

펄토초 레이저를 이용한 유리 표면의 미세구조 생성에 관한 연구

최지연*, 장정원, 김재구, 신보성, 장원석, 황경현 (한국기계연구원)

A study on micro patterning on the surface of glass substrate using femtosecond laser

J. Y. Choi*, J. W. Chang, J. G. Kim, B. S. Shin, W. S. Chang, K. H. Hwang (KIMM)

ABSTRACT

We present investigations of the surface micromachining for transparent glass substrate, e.g. soda lime glass using tightly focused 800nm Ti:sapphire femtosecond laser. In this study, experiment conditions such as laser intensity, scanning speed, focus position were controlled as variable parameters to decide optimal machining conditions. This study shows clearly that laser intensity and scanning speed are dominant factors for good surface morphology. Using the optimal conditions, grooves with 50 μ m line width were fabricated on glass substrate and their surface morphologies were investigated from SEM image.

Key Words : Ti : sapphire femtosecond laser, glass, transparent materials, Multiphoton absorption, Micro patterning

1. 서론

최근 디스플레이산업과 생명과학산업이 각광을 받으며 급속하게 성장함에 따라 그 소재로 쓰이는 특수유리기판의 정밀가공이 요구되고 있다. 레이저를 이용한 가공은 기존의 기계적 가공에 비해 우수한 고정밀도와 청정가공의 실현이 가능하므로 다양한 정밀가공분야에 도입되고 있는 추세이다. 그러나 유리와 같은 투명재료의 경우 근자외선부터 적외선에 대한 흡수율이 극히 낮아 레이저를 이용한 미세가공이 쉽지 않았다. 게다가 산업적으로 널리 도입된 적외선 영역의 Nd³⁺ doped DPSSL 과 CO₂ 레이저의 경우 수 ns 에서 수 μ s 에 이르는 긴 펄스폭으로 인해 조사된 에너지의 많은 부분이 열전달을 통해 주변부로 전파되므로 유리와 같은 취성재료의 가공시 열응력이 가공부 주변에 미세균열을 발생시키는 주요인으로 작용하였다.

따라서 투명재질을 가공하기 위해서는 기존의 레이저 가공 메커니즘과 다른 방법으로 접근해야 하며 그 대안중의 하나가 바로 펄토초 레이저를 이용한 미세가공이다. 1980 년대 중반 G. Mourou^[1] 등에 의해 CPA (Chirped Pulse Amplification)방법이 제안됨으로써 산업적으로 충분히 이용 가능한 고출력 펄토초 레이저 시스템이 개발되는 계기가 되었고 최근 여러 레이저업체에서 비교적 안정적인 산업용

펄토초 레이저 시스템을 출시하여 펄토초 레이저 가공에 대한 토대가 마련되었다.

이에 본 연구에서는 펄토초 레이저를 이용하여 유리기판위에 미세패턴을 가공하기 위한 다양한 방법을 시도하고 특히 가공시 발생하는 입자들의 재흡착을 방지하여 복잡한 표면세정공정을 거치지 않고도 후속공정이 가능한 청정가공을 구현하기 위한 방법을 연구하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 펄토초레이저 가공

펄토초 레이저는 수 ~ 수백 fs 의 극히 짧은 펄스폭을 가지므로 잘 알려진 대로 가공부에 조사된 에너지는 매질 내에서 열전달이 발생하기 전에 가공을 끝내게 되어 열적인 손상이 극히 적은 정밀가공을 구현할 수 있다. 아울러 펄토초 레이저의 높은 침투출력은 투명매질 내에서 다광자흡수 (Multiphoton absorption)를 일으켜^[2,3] 이론적으로는 파장에 관계없이 모든 재료를 가공할 수 있는 장점이 있다.

2.2 실험장치

본 실험을 위한 장치 레이아웃은 Fig. 1 과 같다. 레이저 소스로는 800nm 의 파장을 가진 Ti:sapphire 증폭 시스템(Coherent, RegA 9000)을 사용하였으며 펄스폭은 200fs 이내이고 100kHz 의 반복율로 사용되었을 때 최종출력은 약 350mW 이다. 집속을 위한 렌즈로는 NIR 용 대물렌즈(Olympus)를 사용하였으며 NA 는 각각 0.4, 0.8 이었고 이론적으로 계산된 초점위치에서의 빔직경은 대략 2.5 μ m 과 1.3 μ m 이다. 레이저가공시 시료에서 반사된 빔은 가공렌즈를 거쳐 Dichroic mirror 를 통과한 다음 CCD 카메라로 전달되어 모니터로 가공영역의 영상을 볼 수 있게 하였다. 가공시편을 이동시키기 위한 스테이지는 1 μ m 이내의 정밀도 및 0.25 μ m 이내의 반복정밀도를 가지며 (Z 축 제외), PMAC 컨트롤러에 의해 그 위치가 제어되도록 하였고 NC 기반으로 운동하여 다양한 모양의 패턴과 준 3 차원의 형상을 만들 수 있도록 하였다.

