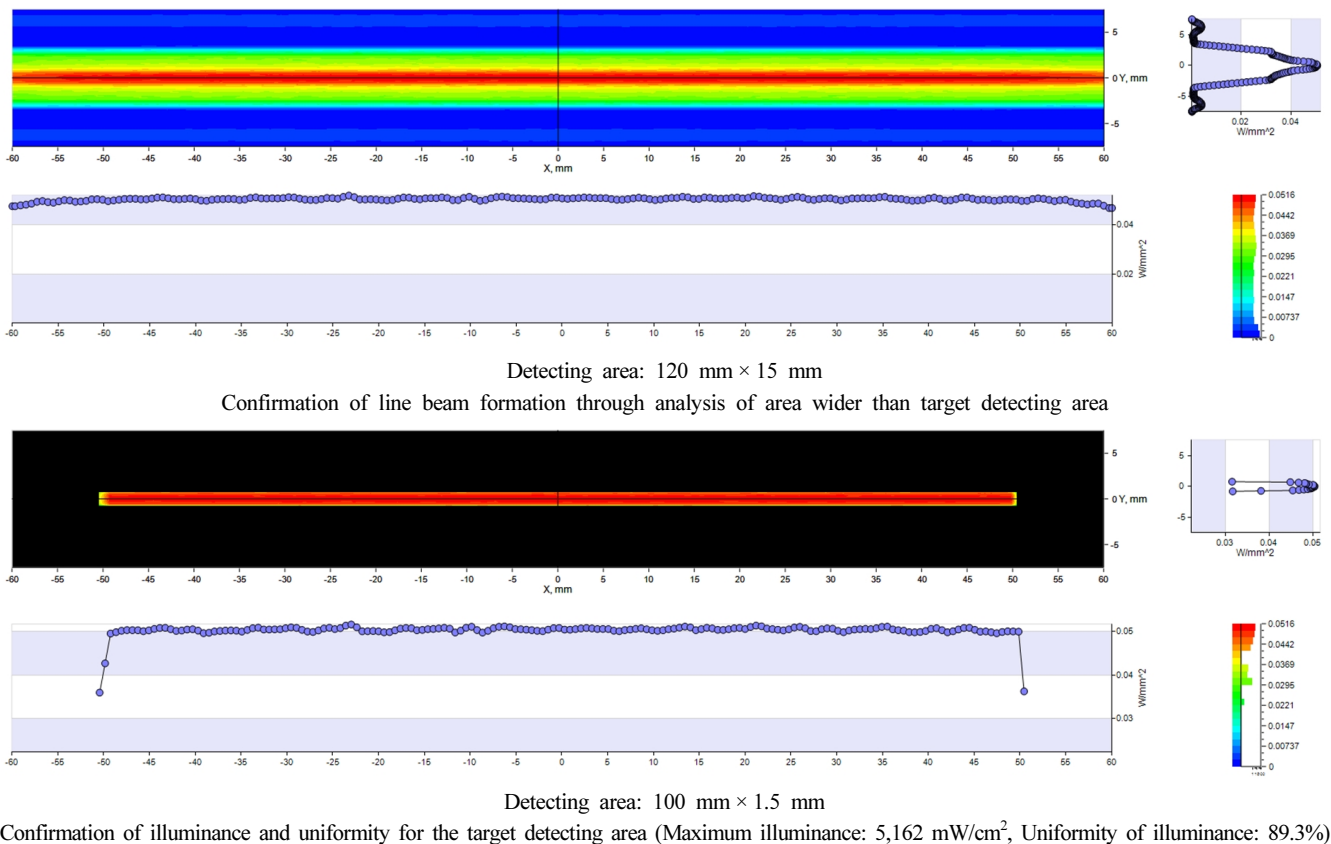


Fig. 6. Simulation results of three spherical cylindrical lens.

