

피코초 레이저를 이용한 Eagle Glass 절단 시 가공성 평가

Processing Evaluations of the Eagle Glass Cutting Using Pico-second Laser

이상균¹, 이영곤¹, 김재도^{1,✉}
Sang Kyun Lee¹, Young Gon Lee¹, and Jae Do Kim^{1,✉}

¹ 인하대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Inha Univ.)
✉ Corresponding author: kimjaedo@inha.ac.kr, Tel: +82-32-860-7316

Manuscript received: 2012.5.4 / Revised: 2012.10.6, 2013.1.2 / Accepted: 2013.1.3

In this paper, the characteristics of ablation processing of the eagle glass by pico-second laser are investigated. The laser ablation is used to process micro forms on materials. The ablation causes little thermal effect and little burr on the surface of eagle glass. In order to examine the characteristics of panic cracks, experiments are conducted under various cutting conditions such as a frequency of 600 kHz, laser powers, scan speeds and number of scan(NS). To minimize the panic cracks, the specimens are heated at 30°C, 45°C, and 60°C for ten minutes respectively and then they are broken by hands. Laser powers, NS and scan speeds have an effect on glass cutting results. The ablation depths increase with an increase in the laser power and NS whereas the panic cracks decrease with an increase in scan speed. The high temperature on processed specimens reduces the panic cracks and makes good results of laser cutting. The optimal condition for eagle glass laser cutting is found to be at 30 W of laser power, 3 mm/s of scan speed and 500 of NS, respectively.

Key Words: Pico-second Laser (피코초 레이저), Laser Ablation (레이저 어블레이션), Panic Crack (패닉 크랙), Eagle Glass (이글 유리)

1. 서론

최근 휴대폰, 노트북, 휴대용 IT 제품들이 초 소형화 됨에 따라 이 제품에 공급되는 유리부품 제작에도 고정밀 가공 기술이 요구되고 있다. 현재 산업체에서 폭넓게 쓰이는 유리절단 기술은 카바이드 또는 다이아몬드 커팅 휠을 사용하여 절단하는 접촉식 방법이다. 이러한 방법은 다량의 칩 생성과 불규칙적인 절단경로 형성 그리고 미세균열과 같은 결함을 발생시킨다. 이러한 결함 감소를 위해서는 연삭, 폴리싱, 열처리 등의 후처리 가공이 필요하지만, 원상태의 유리 모재 대비 30% 정도의 결함만을 제거시킬 뿐이다.

그동안 접촉식 유리 절단시 발생하는 결함 해결을 위해 CO₂ 및 Nd:YAG 레이저를 이용한 비접촉식 절단방법이 연구되어 왔다. 그러나 위의 방식은 유리의 천이온도 이상에서 수행되기 때문에 cutting profile 주변에 크랙과 버를 생성키는 문제가 발생한다. 이런 단점을 보완하기 위해 water-air mixture 방법을 도입하였다. 이 방법은 유리의 천이온도 이하 가공 상태를 유지하며 cut path 에 따라 인장응력을 발생시켜 절단한다. 따라서 크랙과 버의 발생량을 상당히 줄일 수 있지만 모재에 다른 이물질의 접촉으로 후처리 가공이 요구되는 문제점이 발생한다.

최근 장펄스 형태의 CO₂ 및 Nd:YAG 레이저 보다 더욱 정밀한 유리가공이 가능한 단펄스 형태의

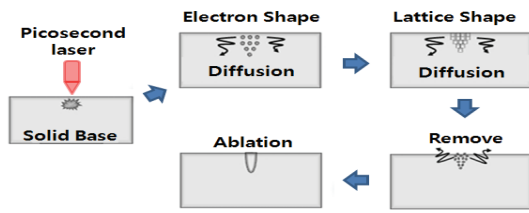


Fig. 1 Schematic drawing of ablation in solid by a picosecond laser pulse

레이저 가공기술이 도입되었다. 이러한 단펄스 레이저 가공은 공정 후 모재를 breaking 해야 하기 때문에 breaking 공정 시 발생하는 절단면의 패닉 크랙이 큰 문제가 되고 있다.⁵ 본 논문에서는 유리의 단펄스 레이저 가공 시 발생하는 패닉 크랙의 경향과 이의 개선을 위한 기술적 방법을 연구를 하였다. 피코초 레이저로 유리를 가공한 후, breaking 공정을 수행하였다. 그리고 유리 절단면을 각 공정 변수(열, 이송속도, 주파수, 중첩율)에 따라 비교 분석하였다.

