

펄초 레이저에 의한 투명 유리내부 미세가공특성

김재구[#], 남기곤^{*}, 조성학^{*}, 장원석^{*}, 나석주^{**}, 황경현^{*}

Micromachining Characteristics inside Transparent Materials using Femtosecond Laser Pulses

Jae Gu Kim[#], Ki Gon Nam^{*}, Sung Hak Cho^{*}, Won Seok Chang^{*}, Suck Joo Na^{**} and Kyung Hyun Whang^{*}

ABSTRACT

Transparent materials are widely used in the fields of optic parts and bio industry. We have experiment to find out the characteristics of the micromachining inside transparent materials using femtosecond laser pulses. With its non-linear effects by very high peak intensity, filament (plasma channel) was formed by the cause of the self-focusing and the self-defocusing. Physical damage could be found when the intensity is high enough to give rise to the thermal stress or evaporation. At the vicinity of the power which makes the visible damage or modification, the structural modification occurs with the slow scanning speed. According to the polarization direction to the scanning direction, the filament quality is quite different. There is a good quality when the polarization direction is parallel to the scanning direction. For fine filament, we could suggest the conditions of the high numerical aperture lens, the short shift of focusing point, the low scanning speed and the low power below 20 mW. As the examples of optics parts, we fabricated the fresnel zone plate with the 225 μm diameter and Y-bend optical wave guide with the 5 μm width.

Key Words : Laser micromachining(레이저 미세가공), Femtosecond laser(펄초 레이저), Fused silica(용융 실리카), Filamentation(필라멘트)

1. 서론

유리등 투명한 재료의 가공은 각종 광학부품, 통신용부품, 의료용 미세형상 및 디스플레이 등 여러 산업분야에서 활용도가 많아 활발히 연구되고 있다. 그 중에서도 레이저에 의한 형상가공은 자외선영역의 짧은 파장을 이용하여 브래그 회절격자를 제작하거나, CO₂ 또는 Nd:YAG 레이저를 이용하

여 절단 또는 스크라이빙 하는 응용이 산업계에 주를 이루고 있다. 하지만 최근 펄초 영역의 극초단펄스 레이저가 출현함에 따라 투명한 유리재료에 미세한 패턴을 제작하는 연구가 활발해지고 있어 회절격자, 광 정보 저장장치 및 광도파로 등의 광학부품응용에 많은 시도가 있다.¹⁻⁶

투명한 재료에 펄초 레이저를 조사하게 되면 가전자대에서 전도대로의 다광자 흡수, 충격이

☞ 접수일: 2005년 11월 29일; 게재승인일: 2006년 4월 14일

교신저자: 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

E-mail gugu99@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7141

* 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

** 한국과학기술원 기계공학과

은화 및 전자의 사태 이온화 (avalanche ionization) 현상이 일어나 레이저가 조사된 영역에서만 재료의 구조 변화를 일으켜 굴절률 등의 물성치 변화를 가져온다.⁷ 하지만 변화 형상은 침투 출력이 매우 커서 나타나는 비선형효과 즉, 자기집속 (self-focusing) 효과와 자기 위상변조 (self-phase modulation) 등의 효과로 인해 복잡하게 나타난다. 즉 레이저 빔이 투명한 재료 내부에 집광되면 실과 같이 가느다란 필라멘트가 형성되는데 그 원인으로 비선형 커 (kerr) 효과인 자기집속과 집속된 부근에서 다광자 흡수 이온화로 나타나는 플라즈마로 인해 빔의 자기확산(self-defocusing)이 동시에 나타나게 됨으로 여겨지며, 따라서 전체적으로 보면 플라즈마 채널을 형성하게 된다. 이 길이는 일반적으로 빔의 초점길이를 정하는 레일리 (Rayleigh) 길이에 비해 수십배 이상으로 매우 크게 나타나며 빔의 공간상 진행 형상과 다르게 나타난다.^{7,9} 침투출력이 재료의 구조변화의 임계값 이상이면 또는 강도의 증가로 과도한 열적 영향이 크며 이로 인해 기포, 크랙을 수반하게 된다.

