

비구면 렌즈를 이용한 레이저 빔 셰이핑에 관한 연구

A Study on laser beam shaping using aspheric lenses

*안문수¹, #나석주¹, 이재훈²

*J. S. Ahn¹, #S. J. Na(sjna@kaist.ac.kr)¹, J. H. Lee²

¹KAIST 기계공학과, ²한국기계연구원

Key words : aspheric lens, laser, beam shaping

1. 서론

레이저 빔의 공간적 에너지 분포를 변형시켜 원하는 빔의 형상을 얻기 위한 레이저 빔 셰이핑 기술은 최근 레이저를 이용한 재료 가공 공정의 미세화, 정밀화와 함께 다시금 주목받고 있다. 과거의 레이저 빔 셰이핑은 상대적으로 저조도이고 직경이 큰 빔의 형상을 변형시켜 직경 수 mm 이상의 큰 빔을 얻고, 이를 조명으로 활용하는 데에 주로 이용되었다. 최근에는 수십 μm 로 작게 집중된 빔의 형상을 변형시켜 재료를 절단, 천공하는 목적으로도 이용되고 있다.^[1]

레이저 빔 셰이핑은 비구면 렌즈 기반의 회절 광학계, 회절 광학 소자를 이용한 회절 광학계, 렌즈 어레이 등을 이용하는 방식이 보편적이다.^[2] 이 외에도 광섬유^[3], deformable mirror^[4], 랜덤 슬릿^[5] 등을 이용하는 방법들이 연구된 바 있다.

레이저 빔 셰이핑 광학계의 형태 및 설계 기법은 다양하며, 특정한 빔 셰이핑 광학계가 모든 용도의 빔 셰이핑에 적용될 수는 없다. 가령 균일한 조명 용도로 사용하기 위해 직경 5mm의 가우시안 빔을 입력받아 직경 8mm의 플랫탑 빔을 출력하도록 빔 셰이핑 광학계를 설계하였다면, 이 광학계를 직경 30 μm 로 집중된 플랫탑 빔을 얻는 용도로 전용하는 것은 곤란하다. 입력 빔의 특성, 광학계의 크기, 출력 빔의 특성 등에 따라 다른 설계가 적용되어야 하기 때문이다.

본 연구에서는 가우시안 빔을 입력받아 비구면 렌즈를 이용하여 직경이 큰 플랫탑 빔을 얻기 위한 빔 셰이핑 광학계와 직경이 작은 플랫탑 빔을 얻기 위한 광학계를 설계하는 기법을 다루고자 한다.

2. 기하광학적 설계 기법

2.1 설계 기법 선정 기준

가우시안 빔을 입력받는 빔 셰이핑 광학계에 대해 다음의 식은 광학계 설계에 기본적인 기준을 제시한다.^[2]

$$\beta = \frac{2\sqrt{2\pi} r_0 y_0}{f\lambda} \quad (1)$$

여기서 r_0 는 입력 가우시안 빔의 $1/e^2$ 반경, y_0 는 빔 셰이핑 광학계로부터 출력 받고자 하는 빔의 반경, f 는 초점거리 혹은 작업거리(working distance), λ 는 레이저의 파장을 각각 나타낸다.

$\beta > 32$ 인 경우 회절의 효과는 무시할 정도로 작으며, 널리 이용되고 있는 기하광학 기반의 설계기법을 적용하여도 무방한 것으로 알려져 있다. $4 < \beta < 32$ 인 경우에는 기하광학적 기법으로 광학계를 설계할 때에 회절의 효과를 추가적으로 고려하여야 하며, $\beta < 4$ 인 경우 기하광학적 설계기법으로는 빔 셰이핑 광학계의 설계가 사실상 불가능한 것으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 r_0 가 약 2.5mm인 가우시안 빔을 입력받아 y_0 가 4mm가 되도록 하는 광학계(이하 A 광학계)와, y_0 가 30 μm 가 되도록 하는 광학계(이하 B 광학계)를 설계하고자 한다. 작업 거리는 100mm로 설정하였으며, 레이저의 파장은 355nm이다. 이 경우 A 광학계의 β 값은 1412가 되어 기하광학적 설계기법의 적용이 적절하다. 그러나 B 광학계의 β 값은 10.6이 되므로 기하광학적 설계기법을 적용하되 회절 효과에 의한 빔 형상 변화를 면밀하게 살필 필요가 있다.

