

Design and Evaluation of a Uniform 266 nm Laser Area-Irradiation Optical System for Contact Lens Production Lines

Jeong-Hyeon Lee^{1,a} and Dong-Hee Lee^{2,b,*}

¹Dept. of Energy IT Engineering, Graduate School of Far East University, Student, EumSeong 27601, Korea

²Dept. of Visual Optics, Far East University, Professor, EumSeong 27601, Korea

(Received May 27, 2026: Revised June 5, 2026: Accepted June 9, 2026)

Purpose: Contact lenses directly contact the ocular surface; therefore, surface microbial contamination should be reduced during manufacturing and transport. In this study, we designed and evaluated a uniform 266-nm laser area-irradiation optical system as a non-contact, short-duration irradiation platform for potential bioburden reduction applications in contact lens production lines. **Methods:** Four 1-W, 266-nm CW lasers were used as light sources. Each laser beam was expanded using a 9× beam expander and then combined with a homogenizer composed of cylindrical lens arrays and a field lens system. Optical design and ray-tracing analysis were performed using Code V and LightTools. The target irradiation area was 50 mm × 50 mm, and the target beam uniformity was set to greater than 90%. **Results:** The final optical system consisted of four laser sources, four beam expanders, one homogenizer, and one field lens set. LightTools analysis showed a flat-top, uniform beam distribution over the target irradiation area. Based on a 21-chromatic contour evaluation chart, the beam uniformity exceeded 90.4%. Assuming 62.5% optical efficiency, the calculated irradiance was approximately 100 mW/cm² at the target irradiation area. **Conclusions:** This optical system may be effective as a UV irradiation optical platform for short-duration UV-based bioburden reduction research and process development. However, additional material stability testing, verification of microbiological efficacy, safety shielding, and process validation are required.

Key words: Contact lens, 266 nm laser, Bioburden reduction, Uniform area-irradiation, Optical system design

서 론

콘택트렌즈는 안구 표면과 직접 접촉하는 의료기기이므로 제조, 이송, 포장 및 유통 과정에서 미생물 오염을 엄격히 제어해야 한다. 특히 소프트 콘택트렌즈는 수분을 포함하는 고분자 재료로 구성되어 세균, 진균, 원생생물 등에 의한 표면 오염 가능성이 존재한다. FDA의 콘택트렌즈 관련 성능 기준에서도 기기의 청정성과 무균성 검증, 멸균보증수준(sterility assurance level, SAL)의 관리가 요구된다.^[1]

현재 콘택트렌즈 제조 공정에서는 습열, 과산화수소, 감마선, 전자선 또는 포장 후 최종 멸균 공정 등이 사용된다. 그러나 이러한 방식은 공정 시간이 길거나 렌즈 및 포장재에 열적·화학적 부담을 줄 수 있으며, 생산라인 내에서 짧은 시간 동안 국소적으로 표면 오염을 저감하는 데에는 한계가 있다. 따라서 인라인 고속 생산 공정에 적용 가능

한 비접촉식, 무잔류, 고속 표면 살균 기술이 요구된다.

자외선 살균(ultraviolet germicidal irradiation, UVGI)은 DNA 및 RNA에 광화학적 손상을 유도하여 미생물을 불활화하는 비접촉 살균 기술이다. 특히 260 nm 부근은 핵산 흡수와 밀접한 관련이 있으며, 266-279 nm 자외선 영역에서는 세균 및 효모에 대한 강한 불활화 효과가 보고되었다.^[2] 또한 266 nm 펄스 레이저를 이용한 연구에서도 짧은 조사(irradiation) 시간 내 바이러스 불활화 가능성이 제시되었다.^[3]

기존 UVGI 시스템은 주로 저압 수은램프, excimer lamp 또는 UVC-LED를 사용하지만, 램프 기반 광원은 공간 제어성이 낮고 LED는 고속 면처리를 위한 출력 밀도 확보에 한계가 있을 수 있다. 반면 자외선 레이저는 높은 빔 품질과 정밀한 광학계 결합이 가능하므로 제한된 면적에 균일하고 재현성 있는 UV-C 파장의 조사량(dose)을 빠르게 부여하는 공정에 적합하다.