필라멘트 길이, 형상 및 파괴 등은 투명재료의 내부 가공에 있어 이해되어야 할 중요 인자이며, 많은 연구자들이 플라즈마 광 방출 및 산란된 레이저 빛 형상을 외부에서 CCD 등을 이용하여 길이를 측정하고 분석하였다.⁸⁻¹⁰

본 연구에서는 마이크로 광학부품에 응용될 수 있는 내부가공을 위해 앞서 기술한 가공특성에 중요한 인자로 작용하는 필라멘트의 단면 형상을 펄스 레이저로 가공한 후 절단하여 조건별로 분석하고 이를 이용해 광학부품을 제작 하였다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용한 레이저는 중심파장 800 nm, 펄스폭 220 fs, 반복주기 100 KHz 인 Chirped-Pulse-Amplification (CPA) Ti:sapphire 레이저를 사용하였고, 선형적으로 편광 되어 있으며 TEM₀₀ 출력밀도 분포를 갖고 있다. 집광에 사용된 대물렌즈는 각각 x20 (NA 0.4), x100 (NA 0.8)를 사용하였다. 전체적인 실험구성도 및 빔의 공간 분포는 Fig. 1 과 같고 실험에 사용된 재료는 용융 실리카로 그 물성치는 Table 1 과 같다.

미세패턴에 중요한 인자로 작용하는 것 중의 하나는 정밀한 운동을 구현할 수 있는 것이며 본

패턴제작에 사용된 스테이지의 위치 정밀도는 1 μm / 25 mm, 반복정밀도는 0.5 μm 를 가진다. 또한 가공초점을 정확히 찾기 위해 분광기를 이용해 표면에서 산란되는 빔의 강도를 측정, 빔의 초점 위치를 찾아낸 다음 초점위치를 투명 유리 내부로 이동시켰다.

조건별 가공특성을 보기 위해 적용한 실험 조건은 출력, 이송 속도, 편광 방향 및 초점의 표면으로부터의 깊이로 하였으며, 10 mm 의 길이를 직선으로 가공한 후 직선의 중앙 부분을 절단하여 단면을 DIC (Differential interference contrast) 현미경 및 전자주사현미경으로 가공부를 관찰하였다.

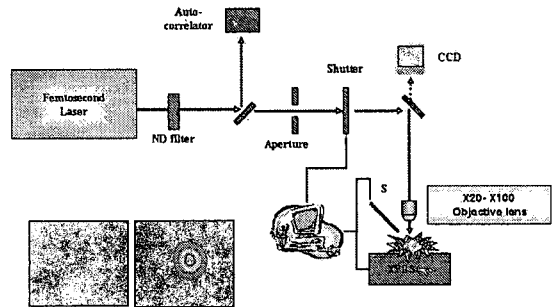


Fig. 1 Schematic layout of the experimental setup

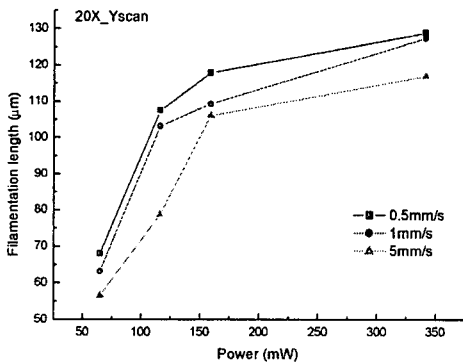
Table 1 Properties of fused silica

Property	Value
Refractive index @589nm	1.45840
Density	2.202 g/cm ³
Softening point	1585 °C
Annealing point	1075 °C
Strain point	990 °C
Knoop-Hardness HK	560 kg/mm ²

