

Reflector Design to Improve the Uniformity of an Irradiated Area Using a Xenon Flash Lamp

Seo-Young Kim, Han-Yul Lee, Won-Kyoun Jun, Dong-Hwa Kang, Ye-Ji Jo, and Mee-Suk Jung[†]

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

(Received December 19, 2018; Revised May 16, 2019; Accepted August 7, 2019)

In this paper, we studied a reflector design that can improve the illuminance uniformity when using a xenon flash lamp in the photonic sintering process. To achieve complete sintering of substrates in the irradiated area, the light efficiency and illuminance uniformity were set to target performance. Existing elliptical reflectors or parabolic reflectors make it easy to satisfy the target light efficiency, but have difficulty satisfying the illuminance uniformity. In this paper, a twin-concave feature has been added to the center of the parabolic reflector to satisfy the illuminance uniformity. It was confirmed that the illuminance uniformity of the parabolic reflector with a twin-concave feature was improved, compared to that of the traditional reflector.

Keywords: Xenon flash lamp, Reflector, Illuminance uniformity, Illumination optics
OCIS codes: (220.2945) Illumination design; (230.4040) Mirrors

제논 플래시 램프 사용 시 조사 영역 균일도 개선을 위한 반사경 설계

김서영 · 이한울 · 전원균 · 강동화 · 조예지 · 정미숙[†]

한국산업기술대학교 나노-광공학과
Ⓣ 15073 경기도 시흥시 산기대학로 237

(2018년 12월 19일 받음, 2019년 5월 16일 수정본 받음, 2019년 8월 7일 게재 확정)

본 논문은 광 소결 공정에 쓰이는 제논 플래시 램프 사용 시 조도 균일도를 개선시킬 수 있는 반사경 설계에 대한 연구를 진행하였다. 조사 영역에서 기판의 완전한 소결이 이루어지기 위해서 광효율과 조도 균일도를 목표 성능으로 설정하였다. 기존의 타원 반사경 또는 포물 반사경을 이용한 방식은 광효율을 만족하기 용이하지만 조도 균일도를 만족하는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 조도 균일도를 만족시키기 위해 포물경의 중앙부에 쌍오목 형상을 추가하였다. 이러한 쌍오목 형태의 중앙부 형상을 갖는 포물 반사경의 조도 균일도가 기존의 반사경에 비해 향상됨을 확인하였다.

Keywords: 제논 플래시 램프, 반사경, 조도 균일도, 조명 광학
OCIS codes: (220.2945) Illumination design; (230.4040) Mirrors

I. 서 론

최근 각종 스마트 기기의 부상에 따라 터치스크린에 이용되는 유연소자의 수요가 많아지면서 인쇄 전자와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있다. 인쇄 전자 공정은 나노 잉크를 기판에 인쇄하는 방식으로 나노 잉크를 패턴화하기 위한 별도의 소결 공정을 진행한다. 소결 공정은 압축된 금속 분말에 에너지를 가해 입자들을 서로 결합시키는 과정을 말하며 크게 열 소결, 레이저 소결, 광 소결로 나누어진다. 그중 제논 플래시 램프를 이용하는 광 소결 공정은 기판의 완전한

소결을 위해 충분한 광량이 조사되어야 하고 조사 영역 내 모든 위치에서 동일하게 소결이 진행되어야 한다. 따라서 광 효율과 조도 균일도를 필수적으로 고려해야 하며 이를 위한 제논 플래시 램프의 광학계 설계가 필요하다^[1].

본 논문에서는 반사경을 제논 플래시 램프의 광학계로 선정하고 설계를 통해 목표 광효율 및 조도 균일도를 만족하고자 한다. 그러나 부피가 큰 제논 플래시 램프가 광경로를 방해하여 광이 목표 조사 영역에 균일하게 조사되지 않아 목표 조도 균일도를 만족하는데 어려움이 있다. 따라서 출사광 중 반사경으로 제어할 수 있는 광을 분석하고 광의 작도를 통해

[†]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.

최적의 반사경 형상을 설계하여 광손실을 최소화하면서 조도 균일도를 개선하고자 한다.