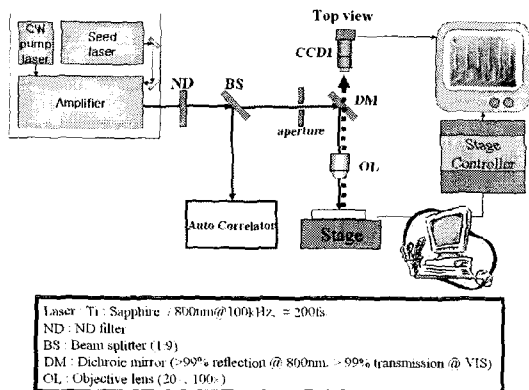


Fig. 1 Experimental layout for glass micromachining using femtosecond laser

이렇게 구현된 본 가공시스템의 사진을 Fig. 2 에 나타내었다. 펄스초레이저의 공진기는 환경에 매우 민감하므로 별도의 항온항습시설을 갖춘 부스안에 시스템을 설치하여 주변환경으로 인한 시스템의 변화를 최소화 하였다.

2.3 실험방법

다양한 가공조건을 도출하기 위해 가공품질에 영향을 끼치는 주요변수들을 정의하였다. 투명재질의 특성상 빔을 투과시켜 시편 아래쪽에 초점을 맺게 할 수 있으므로 기존의 표면가공과 달리 레이저의 초점위치에 따른 에너지의 조사방향도 가공조건 하나로 고려하였다. 주요 가공변수로는 레이저의 강도(W/cm²), 가공물의 이동속도(mm/sec), 초점

의 위치, air blower 의 유무로 한정하였으며 각각의 가공변수의 변화에 따른 시료의 변화를 관찰하였다.

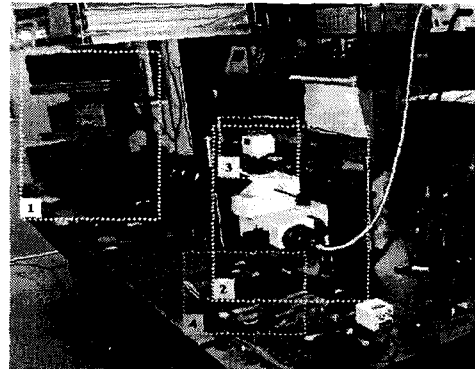


Fig. 2 Ti:sapphire femtosecond laser micro machining system (1: laser source, 2: beam delivery part, 3: monitoring part, 4: XYZ stage)

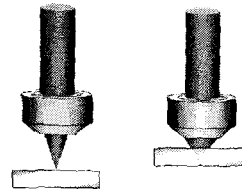


Fig. 3 Focused beam on the surface (left) and through a transparent medium (right)

3. 실험결과 및 고찰

각각의 가공변수들은 기존의 레이저가공시의 가공변수들의 특성과 크게 다르지 않은 작용을 하였다. 그러나 40ns 정도의 펄스폭을 가진 355nm 의 Nd:YVO₄ 레이저와 가공형상을 비교할 때 짧은 펄스폭과 높은 컷아웃력으로 인한 비열적가공과 비선형흡수과정이 관여하여 가공품질에 큰 차이가 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 4 에 나노초 UV 레이저와 펄스초 레이저로 가공한 결과를 도시하였다.