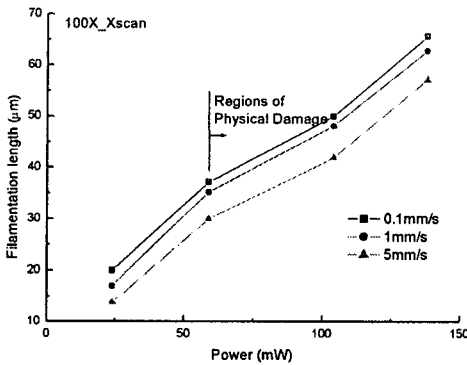
3. 실험 결과 및 고찰

초점위치를 표면에서 내부로 약 500 μm 이동하고 시편을 이송시키면서 가공한 후 절단면에 나타난 필라멘트 길이를 출력 및 속도에 따라 대물렌즈 별로 나타내면 다음 Fig. 2 와 같다. 즉 20 배율을 가진 렌즈에 의해서는 필라멘트 길이가 65 mW 출력에서 60 μm 에서 커지기 시작하여 출력이 커질수록 증가하나 159 mW 이상에서는 증가가 둔화 되었다. 이는 초점근방을 벗어난 위치에서의

빔 면적에 의해 단위면적당 레이저 강도가 급격히 줄어들므로 길이의 증가 폭이 완화되는 것으로 여겨진다. 이송 속도에 따른 길이 변화폭은 약 10 μm 이상으로 나타났다. 그러나 100 배율을 가진 렌즈의 경우 필라멘트 길이가 거의 선형적으로 증가하였으며 20 배율에서는 관찰할 수 없었던 열적 현상, 기공생성 등의 물리적 손상이 출력 59 mW (출력강도 $2.3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$) 에서 저속의 이송 속도를 제외하고는 모두 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 2 Measured filamentation length inside fused silica as a function of laser power for various scanning speed. (a) x20 (NA 0.4) objective lens and polarization perpendicular to scanning direction. (b) x100 (NA 0.8) objective lens and polarization parallel to scanning direction

단위길이당 유효에너지로 환산하면 0.029 J/mm 에서는 가시적 물리적 손상이 나타나지만 저속의 0.59 J/mm 인 조건에서는 보이지 않아 단위길이당 유효에너지보다 속도의 영향이 내부 구조 변화에 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

물리적 손상의 양상은 편광방향에 따라서도 Fig. 3 과 같이 선명하게 나타났다. 즉 가시적인 물리적 손상이 나타나는 동일 조건하에서 편광방향에 수직으로 빔이 진행하여 중첩된 경우(Fig. 3 (a), (c))가 편광에 평행한 방향으로 중첩이 일어난 경우(Fig. 3 (b), (d))보다 더 물리적 손상이 크음을 알 수 있었다. 하지만 편광에 따른 필라멘트 길이차이는 수 μm 정도로 각 배율 모두 그다지 크지 않음을 확인 하였다.

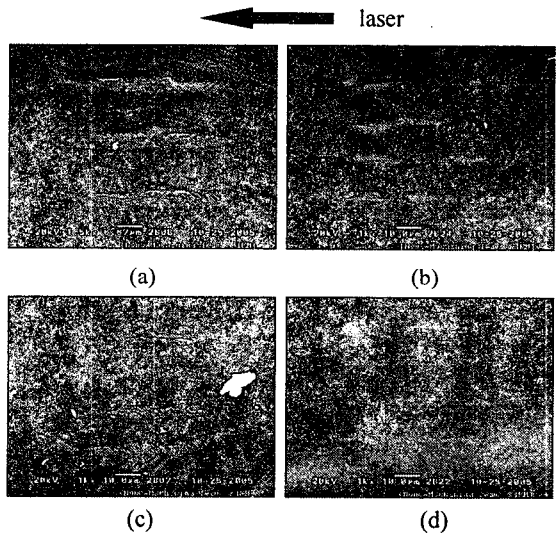


Fig. 3 SEM pictures of cross-section by different polarization direction, sample moving direction and moving speed with x100 lens and 138 mW. The speed of (a) and (b) is 0.1 mm/s speed, (c) and (d) 1 mm/s, and the moving direction of (a) and (c) is perpendicular to the polarization of the laser beam (b) and (d) is parallel

또한 자기집속 및 자기확산 현상에 의해 나타나지는 것으로 여겨지는 플라즈마 채널의 형상을 Fig. 4 에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 레이저 빔이 집속 되어 물리적 손상이 확연히 보이는 부분과 손상이 덜한 부분으로 구분 되어 있으며, 주로 편광방향과 수직인 방향으로 시편을

이송할 때에 나타났고 주기 간격은 약 5 μm 정도로 관측되었다. Fig. 4 와 같은 플라즈마 채널 형상이 관찰 되는 가공조건 영역 밖에서는 Fig. 3 및 Fig. 5 와 같이 필라멘트 전체에 열적 파괴 또는 약한 손상만을 받는 현상을 관측할 수 있었다.

