

## 비대칭 레이저 빔에 의한 유리 절단 시 파단 효과

윤상우<sup>a</sup>, 김주한<sup>a\*</sup>

## The Fracture Effect of a Non-Symmetric Laser Beam on Glass Cutting

Sangwoo Yoon<sup>a</sup>, Joohan Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	19	May	2015
Revised	5	July	2015
Accepted	26	July	2015

## Keywords:

Laser  
Glass cutting  
Beam shaping  
Crack

## ABSTRACT

A non-symmetric laser beam was used for cutting a thin glass substrate and its effect was investigated. In laser cutting of brittle materials, controlling crack initiation on the surface is crucial; however, it is difficult to ensure that crack propagation occurs according to a designed laser path. A lot of deviation in crack propagation, especially at the edge of the substrate, is usually observed. A non-symmetric laser beam generates a non-uniform energy distribution, which enhances directional crack propagation. A 20-W pulsed YAG laser was used for cutting a thin glass substrate. Parametric analysis was carried out and the crack control of the non-symmetric laser beam was improved. A theoretical model was presented and the limitations of the proposed process were also discussed.

## 1. 서론

디스플레이 산업에서 사용되는 유리는 그 종류와 사용이 다양하며 사용되는 제품 자체의 중량을 줄이기 위해 유리의 두께가 얇아지거나 외형이 직선이 아닌 형태로 변하고 있다. 이에 따라 유리 절단 공정은 그 중요성이 커지고 있으며 취성이 강한 유리의 절단에 있어서 정밀 공정이 적용되어야 한다. 특히, 커버용 유리의 품질은 디스플레이 품질과 직결되므로 매크로 및 마이크로의 파편을 억제하면서 정확한 패턴 커팅이 가능한 정밀 절단기술의 개선 및 적용이 필요하다<sup>[1-3]</sup>.

유리는 취성재료로서 크랙 전파가 임의의 방향으로 진행되어 유리의 절단기술은 매우 흥미로운 주제다<sup>[1]</sup>. 이 유리절단 방법에는 다이아몬드돌 같은 공구를 사용하는 기계적인 방법<sup>[4-6]</sup>, 워터젯을 이용한 방법<sup>[7,8]</sup>, 화학 에칭방법<sup>[9,10]</sup> 그리고 레이저를 이용한 레이

저 절단방법 등이 있다<sup>[11-19]</sup>. 현재 상용화된 방법은 기계적 절단 방법으로 절단날을 사용하는 연삭절단 방법과 다이아몬드 스크라이빙 휠을 이용한 굽힘절단 방법이 있다<sup>[20]</sup>.

그러나 이런 기계적인 절단 방식은 절단 시 유리에 발생한 마이크로 크랙이 미세한 손상을 초래하며, 이 손상은 마이크로 입자를 발생시킨다<sup>[20-22]</sup>. 이러한 마이크로 입자는 모바일기기 디스플레이와 같은 정밀공정에 큰 영향을 미치게 된다. 또한 공구의 지속적 사용으로 휠이 마멸되어 휠을 주기적으로 교체할 필요성이 있다<sup>[22]</sup>. 이에 비해 레이저를 이용한 절단방법은 광 에너지를 이용한 비접촉 절단이기 때문에 마이크로 입자 발생률이 현저히 낮다. 이러한 레이저 절단방식은 유리의 두께가 얇은 경우에 더욱 적합한데, 두께가 수 밀리미터 이내이며 표면에 전기적 전도성 물질이 코팅된 디스플레이용 커버유리 절단에 높은 효율을 보인다고 알려져 있다<sup>[20,22-24]</sup>.

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6314

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: joohankim@seoultech.ac.kr (Joohan Kim).