Confirmation of illuminance and uniformity for the target detecting area (Maximum illuminance: 5,162 mW/cm², Uniformity of illuminance: 89.3%)

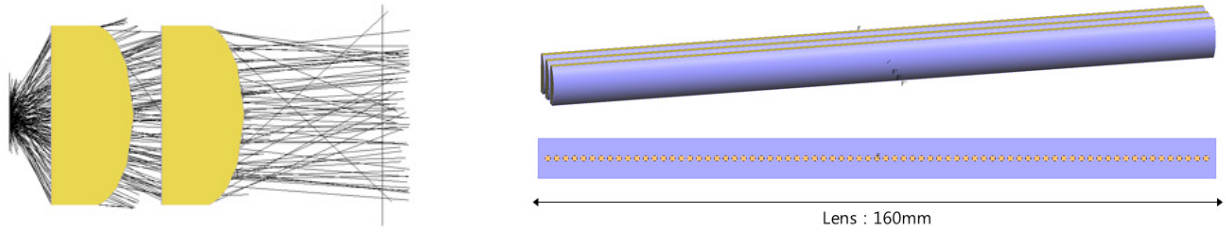


Fig. 7. Two aspherical cylindrical lens optical system.

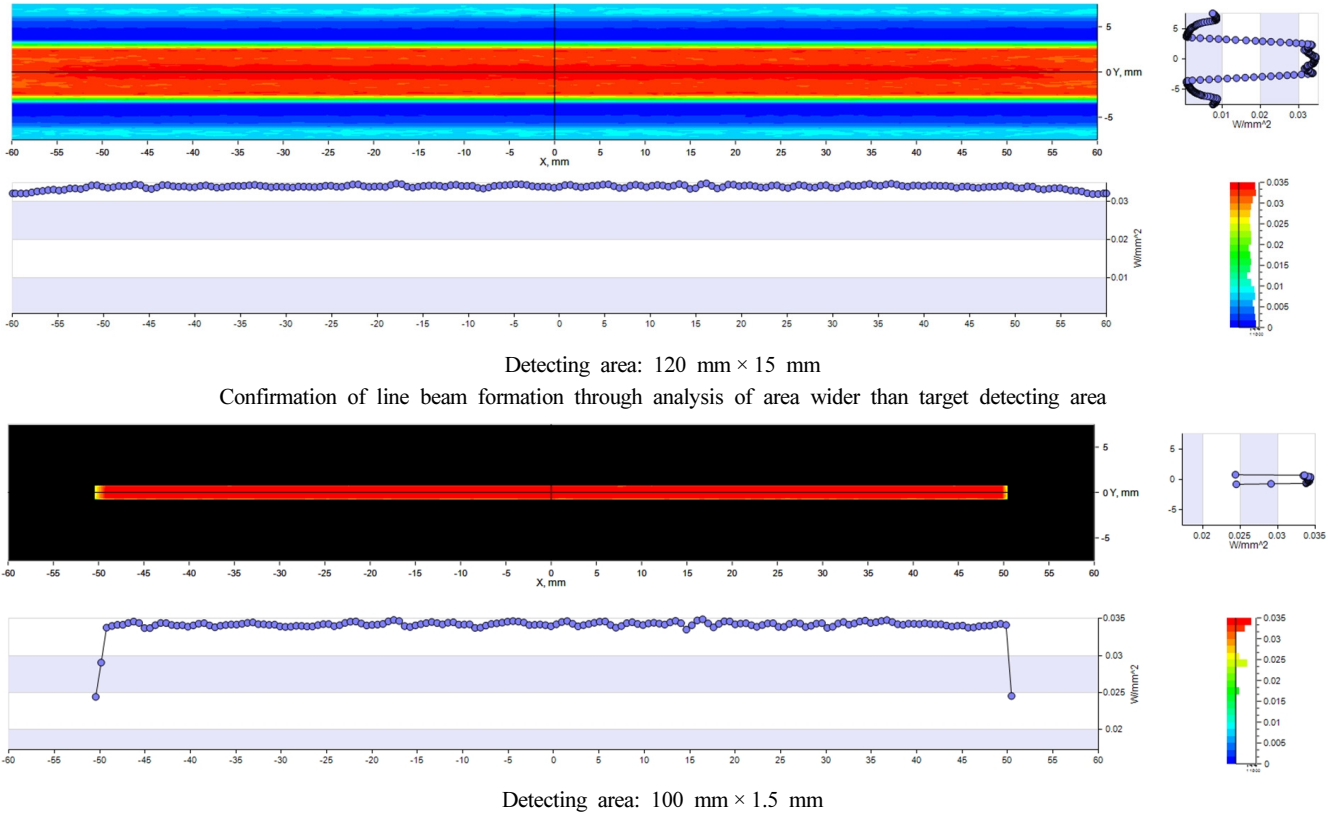


Fig. 8. Simulation results of two aspherical cylindrical lens.