2. 어블레이션 원리

2.1 어블레이션

어블레이션(Ablation)이란 레이저 빔이나 각종 공구들을 이용해 재료 표면의 일부를 제거하여 재료의 표면에 미소 형상 제작을 수행하는 가공 방법이다. 재료 표면에 조사되는 피코초 레이저는 낮은 강도와 짧은 펄스 특성을 갖는 빔이다. 에너지를 보유한 피코초 레이저의 자유 전자가 재료 표면에 접촉을 하게 되면 전자의 열에너지에 의해 열적 확산작용이 일어난다. 이런 전자 형태의 에너지는 재료 표면에서 격자 형태로 변화되는 과정을 거친다. 이 격자 형태는 재료 표면에서 에너지의 방출 시 함께 제거된다.^{3,4} Fig. 1 는 피코초 레이저에 의한 어블레이션 가공 과정을 도해한 것이다.

2.2 장펄스 레이저와 단펄스 레이저 비교

Fig. 2 는 장펄스와 단펄스 레이저로 재료 가공 시의 모습을 나타낸 것이다. CO₂ 및 Nd:YAG 레이저와 같은 장펄스 레이저의 발생 펄스 간격은 대부분 나노초 형태로 조사된다. 장펄스 레이저는 고체→액체→기체의 상변화 과정을 거치기 때문에 높은 에너지가 재료에 과도하게 입열된다. 이로 인해 재료에 부분적인 용융을 일으킨다. 형성된

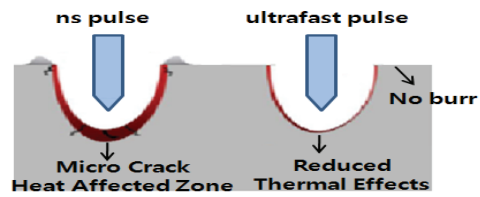


Fig. 2 Comparison between long pulse laser and short pulse laser

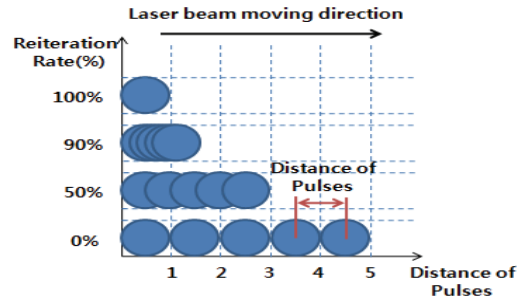


Fig. 3 Image of reiteration rate and distance of pulses

열영향부와 충격파에 의해 가공된 부위에 균열 현상이 발생된다. 재료 표면에는 버가 생성되고 충격파의 영향으로 인한 재료 표면의 국부적 함몰 현상도 나타난다. 반면 단펄스 레이저는 고체→기체의 상변화 과정을 거치기 때문에 상변화 과정의 시간이 매우 짧아 재료에 미치는 열영향은 미미하여 보다 정밀한 가공이 가능하다.^{3,4}

2.3 어블레이션과 중첩율과의 관계

Fig. 3 은 레이저 펄스의 중첩율을 보여 준다. 중첩율은 펄스의 중첩 정도이며 가공속도 및 레이저 펄스폭과 관계가 있다. 동일 가공속도에서 레이저 펄스폭과 조사간격 변경은 단위면적당 레이저의 출력에너지를 변경하는 것과 같다.² 이는 펄스의 조사 간격 변화로 중첩율을 조절 하여 어블레이션의 가공 제어를 할 수 있음을 의미한다.

3. 실험

3.1 실험 장치

본 실험에 사용된 Ultra-short pulsed laser (TruMicro525)는 피코초 레이저이다. 이 레이저의 파장은 515 nm 이고 평균파워는 30 W, 주파수 (Repetition rate)는 200 ~ 800 kHz, 펄스 폭(Pulse duration)은 10 ps, spot size 는 30 μm, 빔 직경은 5 mm,

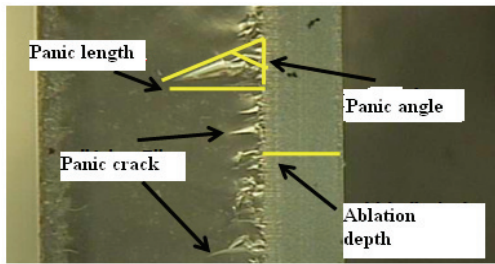


Fig. 4 Experimental terminology

Table 1 Processing conditions

Scan speed (mm/s)	NS (Number of Scan)	Laser power (W)
1, 3, 5	100	18
		30
		60
	300	18
		30
		60
	500	18
		30
		60

NA 는 0.042 이다. 재료의 이송장치는 PC 에 내장된 프로그램에 의해 제어되며 스캔속도를 변화 시킬 수 있다. 실험에 사용된 재료는 110 x 55 x 0.7 mm 의 크기로 휴대폰 액정으로 사용되는 Eagle Glass 를 사용하였다.