레이저를 이용한 취성재료 절단방법은 레이저 어블레이션에 이용한 직접절단과 레이저를 통해 표면 열응력을 변화시켜 발생된 마이크로 크랙의 전파로 절단하는 방법이 있다<sup>[1]</sup>. 전자는 재료 표면에 레이저 어블레이션에 의한 초기 미세한 크랙을 발생시켜 가공 경로에 따라 레이저 방사에 의해 재료가 급가열 및 급냉각을 반복하여 유도된 크랙 전파에 의해 재료를 절단하는 방법이다<sup>[25]</sup>.

레이저의 종류에 따라 각각 다른 결과가 나타나며 레이저의 파장과 펄스폭이 주요 파라미터로 작용한다<sup>[1,25,26]</sup>. 후자는 레이저 어블레이션에 의한 절단과는 다르게 재료 표면이 레이저 광에너지를 흡수하여 레이저 스폿 근처엔 고온에 의한 인장응력이 형성되고, 레이저가 지나간 후 응축에 따른 압축응력이 이완되어 국부적으로 열응력이 증가한다<sup>[11]</sup>. 이러한 레이저 유리 절단에 있어서 레이저 출력, 스캔 속도, 빔 스폿 크기 등은 직접적으로 재료 표면 및 레이저 조사 중심에서의 국부적 열 분포에 영향 미친다<sup>[26,27]</sup>. 이러한 온도분포는 재료의 응력분포에 영향을 미치며 이를 통해 크랙 전파가 일어난다. 이는 레이저 빔 형상에 따라 그 응력 발생 및 분포를 컨트롤 할 수 있다는 것을 의미한다<sup>[28,29]</sup>.

본 연구에서는 원형의 레이저 빔 형상을 웨이핑하여 비대칭 빔을 통해 유리 재료를 절단하였을 경우 그 절단 품질의 변화에 대해 연구하였다. 특히 레이저 빔의 형태에 따른 빔 경로와 절단 경로의 변화에 대한 분석을 수행하였고 각 파라미터간의 크랙 발생 영향을 연구하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 실험장치

실험에 사용된 레이저는 펄스 파이버 레이저이며, 1,070 nm 스캐닝 프로세스 시스템을 이용하여 스캐닝 경로를 결정하였고, 마이크로 모션 스테이지를 이용하여 시험편을 컨트롤 하였다. 실험에 사용된 레이저 파라미터는 Table 1과 같으며, 실험장치의 전반적인 셋업은 Fig. 1에 나타나 있다.

실험에 사용된 재료는 18×18 mm<sup>2</sup>의 커버글라스를 사용하였으며 두께는 100 μm 이다. 레이저 투과율을 낮추고 흡수율을 높이기

Table 1 Laser parameters

Wavelength (nm)	1,064
Pulse width (ns)	4
Repetition rate (kHz)	500
Average Output (W)	20.0
Glass thickness (μm)	130
Scan speed (mm/s)	100
Beam spot diameter (μm)	50

위해 글라스에 Pt 박막을 코팅하여 실험하였다. Fig. 2는 레이저가 실험재료를 수직으로 지나도록 스캐닝 패턴을 설계한 모습을 나타낸다.

### 2.2 재료의 광학 특성

Pt 박막 코팅은 레이저를 97% 투과하는 커버글라스에 광흡수율을 증가시키기 위해 수행되었다. Fig. 3은 Pt 박막을 코팅한 커버글라스의 반사율을 나타낸다. 1,070 nm 파장영역에서 Pt 코팅된 커버글라스의 반사율은 약 55%로, 조사된 레이저 에너지의 약 45%를 흡수하는 것으로 나타났다. Pt 박막층은 조사된 에너지를 흡수하여 커버글라스 표면에 열응력을 발생시키고, 이 열응력은 커버글라스 표면에 미세한 균열을 생기게 한다. 취성재료인 커버글라스는 표면의 미세한 균열들에 의해 가공경로를 따라 절단된다.