*Corresponding author: Dong-Hee Lee, TEL: +82-043-880-3808, E-mail: dhlee99@hanafos.com

Authors ORCID: ^a<https://orcid.org/0000-0001-9259-9687>, ^b<https://orcid.org/0000-0001-7655-0058>

콘택트렌즈에 대한 자외선 살균 가능성은 기존 연구에서도 보고되었다. Lonnen 등은 자외선 기반 콘택트렌즈 소독 장치가 *acanthamoeba cyst*에 대해 3 log 이상의 감소를 제공할 수 있음을 보고하였으며, 130 mJ/cm² 이상의 UV 조사량 조건에서 유의한 불활화 효과를 제시하였다.^[3,4,5]

본 연구의 핵심은 자외선 레이저 빔을 직접 사용^[3]하는 것이 아니라, beam expander와 beam homogenizer를 통해 생산라인에 적합한 균일 면조사 광원으로 변환하는 데 있다. 일반적인 자외선 레이저 원 빔은 가우시안 강도 분포를 가지므로, 이를 그대로 사용할 경우 중심부 과조사와 주변부 저조사가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 50 mm×50 mm 조사면에서 90% 이상의 균일한 광도 분포를 형성하는 광학계를 설계하고자 한다.

제안 기술은 콘택트렌즈 생산라인의 포장 전 단계, 검사 후 단계, 이송 중 표면 살균 단계 또는 최종 멸균 전 생물부하 저감(bioburden reduction) 단계에 적용될 수 있다. 그러나 최종 멸균 공정을 대체하기 위해서는 SAL 수준의 멸균 검증, 포장 무균성 유지, 렌즈 물성 변화 평가 및 공정 밸리데이션(process validation)이 필요하다.^[1,5] 따라서 본 연구의 범위는 최종 멸균 장치가 아니라 생산라인 내 고속 표면 살균 또는 생물부하 저감(bioburden reduction) 적용을 위한 균일 면조사 광학계의 설계 및 평가로 제한한다.

또한 본 설계 기술은 콘택트렌즈뿐 아니라 의료용 소형 플라스틱 부품, 안경 렌즈 관련 부품, 화장품 용기, 개인 위생용품, 바이오칩 및 마이크로플루이딕 카트리지 등 다양한 인체 관련 생활용품 생산라인의 표면 살균 단계에 적용 가능성이 있다. 다만 자외선은 눈과 피부에 위험하고 오존 발생 가능성이 있으므로, 완전 차폐형 조사 챔버, 도어 인터록, 누설광 감시, 빔 덤프 및 배기 시스템이 필수적이다.

본 연구에서는 266 nm 파장의 CW 레이저와 beam

expander 및 homogenizer를 이용하여 50 mm×50 mm 면적에 1초 이내로 균일한 조사량을 부여할 수 있는 생산라인용 표면 살균에 이용할 수 있는 균일 면조사 광학계를 설계해보고 특정한 면적 이내에서 빔 강도(intensity) 균질성을 평가하였다. 설계와 평가는 CodeV^[6]와 LightTools^[6]로 진행하였다.

대상 및 방법

1. Bioburden Reduction용 광학계 설계 요구조건

Table 1의 설계 요구조건의 목표 조사량이 100 mW/cm²이고 조사 면적이 25 cm²이므로 시료면 기준 약 2.5W의 광출력이 필요하다. 실제 장비에서는 beam expander, homogenizer, 보호창 및 균일도 확보 과정에서 손실이 발생하므로 의뢰자가 제시한 레이저 출력의 에너지 효율을 62.5%로 고려하면 필요한 레이저 출력은 4 W 정도가 된다. 따라서 사용자가 선택한 Coherent Azure NX 266-1000 레이저^[7]의 출력은 1 W이므로 4대를 사용하여야 한다.

2. Beam expander 설계

Table 1의 설계 요구조건의 laser는 코히어런트사의 Coherent Azure NX 266-1000 모델인데 M²가 1.3 이하로 빔의 프로파일은 가우시안 빔에 가까울 것으로 판단된다. 출력빔의 직경이 약 2 mm이니 homogenizer 효율을 높이기 위해서는 이를 확대해서 beam homogenizer에 입력하도록 할 필요가 있다.

