

## 극초단 레이저를 이용한 겹침 평판유리 절단

신현명\*, 이영민<sup>+</sup>, 최해운<sup>++</sup>

(논문접수일 2011. 08. 12, 수정일 2012. 01. 08, 심사완료일 2012. 02. 24)

### Multi-layer Glass Cutting by Femtosecond Laser

Hyun Myung Shin\*, Young Min Lee<sup>+</sup>, Hae Woon Choi<sup>++</sup>

#### Abstract

A femtosecond laser with 775nm central wavelength and 150 fs of temporal pulse width was used for multi layered glass cutting applications. Ultrashort pulse was effectively used for clean glass cutting with 50 $\mu$ m depth and minimum cutting width. Laser beam was split to two stages and focused on the top surfaces of each layer. Ablation threshold of used glass was measured to be 2.59J/cm<sup>2</sup>. In experiments, 200mW laser power and 1mm/s scanning speed was used for preliminary experiment. Air gap was the major defect occurring parameter and laser power was less sensitive to glass cutting in the experiment. The maximum cutting speed was measured to be 60mm/min with 2kHz, however, Maximum 3m/min cutting speed can be achievable with a commercially available laser with 100kHz.

**Key Words** : Femtosecond laser(극초단레이저), Glass cutting(유리절단), Display(디스플레이)

### 1. 서론

평판유리는 가전제품, 식품, 의약품, 멀티미디어 디스플레이 장치 및 자동차 등 산업 전반에 철강소재와 함께 다양하게 사용이 되고 있으며, 그 성능 또한 비약적인 발전을 이루어 왔다. 특히 지난 수 년 동안에는 반도체공정기술 및 멀티미디어 장치의 발전과 더불어 평판유리 수요가 크게 늘었으며, 아울러 평판유리 가공기술에 대한 연구도 활발하게 진행이 되었다.

평판유리절단에 대한 일반적인 방법은 경도가 높은 다이아몬드나 합금강을 사용하여서 유리표면에 노치를 만든 후 기계적인 힘을 가하여 절단하는 방식(Scoring and Snapping)이 많이 사용되어 왔다. 이러한 방법의 단점으로는 유리의 표면 흠집발생으로 인해서 강도가 약해지며, 취성이 높을 뿐만 아니라

절단시 발생하는 부스러기로 인해서 최종제품의 불량률 유발할 수 있는 위험성이 있다<sup>(1)</sup>. 표면의 크랙발생은 크랙전파(Crack Propagation)를 통해서 잠재적으로 치명적인 결함을 유발할 수 있어서 표면그라인딩 등의 후처리 공정을 요하며, 이로 인한 원가상승 등의 부담이 발생할 수 있고, 공구의 마모로 인한 균일한 제품생산의 한계가 발생 할 수 있다.

레이저를 이용한 유리절단은 이러한 기계적 가공의 한계를 극복한 기술로서, 레이저를 비교적 원거리에서 비접촉 형태로 평판유리 표면 또는 내부에 조사한 후 냉각가스를 사용하여 급냉을 시켜 유리내부의 열팽창 균열을 유도하여 절단하는 방식이다.

이러한 레이저응용기술은 크랙의 정도나 방향을 기계적방법에 비해서 비교적 정밀하게 조절할 수 있으며, 재료의 손실도

\* 계명대학교 기계자동차공학과  
+ 한국폴리텍 VI 대학 금형설계학과  
++ 교신저자, 계명대학교 기계자동차공학과 (hwchoi@kmu.ac.kr)  
주소: 704-701 대구광역시 달구벌대로 1095번지

비교적 적어도 광범위하게 응용이 되고 있으며<sup>(2)</sup>, 일부 기계적인 방법과 레이저를 혼용한 방법도 연구되었다<sup>(3)</sup>.