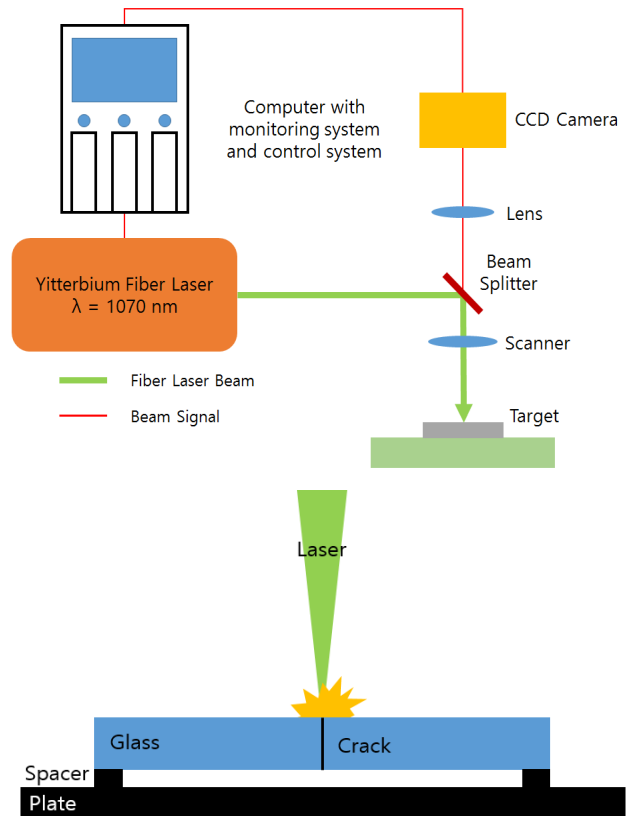


Fig. 1 Schematic of the laser setup and specimen

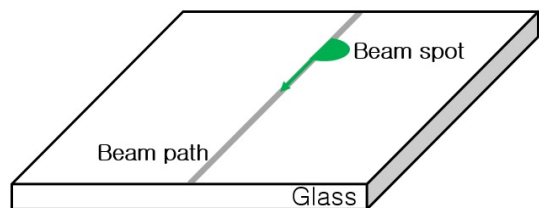


Fig. 2 A scanning pattern of laser beam

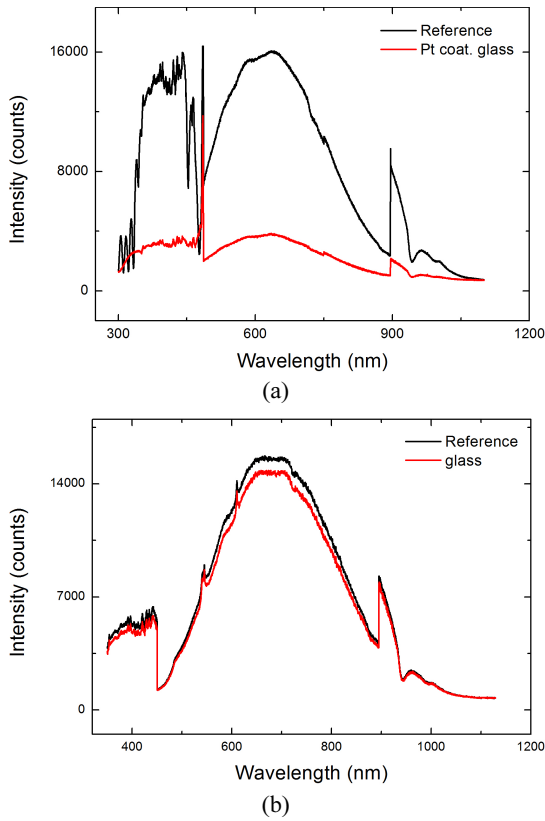


Fig. 3 Optical properties of Pt coating glass substrate: (a) reflection, (b) transmittance

