

355nm UV 레이저 빔 프로파일 제어에 관한 연구

*오재용¹, 신보성², 김호상³

¹ 부산대학교 대학원, ² 부산대학교 ERC/NSDM, ³ 한국고등기술원

Control of the 355nm UV laser beam profile using beam shaper mask

*J. Y. Oh¹, B. S. Shin², H. S. Kim³

¹ ERC/NSDM Pusan Nat'l Univ., ² ERC/NSDM Pusan Nat'l Univ., ³ KCTEC

Key words : beam shaper mask(빔 셰이퍼 마스크), flattop profile(플랫탑 프로파일), random array(불규칙배열)

1. 서론

일반적인 레이저 빔의 에너지 프로파일은 가우시안(Gaussian) 분포로써 중앙부에 에너지가 높고 반경 방향으로 갈수록 에너지는 작아진다. 레이저 가공시 가우시안 분포와 펄스에 의한 높은 열두 출력은 가공성을 향상시키지만¹ 프로젝터, 스테레오리소그래피(stereolithography) 혹은 마이크로 스케일의 복잡한 형상 가공 등에는 에너지 분포가 균일한(flat-top) 레이저 빔이 필요하다. 빔셰이퍼(mask shaper)는 이러한 가우시안 빔을 일정한 에너지 분포를 가지는 빔으로 변환시키는 역할을 한다. 상용화 되었거나 연구중인 빔셰이퍼는 비구면 렌즈, MDT(monoclinic double tungstate)² 혹은 DOE(diffractive optical elements)³ 등을 이용하여 제작되고 있다. 본문에서 빔셰이퍼의 새로운 원리를 제안하였다. 불규칙적으로 배열된 원형 슬릿을 통과하는 빛의 회절 및 간섭을 이용하여 레이저 빔의 에너지 프로파일을 제어하는 빔셰이퍼로써, 설계 및 제작 후 실험을 통하여 타당성을 입증하였다.

2. 이론적 배경

2.1 불규칙 배열 슬릿의 회절 현상

두 개의 슬릿을 통과하는 빛 사이에는 간섭현상이 일어나게 되어 회절무늬가 나타나며 많은 슬릿이 규칙적으로 배열된 경우 또한 규칙적인 회절무늬를 볼 수 있다. 하지만 많은 슬릿이 불규칙적으로 배열된다면 회절무늬는 나타나지 않고 섬유 다발의 단면과 같은 입상(granularity) 구조가 나타나게 된다. 이러한 현상은 통계적인 측면에서 분석이 이루어진다. 슬릿의 수가 작을수록 회절 무늬는 뚜렷하게 나타날 것이다. 하지만 간격이 불규칙적인 많은 수의 슬릿은 많은 수의 서로 다른 회절스크린을 야기하며, 이것이 서로 겹친다면 회절 무늬는 거의 나타나지 않을 것이다.

일반적으로 불규칙적인 N 개의 동일 슬릿을 사용하면 하나의 구멍이 만드는 무늬와 유사하고 선속밀도는 N 배 밝은 반점의 조도분포를 얻을 수 있다. 빛은 단색광이어야 한다. 물론 완전한 단색광이나 또는 엄밀하게 불규칙적(겹치지 않는)으로 배열된 회절물체는 존재하지 않는다. 하지만 준단색성이며 거의 평면파인 입사광선과 N 개의 불규칙적인 구멍을 사용하면 이론적인 결과와 거의 비슷한 결과를 얻을 수 있다.^{4,5} 레이저는 준단색광이며 거의 평면파이기 때문에 이러한 현상을 적용시킬 수 있다.

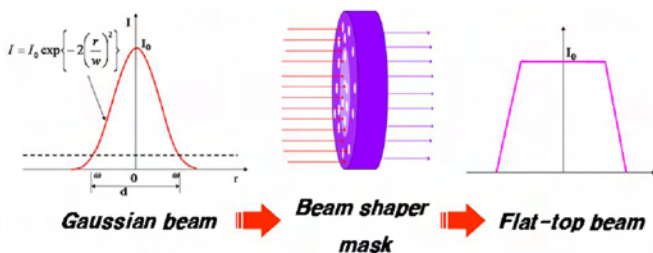


Fig. 1 Laser beam energy profile conversion of Gaussian distribution to Flat-top distribution by the beam shaper

2.2 레이저 빔 에너지 프로파일 제어

Fig. 1은 가우시안 에너지 분포가 빔셰이퍼에 의해 플랫탑 에너지 분포로 변환되는 개략도이다. 에너지 프로파일 제어는 마스크 내부에 불규칙 배열된 원형 슬릿 개수의 밀도 분포에 의해 이루어진다. 슬릿 개수의 밀도가 높아지면 개구율(opening ratio)이 증가하며 이것은 마스크를 통과하는 에너지의 증가를 의미한다. Fig. 2는 빔셰이퍼 마스크의 개략도로써 반경에 따라 여러 구간으로 나누어져 있다. 플랫탑 에너지 프로파일은 단위 면적당 에너지가 일정하므로 각 구간은 식(1)을 만족하여야 한다.

