

# 펄토초 레이저를 이용한 유리내부 미세 패턴 제작

## Micro patterning inside bulk fused silica using femtosecond laser pulses

한국기계연구원(KIMM) 김재구, 남기곤, 조성학, 장원석, 황경현  
한국과학기술원 기계공학과 나석주

### I. 서론

유리 등 투명한 재료의 가공은 각종 광학부품, 통신용부품, 의료용 미세형상 및 디스플레이 등 여러 산업분야에서 활용도가 많아 활발히 연구되고 있다 그중에서도 레이저에 의한 형상가공은 자외선영역의 짧은 파장을 이용하여 브래그 회절격자를 제작하거나, CO<sub>2</sub> 또는 Nd YAG 레이저를 이용하여 절단 또는 스크라이빙 하는 응용이 주를 이루었다 하지만 최근 펄토초 영역의 극초단펄스 레이저가 출현함에 따라 투명한 유리재료에 미세한 패턴을 제작하는 연구가 활발해지고 있어 회절격자, 광 정보 저장장치 및 광도파로 등의 광학부품응용에 많은 시도가 있다 [1-4]

투명한 재료에 펄토초 레이저를 조사하게 되면 열적인 흡수 없이 다광자 흡수 이온화 현상이 일어나 레이저가 조사된 영역에서만 재료의 변화를 일으켜 굴절률 변화 등의 물성치 변화를 가져올 수 있다 하지만 첨두 출력이 매우 커서 나타나는 비선형효과 즉, 자기집속효과와 자기 위상변조 등의 효과로 가공 현상이 복잡하게 나타난다 즉 레이저 빔이 투명한 재료 내부에 집광되어 입사되면 실과 같이 가는 다란 filamentation이 형성되는데 그 원인으로 비선형 커 효과인 자기집속과 국부적으로 집속되어 다광자 흡수에 따른 이온화로 나타나는 플라즈마에 의해서 자기확산(self-defocusing)이 동시에 나타나게 됨으로 여겨지며, 따라서 전체적으로 보면 플라즈마 채널을 형성하게 된다 이 길이는 일반적으로 빔의 초점길이를 정하는 레일리 길이에 비해 수십배 이상으로 매우 크게 나타난다 [5-7]

본 연구에서는 용융 실리카 내부에 펄토초 레이저를 조사하여 조건별 가공 특성을 분석하고 이를 이용하여 마이크로 광학부품에 사용될 수 있는 여러 가지 패턴을 제작하였다

### II. 실험방법

본 실험에서 사용한 레이저는 중심파장 800nm, 펄스폭 220fs, 반복주기 100KHz인 Chirped-Pulse-Amplification (CPA) T<sub>1</sub> sapphire 레이저를 사용하였고, 선형적으로 편광되어 있으며 TEM<sub>00</sub> 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 1과 같고 실험에 사용된 재료는 용융 실리카로 그 물성치는 다음 Table 1과 같다

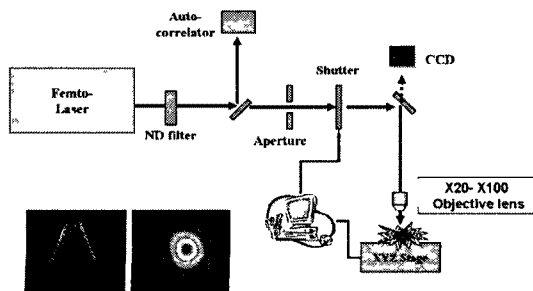


Fig 1 Schematic layout of the experimental setup

Table 1 Properties of fused silica

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

미세패턴에 중요한 인자로 작용하는 것 중의 하나는 정밀한 모션을 구현할 수 있는 것이며 본 패턴 제작에 사용된 스테이지의 정밀도는 위치정밀도  $1\mu\text{m}/25\text{mm}$ , 반복정밀도  $0.5\mu\text{m}$ 를 가진다

