

피코초 레이저를 이용한 디스플레이용 유리 기판 절단 Picosecond laser cutting of glass substrates for flat panel displays

*허정우¹, #오제훈¹, 조태형², 문종남²

*Jeungwoo Huh¹, #Je hoon Oh(jehoon@hanyang.ac.kr)¹, TaeHyong Cho², JongNam Moon²

¹ 한양대학교 기계설계·메카트로닉스 공학과, ²(주)필옵틱스

Key words : Laser ablation, picosecond laser, glass cutting

1. 서론

기존에 정밀미세가공에서 많이 사용하는 나노초 레이저 기술은 그동안 수많은 실험과 결과로 인해 많은 발전을 이루었다. 특히 Nd:YAG를 매질로 사용하는 나노초 기술은 기존 CO₂ 레이저보다 초점깊이와 초점크기에 있어서 10배나 더 우수한 장점을 가지고 있어 정밀미세가공에 많이 사용되었다. 하지만 나노초 레이저가 가지는 큰 단점인 HAZ로 인해 정밀미세가공에 한계가 보였다. 이 HAZ란 Heat Affected Zone을 뜻하는데 특히, 디스플레이용 유리 기판 절단에서는 HAZ에 의한 영향 및 Crack에 민감하여 정밀 디스플레이용 유리 기판 절단 가공에서 나노초 레이저를 사용하여 발표한 연구결과는 있었지만 실제로 산업현장에서 쓰이는 경우는 많지 않았다. 이 HAZ의 영향을 받지 않기 위해서는 열 영향을 받기 전에 가공이 될 수 있는 극초단파의 레이저가 필요하였으며 이를 위해서 20세기말에 Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 펄스초 레이저 기술이 등장 하였다.

펄스초 레이저는 초기에는 측정용으로 쓰였지만 SESAM 및 CPA기술의 개발로 출력 및 안전성이 크게 향상되면서 정밀미세가공용으로 사용되기 시작하였다. 하지만 펄스초 레이저 기술은 구성 광학계의 특성상 평균출력이 낮은 단점을 가지고 있다. 이러한 펄스초 레이저를 보완하기 위하여 나온 레이저가 피코초 레이저이다. 이 피코초 레이저는 Nd:YVO₄를 매질로 사용하며 Mode-Locking 방식을 사용하여 출력하는데 기존 펄스초 레이저에 비하여 출력이 높을 뿐만 아니라 구성 광학계가 펄스초 레이저보다 간단하다.[1-4]

하지만 현재 피코초 레이저를 이용한 디스플레이용 유리 기판 절단 가공 연구 결과가 많지 않다는 단점이 있다. 그래서 본 논문에서는 피코초 레이저로 디스플레이용 유리 기판 절단을 하여 절단 공정 조건을 찾고 특성에 대해 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 피코초 레이저는 10ps의 펄스폭을 가지며 이 폭은 FWHM (Full width at half maximum) 방식으로 측정된 것이다. 기본적인 파장은 1030nm이다. 펄스반복율(Rep.Rates)은 최대 400kHz 이다. 본 연구에서는 기본 파장인 1030nm 즉, IR으로 디스플레이용 유리 기판을 절단 실험을 수행하기 힘들기 때문에 SHG(Second harmonic generator)와 THG(Third harmonic generator)를 이용하여 레이저 파장을 343nm으로 조절하였다. 파장이 343nm일때의 레이저 최고 파워는 14W이다. scanner의 F-theta 렌즈의 focal length는 100mm이다. 343nm 레이저 파장에서의 beam size는 4mm 이고 편광은 본 연구에서 circle로 유지하였다. beam size는 beam expander를 지나면서 7.5mm로 확대되었다. M²는 1.3이다. scanner를 거쳐 focusing 된 빔의 spot size는 다음 식(1)을 통해 산출 되었다.[5]

$$w_0 = \frac{\lambda \cdot f}{\pi \cdot w_l} M^2 \quad (1)$$

여기에서 w₀란 scanner를 거친 레이저 빔의 반경이고, λ는 레이저의 파장, f는 focal length, w_l은 scanner에 입사된 레이저 빔의 반경이다. 이 식을 통해 계산된 광학적 spot size는 7.6μm이다. 스테이지는 X-Y스테이지를 사용하였으며 스테이지의 속도는 최대 300mm/s이며, scanner의 scan속도는 최대 4000

mm/s이다.

유리 기판의 절단 시험은 pulse energy에 의한 유리 기판의 depth와 같은 조건의 pitch상에서의 depth, scan 횟수에 의한 depth를 비교 분석 하였다. 여기서 같은 조건의 pitch란 유리 기판에 레이저 빔이 노출 되는 횟수를 같게 만들어 주는 것으로서 이것은 다음의 식(2)으로부터 도출 할 수 있다.

$$L_p = S_{scan} / S_R \quad (2)$$

여기에서 L_p는 pulse당 거리이며, S_{scan}는 scan speed이다. S_R은 Rep.rates이다. 같은 조건의 pitch란 L_p를 동일하게 만들어 실험을 하는 것이다.