$$P_{n,out} = P_{n,in} \times A_{slit} \times N_n / A_n$$

$$= P_{n,in} \times A_{slit} \times \rho_n = const \quad (1)$$

$P_{n,out}$: n 구간에서 마스크 통과후 출사되는 단위면적당 평균 에너지(W/cm²)

$P_{n,in}$: n 구간에 조사되는 단위면적당 평균에너지(W/cm²)

A_{slit} : 단일 슬릿의 면적(cm²)

N_n : n 구간에서 슬릿의 개수(unit)

A_n : n 구간의 면적(cm²)

ρ_n : n 구간의 단위면적당 슬릿 밀도(unit/cm²)

3. 실험 및 고찰

3.1 빔셰이퍼 마스크 제작

빔셰이퍼 마스크는 Fig. 2와 같이 직경 1.05cm의 원 내부에 직경 50 μm 원형 슬릿을 불규칙적으로 배열하여 제작되었으며, 1000 μm 두께의 수정(quartz) 위에 0.3 μm 크롬을 스퍼터링(sputtering) 증착하여 제작하였다. Fig. 2(a)는 약 3000 개, (b)는 약 11000 개, (c)는 32900 개의 원형 슬릿을 생성한 것이다.

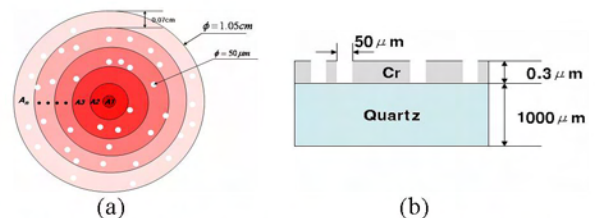


Fig. 2 Schematics of beam shaper mask, (a) in front, (b) cross section

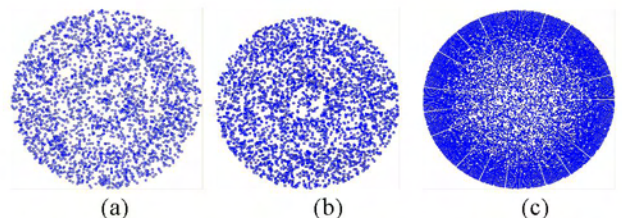


Fig. 3 Random array of circular apertures, (a) 3,000units, (b) 11,000 units, (c) 32,900 units of circular apertures

3.2 실험 결과

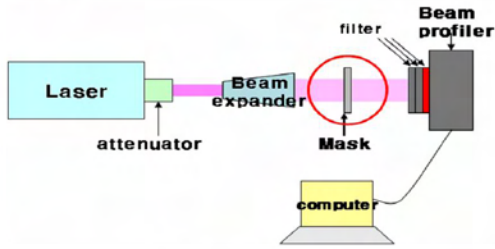


Fig. 4 Experiment system

본 연구에서는 파장(wavelength) 355nm, 직경 1.5mm(1/e)인 레이저를 이용하였으며 장치구성은 Fig. 4 와 같다. 레이저 빔은 빔익스팬더를 통해 7 배 확대된 후 빔셰이퍼 마스크로 입사되며 마스크를 통과한 빔은 빔프로파일 측정기에 의해 측정되어진다. 그리고 빔셰이퍼 마스크의 원형 슬릿 개수 변화에 의한 빔프로파일 변화를 관찰하였다.

Fig. 5 는 측정된 빔프로파일 형상이다. (a)는 레이저 발진기에서 나오는 빔으로 가우시안 분포이다. (b)는 3000 개의 슬릿이 불규칙 배열된 빔셰이퍼 마스크를 통과한 빔프로파일이며 (c)는 11000 개의 슬릿에서 (d)는 32900 개의 슬릿에서 빔프로파일이다. 출력은 각각 Fig. 5 (a) 1.4W (b) 0.02W, (c) 0.07W, (d) 0.2W 이다. Table 1 은 32900 개의 원형 슬릿을 생성하였을 때, 마스크 반경방향으로 0.07cm 간격 15 구간으로 나누어 각 구간별 면적, 에너지, 슬릿 개수 및 슬릿 밀도를 나타낸 것이다.