조건별 가공특성을 보기위해 적용한 실험 조건은 출력, 스캐닝 속도, 편광 방향 직선 길이는  $10\text{mm}$ 로 간격을  $15\mu\text{m}$ 로 4개의 직선을 가공하였으며, 가공 후 직선의 중앙 부분을 절단하여 단면을 DIC (Differential interference contrast) 현미경 및 전자주사현미경으로 가공부를 관찰하였다

### III. 결과 및 고찰

가공 후 절단면에 나타난 filamentation 길이를 출력 및 속도에 따라 대물렌즈 별로 나타내면 다음 Fig 2와 같다 즉 20배율을 가진 렌즈에 의해서는 filamentation 길이가  $60\mu\text{m}$ 정도에서 커지기 시작하여 출력이 커질수록 증가하나  $159\text{mW}$ 이상에서는 증가가 둔화 되었고, 스캐닝 속도에 따른 길이 변화폭은 약  $10\mu\text{m}$  이상으로 나타났다 그러나 100배율을 가진 렌즈의 경우 filamentation 길이가 거의 선형적으로 증가하였으며 20배율에서는 관찰할 수 없었던 열적 현상, 기공생성 등의 물리적 손상이 출력  $59\text{mW}$ (출력강도  $2.3 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ )에서 저속의 스캐닝 속도를 제외하고는 모두 나타났다 단위길이당 유효에너지로 환산하면  $0.029\text{J}/\text{mm}$ 에서는 가시적 물리적 손상이 나타나지만 저속의  $0.59\text{J}/\text{mm}$ 인 조건에서는 보이지 않아 단위길이당 유효에너지보다 속도의 영향이 내부 형상 변화에 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다

물리적 손상의 양상은 편광방향에 따라서도 선명하게 나타났다 즉 가시적인 물리적 손상이 나타나는 동일 조건하에서 편광방향으로 빔이 진행하여 중첩된 경우보다 편광에 수직방향으로 중첩이 일어난 경우가 더 물리적 손상이 크음을 알 수 있었다 물리적 손상이라고 볼 수 없는 단면과 손상이 나타난 단면의 광학식 및 주사전자 현미경 사진은 Fig 3과 같다 하지만 편광에 따른 길이차이는 수  $\mu\text{m}$ 정도로 각 배율 모두 그다지 크지 않음을 확인 하였다

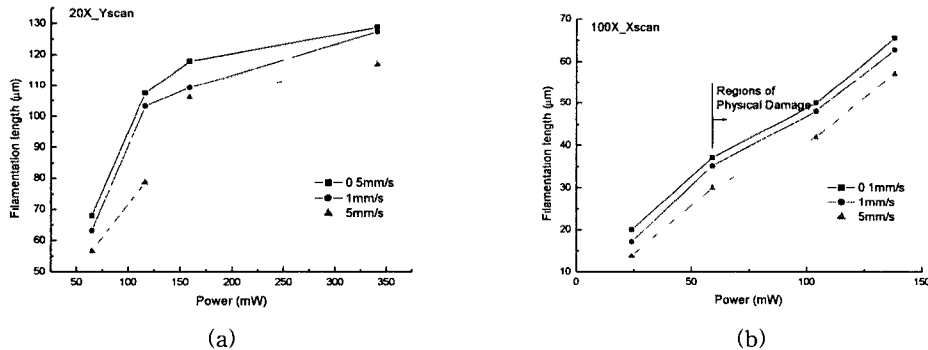


Fig 2 Measured filamentation length inside fused silica as a function of laser power for various scanning speed (a) x20(NA 0.4) objective lens and polarization perpendicular to scanning direction (b) x100(NA 0.8) objective lens and polarization parallel to scanning direction

위의 기초실험 결과를 이용하여 다음 몇 가지 패턴을 제작하였다 먼저 유리 재료 내부에 투과형 회절격자를 제작하는 것으로 회절된 빔의 강도를 통하여 굴절률의 변화를 유추할 수 있다 즉 각 차수의 빔 강도에서 각 차수의 굴절률 변화를 구한 다음, 각 차수 굴절률의 조화급수 중첩에 의해 거리에 따른 굴절률 변화를 표현할 수 있다 [8]

$$\eta = \sin^2(\pi n_q t / \lambda \cos \theta), \quad n(x) = \sum_{j=1}^m n_j \cos\left(\frac{j\pi x}{\Lambda}\right) \quad (1)$$