3.2 실험 방법

Fig. 4 에 패닉 크랙, 각도, 크기, 어블레이션 깊이를 도식화 하였다. 패닉 크랙은 어블레이션된 유리시편을 breaking 한 후 유리시편 단면에 나타난 크랙을 패닉 크랙이라 한다.

Eagle Glass 절단 후 단면에 나타난 패닉 크랙 경향을 분석하기 위해 레이저출력, 스캔속도, NS (Number of Scan)를 변화시켜 가공한 후 패닉 크랙을 비교 분석하였다. 변수 중 이송속도와 가공 시 영향도가 겹치는 주파수는 600 kHz 로 고정시켰다.

Table 1 은 가공조건을 정리하였다.

실험방법은 다음과 같다.

(1) Table 1 의 가공조건과 같이 유리표면을 어블레이션한 후 다이아몬드 휠을 이용하여 단면을 절단한다. 단면에 나타난 어블레이션 깊이를 측정하여 최적 조건을 찾는다.

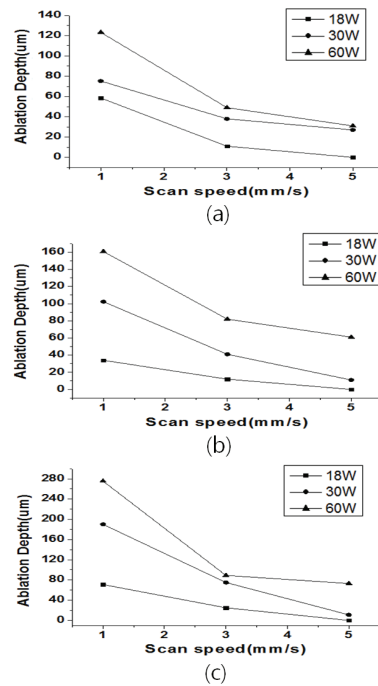


Fig. 5 The effect of scan speed and power on ablation depth ((a) NS : 100, (b) NS : 300, (c) NS : 500)

(2) Table 1 의 가공조건과 같이 유리표면을 어블레이션 한 후 가공된 시편 양 끝단 부를 잡고 breaking 한다. 패닉 크랙크기와 각도를 측정하고 다른 조건과 비교 분석한다.

(3) 패닉 크랙이 선명한 가공 조건(3 mm/s, 300, 60 W)의 유리 시편을 선택하여 같은 가공조건에서 가공한다. 드라이기가 장착된 아이스박스에 유리 시편을 넣고 30℃, 45℃, 60℃로 각각 10분씩 가열한 후 breaking 한다. 상온(20℃)과 각각의 온도로 가열된 유리 시편의 패닉 크랙과 각도를 측정하고 비교 분석한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 스캔속도와 레이저출력의 변화에 따른 어블레이션 깊이

Fig. 5(a)는 NS 를 100, (b)는 NS 를 300 그리고 (c)는 NS 를 500 로 고정하고 스캔 속도와 레이저출력을 변화시켜 가공한 후 어블레이션 깊이를 측정하였다. 모든 출력값과 NS 가 어블레이션 깊이와 비례하였다. NS 는 한 부분에 반복하는 수치이기 때문에 어블레이션 깊이 값과 비례한다. 스캔속도와

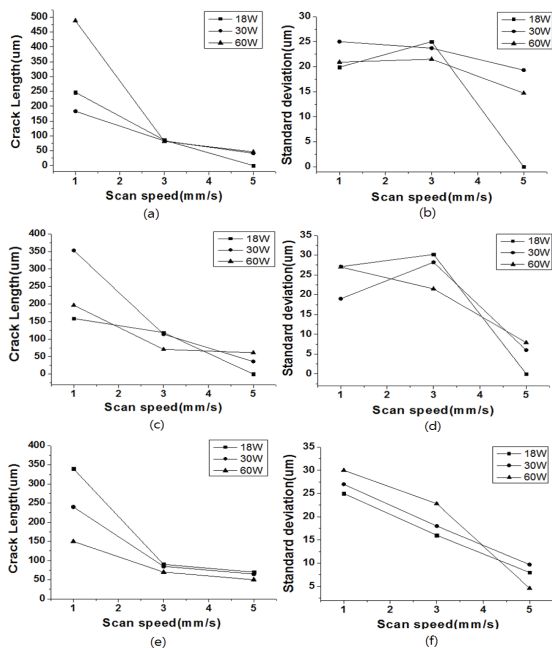


Fig. 6 The effect of scan speed and power on crack length ((a) NS : 100, (b) : (a)'standard deviation, (c) NS : 300, (d) : (c)'standard deviation, (e) NS : 500, (f) : (e)'standard deviation)