초기 2 mm 직경의 가우시안 레이저빔을 어느 정도 확대할지는 homogenizer를 구성하는 실린더렌즈의 폭을 얼마나 가늘게 가공할 수 있는지의 가공회사의 가공효율과 관계된다. 설계 의뢰받은 사용자 관련 회사에서 가장 저렴하고 정밀하게 가공 가능한 실린더 렌즈의 폭은 최소 2.6 mm

Table 1. Design specifications required by the user

Laser Spec.	Model	Coherent Azure NX 266-1000 x4
	wavelength / power	266 nm / 1 W
	Beam waist diameter	2±0.3 mm
	Beam divergence	<0.3 mrad full angle
	M ²	<1.3
	Beam ellipticity	0.9-1.1
User-required optical system performance (by using 4 lasers)		
Input total power		4W
Uniform illumination region		(V) 50.0 mm ± 1% × (H) 50 mm ± 1%
Illumination uniformity		>90%
Target irradiation energy amount		≥ 100 mW/cm ² ± 2 %
Optical system light efficiency suggested by the user		≥ 62.5%

Table 2. Design data for the designed beam expander

Surface #	Radius	Thickness	Glass	Semi-Aperture
1		10		1.0
2	10.4675	2	SILICA_SPECIAL	2.5
3	3.6043	90		2.5
4	396.2336	5	SILICA_SPECIAL	10
5	-59.7592	20		10
Image		10		9



Fig. 1. Ray tracing drawing of a beam expander designed for 9X magnification.

까지라고 하여 이를 수용하여 설계할 실린더렌즈의 폭을 2.6 mm로 설정하였다. 다음은 가우시안 빔을 몇 개의 실린더 렌즈를 지나가게 하여 빔의 균일도를 유지할 것인지를 결정해야 하는데 이는 설계자의 설계 경험에 많이 의존한다. 우리는 레이저의 $M^2 < 1.3$ 이므로 거의 가우시안 빔의 형태와 유사한 빔 형상일 것이라는 점과 가우시안 빔이면 7~8개 이상의 실린더렌즈의 폭을 지나야 균일도 90% 이상을 유지할 수 있을 것이라는 실험실 자체 개발된 simulation S/W 운용 판단으로 beam expander의 배율을 결정하였다.

2.6 mm를 7개 사용하면 18.2 mm가 되고, 이를 2 mm 레이저 빔 폭으로 나누면 9.1이 되기 때문에 우리는 beam expander의 배율을 9배로 결정하였다. 배율이 9배가 되면 Table 1에서의 빔 발산각은 0.3 mrad에서 beam expander를 지나면서 0.033 mrad으로 바뀌게 되어 laser 빔의 지향성은 더 좋아지게 된다. 이렇게 해서 설계된 beam expander의 데이터는 Table 2와 같다. 설계된 beam expander의 유효 광선속의 광선추적도는 Fig. 1에 보여지고, LightTools

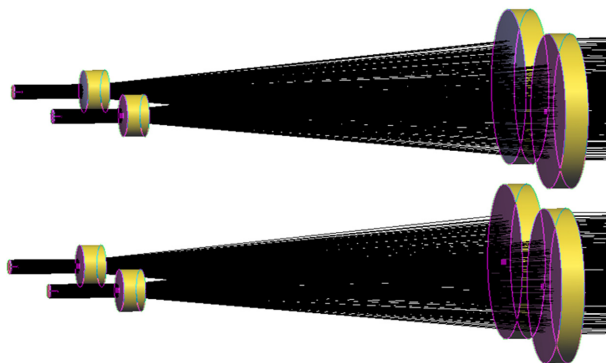


Fig. 2. Ray tracing drawing of the designed beam expander as shown in LightTools.

에서의 광선추적도는 Fig. 2에 나타나있다.