일반적으로 레이저를 이용한 유리절단에 사용되는 레이저는 유리에 흡수가 용이한 CO<sub>2</sub> 레이저나 Nd:YAG 레이저가 주로 이용된다. 하지만, 이러한 레이저의 경우 펄스의 폭이 비교적 긴 나노초 및 마이크로 대 영역의 레이저로서 가공시 미세균열 발생 및 용융 등의 부작용을 수반하게 되어서 기능성 확보를 위해서 후처리 공정이 반드시 필요하며, 초정밀 가공시에 여러 가지 한계를 드러내게 된다.

최근, 펄스의 폭을 10<sup>-15</sup> 초 영역으로 줄여서 레이저 가공시 발생하는 열에 의한 부작용을 획기적으로 줄인 극초단 레이저가 상용화 되면서 산업계 각분야에 다양하게 적용이 되고 있다.

이러한 극초단 레이저의 장점으로서 유전물질(Dielectric material)에서는 가공부 주위의 “부수적인 손상(Collateral damage)”를 획기적으로 줄일 수 있고, 금속물질(Metallic material)에서는 열영향부(Heat affect zone)를 최소화하여서 초정밀 가공을 이룰 수 있게 되는 장점이 있다는 것이다.

또한, 극초단 레이저는 순간정점과워밀도가 아주 높고(P<sub>peak</sub> > 10<sup>16</sup>W/cm<sup>2</sup>), 이러한 고밀도 레이저에너지의 물질내의 투입속도가 전자(Electron)와 격자이온(Lattice-ion) 시스템의 평형화시간(통상적으로 1~10피코초)보다 빨라서 이웃격자(Neighboring lattice)와의 열전도 현상이 거의 무시될 수 있다.

이러한 극초단레이저가 유리가공에 적용이 되었을 때는, 유체유동학적 현상(Hydrodynamics) 등이 현저히 저하 되고, 플라즈마 레이저빔 산란현상(Plasma shielding or light scattering by plasma)에 의한 레이저빔의 산란을 현저히 줄일 수 있다.

본 논문에서는 극초단레이저를 사용하여 평판유리에 미세한 노치를 형성하는 연구사례를 이론적 배경과 실험결과를 토대로 보고하고자 한다.

## 2. 실험 장치의 구성

정밀한 레이저 가공을 위해서 레이저중앙파장 775nm과 파

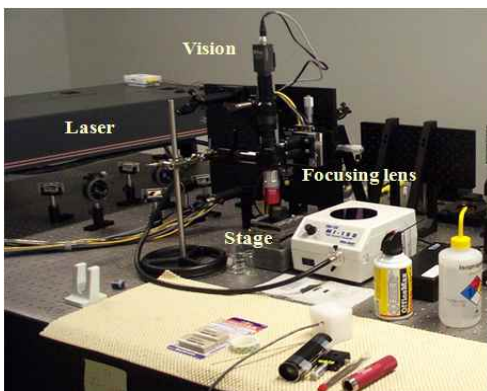


Fig. 1 Experiment setup for glass cutting

장스펙트럼 폭이 50nm를 가지고 펄스 작용시간이 150fs인 Ti:Sapphire 레이저가 본 실험에 사용되었는데, 광학장치 및 실험장치의 구성이 Fig. 1과 Fig. 2에 도시 되었다.

실험에 사용된 극초단 레이저는 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(CPA, Clark-MXR CPA2100)를 발진하는 형태이며, 최대평균출력은 1.6W이고 출력과 펄스의 최적상태는 펄스반복률 2000Hz에 맞추었다. 출력은 필름 형태의 편광장치(Polarizing beam splitter)와 반 파장 광학장치(Half wavelength plate)의 조합을 사용한 빔에너지를 감쇄하였으며, 각각의 장치를 통과하여 최종 출력이 100μW에서 500mW까지로 조절 되도록 설정 하였다.