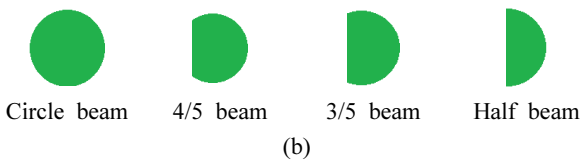
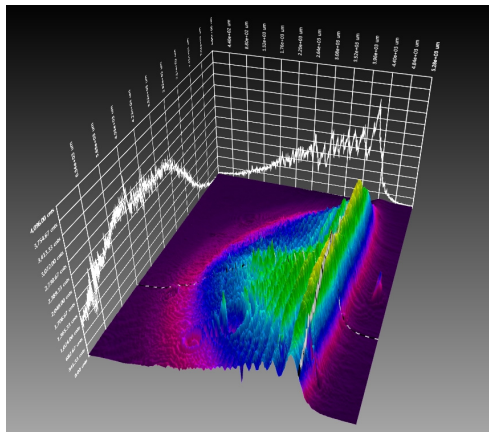


Fig. 4 Various energy profiles of laser beams

### 2.3 빔셰이핑

Fig. 4(a)는 반원형상으로 셰이핑된 빔의 에너지 프로파일이다. 원형 빔의 에너지가 중앙부분이 가장 높은 것으로 나타났으며, 반원형상으로 빔을 셰이핑 하여도 에너지 분포의 변화 없이 셰이핑

되는 것을 보여준다. 빔의 형상은 4가지 경우로 하여 실험하였으며 이는 Fig. 4(b)에 나타나 있다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 열응력 모델링

레이저 가공에 있어서 표면 레이저 조사에 따른 유리 내의 온도 분포는 이로 인한 열응력을 예측하는데 있어서 중요하다. 표면에서 레이저 빔조사에 의한 유리 내의 온도변화는 다음과 같은 열확산지배방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q}_g \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 온도,  $t$ 는 시간,  $\rho$ 는 물질의 밀도,  $c_p$ 는 재료의 비열,  $k$ 는 열전달계수,  $\dot{q}_g$ 는 레이저에 의해 재료 내부에 발생된 에너지 소스이다. 레이저에 의한 표면 열유속은 재료의 깊이방향으로 전달 되고  $\dot{q}_g$ 에 대해 영향을 준다.  $\dot{q}_g$ 을 정량화하기 위해서는 표면에서의 레이저에 의한 열전달량을 정의해 줄 필요가 있다. Fig. 5에 나타난 1차원 열전도 모식도에서 재료의 레이저 복사에너지 흡수로 인한 체적 열 발생은

$$\dot{q}(x) = (1 - \beta) q_o'' \alpha e^{-\alpha x} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 경계조건인

$$\left[ -k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = \beta q_o'' \quad (3)$$

$$\left[ -k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=L} = h(T(L) - T_\infty) \quad (4)$$

을 대입하여 풀면, 깊이방향( $x$ )에 대한 온도분포는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T(x) = \frac{(1 - \beta) q_o''}{k \alpha} (e^{-\alpha L} - e^{\alpha L}) + \frac{q_o''}{k} (L - x) + \frac{q_o''}{h} (1 - (1 - \beta) e^{-\alpha L}) + T_\infty \quad (5)$$

유리표면에서 온도분포를 통해 열응력 분포를 알아 낼 수 있다. 이를 위해 몇 가지 가정이 필요하다. a) 계는 정상상태에 있으며, b) 레이저빔의 국소 빔 조사 열유속은 형상계수( $S$ )의 영향만 받는다고 가정한다.