그림 7은 동일 비구면 cylindrical lens 2매의 광학계 layout 이며 그림 8은 이에 대한 simulation 결과이다. Simulation 결과 확인 시, 비구면 cylindrical lens의 경우엔 2매일 때 최대 조도 3,502 mW/cm², 균일도 96.6%로 line beam 형성 및 목표 성능 만족이 가능하나, 입사 광속 57 W 대비 5.36 W로 광속 효율이 9.4%에 그쳐 구면 cylindrical lens 사용 시 보다 효율이 낮은 것을 확인할 수 있다.

Lighttools내에서 설계 진행 후 simulation 결과를 확인하였을 때, 목표 성능 만족을 위해 구면 cylindrical lens는 3매, 비구면 cylindrical lens는 2매를 사용하면 최대조도 3,500 mW/cm² 이상, 조도 균일도 85% 이상을 만족한다.

하지만 여러 매의 cylindrical lens를 사용하는 경우 광속 효율의 저하와 제작 후 조립이 까다롭다는 단점이 있다. 또한 목표 조사영역에 비해 LED array 개수가 많아 광학계가

길어져 추후 linear type UV LED 경화기 제작 시 광학계 모듈의 대형화, 광학계의 align 등에서 문제가 발생할 수 있다. 이런 문제점들의 해결을 위해 새로운 형태의 광학계 개발이 필요하다.

2.5. Bar type의 TIR lens 설계

2.5.1. 전반사(Total internal reflection)

기하광학 이론에 따르면 밀한 매질에서 소한 매질로 빛이 임의의 각 이상으로 입사될 경우 그림 9와 같이 내부 전반사가 일어나게 된다. 이러한 내부 전반사가 일어나기 시작하는 임의의 각을 임계각(critical angle, θ_c) 이라 하며, 임계각 이하의 입사광은 공기 증으로 투과하게 되고 임계각 이상의 입사광은 내부 전반사가 일어난다⁵⁾.

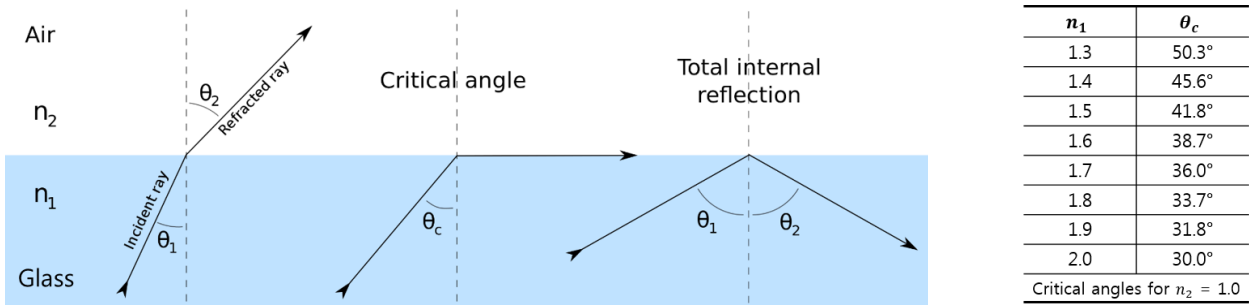


Fig. 9. Total internal reflection & critical angles.

그림 10은 내부 전반사를 활용한 TIR lens이며, LED광을 focusing 시키는 방법으로 원하는 조사영역에 집중 시킬 수 있다. 또한 전반사면에서의 반사 손실이 거의 없어 높은 광속 효율을 가진다.

그림 11은 TIR lens의 구조에 따른 ray tracing 이다. LED에서 방출되는 빛의 발산각이 작은 경우, TIR lens 중앙의 inner surface를 맞고 굴절하여 수직 방향으로 향하게 되는데, inner surface는 식 (1)의 Snell's law에 의하여 설계 가능하다. 식에서 θ_i 는 입사각, θ_r 는 굴절각이며, n_i 와 n_r 은 각각 매질에 대한 굴절률이다.

$$\frac{\sin\theta_r}{\sin\theta_i} = \frac{n_i}{n_r} \quad (1)$$

발산각이 큰 경우, TIR lens의 inner side surface에서 굴절되고 다시 렌즈 외곽의 TIR surface 곡면을 통해 반사되어



Fig. 10. TIR lens.