2.2 직경이 큰 플랫탑 빔으로의 셰이핑

기하광학적 기법에 의한 빔 셰이핑 광학계 설계는 흔히 2매의 비구면 렌즈를 이용하고 있다. 설계의 용이성 및 광학 소자 개수 저감을 통한 에너지 손실 최소화가 주된 목적이다. 본 연구에서도 이와 같이 2매의 비구면 렌즈 설계를 채택하였으며, Rhodes와 Shealy가 제안한 기법^[6]을 적용하였다. 이 기법은 특히 β 값이 큰 경우에 적용성이 좋은 것으로 평가되고 있으며, 에너지 보존 조건, 동일 광경로 조건, 스넬의 법칙 3가지 방정식들로 구성되는 광선 추적 개념의 기법이다.

실제의 레이저 가공기에서 거울에 의해 수송되는 빔은 거의 평행광에 가깝다고 가정할 수 있다. 따라서 레이저 가공기의 광경로상에 삽입될 빔 셰이핑 광학계는 평행광을 입력받아 평행광을 출력하도록 설계되어야 한다. 이 가정 하에 입력 렌즈의 좌측 표면은 형상 설계 대상에서 제외하였으며, 마찬가지로 출력 렌즈의 우측 표면도 제외하였다. 결과적으로 실제로 설계하여야 할 렌즈의 표면(설계 표면)은 입력 렌즈의 우측면과 출력렌즈의 좌측면이 된다. 또한 에너지 보존 조건을 적용함에 있어 렌즈 표면에서의 반사 및 렌즈 내부로의 에너지 흡수는 무시하였다.

A 광학계의 구성은 그림 1의 굵은 선 안쪽에 나타난 바와 같다. 그림 2는 비구면 설계 기법에 의해 도출된 입/출력 렌즈 표면의 단면 형상을 나타낸 것이다. 출력 렌즈를 통과한 빔의 형상은 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 플랫탑 형상을 띄게 된다. 그러나 이 플랫탑 빔을 별도의 집중 렌즈(그림 1의 점선 부분)를 이용하여 집중하게 되면 광학계의 β 값이 작아져 회절의 효과가 두드러지게 되며, 어느 한도 이하로 작게 집중하면 그림 3(b)와 같이 플랫탑 형상을 유지하지 못한다. 또한 따로 도시하지는 않았으나 위치에 따라 빔 형상이 지속적으로 변하게 된다.

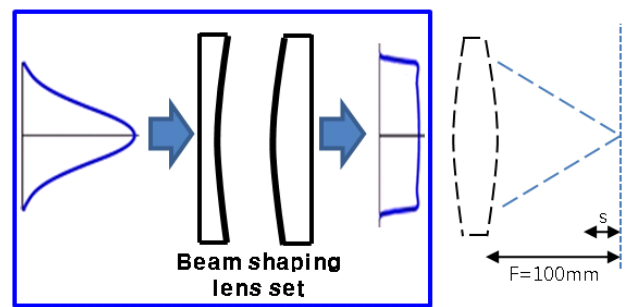


Fig. 1 Configuration of Gaussian-to-large-flattop beam shaping system (system A)

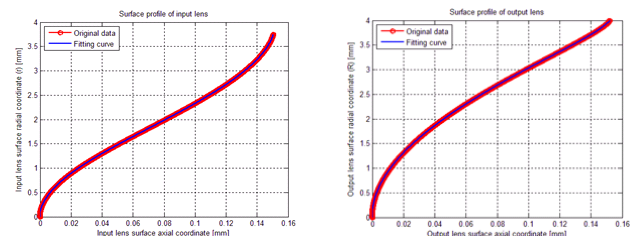


Fig. 2 Surface profile of input(left) and output(right) lens (system A)