형상계수에 의한 열전달률은 다음과 같다.

$$q = Sk(T - T_\infty) \quad (6)$$

식 (5)에서 열유속( $q_o''$ )은 식 (6)을 면적으로 나눈 것과 같다.

$$q_o'' = \frac{Sk}{A}(T - T_\infty) \quad (7)$$

여기서 형상계수( $S$ )는 빔의 반지름( $r_b$ )에 대한 함수이며 다음과 같이 정의된다.

$$S = 2\pi^{1/2}r_b \quad (8)$$

위의 식을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{T(x) - T_\infty}{T - T_\infty} = \left[ \frac{(1-\beta)}{k\alpha} (e^{-\alpha L} - e^{\alpha L}) + \frac{1}{k}(1-x) + \frac{1}{h}(1 - (1-\beta)e^{-\alpha L}) \right] \frac{Sk}{A} \quad (9)$$

여기서  $(T(x) - T_\infty)/(T - T_\infty)$ 을  $\theta^*$ 로 무차원화 할 수 있다. 커버글라스의 300 K에서의 물성값은, 열전달계수  $k$ 는 1.4 (W/m·K), 자연대류열전달계수  $h$ 는 10 (W/m<sup>2</sup>·K) 이며, 두께  $L$ 은 130 ( $\mu$ m), 에너지 흡수율  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 Fig. 3(a), (b)에서 0.45, 0.03으로 구해질 수 있다. 이 물성값을 식 (9)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식으로 간략히 나타낼 수 있다.

$$\theta^*(x) = -\frac{x + 4.09 \times 10^{-3}}{\sqrt{\pi} r_b} \quad (m) \quad (10)$$

이와 같은 관계로 온도 프로파일이 계산되었을 때, 온도분포로부터 열응력 분포는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\sigma_{thermal} = \frac{E\alpha \Delta T}{1-\nu} \quad (11)$$

$E$ 는 재료의 탄성계수,  $T$ 는 온도,  $\alpha$ 는 열확산계수,  $\nu$ 는 푸아송 비이다<sup>[1]</sup>. 이와 같은 관계를 이용하여 이 식 (10)을 식 (11)에 대입하여 얻은 열응력 분포는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma_{thermal} = \frac{E\alpha\theta^*}{1-\nu} \quad (12)$$

탄성계수  $E$ 는 65 GPa, 열확산계수  $\alpha = k/\rho c_p$ 는  $7.46 \times 10^{-7}$ , 푸아송 비  $\nu$ 는 0.22 이다.

실험에 사용한 빔 형상에 따른 표면에서의 온도분포와 열응력 분포는 Table 2와 Fig. 6과 같다. 이 열응력 분포는 커버글라스

Table 2  $\theta^*$  and  $\sigma_{thermal}$  at  $x=0$

$r_b$ ( $\times 10^{-6}$ m)	$\theta^*$	$\sigma_{thermal}$ (MPa)
25.0	92.3	5.74
20.0	115.4	7.17
15.0	153.8	9.56
12.5	184.6	11.47

표면에서 마이크로 크랙을 발생시키는 원인이 된다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 빔의 반경이 줄어들면 그것에 비례하여 열응력이 증가되고 있음을 Table 2와 Fig. 6으로부터 확인할 수 있다. 이것은 빔이 비대칭일 경우 한쪽 방향의 열응력이 반대 방향보다 크게 나타나는 것을 의미하며 이것은 응력에 의한 크랙이 발생되었을 때 보다 강한 방향성을 갖는다는 것으로 유추할 수 있다.

### 3.2 레이저 절단 실험

Table 3은 빔 형상에 따른 팁의 절단 경로차를 사진으로 나타낸 것이다. 절단은 레이저 에너지가 커버글라스 표면에서 흡수되면서 열응력에 의해 발생한 마이크로 크랙이 가공경로를 따라 연장되면서 진행되었다. 원형 가우시안 빔을 반원형상까지 웨이핑하여 네 가지로 나눠 실험하였고, 레이저의 피크 파워는 10 kW/mm<sup>2</sup> 이다. 절단경로와 가공경로의 차는 절단면 팁 부분에서의 각도로 나타내었다. 원형 빔으로 커버글라스를 절단시도 한 경우 팁의 각도는 12°-16°로 나타났으나 비대칭 빔으로 절단을 한 경우 반원에 가까운 에너지 분포일수록 그 절단 팁의 각도가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 이러한 빔 형상에 따른 팁 각을 그래프로 나타낸 것이다. 절단면의 측면 형상은 빔의 웨이핑에 따른 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다.