어블레이션 깊이는 반비례 하였다. NS 가 100, 300, 500 이고 파워가 18 W, 스캔속도가 5 mm/s 일 때 유리시편 표면은 미세 흠집만 있을 뿐 가공되지 않아 어블레이션 깊이는 모두 0 으로 처리하였다. 이것은 초당 유리표면에 조사하는 주파수가 정해져 있기 때문에 스캔속도가 감소하면 그에 따라 레이저 빔의 중첩은 증가되고 스캔속도가 증가하면 레이저 빔의 중첩은 감소되기 때문이다.

4.2 스캔속도와 레이저 출력에 따른 크랙 변화

Fig. 6(a)는 Number of Scan(NS)를 100, (c)는 300, (e)는 500 로 놓고 가공조건들을 변화시켜가면 패닉크랙을 측정하였다. Fig. 6(b), (d), (f)는 객관적인 데이터를 제시하기 위해 (a), (c), (e)의 실험 데이터들을 이용하여 표준편차를 구한 후 그래프로 나타내었다. 모든 스캔속도와 패닉크랙 크기는 반비례 하였다. 스캔속도 증가에 따라 모재에 NS 와 출력의 영향이 감소하였기 때문이다. 패닉크랙 크기는 어블레이션 깊이와 유리시편에 미치는 영향과 가장 관련이 있다. 즉, Fig. 6(a)에서 60 W 는 2/5 정도의 어블레이션 깊이와 많은 영향으로 인해 패닉크랙이

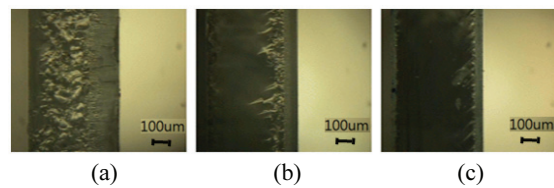


Fig. 7 The pictures of triangular forms in Fig. 5(a) ((a) Scan speed : 1 mm/s, (b) Scan speed : 3 mm/s, (c) Scan speed : 5 mm/s)

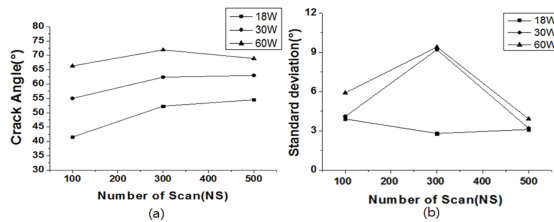


Fig. 8 The effect of NS and power on crack angle ((a) Scan speed : 3 mm/s, (b) : (a)'standard deviation)

크게 나왔고 18 W 는 반대 경향을 보이며 작게 나왔다. Fig. 6(a)에서 60 W 는 너무 깊은 어블레이션 깊이와 많은 영향으로 인해 패닉크랙이 형성할 공간이 적어 작게 나왔다. 18 W 는 1/7 정도의 어블레이션 깊이와 많은 영향으로 인해 크게 나왔다. 30 W 인 경우, Fig. 6(b)에서 1/2 정도의 어블레이션 깊이와 많은 영향으로 패닉크랙이 크게 나왔다.

Fig. 7 는 Fig. 6 에서 패닉크랙의 변화를 잘 보여주는 시편을 광학현미경으로 촬영한 것이다. 이 시편의 NS 는 100, 파워는 60 W 로 가공조건을 고정시키고 스캔속도만을 변화 시켰다. Fig. 7(a)는 낮은 스캔속도로 인해 NS 와 출력의 영향을 많이 받아 단면 전체에 불규칙성 패닉크랙이 많이 발생하였다. Fig. 7(b), (c)는 Fig. 7(a)과 달리 스캔속도 및 NS 와 출력의 영향이 적어 규칙적인 패닉크랙을 형성하였다.