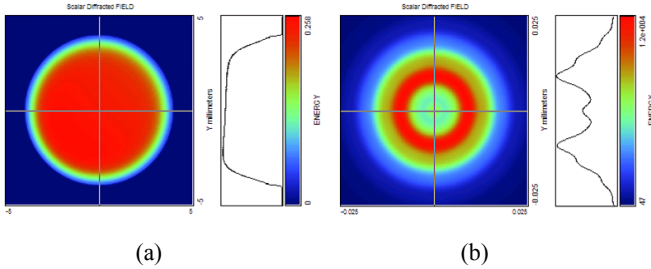


Fig. 3 Beam shape of different location of system A
 (a) just after output lens of system A (8mm diameter)
 (b) focused beam profile (30µm diameter, s=0.5mm)

2.3 작은 직경으로 집속시 플랫폼 빔으로의 셰이핑

가우시안 형상의 빔을 다른 형상의 직경이 큰 빔으로 변형한 후 어느 한도 이하로 작게 집속할 때에는 기하광학적으로 설계된 빔 형상을 유지하지 못하게 된다. 이는 2.1절에서 언급한 바와 같이 회절 효과에서 기인한다. 또한 정도의 차이는 있으나 작게 집속된 빔은 광축상의 위치에 따라 빔의 형상이 지속적으로 변한다.

A 광학계를 통과한 빔을 집속하는 경우에도 광축상의 특정한 위치에서 플랫폼과 유사한 형상이 나타날 수 있다. 그러나 집속 전의 큰 빔의 형상이 가우시안 형상과 차이가 클수록, 집속된 빔의 형상은 광축상에서의 작은 위치변화에 대해 급격하게 변하는 경향을 보인다. 이에 따라 A 광학계를 통과한 빔을 집속할 때 얻어지는 유사 플랫폼 빔은 매우 짧은 거리에서만 유지된다. 이는 재료의 가공시 가공 깊이에 따라 빔 형상이 급격하게 변하게 됨을 의미하므로 가공부의 형상이 일정치 않게 되며 형상의 예측이 어렵게 되는 원인이 된다.

그림 4는 초점거리 근방에서 작게 집속된 플랫폼 빔을 얻기 위한 광학계의 구성을 나타낸 것이다.

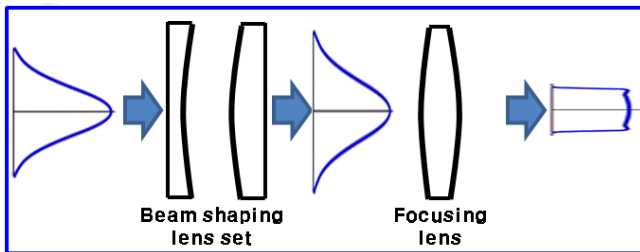


Fig. 4 Configuration of Gaussian-to-focused-flattop beam shaping system (system B)

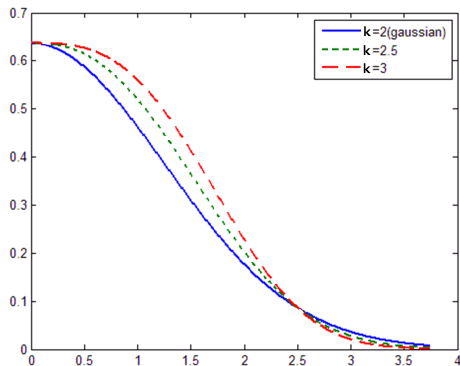


Fig. 5 Comparison of beam shapes
 : Gaussian(k=2) and super-Gaussians(k=2.5, 3)

$$I = I_0 \exp[-2(R/R_0)^k] \quad (2)$$

그림 1과 비교할 때 그림 4의 가장 큰 차이점은 빔 셰이핑 렌즈를 통과한 후의 빔 형상이 플랫폼이 아니며, 가우시안과 유사하다는 것이다. 이는 작게 집속할 때 광축상의 위치 변화에

따라 빔의 형상이 급격하게 변하는 현상을 완화하여 보다 긴 범위에서 플랫폼과 유사한 형상을 유지하기 위함이다.