유리절단기에 의한 절단면 형상에 비해 레이저에 의한 절단면은 매우 매끄럽게 나타났다. 따라서 커버글라스 표면의 마이크로 크랙에 의한 절단면은 유리절단기로 절단한 기계적인 절단면보다 품질

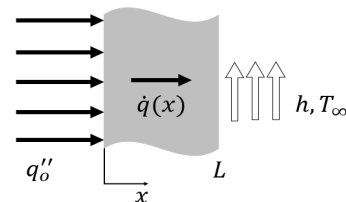


Fig. 5 Schematics of laser setup and specimen

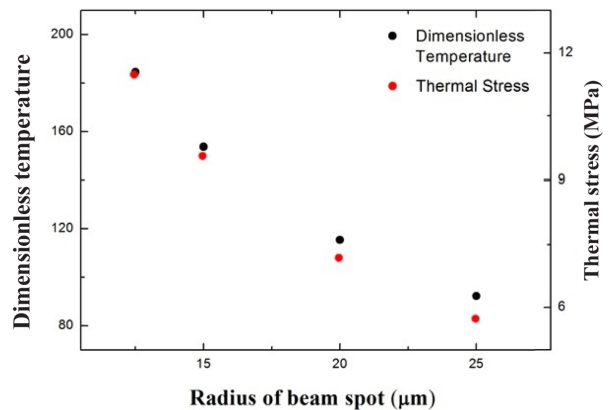
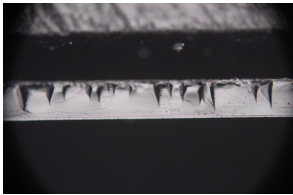
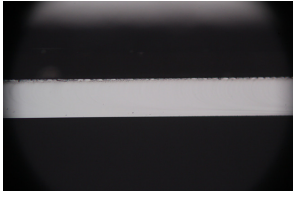

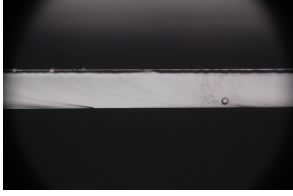
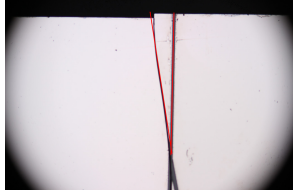
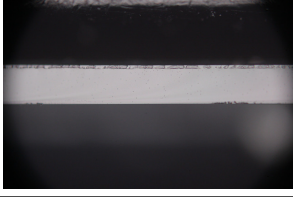
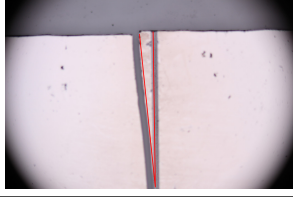
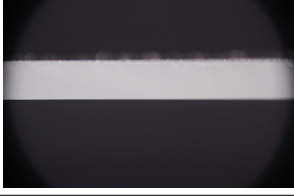



Fig. 6 Dimensionless temperature ( $\theta^*$ ) and thermal stress ( $\sigma_{thermal}$ ) vs. radius of beam spot

Table 3 Laser cutting of glass vs. beam's shape

Beam's shape	Laser peak power density [kW/mm <sup>2</sup> ]	Cross view (x200)	Top view (x50)
No laser process (Glass cutter)	—		—
Circle (Gaussian)	10.2		
4/5	10.2		
3/5	10.2		
half	10.2		

이 우수하다고 볼 수 있으며 빔쉐이핑을 통한 절단에서는 절단면 팁의 절단 정밀도는 향상되는 것으로 보인다.