4.3 Number of Scan (NS)와 레이저 출력에 따른 각도 변화

Fig. 8(a)는 스캔속도 3 mm/s 에서 레이저 출력과 NS 를 변화시켜 가공한 시편의 패닉크랙 각도다. Fig. 8(b)는 객관적인 데이터를 제시하기 위해 (a)의 실험 데이터들을 이용하여 표준편차를 구한 후 그래프로 나타내었다. Fig. 8(a)는 출력이 NS 값보다 패닉크랙 각도와 더욱 비례함을 보여준다. 패닉크랙 각도는 NS 보다 출력에 더 많은 영향을 받는

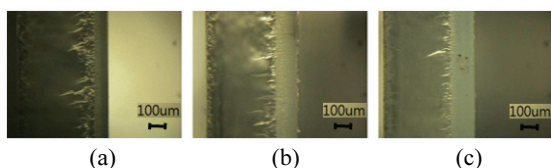


Fig. 9 The specimen tested in Fig. 8 ((a) NS : 100, (b) NS : 300, (c) NS : 500)

다는 것을 알 수 있다. 스캔속도 1 mm/s 에서는 NS 와 파워의 영향이 커 패닉크랙을 측정할 수 없었다. 스캔속도 5 mm/s, NS 가 100 일 때 어블레이션이 되지 않아 경향 파악하는 데 어려움이 있어 스캔속도 5 mm/s 의 경우에는 그래프화 하지 않았다.

Fig. 9 는 Fig. 8 에서 패닉크랙의 각도가 잘 나타난 시편을 광학현미경으로 촬영한 것이다. 이 시편의 가공조건은 스캔속도 3 mm/s, 파워 60 W 로 고정시키고 NS 만을 변화 시켜가면서 실험한 것이다. Fig. 9(a)은 Fig. 9(b), (c)보다 패닉크랙이 크고 각도는 작았다. Fig. 9(b)는 Fig. 9(a)보다 패닉크랙 크기는 작았지만 각도는 크게 나왔다. Fig. 9(c)은 패닉크랙 크기와 각도가 모두 작게 나왔다. 이것으로부터 NS 값이 패닉크랙 크기와 각도에 어느 정도 영향을 준다는 것과 패닉크랙 크기가 작을수록 각도는 크다는 것을 알 수 있다.

4.4 가열 후 온도에 따른 각도와 크랙 변화 특성

Fig. 10 는 온도가 증가할수록 작아진 패닉크랙, 미세하게 증가한 각도, 시편의 단면 상태를 보여 준다. 유리가 열을 받으면 결정 내에 원자들이 팽창하게 된다. 또한 유리 두께가 얇을수록 더 빠르게 열을 전달하거나 잃게 된다. 그래서 아이스박스에서 가열 된 유리를 꺼내어 breaking 할 때 유리 네 면은 빠르게 열을 잃게 된다. 그리하여 유리단면에는 팽창과 수축으로 인한 인장응력과 수축응력이 작용하게 된다. 이런 상황에서 유리를 breaking 하였기 때문에 온도가 높을수록 유리는 인장응력과 수축응력의 영향을 더 많이 받는다. 그 결과 온도가 높을수록 패닉크랙이 축소되어 양호한 유리단면 상태가 형성됨을 판단 할 수 있다.

Fig. 11(a), (b), (c), (d)는 Fig. 10 에서 실험한 시편을 광학현미경으로 촬영하여 보여준 그림이다. Fig. 11(a)는 가열 전 시편, Fig. 11(b)는 30℃ 가열 시편,

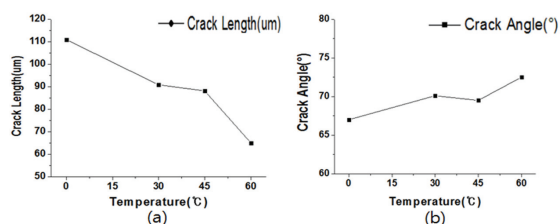


Fig. 10 The effect of the temperatures on crack length and angle after specimens is heated in 30℃, 45℃, 60℃ (Scan speed : 3 mm/s, NS : 300, Power : 60 W)

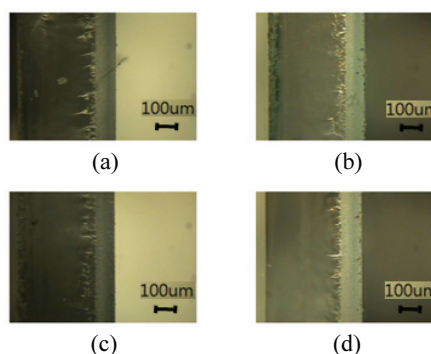


Fig. 11 The specimen tested in Fig. 10 ((a) non heat (b) 30℃ (c) 45℃ (d) 60℃)