빔 셰이핑 렌즈를 통과한 빔의 형상은 그림 5와 식 2에 나타낸 바와 같이 가우시안 빔으로부터 약간의 형상 변화가 있다. 본 연구에서는 식 2와 같이 지수 k 값의 변화만으로 가우시안 형상으로부터의 변형이 용이한 슈퍼 가우시안 빔을 대상으로 하여 k값의 변화에 따라 최종집속 빔의 형상 변화를 시뮬레이션을 통해 관찰하였으며, k=3 전후일 때 그림 6과 같은 범위에서 직경이 약 30µm인 플랫폼과 유사한 빔 형상을 얻을 수 있을 것임을 예측하였다.

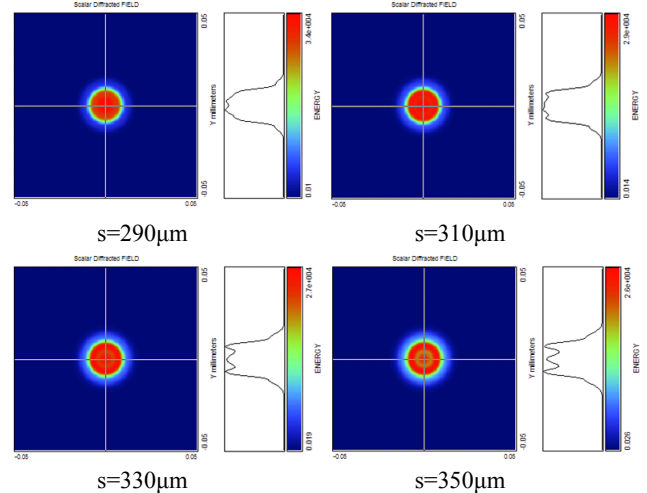


Fig. 6 Beam shape of different location of system B

3. 결론

비구면 렌즈를 이용하여 가우시안 빔을 플랫폼 빔으로 변형하는 빔 셰이핑 광학계를 설계할 때, 목표 플랫폼 빔의 크기에 따라 설계 방법을 서로 달리할 필요가 있다. 목표 빔의 직경이 큰 경우는 기하광학적 설계기법만으로 충분하나, 작은 직경으로 집속시에 플랫폼 형상을 얻기 위해서는 회절 효과에 의해 중간 단계의 빔 형상에 대한 추가적인 고려가 필요하며, 그 중간 단계의 빔 형상은 플랫폼이 아닐 수 있음을 도출하였다.

후기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. D. M. Karnakis, J. Fieret, P. T. Rumsby and M. C. Gower, "Microhole drilling using reshaped pulsed Gaussian laser beams", Proc. SPIE Vol. 4443, 150-158, 2001
2. Fred M. Dickey and Scott C. Holswade, eds., "Laser Beam Shaping: Theory and Techniques", Marcel Dekker, Inc., New York, 2000.
3. Jonghoon Yi, Kangin Lee, Illhyun Park, and Jin Hyuk Kwon, "Laser Beam Shaping Using Hollow Optical Fiber and Its Application in Laser Induced Thermal Printing", Journal of the Optical Society of Korea, Vol.13 No.1, 146-151, 2009.
4. K. Nemoto, T. Nayuki, T. Fujii, N. Goto, and Y. Kanai, "Optimum control of the laser beam intensity profile with a deformable mirror," Appl. Opt. 36(30), 7689-7695, 1997
5. 오재용, 신보성, 김호상, "355nm UV 레이저 빔 프로파일 제어에 관한 연구," 한국정밀공학회 학술발표대회 논문집, 523-524, 2006
6. P. W. Rhodes and D. L. Shealy, "Refractive optical systems for irradiance redistribution of collimated radiation: their design and analysis", Appl. Opt. 19, 3545-3553, 1980.