#### 4. 결론

펄스레이저의 비대칭 빔쉐이핑을 통해 유리재료의 절단품질 연구를 수행하였다. 가공경로를 따라 진행하면서 나타나는 열응력 분포를 예측하기 위한 모델링이 실험결과와 함께 제시 되었다. 레이저 빔은 커버글라스 표면에서 흡수되어 마이크로 크랙을 발생시키고, 이 크랙은 가공경로를 따라 연장되어 커버글라스를 분리시킨다. 비대칭 원형 빔을 통해 실험을 수행하였으며 원형 빔이 반원형상으로 쉐이핑 되는 정도에 따라 절단면과 빔 패스의 경로차가 줄어드는 것으로 결론내릴 수 있었다. 이는 빔쉐이핑이 취성이 큰 재료의 절단에 있어서 크랙 전파의 방향성을 향상시키는 결과로 볼 수 있다.

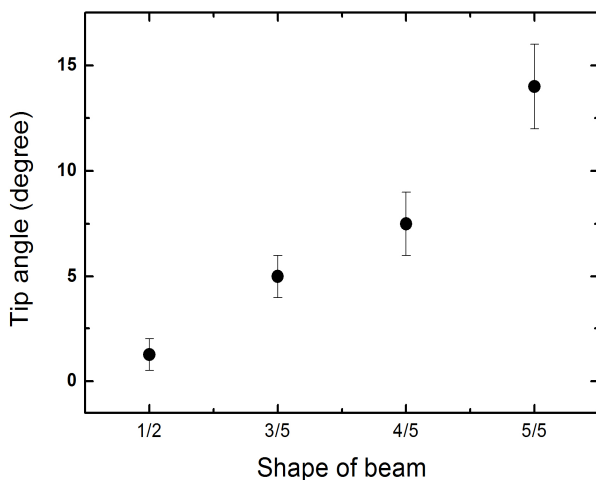


Fig. 7 Shape of beam vs. tip angle

## 후 기

이 연구는 2015 서울과학기술대학교 교내연구지원사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