3. 실험 결과

본 실험은 디스플레이용 유리 기판 절단을 실제 산업현장에서 적용할 수 있는지의 가능성에 대해 파악하는데 목적을 두었다. Fig. 1에는 pulse energy에 따른 유리 기판의 depth에 대하여 그래프로 나타낸 것이다. 이때 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Experimental conditions

Wave length[nm]	343
average power[W]	3.6, 5.4, 6.5, 8.6, 11.0, 13.0
Rep.rates[kHz]	400
Scan speed[mm/s]	1000
Beam size[mm]	7.5
Substrate	0.5mm glass

pulse energy의 변화를 주기 위해 본 연구에 사용되고 있는 피코초레이저의 attenuator를 사용하여 조절하였으며 average power가 3.6W일 경우에는 9.0uJ, 5.4W일 경우에는 13.5uJ, 6.5W일 경우에는 16.3uJ, 8.6W일 경우에는 21.5uJ, 11.0W일 경우에는 27.5uJ, 13.0W일 경우에는 32.5uJ pulse energy이다.

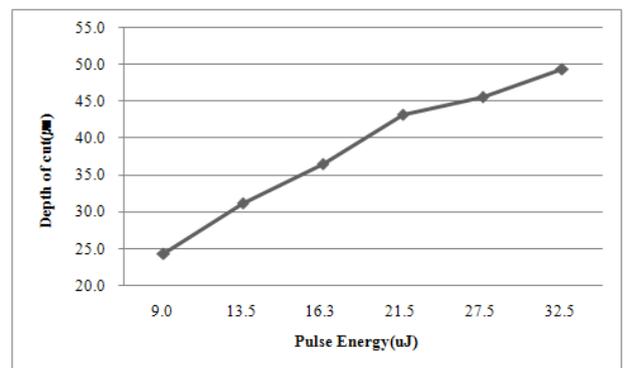


Fig. 1 Influence of the pulse energy on the depth of cut

Fig. 1의 그래프에서 나타나는 결과를 보면 pulse energy가 증가함에 따라 depth가 따라서 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 pulse energy가 16.3uJ 이상부터는 sample에 미세한 crack이 관찰되었다. 그리고 pulse energy가 높아 짐에 따라 sample의 표면에 particle들이 많이 관찰되었고 또한 커지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 2의 그래프는 scan 횟수에 의한 depth를 나타낸 것이다.

실험 조건으로 Rep.rates는 100kHz, scan speed는 stage만을 사용하여 250mm/s로 고정하였으며 레이저 파워는 100kHz일때 최대 2.56W이다. substrate는 0.7mm glass를 사용하였다. scan 횟수는 2회부터 시작하여 1000회까지 실험을 진행 하였다.

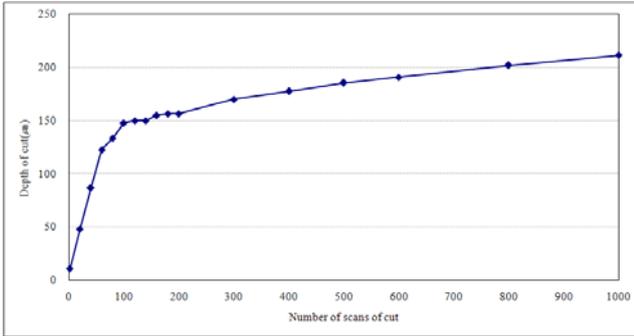


Fig. 2 Influence of the numbers of scans on the depth

Fig. 2의 그래프를 보면 scan횟수가 일정 횟수가 진행되면 초기와 같이 선형적으로 depth가 cutting되는 것이 아니라 수렴이 되는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 현상이 나오는 것은 레이저 빔이 집중되는 범위가 한정되어있고 cutting이 진행되는 동안 레이저 빔의 산란에 인하여 발생한 것이다.

세 번째 실험으로 진행한 동일한 pitch상에서의 depth를 확인한 것을 Fig.3에 나타내었다. 실험 조건으로 식(2)에서와 같이 동일한 pitch를 맞춰 주기 위해 80kHz에서 scan speed는 200mm/s, 100kHz에서 scan speed는 250mm/s, 200kHz에서 scan speed는 500mm/s, 400kHz에서 scan speed는 1000mm/s로 정하여 L_p 를 2.5µm로 유지하였다. scan 횟수는 20회이다. attenuator를 이용하여 power를 60%, 70%, 80%, 90%, 100%로 변화를 주어 실험결과를 도출하였다. substrate는 0.5mm glass를 사용하였다.