II. 본 론

2.1. 제논 플래시 램프

제논 플래시 램프는 백색광으로 넓은 방출 스펙트럼 분포를 가지는데, 특히 300~600 nm 영역의 파장은 단결정 실리콘으로 이루어진 기판을 광자를 흡수하기 수월하여 효과적으로 소결 공정을 진행할 수 있다. 하지만 제논 플래시 램프에서 발생하는 자외선 파장은 오존을 생성하여 광 소결 장비 및 기판에 결함을 줄 수 있다. 따라서 자외선 차단을 위해 제논 플래시 램프의 유리는 일정 두께를 유지해야 하며 재질 선택에 유의해야 한다. 또한 순간적으로 고전압을 인가하여 수 밀리초 간격으로 반복 발광하는 광원이기에 높은 출력으로 인한 과도한 열이 광원의 손상을 불러올 수 있기 때문에 수냉 방식을 사용한다.

광 소결 공정에 적합한 광원을 설계하기 앞서 광출력 100 W의 지름 20 mm, 길이 550 mm를 가지는 제논 플래시 램프를 선정하였다. 수냉 방식을 사용하기 위하여 유리 사이에 냉각수를 적용한다. 또한 광원과 냉각수 사이의 잦은 온도 변화로 인한 재료 변형을 고려하여 1 mm 두께의 유리를 적용하고, 가장 외곽의 유리는 충격 에너지를 대비하기 위해 2 mm 두께의 유리를 가지도록 하였다. 이때 유리의 재질은 약 220 nm 파장까지의 자외선 영역을 차단하는 fused silica로 한다. 그림 1은 앞서 언급된 사항들이 고려된 제논 플래시 램프 광원의 단면 개략도와 광원을 LightTools 내에서 구현한 모습이며 실제 제작 시 성능 오차를 최소화하기 위해 Fresnel loss를 적용하였다.

2.2. 반사경 설계 목표

본 논문에서는 제논 플래시 램프의 광학계 설계를 통해 넓은 조사 영역을 목표로 하여 크기가 큰 기판이나 다수의 작은 기판 소결이 가능하게 하고자 한다. 하지만 광원에서 방출된 광이 목표 조사 영역에 충분히 도달하지 못할 경우 각 기판들의 불완전한 소결이 발생하고, 이로 인해 여러 번의 공정을 반복하게 되어 소결 효율이 떨어지게 된다. 따라서 목표 조사 영역에서 완전한 소결이 이루어지려면 광효율과 조도 균일도를 필수적으로 고려해야 한다.

목표 조사 영역은 광원의 크기를 고려하여 450 mm × 100

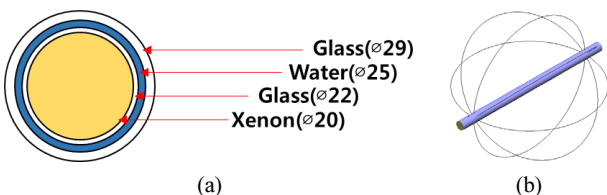


Fig. 1. Light source modeling. (a) Schematic of the light source. (b) Light source designed with LightTools.

mm로 지정하였으며 광효율은 목표 조사 영역 대비 광손실을 고려하여 25% 이상을 만족하도록 한다. 광출력이 100 W인 광원을 사용하므로 목표 광효율 25% 이상을 충족하기 위해서 식 (1)에 따라 조사 영역에 도달하는 광량이 25 W 이상이어야 한다.

$$\text{Optical efficiency (\%)} = \frac{\text{Incident power on target area}}{\text{Input power}} \times 100 \quad (1)$$

또한 조사 영역 내 다수의 기판을 모든 위치에서 동일하게 소결하기 위해 조도 균일도를 고려해야 한다. 조도 균일도는 조사 영역 내에서 조도의 최댓값과 최솟값을 식 (2)에 대입하여 계산한다. 광 소결 공정에서 배치된 기판들의 완전한 소결을 이루기 위해서 목표 조도 균일도 90% 이상을 만족하도록 한다.

$$\text{Illuminance uniformity (\%)} = \left(1 - \frac{\text{Max} - \text{Min}}{\text{Max} + \text{Min}}\right) \times 100 \quad (2)$$

광효율 25% 이상을 만족하기 위해서는 광 제어를 통한 광량 확보가 필요하므로 광학계를 이용한 집광 방식인 반사경 제어 방식을 사용한다. 반사경 제어 방식은 반사경의 초점에서 나온 광을 반사시켜 해당 조사 영역에 집광시키는 것으로 발산각이 넓은 광원을 제어하는데 적합한 방식이다. 광 조사 각 제어를 위한 multi-faceted 반사경은 적용 면적이 넓을수록 수축률에 민감하여 현재까지 500 mm 이상의 긴 길이를 가지는 제논 플래시 램프의 반사경에 적용하기 어렵다. 따라서 본 논문에서 사용하는 제논 플래시 램프는 360°의 발산각을 가지는 광원으로, 이에 적합한 반사경 제어 방식을 이용하고자 한다.

