

## 펨토초 레이저 기반 유리 내부가공 특성

유병현\*, 김영미, 조성학, 장원석, 김재구, 황경현(한국기계연구원),  
이동주(충남대학교 기계공학과)

### Characteristic of the femtosecond laser machining in glass

B. H. Yoo, Y. M. Kim, S. H. Cho, W. S. Chang, J. G. Kim, K. H. Whang (KIMM),  
D. J. Lee (Mechanical Eng. Dept., CNU)

#### ABSTRACT

For longer than picosecond pulses, bulk damage inside defect-free dielectrics involves the heating and multiplication of spurious electrons by the incident laser beam and transfer of this energy to the lattice. The situation is quite different for femtosecond pulses which are shorter than the time scale for electron energy transfer to the lattice. Damage caused by these pulses is produced with smaller statistical uncertainty and is controllable on a microscopic scale. These properties can be exploited to produce laser devices such as arrays of damage dots for all optical memories with high data storage density or arrays of parallel grooves to form transmission gratings. In this work, we observed characteristic of the femtosecond laser machining in BK7 and fused silica.

**Key Words** : Femtosecond laser(펨토초 레이저), Glass(유리), BK7, Fused silica, Spectrophotometry(광도법)

#### 1. 서론

레이저를 집광하여 투명재료가 갖는 에너지 임계값 이상의 펄스 에너지가 조사되면 다광자 흡수(multi-photon absorption) 현상에 의해 영구적인 구조 변화가 가능하다. 투명재료내의 초점에서 에너지 흡수는 비선형적으로 나타나므로 레이저 초점의 일부에 흡수영역이 존재하게 되고, 그 부분에 굴절률의 변화, 밀도의 변화, 균열 등의 현상이 일어난다. 이러한 원리를 이용하여 유리 표면 혹은 내부 3차원형상 가공을 할 수 있다. 펨토초 레이저의 투명재료에 대한 우수한 가공 특성을 3차원 광정보 저장장치(three-dimensional data storage), 광도파로(optical waveguides), 웨이브가이드 분배기(waveguide splitter)등의 광소자 개발에 적용하기 위한 연구가 진행 중이다. 본 연구에서는 광학용으로 많이 사용되는 BK7 과 fused silica 내부에 펨토초 레이저를 조사한 후 가공 특성을 비교하였다.

#### 2. 실험장치 및 방법

유리표면으로부터 200  $\mu\text{m}$  아래에 60x (NA=0.85) 대물렌즈 초점을 위치하고 펨토초 레이저( $\lambda$ :800, 100fs, 1kHz)를 조사하였다. 이때 가공속도는 0.1mm/s 로 고정하고 ND 필터 조합을 통해 20~30% 씩 출력을 변화시킨 후 각각의 형상을 관찰하였다. 유리 내부 가공 결과는 1000 $\times$ 까지 관측 가능한 Nikon 현미경을 사용하고 CCD 카메라로 얻은 이미

지를 영상측정 프로그램 Solution-DT 로 분석하였다.

실험에 사용된 유리는 Corning 사의 fused silica(SiO<sub>2</sub>)과 Schott 사의 BK7 이다. fused Silica 는 단일 산화물로된 유리로서 무정형, 비결정(amorphous)의 실리카로 이루어진 유리이며, BK7 은 아베수 64.1, 굴절률 1.516 의 광학상수를 갖는 붕규산(borosilicate) 크라운 유리이다.

#### 3. 내부가공 특성

Fig. 1 은 BK7 과 fused silica 에 각각 레이저를 조사한 후 흡수 스펙트럼의 변화를 측정한 그래프이다. 두 재료 모두 90%에 가까운 투과율을 보이지만 레이저를 조사한 후 내부 크랙 등에 의한 흡수 스펙트럼 변화가 나타났음을 보이고 있다. Fig. 2 는 BK7 에 대한 내부가공 결과이다. 어둡게 보이는 부분이 레이저 조사에 의한 크랙이 발생으로, 크랙 주변에 밝게 보이는 부분은 굴절률 변화에 의한 렌즈효과로 해석할 수 있다. 전체적으로 출력이 감소함에 따라 가공선폭이 줄어들다가 0.3mW 에 이르러 광학현미경으로 분석할 수 있는 최소 선폭에 근접한 1  $\mu\text{m}$  이하의 가공결과가 나타났다. 레이저 입사면 직경이 3mm 일 때, 60 $\times$ 대물렌즈를 이용한 가공에서 이론상의 초점부 크기는 2  $\mu\text{m}$  내외이므로 이보다 큰 선폭은 에너지 밀도가 높아지면서 주변부까지 가공 영역이 확대된 것으로 판단할 수 있다. 1mW 이하 출력에서는 초점보다 작은 1~1.7  $\mu\text{m}$