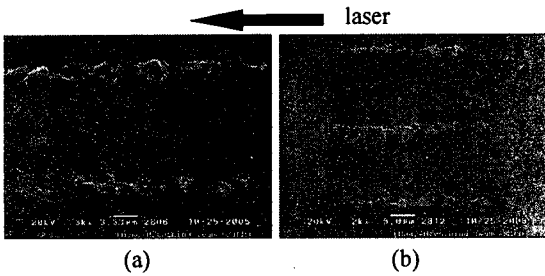


Fig. 4 SEM image of the plasma channel by self-focusing and defocusing with speed 5mm/s and (a) 138 mW and (b) 59 mW. Moving direction is perpendicular to the polarization of the laser beam

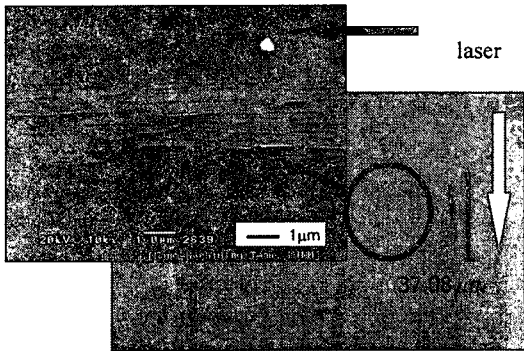


Fig. 5 Optical image and SEM pictures when the visible physical damage is observed at the x100 (NA 0.8), 59mW and 0.1mm/s (0.59J/mm). Moving direction is parallel to the polarization of the laser beam

한편, 물리적 손상이 없는 필라멘트는 전자주사 현미경에서 관측이 불가능했으며, 광학 현미경에 의해 물리적 손상의 구분이 되는 임계값 근방에서의 단면 사진은 Fig. 5 와 같다. 같은 조건에서도 레이저 빔 안정성, 구동부의 오차 및 재료의 물성 등으로 가공위치에 따라 다르게 나타나는 미묘한 차이로 인해 물리적 손상이 나타나거나 또는 나타나지 않았으며, 그 조건에서 가공된 단면을 전자주사 현미경 사진을 보면 100 nm 이하의 가느다란 실선

이 단속적으로 관찰되었다. 이는 빔 공간 모드가 완전한 가우시안이 아니고, 미세한 스파이크가 포함되어 있어 그에 따른 영향으로 여겨진다.

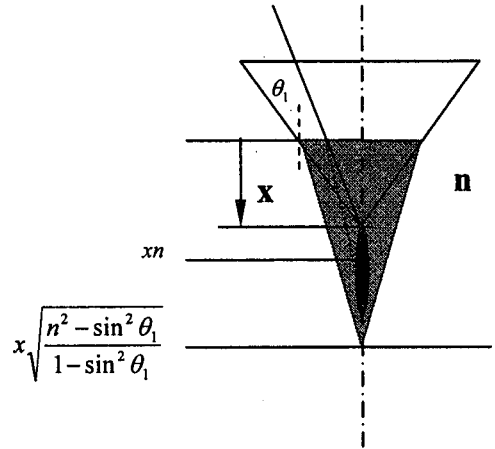


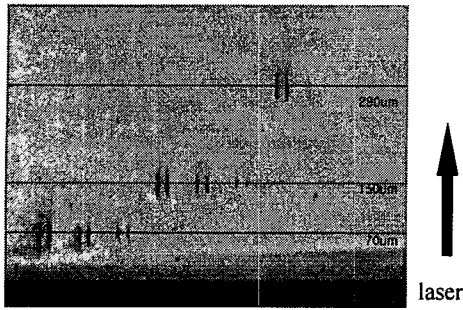
Fig. 6 Focal range variation by the material with the different index of refraction

깊이에 따른 필라멘트 길이 변화를 조사하기 위해 100 배 (NA 0.8) 렌즈를 사용하여 초점위치를 표면에서부터 50 μm, 100 μm, 200 μm 및 400 μm 를 내부로 이동시키고 속도를 1 mm/s 로 고정한 후 출력을 변화시키면서 가공하였다.