그림 2는 광원, 반사경, 유리 덮개로 이루어진 제논 플래시 램프 광학계의 개략도이며 유리 덮개로부터 30 mm 떨어진

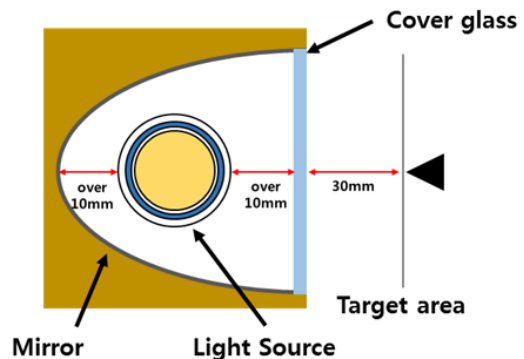


Fig. 2. Schematic of the optical system.

Table 1. Target specification of the xenon flash lamp

	Target specification	Target area
Optical efficiency	>25%	450 mm × 100 mm
Illuminance uniformity	>90%	

곳에 목표 조사 영역 $450\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 를 지정하였다. 반사경의 경우 광원의 과도한 열로 인한 손상 방지를 위해 광원과과의 거리 10 mm 이상을 유지하고 광원의 길이와 같은 550 mm 길이를 가진다. 또한 반사경에 $300\sim 600\text{ nm}$ 파장에서 90%의 반사율을 가지는 알루미늄 코팅을 적용하였다. 광원의 오염 방지를 위해 유리 덮개는 10 mm 의 두께를 가지며 위에서 기술한 광학적 요소들을 고려하여 표 1과 같이 목표 조사 영역 $450\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 에서 광효율 25% 이상, 조도 균일도 90% 이상을 만족하는 반사경 설계를 진행하고자 한다.

2.3. 기존 반사경 분석

기존의 제논 플래시 램프에 사용된 타원 반사경은 조도 균일도를 향상시키기 위해 두 개의 반사경을 사용하였다. 두 개의 반사경은 대칭을 이루며 광원에서 출사한 광은 반사경에 반사된 후 각각의 초점에 맺혔다가 다시 분산되어 목표 조사 영역에 균일하게 조사되도록 설계하였다.

그림 3은 코닉 $k=-0.19$, 곡률반경 $r=130\text{ mm}$ 를 가지는 타원 반사경의 상하좌우에 평반사면을 추가하여 구현한 반사경의 y - z 평면부 단면 모습과 유리 덮개 숨김 상태인 반사경의 등각 모습이다. 그림 4는 전체 조사 영역 $550\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 와 목표 조사 영역 $450\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 에서의 조도 분포 모습이며 전체 조사 영역에서 표시된 영역은 실제 목표 조사 영역이다. 또한 표 2는 목표 조사 영역 $450\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 에서의 광효율과 조도 균일도에 대한 값을 나타냈다. 조도 균일도는 88%, 광효율은 19.2%로 목표 값을 만족하지 못하였다.

설계한 타원 반사경의 시뮬레이션 결과, 목표 성능에 도달하지 못하였다. 이를 해결하기 위해 평행광을 형성하여 조도 균일도를 만족하기 용이한 포물 반사경을 적용하고 광손실을 최소화하기 위해 내부 높이를 조사 영역과 같은 100 mm 로 조정하였다.

그림 5는 코닉 $k=-1$, 곡률반경 $r=89\text{ mm}$ 를 가지는 포물 반사경의 상하좌우에 평반사면이 추가된 y - z 평면부 단면 모습과 유리 덮개 숨김 상태인 반사경의 등각 모습이다. 그림 6은 전체 조사 영역과 목표 조사 영역의 조도 분포 모습이고 표 3은 목표 조사 영역 $450\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 에서 광효율과 조도 균일도에 대한 값을 나타냈다. 광효율은 목표 값 25% 이상을 만족하는 30.7%로 기존 방식보다 광효율이 증가하였지만 조도 균일도는 78.8%로 목표 조도 균일도를 만족하기 위해 개선이 필요함을 알 수 있다.