선폭으로 가공이 이루어짐을 확인하였으며, 이는 가우시안 분포를 갖는 펄스의 중심부분에 다광자 흡수 프로세스가 발생한 것으로 설명이 가능하다.

fused silica 에 대한 가공 결과는 Fig. 3 과 같다. 같은 출력조건에서 BK7 과 비교했을 때 전반적으로 가공 영역이 넓게 나타나는 경향을 보였다. BK7 에서는 Fig. 2(i)에 나타난 것과 같이 0.3mW 에서 미약하지만 가공결과를 관측할 수 있었으나 fused silica 에서는 관측이 불가능하였다. 이는 BK7 보다 fused silica 가 높은 투과율을 갖고 있음을 볼 때 에너지 흡수차이 혹은 재료의 에너지 밴드갭(bangap) 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다.

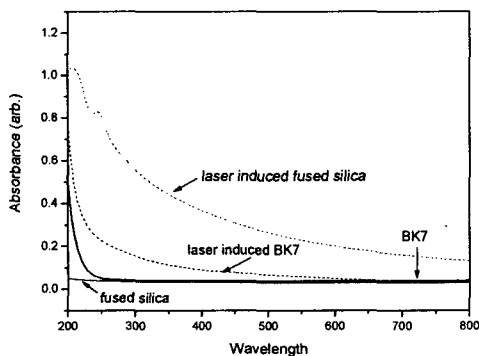


Fig. 1 Absorbance difference between bulk and laser induced material



Fig. 2 Magnified (1000 $\times$ ) photograph of damage in BK7 different irradiation power using 60 $\times$  (f=2.9mm, NA:0.85) objective lens. (a)7mW (b)5mW (c)3.4mW (d)2.2mW (e)1.5mW (f)1.0mW (g)0.7mW (h)0.4mW (i)0.3mW

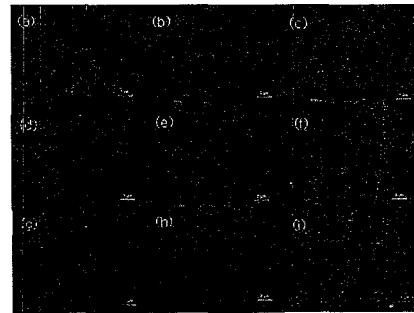


Fig. 3 Magnified (1000 $\times$ ) photograph of damage in fused silica different irradiation power using 60 $\times$  (f=2.9mm, NA:0.85) objective lens. (a)12mW (b)7mW (c)5mW (d)3.4mW (e)2.2mW (f)1.5mW (g)1.0mW (h)0.7mW (i)0.4mW

#### 4. 결론

BK7 과 fused silica 내부에 펄스 레이저를 조사하고 그 가공 특성을 광학현미경 이미지와 스펙트로미터 스펙트럼을 분석하였다. 두 재료의 가공 결과를 광학현미경으로 비교하였을 때 fused silica 에서 더 높은 임계값을 보여주었다. 가공 최소 선폭은 BK7 에서 관찰되었으나, 레이저 조사부에서의 광 차단효과는 fused silica 가 더 우수하였다. 이러한 특징은 그레이팅이나 존 플레이트(zone plate) 등의 미소 광학소자 제작에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 첨단레이저 응용 미세가공기술 개발 과제의 일부로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Le Luo, Dangling Wang, Chengde Li, Hongbing Jiang, Hong Yang and Qihuang Gong, "Formation of diversiform microstructures in wide-bandgap materials by tight-focusing femtosecond laser pulses," J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 4, 105-110, 2002.
2. L. Sudrie, A. Couairon, M. Franco, B. Lamouroux, B. Prade, S. Tzortzakis, and A. Mysyrowicz, "Femtosecond laser-induced damage and filamentary propagation in fused silica," PhysRevLett, Vol 89, No 18, 2002.
3. Quan Sun, Hongbing Jiang, Yi Liu, Zahoxin Wu, Hong Yang, and Qihuang Gong, "Measurement of the collision time of dense electronic plasma induced by a femtosecond laser in fused silica," Optics letter, Vol. 30, No. 3, 2005.