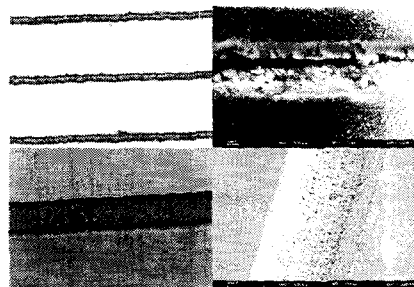


Fig. 4 comparison between ns UV laser (top, fluence : 120 J/cm², 40ns, 355nm) and fs laser (bottom, fluence : 118 J/cm², 200fs, 800nm)

Fig. 5 는 펨토초레이저의 스캐닝 속도를 일정하게 두고 출력을 변화시켜가면서 관찰한 결과이다. Fig. 5 의 (d)를 통해 유리재질의 가공 threshold 를 추정할 수 있으며 대략 수 10¹³ W/cm² 로 다른 문헌에서 보고된 값과 거의 일치한다^[3]. 펨토초레이저의 펄스폭이 전자-격자간의 열 전달시간보다 짧기 때문에 완전한 광화학적 어블레이션이 일어났음을 (a)~(c)의 사진을 통해 확인할 수 있다. 이론적으로 계산된 대물렌즈의 빔크기가 약 2.5 μ m 로 가공된 선폭과 일치함을 볼 수 있으며 광열적 어블레이션이 동반되는 나노초급 레이저로 가공하는 경우 에너지의 조사량이 커짐에 따라 주변부로 전파되는 열에너지의 영향으로 인해 가공 선폭이 비례하여 커짐에 반해 펨토초레이저로 가공하는 경우 주변부로의 열에너지의 확산이 배제되므로 조사에너지가 커지더라도 비교적 균일한 선폭을 유지함을 확인할 수 있다.

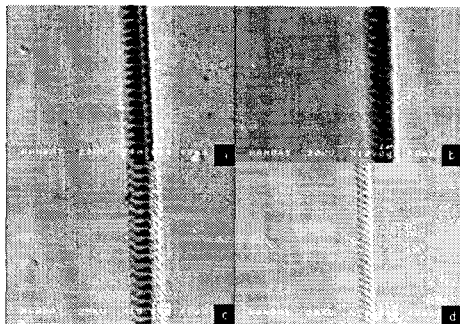


Fig. 5 SEM images of ablated glass surface (scanning speed : 80mm/sec) (a) 220 TW/cm² (b) 190 TW/cm² (c) 168 TW/cm² (d) 35 TW/cm²

다음으로 스캐닝 속도에 따른 가공품질의 차이를 관찰하기 위해 10mm/sec 과 70mm/sec 으로 가공물을 이송시키고 그 결과를 관찰하였다. 빔크기를 2.5 μ m 로 가정하고 각각의 속도에 따른 빔의 중첩도를 계산하면 전자의 경우 96%, 후자의 경우 72%의 빔이 중첩되는 셈이다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 6 과 같다. Fig. 7 에서 확인할 수 있는 바와 같이 빔의 중첩도가 커질수록 groove 경계선의 균일도가 개선되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 중첩도가 과도해질 경우 오히려 가공품질을 떨어뜨리게

된다.

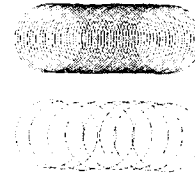


Fig. 6 Schematic diagram of beam overlap. (top : 10mm/sec - 96%, bottom : 70mm/sec - 72%)

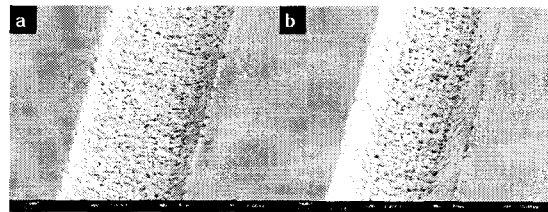


Fig. 7 SEM images of ablated glass surface (laser intensity : 220 TW/cm²) (a) 70mm/sec (b) 10mm/sec

Fig. 8 에는 air blow 의 효과를 관찰하기 위해 직경 1mm 의 스테인레스 관을 통해 수기압의 air blow 를 준 경우와 air blow 없이 가공한 형상을 비교한 결과를 나타내었다. 바늘의 끝이 레이저 조사영역에서 거의 2mm 이내에 위치하도록 정렬한 다음 불어준 경우 잔여물이 거의 남아있지 않은 깨끗한 가공상태를 보여주었다. 반면 air 를 불어주지 않거나 바늘의 끝이 조사영역으로부터 수 mm 이상 떨어진 경우 남아있는 잔여물의 양에 차이는 있으나 여전히 존재함을 보여 불어주는 공기의 압력과 불어주는 방향 및 가공위치와의 거리가 가공 품질에 상당한 영향을 끼침을 확인할 수 있다.