본 실험에 사용된 초점렌즈는 초점거리가 25mm인 색수차보정렌즈와 현미경용 10배율(NA=0.25) 및 20배율(NA=0.40)이 사용되었으며, 정밀한 파워 측정을 위해서 파워측정장치는 초점렌즈를 완전히 통과한 이후 부분에 위치되었고, 레이저빔의 품질(M<sup>2</sup>)의 측정은 CCD 카메라와 Spirocon 소프트웨어를 사용 하였다.

회절한계초점계산(Diffraction limited focusing diameter)에 따르면 25mm 초점렌즈의 경우 초점크기는 7.5μm 이고 10X 배율 현미경 초점렌즈는 2.6μm, 20X 배율 현미경 초점렌즈의 경우 1.6μm로 계산 되었다.

## 3. 실험의 결과

### 3.1 가공입계치 측정실험

실험에 사용된 유리의 가공특성을 알아보기 위해서 소재 표면에 단펄스(Single pulse)를 조사하여서 단위면적당 펄스에너지(Fluence, J/cm<sup>2</sup>)와 가공된 재료의 가공크기를 조사하였다. 실험에 사용된 레이저는 M<sup>2</sup>가 1.2로 측정되었으며, 가우시안 빔의 형태를 가정하여 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$E = E_0 e^{(-2r^2/w_0^2)} \tag{1}$$

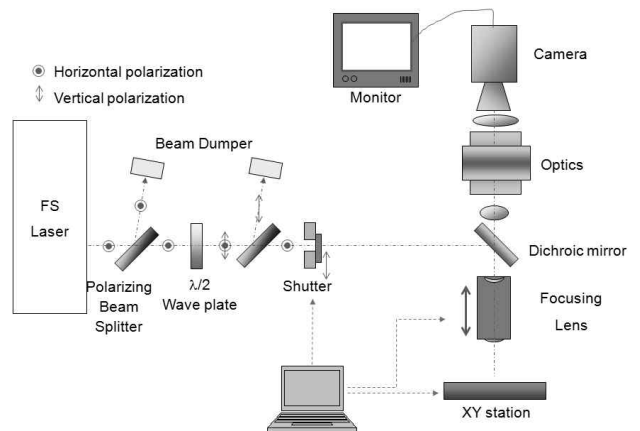


Fig. 2 Schematic of experiment setup

여기에서  $\omega_0$ 는 조사레이저 반경(Radius of beam waist)이며 일반적으로 FWHM(Full width half max) 값을 사용하며,  $E_0$ 는 정점에너지(Peak energy)이다.  $\omega_0$ 은 조사된 레이저의 반경으로서 초점위치 및 렌즈로 인한 빔의 왜곡 등의 이유로 이론값과는 차이가 나므로 에너지( $E_0$ )에 따른 가공물의 실제반경( $r$ )을 Fig. 3과 같이 측정된 후 경향 그래프의 기울기와 절편을 식 (2)와 같이 이용하면 구할 수 있다.

$$r^2 = \frac{1}{2} \omega_0^2 \ln(E_0) - \frac{1}{2} \omega_0^2 \ln(E_{th}) \quad (2)$$

여기서,  $r$ 은 가공 반지름,  $E_{th}$ 는 가공임계 에너지이다.

Fig. 3에서 나타난 데이터를 근거로 하여 로그함수에 대한 커브피팅을 실시하였으며 식 (2)에 의거 첫 번째 항의 계수를 로그스케일 기울기에서 찾았으며 결과로 6.9로 계산되었다. 결과적으로 실험에서 적용된 레이저빔의 반경( $\omega_0$ )은  $1.85\mu\text{m}$ 로 계산될 수 있었다. 또한, 가공 임계치 계산을 위해서 순간에너지를 조사레이저면적(Irradiation area)인  $\pi\omega_0^2$ 로 나누면, 에너지 밀도를 구할 수 있으며,  $F=E/\pi\omega_0^2$ 를 이용하여서, 가공된 크기와 조사된 레이저의 에너지 밀도를 Fig. 4와 같이 도시화하