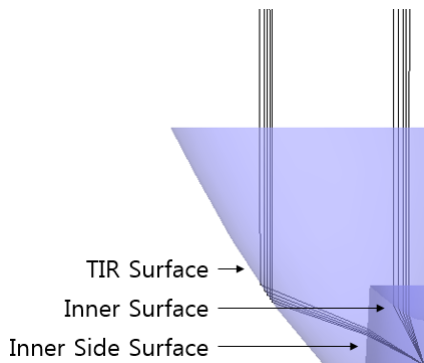


Fig. 11. Non-sequential ray tracing of TIR lens.

수직 방향으로 발산한다. TIR surface에서 일어나는 내부 전반사는 식 (2)의 임계각(critical angle, θ_c) 계산식에 의해 제어할 수 있다⁶⁾.

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_r}{n_i}\right) (n_i > n_r) \quad (2)$$

Lambertian 배광분포를 가지는 LED에서 방출되는 빛을 제어하기 위해서는 TIR lens의 inner surface와 TIR surface의 최적 설계가 중요한 요소이다.

2.5.2. 베지어 곡선(Bezier curve)

TIR lens의 TIR surface는 베지어 곡선(Bezier curve)을 활용하여 설계한다. 자유 곡선을 그리고 기준 축을 기준으로 대칭 회전시켜 TIR lens의 자유 곡면을 구성한다. 여기서 베지어 곡선(Bezier curve)이란 임의의 형태의 곡선을 수학적으로 표현하기 위해 만든 곡선으로써 최초의 제어점(control point)인 시작점과 최후의 제어점인 끝점 그리고 그 사이에 위치하는 내부 제어점의 이동에 의해 다양한 자유 곡선을 얻을 수 있다. 이때 곡선은 제어점의 위를 통과하는 것이 아니고 각 제어점의 좌표를 매개로 하는 함수식을 통해 그려진다.

시작점과 끝점을 포함한 제어점의 개수가 많을수록 복잡한 곡선을 만들 수 있는데, 본 논문에서는 그림 12와 같은 2차 베지어 곡선(quadratic Bezier curve)을 사용하여 두개의 양 끝점 P_0 , P_2 와 한 개의 중간 제어점 P_1 으로 배광을 제어하는 주요 렌즈 곡면을 구성하였다. 2차 베지어 수식은 다음과 같다⁷⁾.

$$P(t) = (1-t)^2P_0 + 2t(1-t)^2P_1 + t^2P_2, 0 \leq t \leq 1 \quad (3)$$

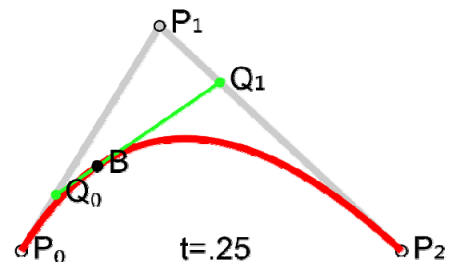


Fig. 12. Secondary Bezier curve.

2.5.3. TIR lens 설계

본 논문에서는 광학 설계 프로그램인 Lighttools를 이용하여 TIR lens를 설계 및 분석하였고, 설계된 TIR lens를 bar type의 TIR lens로 변환하여 line beam을 형성하였다. TIR lens 설계는 sweptsolid 기능을 이용하였으며, 그림 13에서 보는 바와 같이 배광에 주요 영향을 미치는 ①, ④ 곡선은 Bezier curve로 하여 설계의 자유도를 높였으며, 배광에 큰 영향을 미치지 않는 ③, ⑤ 곡선은 polyline으로 함으로서 TIR lens의 최적화 효율을 높였다. 또한 ② 곡선의 값에 따른 조도 분포를 확인하면서 TIR lens의 암영대를 개선하였고 최종적으로 높은 광속 효율을 가지는 TIR lens를 설계하였다⁸⁾.