3. Homogenizer 설계

다음은 homogenizer를 구성하는 실린더렌즈 array를 설계하고자 한다. 설계하고자 하는 실린더렌즈 array 판렌즈 크기(A mm×A mm)는 Table 1의 사용자 레이저 4대의 빔을 수용해야 하기 때문에 각각의 레이저 beam의 간격을 25 mm로 하고, 9배 확대된 레이저 빔을 수용할 수 있는 유효 공간의 한 변의 길이는 25+18=43 mm이다. 여유분 12 mm를 고려하면 55 mm가 되고 이를 수용할 실린더렌즈의 개수는 21개이고 따라서 A=54.6 mm가 된다.

개별 실린더렌즈는 2.6 mm 빔 폭을 가지는데 균일 빔 조사면(mask 면)에서 50 mm로 확대되어야 한다. 이 확대는 다음 단계 설계인 field lens 설계와 연동되어 설계되어야 한다. 우선 우리는 2.6 mm 빔폭을 가지는 실린더렌즈의 최종단에서의 수축각의 Tan값이 0.05208이 되고 BFL(back focal length)은 수직 실린더 조합에서는 10.6572 mm, 수평 실린더 조합에서는 14.6576 mm이므로 평균값 12.6574 mm를 BFL로 사용하였다. 이는 다음 단계 Field Lens 설계에 이용된다.

이렇게 설계된 개별 실린더렌즈의 데이터는 Table 3과 같다. 설계된 개별 실린더렌즈의 유효 광선속의 광선추적도는 Fig. 3에 제시되어 있으며, LightTools에서의 광선추적도는 Fig. 4에 나타나있다. Table 3에서 P-Window는 보호용 윈도우 두께를 2 mm로 하였다. 배열은 수직-수평-수직-수평 방향 실린더 array판 배열로 homogenizer를 구성하였다. 즉 Fig. 3에서 보면 a), b)가 광축이 수직방향이고 c), d)가 광축이 수평방향인 실린더 렌즈를 나타낸다.

Fig. 4는 이들 개별 실린더 렌즈를 4판(54.6 mm×54.6 mm)의 실린더 array판으로 만들어 homogenizer를 구성하여 LightTools를 통해서 구현한 광선추적도를 보여주고 있다. 여기서 protecting window는 homogenizer를 구성하는 렌즈들을 보호하기 위해 존재하는 것이다.

4. Field Lens 설계

Field Lens 설계^[8,9]는 homogenizer를 구성하는 개별 실

Table 3. Design data for a vertical-horizontal axis cylindrical lens with a 2.6 mm beam width

Surface #	Radius	Thickness	Glass	Semi-Aperture
P-Window		2	SILICA_SPECIAL	1.3
2		5		1.3
V-Cylinder	31.44854	3	SILICA_SPECIAL	1.3
4		2		1.259023
H-Cylinder	31.44854	3	SILICA_SPECIAL	1.21768
6		15		1.176333
V-Cylinder	13.80879	3	SILICA_SPECIAL	0.865698
8		2		0.762532
H-Cylinder	13.80879	3	SILICA_SPECIAL	0.658369
10		(V)10.6572 (H)14.6576		-
11		0		0.000786



Fig. 3. Ray tracing of individual cylindrical lenses with a beam width of 2.6 mm (a-b and c-d are combinations of cylindrical lenses with vertical and horizontal axes; e is a protective window).

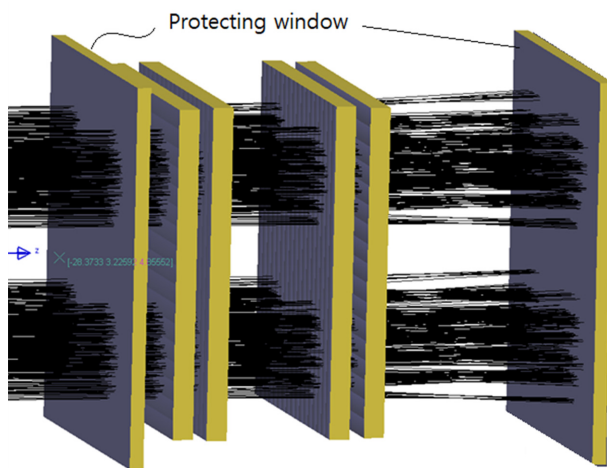


Fig. 4. A ray tracing diagram produced by LightTools and a homogenizer (with protective windows on the front and back), consisting of a cylindrical array plate (54.6 mmx54.6 mm) comprising 21x4 individual cylindrical lenses, with a width of 2.6 mm.