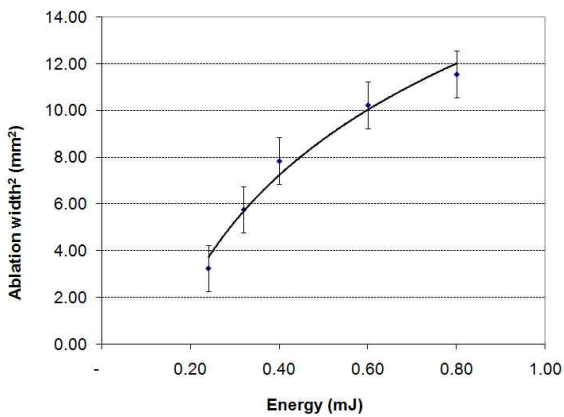


Fig. 3 Ablation width<sup>2</sup> vs. Energy

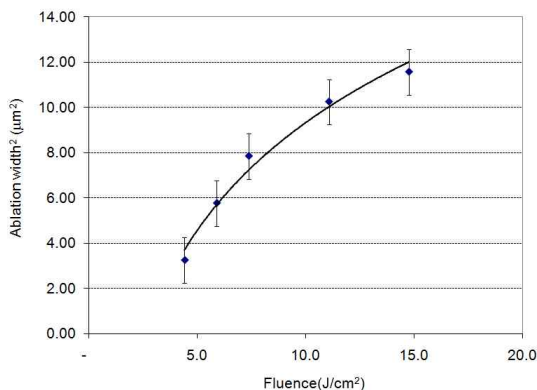


Fig. 4 Ablation width<sup>2</sup> vs. Fluence

면 가공 임계치를 구할 수가 있다.

커브피팅의 결과로서 가공 임계치는  $2.59\text{J}/\text{cm}^2$ 으로 계산이 되었으며, 타 연구진의 선행연구의 결과( $1.7\sim 4.0\text{J}/\text{cm}^2$ )와 비교했을 때 비교적 타당한 범위 내에서 도출된 것으로 나타났다<sup>(4,5)</sup>.

### 3.2 단층(Single layer) 가공

도출된 가공임계치 이상의 출력을 사용하여 단층 평판에 레이저를 집속하여서 유리절단을 시도하였다. 이때 사용한 초점렌즈는 비교적 저가이면서 대출력에 견딜 수 있고, 입사광의 반사를 비교적 작게 할 수 있도록 코팅된(AR, Anti-reflection) 1" 초점렌즈를 사용하였다. NA=1 기준으로하면, 이론적으로 초점의 지름은 약  $5\mu\text{m}$  이나, 실험 3.1과 동일한 방법으로 측정 결과 약  $10\mu\text{m}$ 로 계산이 되었다. 초점의 지름  $10\mu\text{m}$ 를 가정하면, 펄스겹침량을 고려한 최적 스캐닝 속도(이송속도)를 식 (3)과 같이 계산 할 수 있다.

$$O_d = \frac{L_o}{d} = 1 - \frac{s}{d \cdot f_p} \quad (3)$$

여기에서  $O_d$ 는 펄스겹침량(Overlap, %),  $L_o$ 는 펄스 겹침길이,  $d$ 는 초점의 지름,  $s$ 는 스캐닝속도,  $f_p$ 는 펄스 반복률(Hz)이다. 식 (3)을 이용하고, 주어진 조건 중 초점의 지름을 이론 초점 크기인  $5\mu\text{m}$  및 실제초점크기  $10\mu\text{m}$  그리고 가변치인  $15\mu\text{m}$ 을 각각 대입하여서 펄스겹침량에 따른 스캐닝속도를 그래프화 하면, Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

일반적으로 용접공정 및 기계가공시 75% 이상의 펄스 겹침량만 유지하여도 가공 및 용접공정에 적용이 가능하지만, 본 실험에서는 양질의 절단을 위해서 95% 이상의 겹침량을 설정하였다. 이러한 조건에 따르면, 초점크기  $5\mu\text{m}$ ,  $10\mu\text{m}$  및  $15\mu\text{m}$  설정시 스캐닝속도  $0.5\text{mm}/\text{s}$ ,  $1\text{mm}/\text{s}$  및  $1.5\text{mm}/\text{s}$ 로 설정할 수 있다.