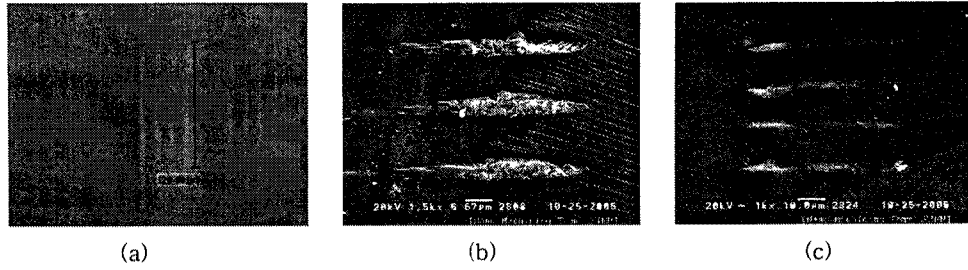


Fig 3 Optical image and SEM pictures showing different patterns according to the patterning conditions (a) x20(NA 0.4), 341mW, 0.5mm/s (0.682J/mm), perpendicular to scanning direction (b) x100(NA 0.8), 138mW, 0.1mm/s (1.38mJ/mm), polarization perpendicular to scanning direction (c) same condition as (b) except polarization direction

여기서  $\eta$ 는 회절 효율,  $n_q$ 는 각 차수에 따른 굴절률 변화,  $t$ 는 개질된 격자길이(filamentation),  $\lambda$ 는 파장,  $\theta$ 는 입사각,  $n(x)$ 은 거리에 따른 굴절률 변화량,  $2\Lambda$ 는 격자 피치 간격이다

Fig 4 (a)에 출력 59mW, 스캐닝 속도 1mm/s의 조건으로 피치간격을 1.25 $\mu$ m(800/mm)로 하여 제작된 격자의 사진을 보이고 있으며, 회절된 빔의 강도가 약해 굴절률을 측정하기 어려웠지만 투과형 회절 격자를 이용하는 응용에는 적용가능 하리라 예상된다

또한 Fig 4 (b)는 프레넬 존 플레이트로 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  $R_1 = \sqrt{\lambda f}$ ,  $R_2 = \sqrt{2\lambda f}$ ,  $R_3 = \sqrt{3\lambda f}$   $R_n = \sqrt{n\lambda f}$  이다 여기서  $f$ 는 초점거리이다 제작된 프레넬 존 플레이트는 직경 약 225 $\mu$ m으로 마지막 띠의 간격은 약 3 $\mu$ m이다

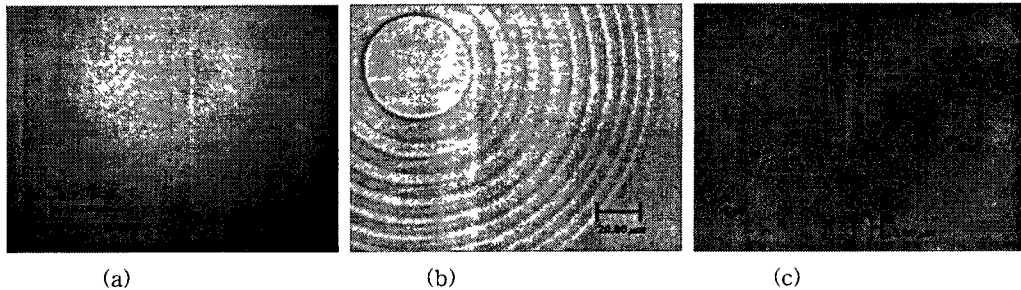


Fig 4 Patterns inside fused silica fabricated by femtosecond laser (a) 800/mm transmittance grating (b) Fresnel zone plate of diameter 225 $\mu$ m (c) Y-bend optical wave guide