## References

- [1] Choi, W. S., Kim, J. H., Kim, J., 2014, Thermal Cleavage on Glass by a Laser-induced Plume, *Optics and Lasers in Engineering*, 53 60-68.
- [2] Choi, S. D., Cheong, S. W., Kwon, H., Jun, J. M., Choi, M. S., Yang, S. C., 2007, Design of Hybrid Cutting System for Flat Glass by Laser Beam, *The Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference*, 838-843.
- [3] Shin, H. M., Lee, Y. M., Choi H. W., 2012, Multi-layer Glass Cutting by Femtosecond Laser, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, 21:3 382-386.
- [4] Fang, F. Z., Zhang, G. X., 2004, An Experimental study of Optical Glass Machining, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 23:3/4 155-160.
- [5] Liu, K., Li, X., Liang, S. Y., Liu, X. D., 2005, Nanometer-scale, Ductile-mode Cutting of Soda-lime Glass, *J. of Manuf. Processes*, 7:2 95-101.
- [6] Giovanola, J. H., Finnie, I., 1980, On the Machining of Glass, *Journal of Materials Science*, 15:10 2508-2514 .
- [7] Prakash, E. S., Sadashivappa, K., Joseph, V., Singaperumal, M., 2001, Nonconventional Cutting of Plate Glass using Hot Air Jet: Experimental Studies, *Mechatronics*, 11:6 595-615.
- [8] Yuan, F., Johnson, J. A., Allred, D. D., Todd, R. H., 1995, Waterjet Cutting of Cross-linked Glass, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 13:1 136-139.
- [9] Kruusing, A., 2004, Underwater and Water-assisted Laser Processing: Part 2-Etching, Cutting and Rarely used Methods, *Optics and Lasers in Engineering*, 41:2 329-352.
- [10] Iliescu, C., Chen, B., Miao, J., 2008, On the Wet Etching of Pyrex Glass, *Sensors Actuator A*, 143:1 154-161.
- [11] Jiao, J., Wang, X., 2008, A Numerical Simulation of Machining Glass by Dual CO<sub>2</sub>-laser Beams, *Optics and Laser Technology*, 40:2 297-301.
- [12] Wang, Y. Z., Li, J., 1996, Characterization of the Laser Cleaving on Glass Sheets with a Line-shape Laser Beam, *Optics and Laser Technology*, 39:5 892-899.
- [13] Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., Ohmura, E., 2010, Influence of Glass Substrate Thickness in Laser Scribing of Glass, *Precision Engineering*, 34:1 55-61.
- [14] Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., Ohmura, E., 2010, Influence of Thermal Expansion Coefficient in Laser Scribing of Glass, *Precision Engineering*, 34:1 70-75.
- [15] Kuo, Y. L., Lin, J., 2008, Laser Cleaving on Glass Sheets with Multiple Laser Beams, *Optics and Lasers in Engineering*, 46:5 388-395.
- [16] Yilbas, B. S., Arif, A. F. M., Abdul Aleem, B. J., 2010, Laser Cutting of Sharp Edge: Thermal Stress Analysis, *Optics and Lasers in Engineering*, 48:1 10-19.
- [17] Dubey, A. K., Yadava, V., 2008, Multi-objective Optimisation of Laser Beam Cutting Process, *Optics and Laser Technology*, 40:3 562-570.
- [18] Nisar, S., Sheikh, M. A., Li, L., Safdar, S., 2010, The Effect of Material Thickness, Laser Power and Cutting Speed on Cut Path Deviation in High-power Diode Laser Chip-free Cutting of Glass, *Optics and Laser Technology*, 42:6 1022-1031.
- [19] Yamamoto, K., Hasaka, N., Morita, H., Ohmura, E., 2008, Three-dimensional Thermal Stress Analysis on Laser Scribing of Glass, *Precision Engineering*, 32:4 301-308.
- [20] Shingo, K., Kazuyuki, H., 2014, The Advanced Functional Materials and Optical Technique(3), *Bulletin of the Ceramic Society of Japan*, 49:2 132-136.
- [21] Weber, H., Berberger, J., Pilz, R., 1984, Turning of Machinale Glass Ceramics with an Ultrasonically Vibrated Tool, *Annals of CIRP*, 33:1 85-87.
- [22] Choi, S. D., Cheong, S. H., Kwon, H. G., Jun, J. M., Choi, M. S., Yang, S. C., 2007, Design of Hybrid Cutting System for Flat Glass by Laser Beam, *J. of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 4:1 37-42.
- [23] Anderson, T. L., 2005, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, CRC Press, Florida.
- [24] Lumley, R. M., 1969, Controlled Separation of Brittle Materials using a Laser, *Am. Cream. Soc. Bull.*, 48 850-854.
- [25] Yan, Y., Li, L., Sezer, K., Whitehead, D., Ji, L., Bao, Y., Jiang, Y., 2011, Experimental and Theoretical Investigation of Fiber Laser Crack-free Cutting of Thick-section Alumina, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51 859-870.
- [26] Nissim, Y. I., Lietoila, A., Gold, R. B., Gibbons, J. F., 1980, Temperature Distributions Produced In Semiconductors by a Scanning Elliptical or Circular CW Laser Beam, *Journal of Applied Physics*, 51 :1 274-279.
- [27] Nisar, S., Sheikh, M. A., Li, L., Safdar, S., 2009, Effect of Thermal Stresses on Chip-free Diode Laser Cutting of Glass, *Optics and Laser Technology*, 41:3 318-327.
- [28] Nisar, S., Li, L., Sheikh, M. A., Pinkerton, A. J., 2010, The Effect of Continuous and Pulsed Beam Modes on Cut Path Deviation in Diode Laser Cutting of Glass, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49:1/4 167-175.
- [29] Nisar, S., Li, L., Sheikh, M. A., Pinkerton, A. J., 2010, The Effect of Laser Beam Geometry on Cut Path Deviation in Diode Laser Chip-free Cutting of Glass, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132:1 011002-011010.