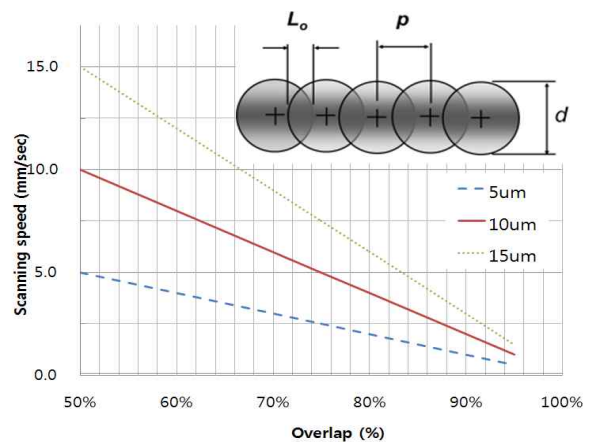


Fig. 5 Scanning speed vs. Overlap

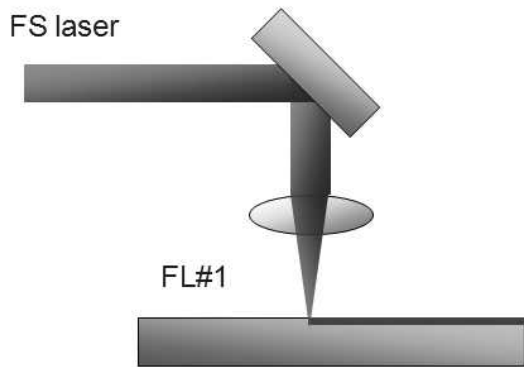


Fig. 6 Single layered glass machining

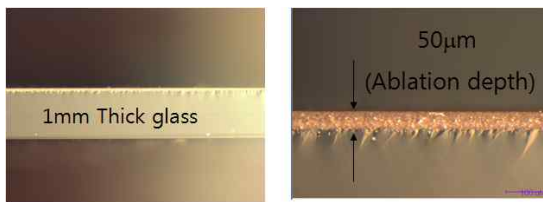


Fig. 7 Cross section of cut glass(200mW/1"FL, 1mm/s)

일반적으로 이송속도가 증가하면 펄스중첩률이 작아지면서 가공면이 거칠어 지는데 이는 가공시의 곡률반경과도 관계가 있으며<sup>(6)</sup>, 단층 가공에 있어서의 최적 조건은 Fig. 6과 같이 시스템을 설정하고, 스캐닝속도 1mm/s로 설정한 후 출력 200mW를 사용하여서 가공하였다.

가공의 결과를 광학현미경을 사용하여서 Fig. 7과 같이 나타내었다. 위치에 따라서 다소 편차가 있기는 하지만, 평균 50µm 정도의 깊이로 초기 가공이 되었다. 이후 기계적 힘을 가하여 유리를 절단한 결과 절단면이 비교적 양호하게 절단됨을 알 수가 있었다.

### 3.3 다층(Multi-layer) 가공

단층가공과 동일한 조건을 적용한 후 레이저빔을 50% 대 50%로 양분하여서 상부유리와 하부유리 표면에 조사를 하여서 동시가공을 시행하였다(Fig. 8). 이때 사용된 유리는 UV Glue를 얇게 도포하여서 접착하였으며, 이때 출력은 200mW를 사용하였으며 50%로 양분하였으므로 각 유리표면에는 100mW가 조사되었다.