광 도파로에 응용할 수 있는 Y-bend 형상을 제작하였으며 기하학적 형상은 Fig 5와 같으며 곡률 R이 광전송 효율에서 중요한 인자로 작용하므로 H와 더불어 R을 변수로 하여 제작할 수 있도록 프로그래밍 하였다 Fig 4 (c)는 출력 24mW, 스캐닝 속도 1mm/s, R 5mm, H 1mm의 조건으로, filamentation 길이가 약 20 $\mu$ m, 폭이 5 $\mu$ m가 되도록 빔을 0.5 $\mu$ m간격으로 중첩하여 직사각형 광도파로 형상을 갖도록 하여 제작하였으며 분기점을 확대한 사진이다

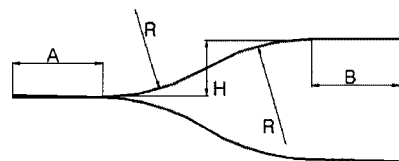


Fig 5 Measured filament's length in fused silica 100X(NA ) objective lens

#### IV. 결론

펄토초 레이저를 산업용으로 많이 사용되는 용융 실리카 유리 내부에 집광시켜 단면형상을 관찰하고 비선형효과로 나타나는 filamentation 길이를 측정하였다. 길이는 초점거리에 비해 수십배 이상으로 컸으며, 빔의 강도가 재료의 광학적 구조변화 이상으로 커질 경우 열적 현상, 기공형성 등에 의한 물리적 손상을 가져왔다. 손상을 일으키는 일정한 빔 출력 조건(본 실험에서는 약  $2.3 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ )에서는 스캐닝 속도에 의해 영향이 컸으며 고속에서의 영향이 더욱 컸다. 즉 단위길이당 유효에너지  $0.029 \text{J/mm}$ 에서 나타난 가시적 물리적 손상이 유효에너지가 20배 이상 높은  $0.59 \text{J/mm}$ 인 조건에서는 보이지 않아 단위길이당 유효에너지보다 속도의 영향이 가공에 중요한 인자라는 것을 알 수 있었다.

또한 본 기초 가공실험을 토대로 하여  $800/\text{mm}$ 의 회절격자를 유리내부에 패터닝 하였으며, 직경 약  $225 \mu\text{m}$ , 마지막 띠의 간격은 약  $3 \mu\text{m}$ 인 프레넬 존 플레이트를 제작하였다. 광 도파로의 패터닝에도 적용하였으며 Y-bend 형상의 광도파로를 제작하였다. 각 부품의 성능을 향상시키기 위해서는 filamentation 길이의 조절, 재료의 조성 등 더 많은 연구가 필요하며, 본 제작 실험을 통하여 펄토초 레이저를 이용하여 광학부품으로 제작할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

#### V. 참고문헌

- 1 Jianrong QUI, et al Three-Dimensional Optical memory Using Glasses as a Recording Medium through a Multi-Photon Absorption Process, Jpn J Appl Phys, 37, pp 2263-2266, (1998)
- 2 K. M Davis, et al Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, Optics Letters, 21(21), pp 1729-1731, (1996)
- 3 Yuki Kondo, et al Fabrication of long-period fiber gratings by fused irradiation of infrared femtosecond laser pulses, Optics Letters, 24(10), pp 646-648, (1999)
- 4 K. Miura, et al Photowritten optical waveguides in various glasses with ultra pulse laser, Appl Phys Lett, 71(23), pp 3329-3331, (1997)
- 5 Quan Sun, et al Effect of spherical aberration on the propagation of a tightly focused femtosecond laser pulse inside fused silica, J Opt A Pure Appl, 7, pp 655-659, (2005)
- 6 A Salimma, et al The influence of self-focusing and filamentation on refractive index modifications in fused silica using intense femtosecond pulses, Optics Communication, 241, pp 529-538, (2004)
- 7 D Ashkenasi, et al Application of self-focusing of ps laser pulses for three-dimensional microstructuring of transparent materials, Appl Phys Lett, 72(12), pp 1442-1444, (1998)
- 8 Tadamasu TOMA, Yoshio FURUYA, et al Estimation of the Refractive Index Change in Glass Induced by Femtosecond Laser Pulses, Optical Review, 7(1), pp 14-17, (2000)