그림 4와 그림 6을 통해 목표 조사 영역의 중심이 다른 부분에 비해 상대적으로 광량이 적음을 확인하였다. 이러한 문제는 부피를 갖는 제논 플래시 램프가 조사 영역의 중심으로 가는 광경로에 영향을 주어 발생한다. 그림 7은 부피가 큰 광원의 반사광이 점광원의 반사광과 다른 경로로 진행됨을 보인다. 점광원이 초점에 위치하였을 때 타원 반사경에 반사되는 광이 정확히 제 2 초점 f' 에 맺히지만 부피가 큰 광원에서 나온 광의 경우, 제 2 초점 f' 에 맺히지 않고 다른 방향으로 진행됨을 알 수 있다.

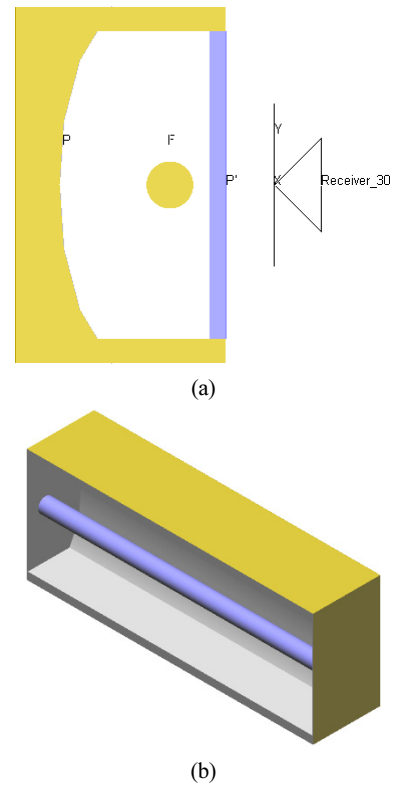


Fig. 3. Layout of the elliptical reflector. (a) y - z plane view. (b) Isometric view (hiding cover glass).

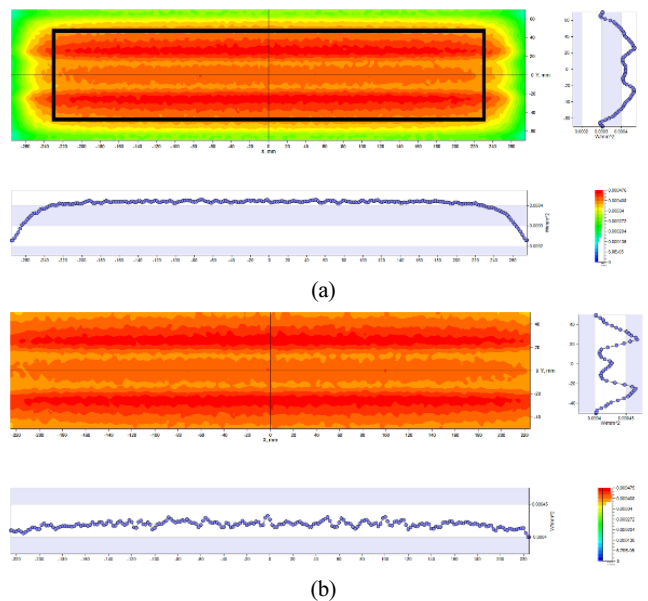


Fig. 4. Illuminance simulation of the elliptical reflector. (a) $550\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ receiver. (b) $450\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ receiver.

Table 2. Simulation result of the elliptical reflector

	Target specification	Simulation result
Optical efficiency	>25%	19.2%
Illuminance uniformity	>90%	88%

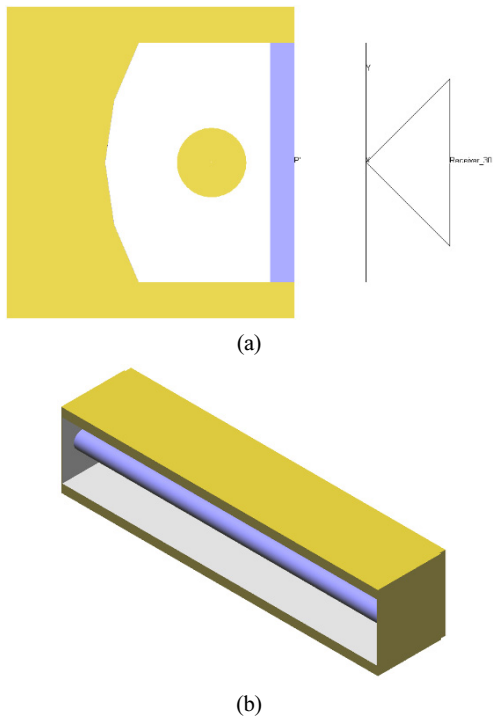


Fig. 5. Layout of the parabolic reflector. (a) y-z plane view. (b) Isometric view (hiding cover glass).