그림 14는 sweptsolid로 설계한 TIR lens 단면도를 Z축 기준으로 회전시켜 얻은 TIR lens와 illuminance 결과로서, 0.76 W를 가지는 LED에 대해 detector로 들어가는 광속은 0.6794 W로 89.3%의 효율을 나타낸다.

2.5.4. Bar type의 TIR lens 설계

Linear type UV LED 경화기에 적용하기 위해서 LED를 아래 그림 15와 같이 중심 간격 2.1 mm로 60개 array하였다.

또한 bar type으로 변환시키기 위해 그림 16과 같이 TIR lens의 단면도를 X축 방향으로 LED array 개수를 고려하여 130 mm extruded 시켰으며 Y축 길이는 5 mm로 설정하였다.

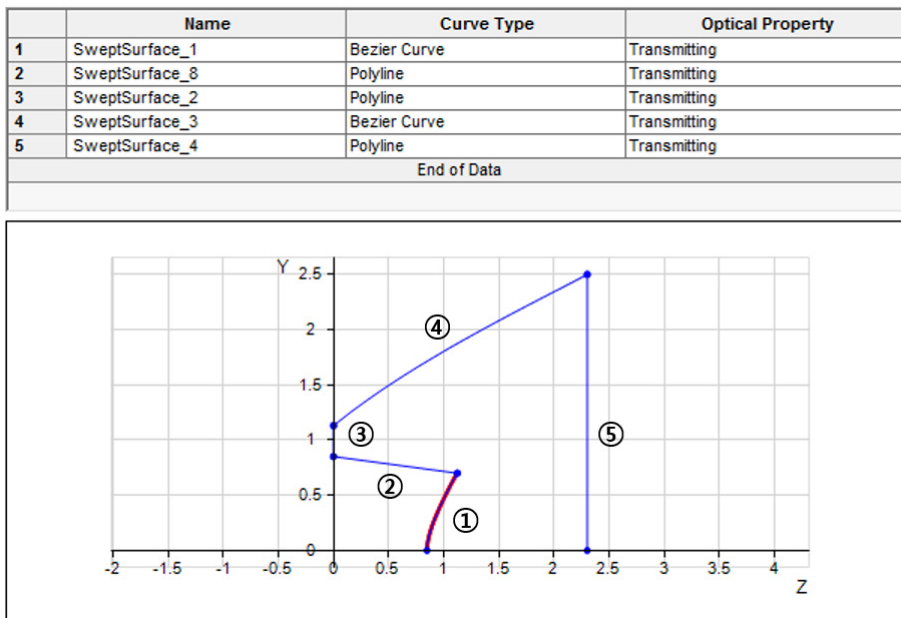


Fig. 13. TIR lens section designed with sweptsolid function.

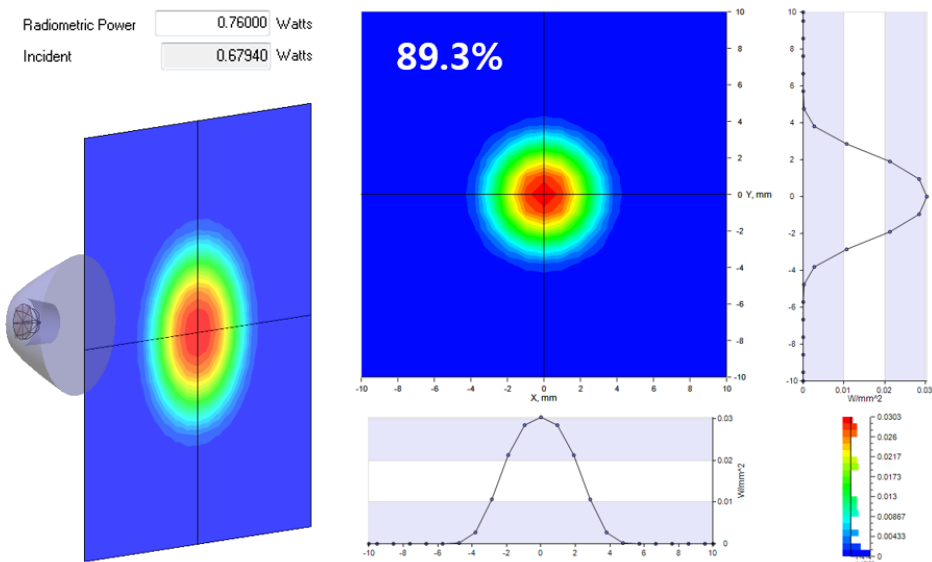


Fig. 14. TIR lens & illuminance.