실험에 사용된 유리절단 실험의 원리는 레이저빔으로 초기 노치를 생성 후 기계적 힘을 가하여 마이크로 크랙을 전파시켜서 동시 절단하는 방법을 취하였다. 초기실험결과 레이저 출력 200mW에서는 상부의 유리만 절단되고 하부 유리는 절단되지 않는 결과가 나타났다 Fig. 9(a). 출력을 상향하여서 400mW까지 조사되어도 동일한 결과가 발생하였으며, 분석결과 두 유리 상이에 존재하는 미세한 기공(Air gap)에서 레이저 빔이 산란

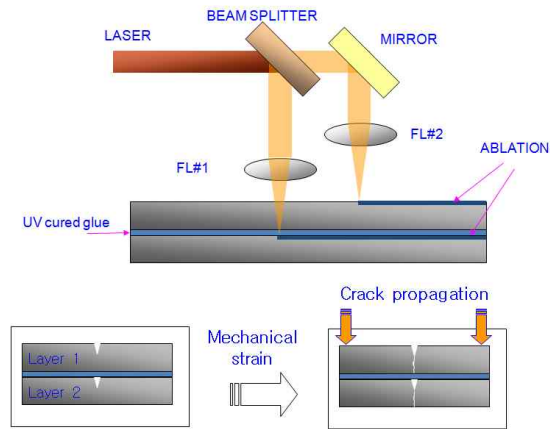


Fig. 8 Multi-layer glass cutting schematic

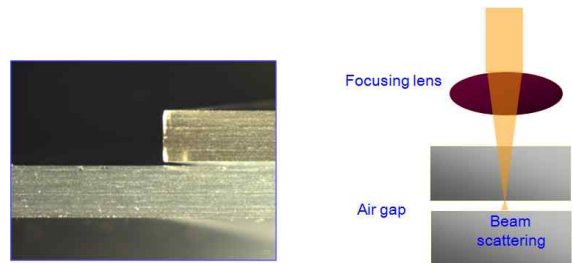


Fig. 9 Multi-layer glass cutting(a) cross sectional view(b) laser beam scattering

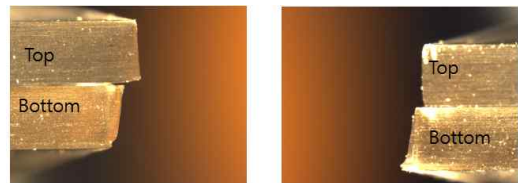


Fig. 10 Multi-layered glass cutting for multi-layer

이 주 원인인 것으로 밝혀졌다.

실험의 결과로 볼 때, 다층가공시 레이저빔의 출력보다는 두 평판사이에서 발생하는 기공을 최소화 하는 것이 중요함이 밝혀졌다. 이는 유리 내면을 통과하던 레이저빔이 공기를 만나면서 급격한 굴절계수변화가 생기게 되고, 유리면 밖에서 산란이 그 원인일 것으로 분석이 된다.

초기실험결과에 기초하여서 기공이 최소화 될 수 있도록 유리접합을 예정 절단면 가까이에 밀착하여서 시행하였으며, 200mW 레이저 출력으로 스캐닝속도 1mm/s의 가공조건을 통해서 가공된 결과가 Fig. 10에 도시되어 있다.