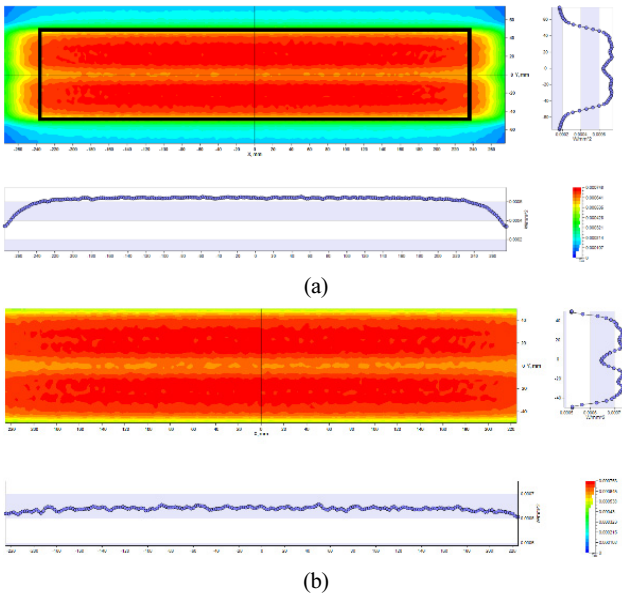


Fig. 6. Illuminance simulation of the parabolic reflector. (a) 550 mm × 150 mm receiver. (b) 450 mm × 100 mm receiver.

Table 3. Simulation result of the parabolic reflector

	Target specification	Simulation result
Optical efficiency	>25%	30.7%
Illuminance uniformity	>90%	78.8%

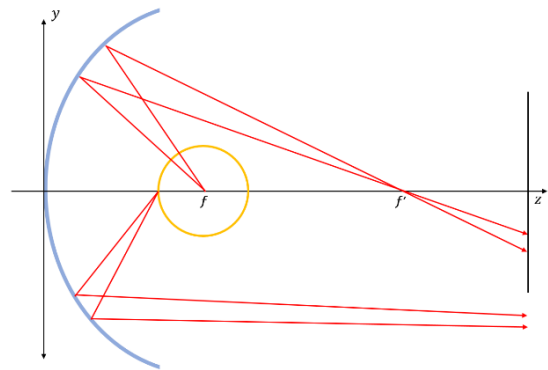


Fig. 7. Light paths for different sizes of light source.

2.4. 중앙부 형상이 추가된 반사경 설계

2.3절에서 시뮬레이션한 결과, 부피가 큰 광원에 의해 일부 반사광이 조사 영역의 중심으로 진행하지 않음을 확인하였다. 따라서 광효율을 만족한 포물 반사경을 토대로 반사광의 광경로를 고려한 반사경 설계를 진행하고자 한다. 그림 8은 일부 반사광을 조사 영역의 중심으로 진행시키기 위해 중앙부 형상을 변화시킨 포물 반사경의 개략도이다. 광손실을 최소화하기 위해 반사경의 내부 높이를 유지하고 조도 균일도를 만족하기 위해 포물 반사경을 이용하고자 한다.

그림 9는 포물 곡선 위의 한 점 A에서 접선을 기준으로 초점에서 입사하는 각 α 와 포물 곡선을 맞고 반사되는 각 α' 이

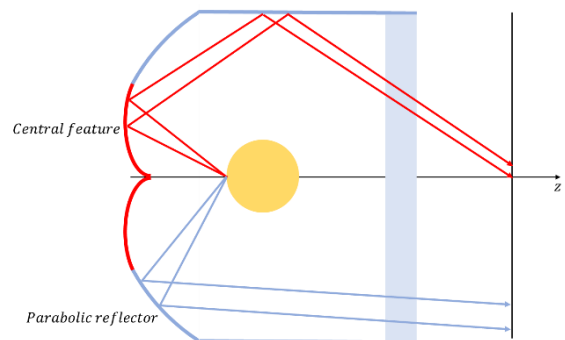


Fig. 8. Schematic of the parabolic reflector with changed central features.