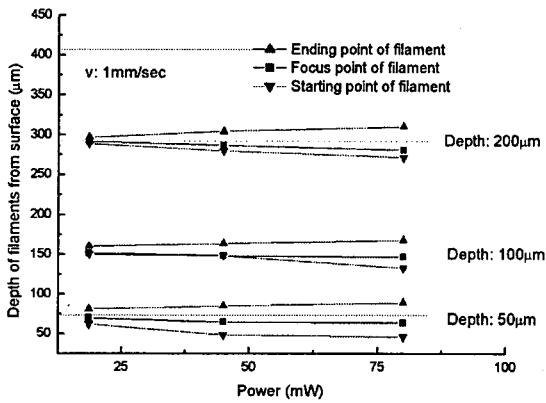
초점위치를 표면으로부터 이동한 후 거리에 따라 나타나는 초점범위를 기하학적으로 계산하면 Fig. 6 에서와 같이 광축에서의 초점은 이동거리(x) 에 굴절율 (n)을 곱한 값 xn 이 되며 빔의 가장자리는 식 $x\sqrt{(n^2 - \sin^2 \theta_1) / (1 - \sin^2 \theta_1)}$ 으로 유도된다. 여기서 θ_1 은 입사각이다.

이 값과 실험값을 비교하면 Fig. 7 과 같이 필라멘트가 기하학적 초점범위 값과는 다르게 형성되며 이는 가우시안 분포를 가진 가장자리 빔은 재료 개질에 큰 영향을 주지 않았던 요인으로 분석된다. 하지만 필라멘트 시작점은 기하학적 광축에 의한 깊이보다 앞서 형성이 되는데 초점 이동 깊이가 작을수록, 출력이 클수록 그 영향은 컸으며 자기 집속 효과에 의한 원인으로 보인다.

또한, 전체 필라멘트 길이는 Fig. 8 과 같이 초점이동 깊이 및 출력에 따라 다른 값을 보이는데 45 mW (0.045 J/mm) 이하에서는 필라멘트 길이가 초점이동 깊이가 클수록 줄어드는 경향을 보였다. 이는 빔이 진행하면서 일부 흡수가 되는 영향과



(a)



(b)

Fig. 7 Cross section image by the different shift distances from the surface of focusing point for various power (x100, 1 mm/s) (a) and the comparison of filamentation length with (b)

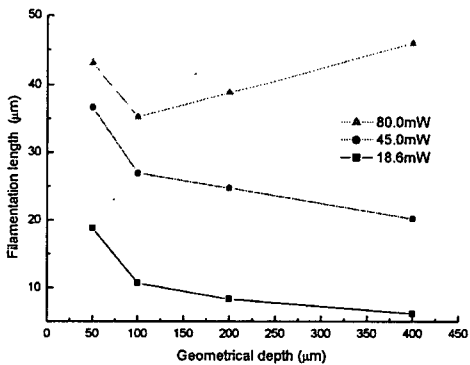


Fig. 8 Filamentation length as a function of geometrical depth for various powers

유리 내부의 초점범위가 커짐으로 인해 재료 개질에 필요한 빔의 강도가 떨어졌기 때문으로 생각된다.

마찬가지로 80 mW (0.080 J/mm)에서 필라멘트 길이가 커지는 이유는 빔이 일부 흡수되었다 하더라도 초점이동 깊이가 커짐으로 해서 나타나는 초점범위 증가와 그 범위내 재료 개질할 수 있는 강도가 충분하였기에 길어졌다고 판단된다. 따라서 투명재료 내부에 짧은 길이의 필라멘트를 가지기 위해서는 높은 NA 를 가진 렌즈, 표면에서 짧은 초점이동 깊이, 저속의 이송 속도 및 20 mW 이하의 낮은 출력이 요구됨을 알 수 있다.