린더 렌즈와 연결되어 설계되어야 한다. 개별 실린더 렌즈의 최종단에서의 수축각의 $\tan$ 값이 0.05208이 되었기 때문에 field lens는 이 각으로 입사한 광선이 초점면에서 50 mm로 발산되어지도록 입사해야한다. 여기서 Field Lens의 초기 초점거리 f_1 을 결정할 수 있는데

$$f_1 = \frac{50 \text{ mm}}{2 \times 0.05208} = 480.03 \text{ mm} \quad (1)$$



Fig. 5. Ray tracing of an optical system with a focal length of 480.03 mm, designed as an early field lens (composed of two plano-convex lenses).

로 결정된다. 여기서 2는 수축각의 $\tan$ 값이 반각이므로 50 mm를 2로 나누어야 하기에 사용된다. 이 값은 최적화 과정에서 변경될 수도 있다.

초기 Field Lens 설계는 2개의 평볼록 렌즈로 초점거리가 480.03 mm가 되도록 하여 설계하였는데 설계된 렌즈를 통한 광선추적도가 Fig. 5에 나와 있다.

5. 통합 광학계의 구조 분석 및 최적화

지금까지 설계된 266 nm 레이저 광원 4개, beam expander 4개, homogenizer 1개, field lens 한 세트를 조합하여 광학계를 구성하고, 이를 LightTools에 데이터 입력하여 확보한 배치도는 Fig. 6과 같이 정리된다. Fig. 6의 오른쪽 끝에는 Mask_1의 receiver가 보이는데 이는 여기서 원하는 균일도의 레이저 빔 분포가 이루어지는지 확인하는 분석 창 역할을 하게 된다.

이러한 구성으로 LightTools을 통해 분석한 90% 이상의 균일도를 갖는 조사영역의 크기가 약 42.0 mm로 측정되었는데 이는 원하는 크기의 84.09%가 된다. 이를 Table 1



Fig. 6. Appearance of the initial optical system configured by arranging four designed 266-nm laser sources, four beam expanders, one homogenizer, and one field lens set.

Table 4. Design data for the final designed field lens

Surface #	Radius	Thickness	Glass
1		17.1906	
2		2	SILICA_SPECIAL
3		1	
FL1	640.5962	13	SILICA_SPECIAL
5		550	
FL2	260.2499	13	SILICA_SPECIAL
6		0	
Image		337.9242	

에 나와있는 설계 의뢰자의 요구를 수용하기 위해 조정하기로 하였다. 따라서 필드렌즈의 초점거리에 비례해서 조사면적이 결정되기 때문에 초점거리를 $\frac{50}{42} \times 480.03 \text{ mm} = 571.46 \text{ mm}$ 가 되도록 필드렌즈의 곡률반경과 거리를 scale up하였고 렌즈두께 등을 정수화 하기 위해 곡률반경을 변수로 추가 최적화하였다. 이 최적화된 결과는 Table 4와 같다. Field lens의 초점거리는 570.8600 mm로 되었고 Field 마지막 면에서 균일조사영역(mask_1 receiver)까지의 거리는 337.9242 mm가 되었다.

Table 4의 2번 렌즈는 Fig. 4의 두 번째 homogenizer의 보호창인 것이다. 이 보호창 앞의 1번 면의 두께 17.1906 mm는 이 Field lens의 FFL(front focal length)를 나타낸다.

이로써 Fig. 3의 (d)면에서 두 번째 homogenizer의 보호창까지의 거리는 $12.6574 + 17.1906 = 29.8480 \text{ mm}$ 로 결정됨으로써 전체 광학계의 구조를 완성할 수 있게 된다. 이러한 구성에 의한 field lens를 통한 광선추적도를 LightTools에서 구현해보면^[10] Fig. 7과 같이 나타난다.

전체 광학계의 구조를 반영한 광학계의 의한 LightTools를 통한 광선추적도가 Fig. 8에 나타나 있다. 이 광학계를 실제 생산라인에서 사용하기 위해서는 광학계 중간에 45도 반사 미러 광학계를 배치하여 folding 구조를 구성하면 필요한 공간에 배치할 수 있을 것이다.