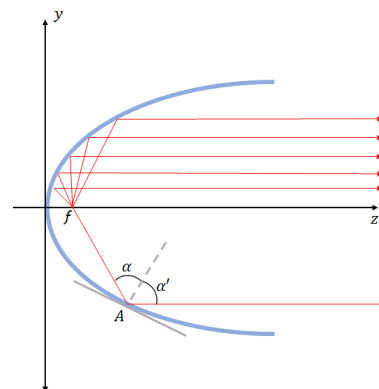


Fig. 9. Principle of the parabolic reflector.

같음을 나타낸다. 이때 반사되어 나가는 광이 평행한 성질을 이용하여 초점에 광원을 배치해 포물 곡선을 맞고 나가는 광을 평행하게 보내는 포물 반사경을 설계하고자 한다^[2].

식 (3)은 포물선의 방정식으로 z 는 반사경의 깊이, h 는 광축에서부터의 반사경 높이를 나타낸다. 앞서 반사경의 내부 높이를 100 mm로 고정한 것과 광원과 반사경 사이의 거리 10 mm 이상 유지를 위해 반사경의 깊이 z 를 14 mm로 지정하였고 식에 따라 초점 거리 약 44.5 mm를 도출할 수 있다. 곡률반경은 비구면 방정식인 식 (4)를 통해 도출하고자 하며 이때 k 는 비구면 상수, r 은 곡률반경을 나타낸다. 식에 의해 곡률반경 약 89 mm를 구할 수 있으며 도출된 초점 거리와 곡률반경을 통해 포물 반사경을 설계하였다. 그림 10은 포물 반사경 설계를 위한 변수들을 표시한 그림이다.

$$z = \frac{(2h)^2}{16 \times \text{focal length}} \quad (3)$$

$$z = \frac{\frac{(2h)^2}{4r}}{1 + \sqrt{1 - (1+k) \frac{(2h)^2}{4r^2}}} \quad (4)$$

일부 반사광의 광경로를 조사 영역의 중심으로 보내기 위해서는 반사경 형상의 변형이 필요하다. 또한 포물 반사경 설계 시 기준이었던 초점이 아닌 광원 외경 위의 한 점을 기준으로 형상의 변화를 주어야 양쪽으로 퍼지는 광을 제어할 수 있다. 따라서 반사경의 중앙과 가장 가까운 광원 외경 위의 한 점을 기준으로 정하고 반사경의 중앙부 형상에 변형을 주고자 한다^[3].

반사면에 수직인 법선을 기준으로 입사각과 반사각이 같다는 반사의 법칙에 의거해 광원 위 임의의 점에서 출사하는 광들이 조사 영역의 중심으로 도달할 수 있는 반사면의 위치를 찾을 수 있다^[4]. 그림 11은 임의의 점 A에서 5°로 출사하는 광이 중심점 P로 입사될 때의 점 B의 위치를 찾기 위한 작도 모식도이다. 5° 이상으로 출사하는 광들의 제어를

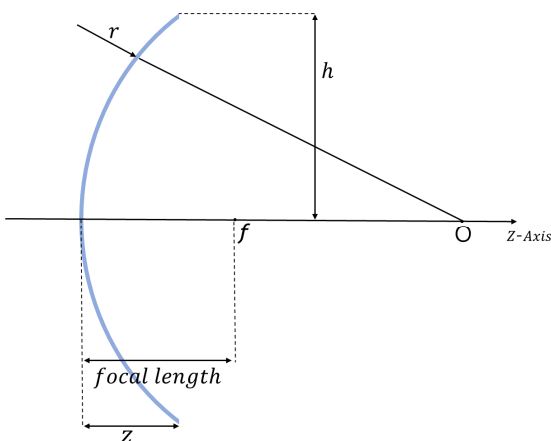


Fig. 10. Optical elements for the parabolic reflector.

통해 광손실을 최소화하고 균일도를 보상하고자 5°부터 45°까지 5° 간격으로 출사하는 광들에 대한 점 B의 작도를 진행하였으며 해당 점들에 대한 좌표를 표 4에 나타냈다. 그림 12는 해당 점들을 z 축 기준으로 -5°~-45°에도 대칭 적용하여 LightTools의 fitted curve 기능을 이용해 선으로 연결한 모습이다. 이 형상을 앞서 설계된 포물 반사경의 중앙부에 추가하고자 한다^[5].