앞서 기술한 가공특성에 따라 프레넬 존 플레이트 및 광도파로로 사용될 수 있는 Y-분기형 광도파로를 제작하였다. 먼저 프레넬 존 플레이트의 경우 이는 광원과 스크린 사이에 창을 설치하되 창 모양을 동심원 띠의 형상으로 만들어 각 띠를 통과하는 빛 중 보강간섭만을 일으키도록 한 것으로 빛 경로가 $\lambda/2$ 만큼 증가할 때마다 한번씩 건너 뛰면서 개방하도록 되어 있다. 중심점에서 각각 변화를 주는 반경은 $R_1 = \sqrt{\lambda f}$, $R_2 = \sqrt{2\lambda f} \dots R_n = \sqrt{n\lambda f}$ 이다. 여기서 λ 는 파장, f 는 초점거리이다. 제작된 프레넬 존 플레이트는 $\lambda = 632 \text{ nm}$, $f = 1 \text{ mm}$ 로 하였으며 직경은 약 $225 \mu\text{m}$ 이고 마지막 띠의 간격은 약 $3 \mu\text{m}$ 이다

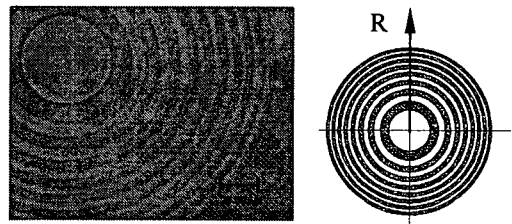


Fig. 9 Fresnel zone plate of $225\mu\text{m}$ diameter (power 24mW, speed 0.05mm/s, overlap $0.5\mu\text{m}$, The final band width is about $3\mu\text{m}$)

Y-분기형 광도파로의 경우는 Fig. 10 (a)에서 보는 바와 같이 폭 R 이 광전송 효율에서 중요한 인자로 작용하므로 H 와 더불어 R 을 변수로 하여 제작할 수 있도록 프로그래밍 하였다. Fig. 10 (b)는 출력 24 mW, 이송 속도 1 mm/s, R 5mm, H 1mm 의 조건으로, 필라멘트 길이가 약 $20 \mu\text{m}$, 폭이 $5 \mu\text{m}$ 가 되도록 빔을 $0.5 \mu\text{m}$ 간격으로 중첩하여 직사각

형 광도파로 형상을 갖도록 제작하였으며 분기점을 확대한 사진이다.

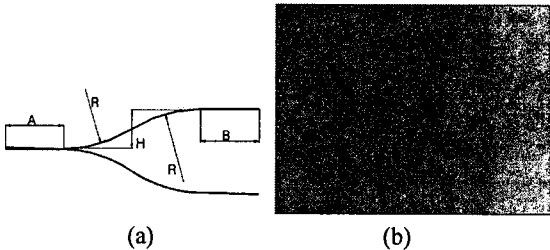


Fig. 10 Y-bend optical waveguide design parameters and the optical image around branch region (power 24 mW, speed 1 mm/s, overlap 0.5 μ m, R 5 mm, H 1 mm)

제작된 광학부품의 성능을 확인하는 것이 중요하지만 측정의 어려움으로 정확한 수치를 얻기가 어려웠으며, 측정 관련 장비의 구성 및 성능 향상을 위한 연구가 필요하리라 생각된다.

4. 결론

펄스 레이저를 산업용으로 많이 사용되는 용융 실리카 유리 내부에 집광시켜 가공한 후 비선형효과로 나타나는 필라멘트의 길이를 단면을 절단하여 측정하였다. 길이는 대기중의 초점거리에 비해 수십배 이상으로 컸으며, 빔의 강도가 재료의 광학적 구조변화만을 일으키는 강도 이상으로 커질 경우 열적 현상, 기공형성 등에 의한 물리적 손상을 가져왔다. 손상을 일으키는 일정한 빔 출력 조건 (본 실험에서는 약 2.3×10^{14} W/cm²) 에서는 이송 속도에 의한 가공품질에 차이를 보였으며 고속인 경우의 유효에너지 0.029 J/mm 에서는 물리적 손상이 관측되었으나 유효에너지가 20 배 이상 높은 0.59 J/mm 의 저속인 경우에는 가시적 물리적 손상이 보이지 않아 단위길이당 유효에너지보다 속도의 영향이 가공에 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

또한 가시적인 물리적 손상이 나타나는 동일 조건하에서 레이저 빔의 편광방향으로 샘플이 이송하는 경우보다 편광에 수직방향으로 중첩이 일어난 경우가 더 물리적 손상이 큼을 확인하였다.