Fig. 7. Ray tracing through the final determined field lens set.



Fig. 8. Ray tracing through the final designed optical system.

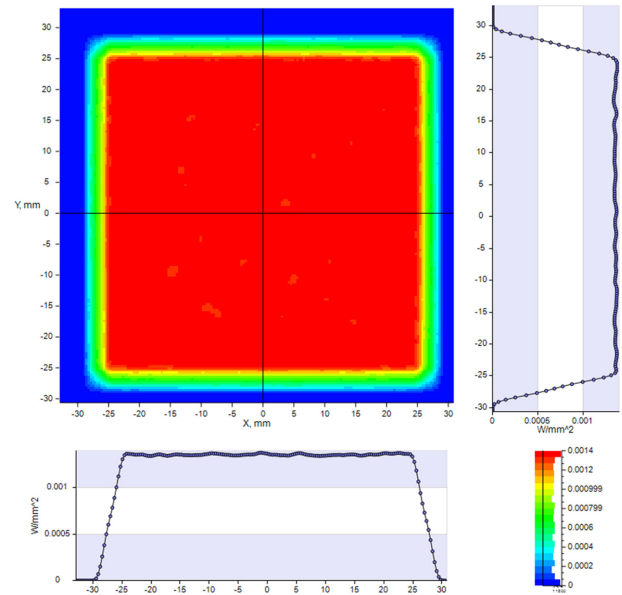


Fig. 9. Beam uniformity evaluation chart of the final designed optical system for bioburden reduction using LightTools.

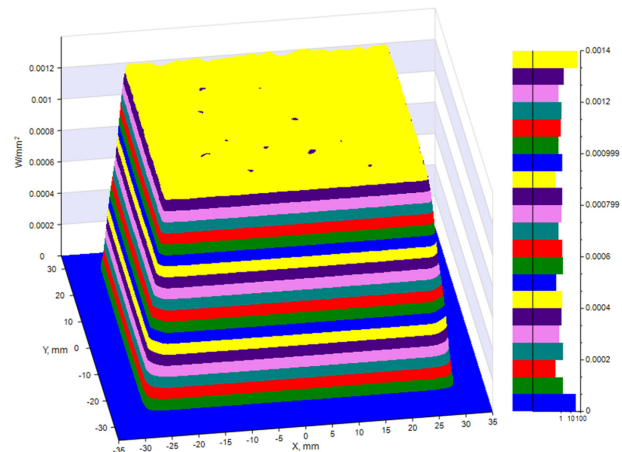


Fig. 10. A 21-chromatic contour evaluation chart of the finally designed optical system for bioburden reduction by LightTools.

결과 및 고찰

지금까지 설계된 266 nm 레이저 광원 4개, beam expander 4개, homogenizer 1개, field lens 한 세트를 조합하여 bioburden reduction용 광학계를 설계 구성하였고, 이를 LightTools에 입력하여 확보한 빔 균일도 정면도 분석 차트가 Fig. 9에, 21색 등고선 평가 차트가 Fig. 10에 나와 있다.

Fig. 9에서 보면 50 mm×50 mm 영역에서 거의 균일한 색상을 가지고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이를 오른쪽 및 하단의 단면 광량 분포 차트에서 보면 더 정확하게 확인할 수 있다. 즉 flat-top(top hat)이 유지되는 영역이 50 mm

×50 mm 크기가 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 10의 21색 등고선 평가 차트에서는 21번째 노란색 층에 일부 구멍이 보이고 20번째 층에는 구멍이 관통되지 않고 있는 것으로 볼 때 최소로 계산하여

$$\frac{19\text{층 높이}}{21\text{색도층 높이}} = \frac{19}{21} = 0.904 \quad (2)$$

90.4% 이상의 uniformity를 이루고 있음을 확인할 수 있다. 실제 LightTools에서 제공된 intensity 수치데이터(mesh data라고 함)에서는 좌표 x=11.628 mm, y=23.023 mm에서 max=1.4143908e-3, 좌표 x=24.884 mm, y=24.884 mm에서 max=1.3068242E-3 이므로

$$\text{Uniformity} \left(\frac{\text{Min}}{\text{Max}} \right) = 0.923949 \quad (3)$$

로 계산되어 92.4%의 수치적 uniformity를 이루고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 이번에 설계된 광학계는 설계의뢰자의 요구조건인 '90% 이상의 beam uniformity를 50 mm×50 mm 영역에 성립시키는 광학계'를 모두 만족하는 것으로 판단된다.