Fig. 10의 결과에서 나타나듯이 100mW 강도의 레이저 조사에도 다층의 유리가 잘 절단되었음이 나타났다. 실험의 결과로 다층의 유리면 절단이 비교적 쉽게 일어남을 알 수가 있었지만, Fig. 11에서 나타나는 바와 같이 약 50µm에서 100µm 사이의 수평편차(Lateral offset)로 인해서 절단면의 진직도가 다소 벗

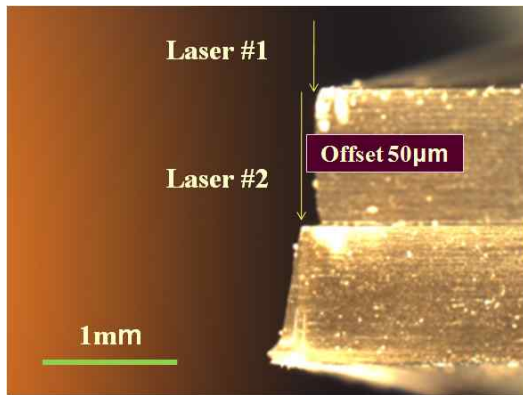


Fig. 11 Glass cutting result with offset

어남을 볼 수가 있다.

초기실험 및 연구의 결과로서 극초단레이저를 사용하여서 비교적 양질의 유리면 절단의 결과를 볼 있었지만, 2kHz의 레이저에서는 생산성이 분당 60mm/min에 불과해서 고반복률 레이저를 사용한 추가 연구가 시행 되어야 할 것으로 판단된다.

현재 100kHz의 레이저가 상용화되어 사용되고 있으므로 최대 3m/min의 속도가 예상된다<sup>(6)</sup>. 또한 광학장치를 개선하여서 상부와 하부의 절단면 위치 편차가 될 수 있도록 실험장치의 개선도 추가연구과제로 시행되어야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론 및 고찰

극초단 레이저를 사용하여서 다층의 유리를 절단하는 연구를 수행한 결과 다음의 결론을 얻을 수가 있었다.

- (1) 사용된 소다 라임 유리의 경우 150fs, 775nm 레이저 조사 결과 최소 2.59J/cm<sup>2</sup>의 가공임계치가 계산되었다.
- (2) 생산성 향상을 위해서 레이저 출력 200mW을 사용한 결과 1mm/s에서 안정적인 결과가 나타났으며, 이때 펄스 겹침 폭은 95% 정도가 사용되었다.

- (3) 다층의 유리가공의 경우 조사 레이저의 출력보다는 두 층 사이에 존재하는 기공이 가공불량에 더 많은 영향을 미침이 나타났다.
- (4) 고속가공 최대 출력은 100mW(가공면당)으로 가능하며, 레이저 반복률을 높이면 최대 3m/s 까지 가능 할 것으로 판단된다<sup>(6)</sup>.

#### 참 고 문 헌

- (1) Kang, H. S, Hong, S. K., Oh, S. C., Choi, J. Y., and Song, M. G., 2002, "A Study of Cutting Glass by Laser," *Proc. SPIE*, pp. 367~370.
- (2) Jiao, J., and Wang, X., 2009, "Cutting Glass Substrates with Dual-Laser Beams," *Opt. Lasers Eng.*, Vol. 47, No. 7, pp. 860~864.
- (3) Choi, S. D., Cheong, S. H., Kwon, H. G., Jun, J. M., Choi, M. S., and Yang, S. C., 2007 "Design of Hybrid Cutting System for Flat Glass by Laser Beam," *Proc. KSMTE*, pp. 838~843.
- (4) Ben-Yakar, A., Harkin, A., Ashmore, J., Byer, R., and Stone, H., 2007, "Thermal and Fluid Processes of a Thin Melt Zone during Femtosecond Laser Ablation of Glass: the Formation of Rims by Single Laser Pulses," *J. Appl. Phys.*, Vol. 40, No. 5, pp. 1447~1459.
- (5) Ben-Yakar, A., and Byer, R., 2004, "Femtosecond Laser Ablation Properties of Borosilicate Glass," *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, No. 9, pp. 5316~5323.
- (6) Farson, D., Choi, H., Zimmerman, B., Steach, J., Chalmers, J., Olesik, S., and Lee, L., 2008, "Femtosecond Laser Micromachining of Dielectric Materials for Biomedical Applications," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 18, pp. 035020~035028.