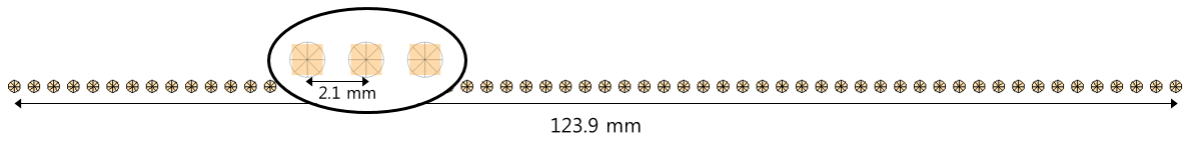


Fig. 15. LED array.

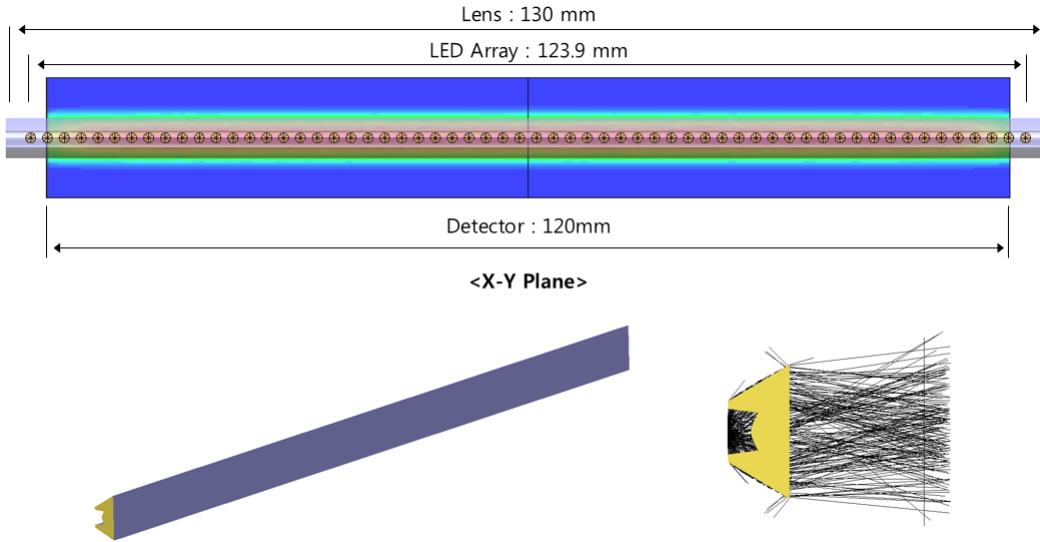
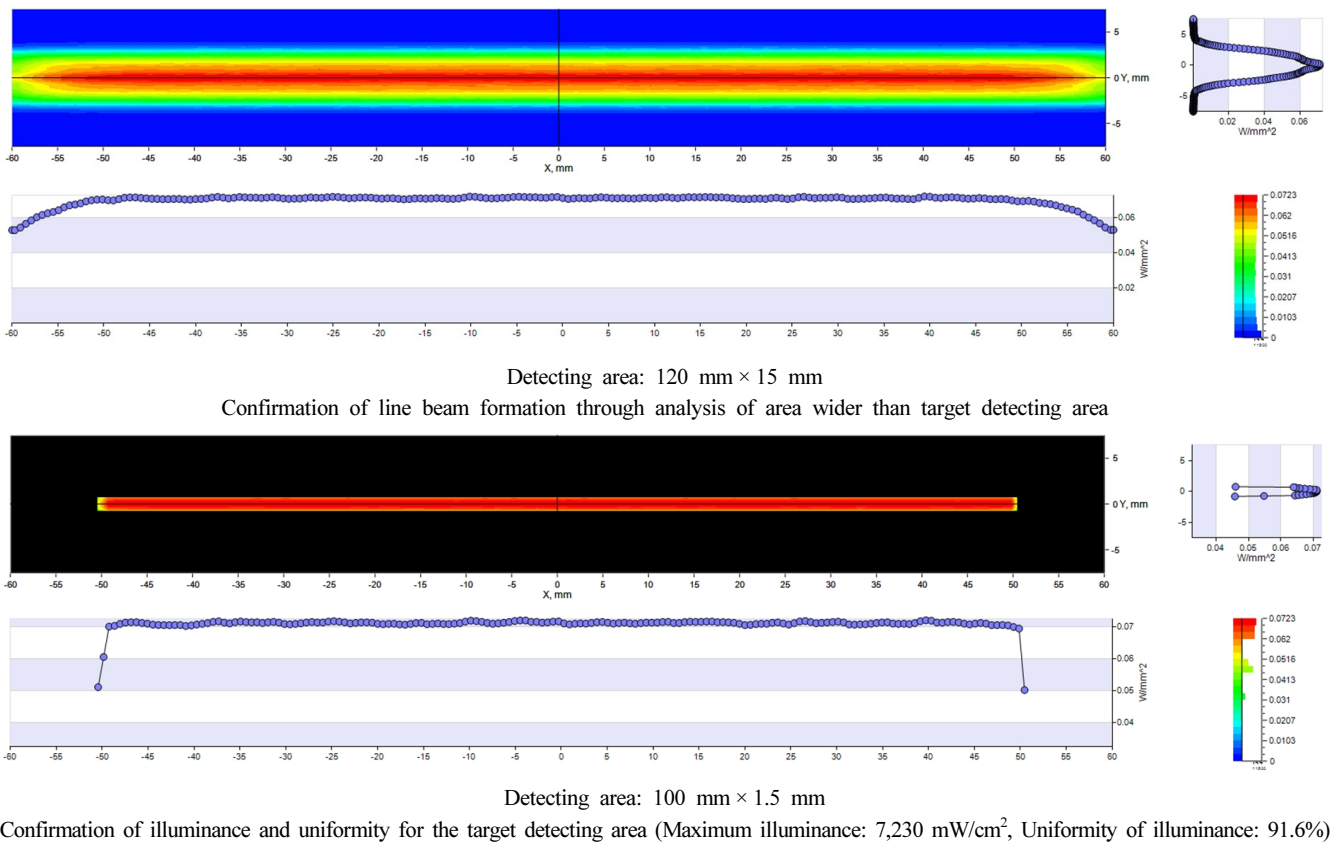