이 광학계는 사용자가 요구하는 광효율이 62.5%를 달성하기 위해서는 다음의 계산이 필요하다. 렌즈 1면당 투과율 0.99로 가정한다면 광학계를 이루는 총 20면의 광 투과율은 0.8179가 된다. 유효면적 효율은

$$\frac{\text{유효면적}}{\text{조사면적}} \times \text{면적효율계수} = \frac{50 \times 50 \text{ mm}^2}{57 \times 57 \text{ mm}^2} \times 1.0 = 0.769 \quad (4)$$

로 계산된다. (여기서 면적효율 계수를 1로 둔 것은 유효면적의 에너지밀도와 비유효면적의 에너지밀도를 같게 둔다는 것이다. 사실 비유효면적의 에너지 밀도가 유효면적의 에너지 밀도보다 작기 때문에 항상 이 계수는 1보다 크게 된다.)

0.99일때의 20장의 광투과율 0.8179와 (4)식을 곱하면 0.629가 되어 사용자가 요구하는 광효율 62.5%를 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

결 론

266-279 nm UV LED 조사 연구에서 병원성 세균인 *Escherichia coli* O157:H7, *Salmonella* spp., *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus* 및 효모에 대한 조사량 증가가 미생물의 불활화를 증가시키며, DNA 손상을 유도함이 주요 불활화 원인이 되고 있음이 보고되었다.^[2,11,12] 이에 본 연구에서 사용하고자 하는 266 nm 파장은 기존 문헌상 미생물 불활화에 유효한 파장 범위에 해당한다는 판

단을 할 수 있다.

이러한 판단에 따라, 설계 요구자의 요구조건을 맞춘 콘택트렌즈 용품 생산에 적용할 생물부하 저감(bioburden reduction) 장치 광학계를 설계하게 되었고, 266 nm 레이저 광원 4개, beam expander 4개, homogenizer 1개, field lens 한 세트를 설계 조합하여 bioburden reduction용 광학계를 구성하였다.

설계 결과를 LightTools S/W를 통해 분석한 결과 50 mm×50 mm의 조사영역과 90% 이상의 빔 균일도를 만족하는 광학계를 구성할 수 있음을 확인하였다. 또한 이 광학계의 광효율이 62.5%일 경우 생산라인에서 50 mm×50 mm 조사 영역의 컨베이어 벨트를 5 cm/sec 속도로 이동시킨다면 100 mW/cm²의 에너지 밀도의 조사량을 가지게 된다.

이러한 광학계는 앞으로 콘택트렌즈 관련 제품뿐만 아니라 의료용 소형 플라스틱 부품, 안경-렌즈 관련 부품, 화장품 용기, 개인 위생용품, 바이오칩 및 마이크로플루이딕 카트리지 등 다양한 인체 생활용품 생산라인으로 확대 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] FDA(Food and Drug Administration). Soft(hydrophilic) daily wear contact lenses - performance criteria for safety and performance based pathway: Guidance for Industry and Food and Drug Administration Staff, 2023. <https://www.fda.gov/media/135629/download>(10 June 2026).
- [2] Kim DK, Kim SJ, Kang DH. Bactericidal effect of 266 to 279 nm wavelength UVC-LEDs for inactivation of Gram positive and Gram negative foodborne pathogenic bacteria and yeasts. *Food Res Int.* 2017;97:280-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.04.009>
- [3] Sun K, Niu G, Zhang Y, et al. Ultrafast inactivation of SARS-CoV-2 with 266 nm lasers. *Sci Rep.* 2022;12(1):18640. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23423-2>
- [4] Lonnen J, Putt KS, Kernick ER, et al. The efficacy of Acanthamoeba cyst kill and effects upon contact lenses of a novel ultraviolet lens disinfection system. *Am J Ophthalmol.* 2014;158(3):460-468.e2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajo.2014.05.032>
- [5] ISO(International Organization for Standardization). ISO 14534:2011, Ophthalmic optics -contact lenses and contact lens care products -fundamental requirements, 2011. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14534:ed-3:v1:en>(10 June 2026).
- [6] Synopsys Inc. Synopsys Documentation on the Web: Online manuals for Synopsys products, 2026. <https://www.synopsys.com/support/licensing-installation-computeplatforms/synopsys-documentation.html>(27 May 2026).