Table 1 Parameters calculations of each track area

D (cm)	A_n (cm ²)	$P_{n,in}$ (W/cm ²)	ρ_n (slit density)	N_n (No. of slit)
0.07	0.015386	2372.559	3000	46.158
0.14	0.046158	2330.814	3053.731	140.9541
0.21	0.07693	2249.514	3164.096	243.4139
0.28	0.107702	2132.852	3337.165	359.4194
0.35	0.138474	1986.659	3582.738	496.1161
0.42	0.169246	1817.927	3915.272	662.644
0.49	0.200018	1634.257	4355.298	871.138
0.56	0.23079	1443.294	4931.55	1138.152
0.63	0.261562	1252.218	5684.056	1486.733
0.7	0.292334	1067.323	6668.72	1949.494
0.77	0.323106	893.7216	7964.089	2573.245
0.84	0.353878	735.1895	9681.42	3426.041
0.91	0.38465	594.1375	11979.85	4608.049
0.98	0.415422	471.6994	15089.44	6268.484
1.05	0.446194	367.9036	19346.58	8632.329

실험 결과로부터 빔셰이퍼 마스크를 통과한 빔은 광다발 형상의 입상 구조이며 슬릿의 개수가 많아질수록 프로파일은 플랫폼 형상에 가까워지고 입상 구조는 더욱 조밀해진다. 출력이 저하되는 현상은 마스크의 개구율에 의한 것으로 사료된다. 개구율과 출력 저하는 선형적으로 나타났다. 하지만 단위 시간당 단위면적당 에너지 강도(W/cm²)는 높아졌다. 발진기에서 나오는 레이저 강도는 80W/cm²이지만 Fig. 5(d)의 경우 평균 100 W/cm² 이며 최고 300 W/cm² 였다. 이 현상은 회절 무늬의 강도 분포식으로부터 유추된다. 슬릿 개수 N 개일 때 입사광의 강도가 I_0 이면 주요최대값(principal peaks)은 $N^2 I_0$ 이다. 즉 불규칙 배열 슬릿은 볼록정 다수의 슬릿에 의한 회절 스크린이 다른 슬릿들에 의한 회절 스크린과 서로 간섭을 하지 않고 중첩되어 나타나기 때문에 각각 $2^2 I_0 \sim n^2 I_0$ 의 주요최대값을 가지는 입상 구조로 나타난다. 따라서 전체적인 에너지는 손실되지만 부분적 단위시간당 단위면적당 에너지 강도는 증가함을 알 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 불규칙 배열 슬릿을 이용한 빔프로파일 제어 및 빔셰이퍼를 제안하였으며 실험적으로 타당성을 입증하였다. 슬릿의 개수가 증가할수록 플랫폼 프로파일 형상에 가까워지고 입상 구조가 조밀해졌으며 단위면적당 에너지 강도도 증가하였다. 이후 제안된 빔셰이퍼를 이용한 가공성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 산업자원부 지원 핵심기술개발사업인 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. 김도훈, 레이저가공학, 경문사, 2005.
2. John A. Hoffnagle, C. Michael Jefferson, “Design and performance of a refractive optical system that converts a Gaussian to a flattop beam”, APPLIED OPTICS, Vol.39, No.20, 2000
3. Fangjie Shu et al., Improved far-field laser-beam uniformity using the air turbulence disturbed light, Optics Communications (2006), doi:10.1016/j.optcom.2006.07.019
4. Hecht, OPTICS 2nd edition, Addison Wesley, 1987.
5. S.O.Kasap, OPTOELECTRONICS AND PHOTONICS-Principles and Practices, Prentice Hall, 2001.

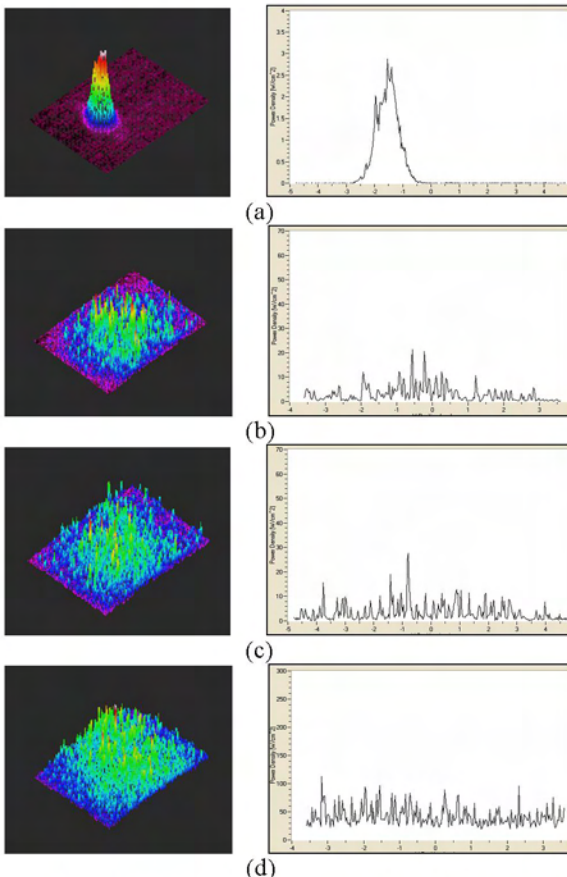


Fig. 5 Beam profiles according to the number of circular apertures. (a) incidence beam into beam shaper mask, 3D view and cross-section view, (b) radiation beam through beam shaper mask with 3000 units of circular apertures, (c) beam shaper mask with 11000 units of circular apertures, (d) beam shaper mask at 32900 units of circular apertures.