Fig. 16. Bar type TIR lens optical system.



Confirming of illuminance and uniformity for the target detecting area (Maximum illuminance: 7,230 mW/cm², Uniformity of illuminance: 91.6%)

Fig. 17. Simulation result of bar type TIR lens.

bar type의 TIR lens는 cylindrical lens와 같이 Y축 방향에 대해서만 자유 곡면 형상을 가진다. 따라서 X축으로 입사하는 빛은 focusing 되지 않고, 자유 곡면 형상을 가지는 Y축으로 입사한 빛은 focusing 되어 line beam을 형성한다.

그림 17은 bar type의 TIR lens가 적용된 linear type UV LED 경화기의 simulation 결과이다. 목표 조사영역보다 넓은 면적 120 mm × 15 mm detector를 통하여 line beam이 형성되었음을 확인하였다. 또한 조사거리 5 mm, 목표 조사영역인 100 mm × 1.5 mm에서 분석한 결과 최대조도 7,230 mW/cm², 균일도 91.6%이며 광속 효율은 45.6 W 대비 10.7 W로 23.4%임을 확인하였다.

III. Simulation 결과 비교

본 논문에서는 동일한 목표 성능에 대하여 3매 구면 cylindrical lens, 2매 비구면 cylindrical lens와 1매 bar type의 TIR lens 설계 및 simulation을 진행하였다. 전체 ray 수는 50,000,000개로 하였으며, mesh 수는 201 × 201로 하여 error율을 3% 이내로 simulation하였다.

IV. 결 론

표 1은 조사거리 5 mm, 목표 조사영역 100 mm × 1.5 mm에 대한 목표 성능을 만족하는 광학계 simulation 결과이다. 3매 구면 cylindrical lens는 최대조도 5,162 mW/cm², 균일도 89.3%, 광속 효율 13.2%를 나타내며 2매 비구면 cylindrical lens는 최대조도 3,502 mW/cm², 균일도 96.6%, 광속 효율 9.4%를 가진다.