- [7] Coherent Corp. Azure NX 266-1000: High-Power CW Deep UV Laser, 2026. <https://www.coherent.com/lasers/cw-solid-state/azure>(27 May 2026).
- [8] Smith WJ. Modern optical engineering: the design of optical systems, 4th Ed. New York: McGraw-Hill, 2008;255-262.
- [9] Kingslake R, Johnson RB. Lens design fundamentals, 2nd Ed. Burlington: Academic Press, 2010;298-301.
- [10] Lee JH, Lee DH. Line-focusing optical system for laser beams using folding mirrors. J Korean Ophthalmic Opt Soc. 2022;27(3):193-200. DOI: <https://doi.org/10.14479/jkoos.2022.27.3.193>
- [11] Kim SJ, Kim DK, Kang DH. Using UVC light-emitting diodes at wavelengths of 266 to 279 nanometers to inactivate foodborne pathogens and pasteurize sliced cheese. Appl Environ Microbiol. 2016;82(1):11-17. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02092-15>
- [12] Green A, Popović V, Pierscianowski J, et al. Inactivation of Escherichia coli, Listeria and Salmonella by single and multiple wavelength ultraviolet-light emitting diodes. Innov Food Sci Emerg Technol. 2018;47:353-361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.03.019>

콘택트렌즈 생산라인용 266 nm 레이저 균일 면조사 광학계의 설계 및 평가

이정현¹, 이동희^{2,*}

¹극동대학교 대학원 에너지IT공학과, 학생, 음성 27601

²극동대학교 안경광학과, 교수, 음성 27601

투고일(2026년 5월 27일), 수정일(2026년 6월 5일), 게재확정일(2026년 6월 9일)

목적: 콘택트렌즈는 안구 표면과 직접 접촉하는 의료기기이므로 제조 및 이송 과정에서 표면 미생물 오염을 저감할 필요가 있다. 본 연구에서는 향후 콘택트렌즈 생산라인의 생물부하 저감 공정 적용을 위한 비접촉식 단시간 조사 광학 플랫폼으로서, 266 nm 레이저를 이용한 균일 면조사 광학계를 설계하고 광학적 조사 성능을 평가하였다. **방법:** 1 W급 266 nm CW 레이저 4개를 광원으로 사용하고, 각 레이저 빔을 9배 beam expander로 확대한 뒤, 실린더렌즈 배열로 구성된 homogenizer와 field lens를 조합하였다. 설계 및 광선추적 평가는 Code V와 LightTools를 이용하였으며, 목표 조사 영역은 50 mm×50 mm, 목표 빔 균일도는 90% 이상으로 설정하였다. **결과:** 최종 설계된 광학계는 4개의 레이저 광원, 4개의 beam expander, 1개의 homogenizer 및 1조의 field lens로 구성되었다. LightTools 분석 결과, 목표 조사 영역에서 flat-top 형태의 균일한 광분포가 형성되었고, 21색 등고선 평가 차트 기준으로 약 90.4% 이상의 빔 균일도가 확인되었다. 또한 광효율을 62.5%로 가정할 경우, 목표 조사 영역에서 약 100 mW/cm²의 조사강도를 제공하는 것으로 계산되었다. **결론:** 본 광학 시스템은 단시간 자외선 기반 미생물 부하 감소 연구 및 공정 개발을 위한 UV 조사 광학 플랫폼으로 활용될 수 있다. 다만, 재료 안정성 시험, 미생물학적 효능 검증, 안전 차폐 및 공정 밸리데이션이 추가로 필요하다.

주제어: 콘택트렌즈, 266 nm 레이저, 생물부하 저감, 균일 면조사, 광학계 설계