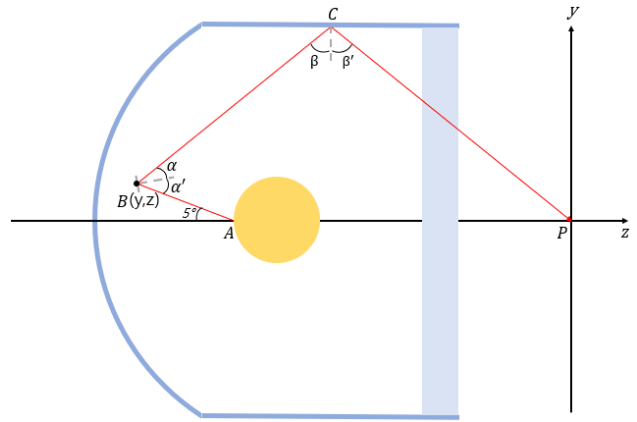


Fig. 11. Drawing figure of ray tracing.

Table 4. Coordinates of point B for various angle ranges

Angle range	Coordinates (y, z)
0~5°	(2.1, -23.8)
5~10°	(4.3, -24.2)
10~15°	(6.6, -24.6)
15~20°	(9.1, -25.0)
20~25°	(11.8, -25.3)
25~30°	(14.8, -25.6)
30~35°	(18.1, -25.8)
35~40°	(21.8, -25.9)
40~45°	(26.7, -26.0)

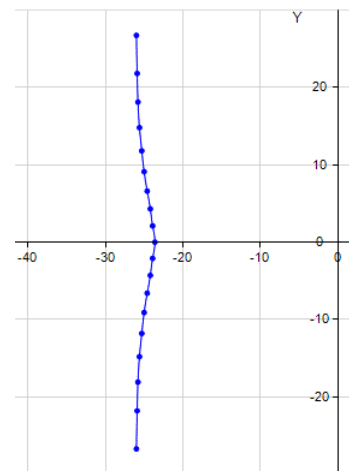


Fig. 12. Reflector shape using LightTools.

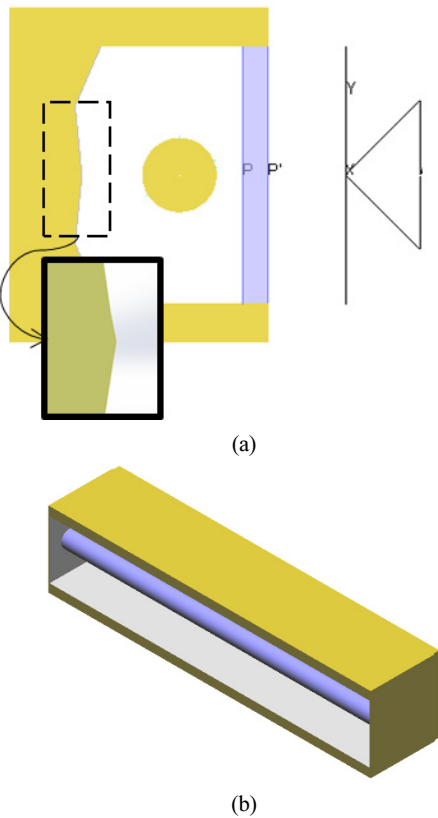


Fig. 13. Layout of the twin-concave parabolic reflector. (a) y-z plane view. (b) Isometric view (hiding cover glass).

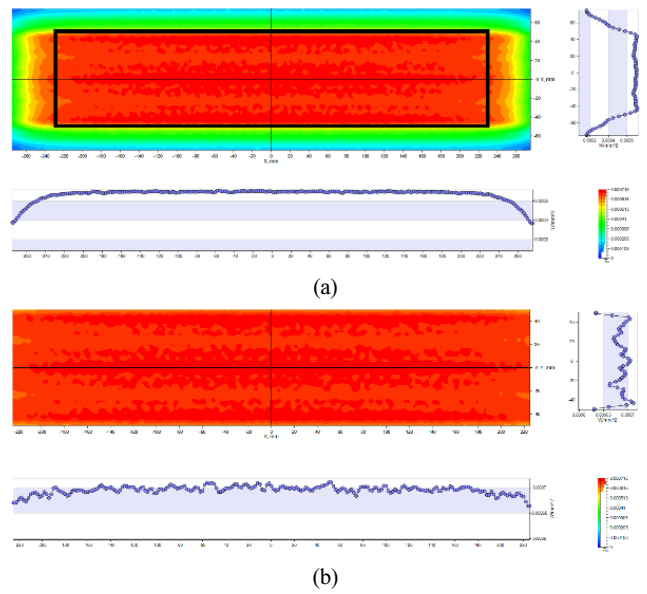


Fig. 14. Illuminance simulation of the twin-concave parabolic reflector. (a) 550 mm × 150 mm receiver. (b) 450 mm × 100 mm receiver.