Fig. 11(c)는 45℃ 가열 시편, Fig. 11(d)는 60℃ 가열 시편이다. Fig. 11 는 (a) → (b) → (c) → (d) 로 갈수록 패닉크랙과 각도가 작아지고 단면 상태가 좋아지는 것을 보여 준다. 이것으로부터 유리 시편의 상변태점 이하의 온도에서는 시편가공에 좋은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

Table 2 는 가공조건들 간의 차이가 선명한 조건들을 선택하여 비교한 것으로 이상적인 어블레이션은 가공 형상의 폭은 좁고 깊이가 깊은 것이다. 시편단면의 폭은 큰 차이가 없지만 깊이와 단면상태는 차이가 많이 났다. 스캔속도 1 mm/s 에서는 파워와 NS 의 많은 영향으로 인해 가공상태가 좋지 않으나 스캔속도 3 mm/s 에서는 대체적으로 양호했다. 파워 30 W, NS 500 일 때, 이상적인 어블레이션에 가장 근접했고 단면상태도 가장 좋았다. 스캔속도 5 mm/s 에서는 빠른 스캔속도 때문에 파워 18 W 와 30 W 에서는 가공이 되지 않거나 미세하게 가공이 되었다. 그 결과 breaking 후 단면상태가 불량하였다. 파워 60 W 에서 시편단면은 양호한 폭과 깊이 그리고 단면상태를 보였다.

Table 2 Processing evaluations

Scan speed (mm/s)	NS (Number of Scan)	Laser power (W)	Width (μm)	Depth (μm)	Cut cond.	Eval.
1	500	18	9	71	△	△
		30	11	190	△	△
		60	12	276	△	△
3	500	18	7	25	○	○
		30	8	75	●	●●
		60	8	89	●	●
5	500	18	-	-	△	△
		30	7	11	○	○
		60	8	73	●	●

● : Good, ○ : Fair, △ : Bad

5. 결론

본 실험으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) NS 와 출력은 어블레이션 깊이와 비례하였고, 스캔속도와 어블레이션 깊이는 반비례 하였다. 이는 NS 가 증가할수록 그에 따라 유리표면이 가공되기 때문에 어블레이션 깊이는 증가한다. 반면 스캔속도가 증가하면 초당 유리표면에 조사하는 주파수의 영향이 감소하기 때문에 어블레이션 깊이는 감소한다.

(2) 스캔속도가 증가함에 따라 패닉크랙이 감소하는 경향을 보였다. 이는 스캔속도가 증가함에 따라 모재에 NS, 파워, 주파수가 적은 영향을 미쳤기 때문에 패닉크랙이 감소한 것으로 보인다.

(3) 레이저출력이 증가함에 따라 패닉크랙 각도는 증가함을 보였다. 그리고 NS 가 증가함에 따라 패닉크랙 각도는 미세하게 증가함을 보였다. 이것으로부터 패닉크랙 각도는 NS 보다 출력의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

(4) Breaking 수행 후 가열온도가 증가할수록 패닉크랙은 작아지고 breaking 된 단면상태도 양호하였다. 이는 온도의 증가에 따른 유리 단면부의 불균일한 내부응력 발생과 미세 균열의 진전 때문으로 판단된다.

후 기

본 논문은 인하대학교의 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Yang, L. J., Wang, Y., Tian, Z. G., and Cai, N., "YAG laser cutting soda-lime glass with controlled fracture and volumetric heat absorption," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50, pp. 849-859, 2010.
2. Kim, P. J., "Cutting characteristic of polarizer film by CO₂ laser," M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Inha Univ., 2010.
3. Momma, C., Nolte, S., Chichkov, B. N., Alvensleben, F. V., and Tunnermann, A., "Precise laser ablation with ultrashort pulses," Applied Surface Science, Vol. 109, pp. 15-19, 1997.
4. Fermann, M. E., Galvanauskas, A., and Sucha, G., "Ultrafast Lasers: Technology and Applications," Marcel Dekker, 2003.
5. Shin, D. S., Suh, J., Lee, J. H., Kim, K. H., and Paik, B. M., "Picosecond laser drilling of silicon wafer for 3D-TSV," Proc. of KSPE Autumn Conference, pp. 701-702, 2009.