짧은 길이의 필라멘트를 가지기 위해서는 높은

NA 를 가진 렌즈, 표면에서부터 짧은 초점이동 깊이, 저속의 이송 속도 및 20 mW 이하의 낮은 출력이 요구됨을 알 수 있었다. 또한 더욱 짧은 길이를 얻기 위해서는 빔을 2 방향 이상에서 시공간적으로 서로 중첩되게 입사하면 가능하리라 생각된다.

본 가공실험을 토대로 직경 약 225 μ m, 마지막 띠의 간격은 약 3 μ m 인 프레넬 존 플레이트를 제작하였고, 광 도파로의 패터닝에도 적용하여 Y-bend 형상의 광 도파로를 제작하였다. 각 광학 부품의 성능을 향상시키기 위해서는 필라멘트 길이의 조절, 재료의 조성 등 더 많은 연구가 필요하며, 본 제작 실험을 통해 펄스 레이저를 이용하여 광학부품을 제작할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. Qui, J., Miura, K. and Hirao, K., "Three-Dimensional Optical memory Using Glasses as a Recording Medium through a Multi-Photon Absorption Process," Jpn. J. Appl. Phys, Vol. 37, pp. 2263-2266, 1998.
2. Davis, K. M., Miura, K., Sugimoto, N. and Hirao, K., "Writing Waveguides in Glass with a Femtosecond Laser," Optics Letters, Vol. 21, No. 21, pp. 1729-1731, 1996.
3. Kondo, Y., Nouchi, K. and Mitsuyu, T., "Fabrication of Long-period Fiber Gratings by Focused Irradiation of Infrared Femtosecond Laser Pulses," Optics Letters, Vol. 24, No. 10, pp. 646-648, 1999.
4. Miura, K., Qiu, J., Inouye, H., Mitsuyu, T. and Hirao, H., "Photowritten Optical Waveguides in Various Glasses with Ultra Pulse Laser," Appl. Phys. Lett., Vol. 71, No. 23, pp. 3329-3331, 1997.
5. Glezer, E. N., Milosavljevic, M., Huang, L., Finlay, R. J., Her, T. H., Gallan, J. P. and Mazur, E., "Three-dimensional Optical Storage inside Transparent Materials," Optics Letters, Vol. 21, No. 24, pp. 2023-2025, 1996.
6. Choi, J. Y., Chang, J. W., Kim, J. G., Shin, B. S., Chang, W. S. and Whang, K. H., "A Study on Micro Patterning on the Surface of Glass Substrate using Femtosecond Laser," Proc. of KSPE, pp. 640-643,

May 2003.

7. Saliminia, A., Nguyen, N. T., Chin, S. L. and Vallee, R., "The Influence of Self-focusing and Filamentation on Refractive Index Modifications in Fused Silica Using Intense Femtosecond Pulses," Optics Communication, Vol. 241, pp. 529-538, 2004.
8. Sun, Q., Jiang, H., Liu, Y., Zhou, Y., Yang, H. and Gong, Q., "Effect of Spherical Aberration on the Propagation of a Tightly Focused Femtosecond Laser Pulse inside Fused Silica," J. Opt A: Pure Appl, Opt., Vol. 7, pp. 655-659, 2005.
9. Ashkenasi, H., Varel, H., Rosenfeld, A., Henz, S., Herrmann, J. and Cambell, E. E. B., "Application of Self-focusing of ps Laser Pulses for Three-dimensional Microstructuring of Transparent Materials," Appl. Phys. Lett., Vol. 72, No. 12, pp. 1442-1444, 1998.
10. Wu, Z., Jiang, H., Yang, H. and Gong, Q., "The Refocusing Behavior of a Focused Femtosecond Laser Pulse in Fused Silica," J. Opt A: Pure Appl, Opt., Vol. 5, pp. 102-107, 2003.