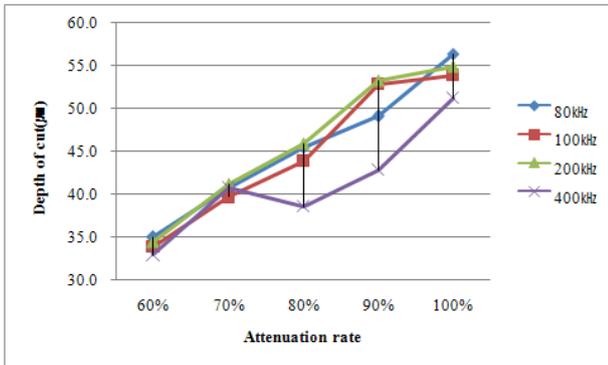


Fig. 3 Depth of cut for various repetition rates at the same L_p

Fig. 3 그래프를 보면 400kHz와 같은 경우를 제외하고 나머지 Rep.rates에서는 depth가 비슷한 경향을 띄고 있음을 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 피코초레이저의 경우 여타 레이저의 경우와는 다르게 Rep.rates를 변화시켜도 동일한 pulse energy를 출력시킨다. 이런 특성으로 인해 각 Rep.rates마다 average power가 다른 경향을 나타나게 된다. average power는 100kHz에서 2.56W, 200kHz에서 6W, 400kHz에서 14W이다. 이론적으로 동일한 pitch에서 유효한 pulse수가 같으면 같은 depth가 나타나야 한다. 유효한 pulse수는 식(3)으로부터 구할 수 있다.[6]

$$N_{eff} = (\pi/2)^2 \cdot w_0 \cdot f/\nu \quad (3)$$

여기에서 N_{eff} 는 유효한 펄스의 수이고, w_0 는 spot radius, f 는 Rep.rates, ν 는 scan speed이다. 위의 식에서 유효한 펄스의 수를 산출해내면 1.91이다. Fig. 3의 그래프의 결과로 미루어보아 400kHz에서 pulse energy가 실제로는 다른 Rep.rates에 비해서 낮음을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 본 연구에서 사용한 피코초레이저의 장비 특성과 scan speed가 빠를 경우 실제로 substrate에

맞는 레이저 빔의 횟수가 상대적으로 다른 scan speed에 비해서 적기 때문이다. 또한 식(3)에 대한 결과를 더 도출하기 위하여 추후에 scan speed와 scan 횟수의 비를 동일하게 하여 동일한 Rep.rates에서 scan speed에 의한 depth에 미치는 영향에 대하여 실험을 수행할 필요가 있다.

4. 결론

본 논문에서는 피코초레이저를 이용하여 디스플레이용 유리 기판 절단을 수행하였다. pulse energy에 따른 depth와 scan 횟수에 의한 depth 그리고 동일한 pitch상에서의 power변화에 따른 depth를 관찰하였다. 위의 실험결과를 바탕으로 실제 디스플레이 산업현장에서 적용될 수 있는 결과를 얻어내었다. pulse energy에 의한 depth를 관찰했을때 높은 pulse energy에서 crack이 발생하였음을 알 수 있었다. 산업현장에서는 이런 crack들에 의하여 균열이 전파되어 제품이 파손될 수 있기 때문에 이를 주의해야한다. scan횟수에 의한 depth에서는 scan의 횟수를 많이 한다고해서 cutting이 더 깊게 되는 것이 아니라 일정한 depth까지 cutting되면 초점 심도(Depth of focus)를 벗어나기 때문에 절단이 더 이상 진행되지 않고 수렴되는 현상을 Fig. 2를 통해 관찰할 수 있었다. 동일 pitch상에서의 depth를 관찰한 결과 이론상으로는 동일한 depth가 나와야하나 실제 실험중에서는 400kHz에서 depth가 다른 Rep.rates에 비해서 적게 나옴을 관찰하였고 이에 대한 원인을 유추해내었다.

참고문헌

1. Koechner Walter, "Solid-state laser engineering", Springer, 2006
2. K. Venkatakrisnan, N. Sudani and B. tan, "A high-repetition-rate femtosecond laser for thin silicon wafer dicing", J. Micromech. Micro Engng. 18(2008) 075032(7pp)
3. D. F Farson, H. W. Choi, B. Zimmerman, J. K Steach, J. J Chalmers, S. V Olesik and L. J. Lee, "Femtosecond laser micromachining of dielectric materials for biomedical applications", J. Micromech. Microeng. 18(2008) 035020(9pp)
4. D. von der Linde, K. Sokolowski-Tinten, "The physical mechanisms of short-pulse laser ablation", Applied Surface Science, (2000) 154-155, 1-10
5. D Hall and P Jackson, "Propagation of Multimode Laser Beam-The M^2 Factor", Adam Hilger, (1989) pp 132-42
6. K. Venkatakrisnan, P. Stanley, N. R. Sivkumar, B. tan and L. E. N. Lim, Appl. Phys. A77 (2003) 655-8