Table 5. Simulation result of the twin-concave parabolic reflector

	Target specification	Simulation result
Optical efficiency	>25%	30.5%
Illuminance uniformity	>90%	91.0%

Table 6. Comparison of reflectors

	Reflector layout	Illuminance distribution	Simulation result	
			Optical efficiency	Illuminance uniformity
Elliptical reflector			19.2%	88%
Parabolic reflector			30.7%	78.8%
Twin-concave parabolic reflector			30.5%	91.0%

그림 13은 쌍오목 형상이 추가된 반사경의 y-z 평면부 단면 모습과 유리 덮개 숨김 상태인 등각 모습이다. 또한 각 조사 영역 별 조도 분포 모습을 그림 14에 나타내었다. 전체 조사 영역 550 mm×150 mm의 조도 분포에서 알 수 있듯이 기존 타원 반사경 방식보다 목표 조사 영역으로 집광되었음을 확인하였다. 표 5는 보상 설계된 반사경의 시뮬레이션 결과 값으로 광효율 30.5%, 조도 균일도 91%로 목표 값을 만족하였다. 또한 표 6은 기존의 타원 반사경과 포물 반사경 그리고 중앙부 형상이 추가된 반사경의 시뮬레이션 결과 비교표이다. 중앙부 형상의 변형을 통해 광손실을 최소화하고 조사 영역의 중앙에 광을 조사해 타원 반사경과 비교하여 광효율과 균일도가 개선되었음을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 광 소결 공정에 쓰이는 제논 플래시 램프를 사용하여 균일도를 개선할 수 있는 광학계 설계에 대한 연구를 진행하였다. 기관의 소결 효율을 향상시키고 조사 영역 내 모든 위치에서 동일한 소결이 이루어지도록 광효율과 조도 균일도를 목표 성능으로 설정하였다. 기존의 타원 반사경 및 포물 반사경을 구현하고 성능 분석을 진행한 결과, 타원 반사경 광효율 19.2%, 조도 균일도 88%로, 포물 반사경 광효율 30.7%, 조도 균일도 78.8%로 목표 성능을 만족하지 못함을 확인하였다. 따라서 반사경의 시뮬레이션을 분석하여 광손실을 최소화하기 위해 반사광의 광경로를 변화시키는 반사경을 설계하였다. 광원 외경 위의 한 점에서 5° 이상으로 출사하는 광들이 조사 영역의 중심으로 가기 위한 점들의 좌표를 구해 쌍오목 형상을 도출하였다. 중앙부 형상이 추가

된 반사경 설계의 시뮬레이션 결과, 광효율 30.5%, 조도 균일도 91%로 목표 값을 만족하였다.

따라서 본 논문에서는 반사경을 제논 플래시 램프의 광학계로 선정하여 중앙부 쌍오목 형상을 적용한 포물 반사경 설계를 통해 조사 거리 30 mm, 조사 영역 450 mm×100 mm에서 광효율 30.5%, 조도 균일도 91%를 가지는 반사경 광학계를 설계하였다.

References

1. Y.-R. Jang, W.-H. Jung, and H.-S. Kim, "Optimization of reflector shape for advanced characteristic of flash light sintering with large area and uniform light density," in *Proc. The Korean Society of Mechanical Engineers Conference* (Korea, Nov. 2015), pp. 563-566.
2. Y.-S. Jo, "A study on the uniformity ratio of illuminance and illumination distribution with reflectance change of lighting instruments reflector," M. S. Thesis, Hongik University, Seoul (2001), pp. 1-66.
3. D.-I. Seok, M. C. Lee, S.-G. Jung, and H. Kim, "Exclusive reflector design for 200 W electrodeless fluorescent lamp," in *Proc. The Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Conference* (Korea, Nov. 2007), pp. 3-7.
4. S.-H. Kim, "Luminaire design of a 75 W LED down-light lamp by optical simulation," M. S. Thesis, Wonkwang University, Seoul (2011), pp. 1-37.
5. C.-S. Lee, "LED high-precision reflector optics using a three-dimensional free-form surface," M. S. Thesis, Korea Polytechnic University, Gyeonggi (2013), pp. 1-71.