Bar type의 TIR lens는 최대조도 7,230 mW/cm², 조도 균일도 91.6%, 광속 효율 23.4%으로 1매의 렌즈를 사용하여 목표 성능을 만족하였다. 또한 cylindrical lens 대비 광속 효율이 높으며, 렌즈의 크기와 LED array 개수가 적어 간소화된 linear type UV LED 경화기 구현이 가능하다.

본 논문은 UV LED를 이용한 line beam 형성 방법에 대한 연구를 진행하였다. 기존의 linear type UV LED 경화기 광학계는 여러 매의 cylindrical lens로 구성되어 있는데 이를 3매 구면 및 2매 비구면 cylindrical lens 설계를 통해 성능 분석하였고 기존 광학계에 대한 문제점을 제거하였다.

Table 1. Simulation result of optical system satisfying target performance

	Optical system layout	Simulation result (Detecting area: 100 mm × 1.5 mm)		
Three spherical cylindrical lens				
Two aspherical cylindrical lens				
Bar type TIR lens				
		Three spherical cylindrical lens	Two aspherical cylindrical lens	Bar type TIR lens
Lens size		X axis lens size: 160 mm Y axis lens size: 9.5 mm	X axis lens size: 160 mm Y axis lens size: 6.5 mm	X axis lens size: 130 mm Y axis lens size: 5 mm
LED array		75 ea	75 ea	60 ea
Maximum illuminance		5,162 mW/cm ²	3,502 mW/cm ²	7,230 mW/cm ²
Uniformity of illuminance		89.3%	96.6%	91.6%
Flux efficiency		13.2%	9.4%	23.4%

문제점 해결을 위한 대안으로써 lambertian 배광분포를 가지는 LED를 효율적으로 제어하는 TIR lens를 고안하였으며, line beam 형성을 위해 cylindrical lens와 마찬가지로 Y축 방향에 대해서만 자유 곡면을 가지는 bar type의 TIR lens를 설계하였다.

또한 동일한 목표 성능에 대하여 3매 구면 및 2매 비구면 cylindrical lens와 1매 bar type의 TIR lens가 적용된 광학계의 simulation을 진행하였다. 비교 분석 결과 bar type의 TIR lens는 최대조도 $7,230 \text{ mW/cm}^2$, 조도 균일도 91.6%, 광속 효율 23.4%으로 여러 매의 cylindrical lens보다 높은 성능을 가지는 것을 확인하였다.

따라서 본 논문에서는 bar type의 TIR lens 이용한 linear type UV LED 경화기의 simulation을 통하여 최대조도, 조도 균일도, 광속 효율 등에서의 이점이 있음을 검증하였다.

References

1. H.-B. Yoon, H.-G. Kim, and K.-E. Ming, "Effect of photo-initiators on adhesion properties of 2-EHA/AA PSA," Polym. (Korea), **38**(4), 491 (2015).
2. D.-B. Kim, "Effect of acrylic acid contents and inorganic fillers on physical properties of acrylic pressure sensitive adhesive tape by UV curing," Polym. (Korea), **37**(2), 184-185 (2013).
3. Y. M. Park, H. C. Bang, Y. H. Seo, and B. H. Kim, "Development of surface-mount-type crown-shaped lens for reducing glare effect of light-emitting diode light source," J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. **23**(1), 64-65 (2014).
4. J.-M. Kim, "Optical design of aplanatic air-spaced doublet composed of a plano-convex and a plano-concave cylindrical lenses," Dept. of Laser and Optical Information Engineering, Graduate School, Cheongju University, 1 (2010).
5. S.-H. Oh, "The research of the 2nd lens design technology for the control of luminous intensity distribution," Korea Polytechnic University, 20 (2012).
6. D. H. Go and Y. C. Lee, "A optical system design of LED marine lanterns based on a TIR collimator lens," J. KIIEE, **29**(11), 2-3 (2015).
7. H.-Y. Park, "Properties of isoparametric curve of quadratic F-Bezier curve," Graduate School of Education, Chosun University, 1-3 (2013)
8. D.-Y. Nam, "A study on the forming method of line beam using LED," Korea Polytechnic University, 14 (2015).