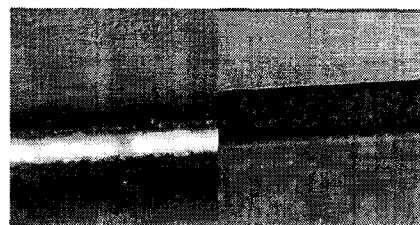


Fig. 8 Effect of air blowing (left : no air blow)

본 연구에서 가장 흥미로운 결과중의 하나는 빔의 초점위치에 따른 가공현상의 차이점이다.

레이저의 초점을 가공시료의 윗면과 아랫면에 두게 되면 윗면집속인 경우 레이저빔의 진행 방향과 가공시 방출되는 플라즈마 및 어블레이션된 잔여물의 방출방향이 반대가 되며 아랫면 집속인 경우 빔의 진행방향과 방출방향이 같은 방향이 된다. 또한 잔여물에 대한 중력의 영향이 반대로 작용하게 되어 아랫면 집속의 경우 중력이 방출된 잔여물의 재흡착을 방해하는 힘으로 작용하게 되는 차이점이 발생한다. 또한 공기보다 굴절율이 높은 매질을 통해서 집속이 되므로 공기중에서 집속되어 매질로 전파되는 현상과 다른 물리환경이 주어지게 된다. Fig. 9 를 통해 그 가공현상의 차이를 관찰할 수 있다. 왼쪽과 가운데 사진은 같은 출력으로 가공한 groove 이나 가공된 선 폭의 굵기에 차이가 있다. 이것이 매질내에서 흡수된 에너지로 인한 선폭의 감소인지 확인하기 위해서 전달되는 출력을 반정도 낮추어 조사했을 때 윗면 집속에서는 가공이 일어나지 않았으나 아랫면 집속일때는 가공이 일어나는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 매질내의 에너지의 흡수에 따른 선폭감소가 아니라 실질적인 빔크기의 감소로 인한 에너지강도의 증가 때문인 것으로 추정되며 이 현상에 대한 이론적인 해석은 진행중에 있다.

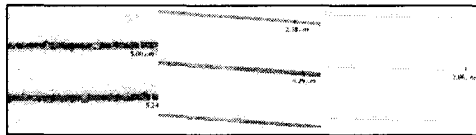


Fig. 9 Effect of focus position (left : top focusing, center : bottom focusing, right : bottom focusing)

마지막으로 가공횟수에 따른 가공깊이를 레이저 측정기로 측정하여 도시한 결과를 Fig. 10 과 11 에 나타내었다. 빔의 중첩도에 따라 단위면적당 조사되는 에너지량이 다르므로 예칭되는 깊이에 큰 차이가 있음을 알 수 있으며 가공횟수에 따른 가공깊이는 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

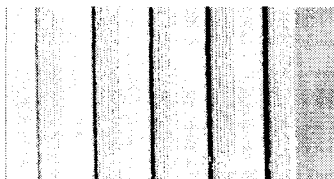


Fig. 10 Etching rate of glass. (number of process: 2,4,6,8,10, scanning speed : 10mm/sec, fluence : 30J/cm²)

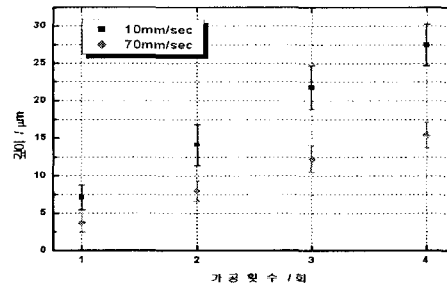


Fig. 11 Etching rate of glass. (fluence : 30J/cm²)

4. 결론

펄스 레이저 가공시스템을 구축하여 기존의 나노초 레이저로 가공하기 어려웠던 유리재질에 대한 정밀가공을 수행하고 관련된 가공변수별로 가공 품질에 대한 영향을 고찰하여 향상된 가공품질을 얻기 위한 최적조건을 도출하였다. 그 결과 유리의 펄스초 레이저에 대한 가공 threshold 는 대략 수~수십 10¹² W/cm² 이내인 것으로 예측되었다. 또한 레이저 빔의 중첩도와 빔의 강도 및 초점의 위치가 가공품질에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. D. Strickland and G. Mourou, "Compression of amplified chirped pulses", Opt. Comm, V. 56, 219-222
2. A. Rosenfeld et al., "Ultrashort-laser-pulse damage threshold of transparent materials and the rold of incubation", Appl. Phys. A 69, 373-376 (1999).
3. C. B. Schaffer, "Interaction of femtosecond laser pulse with transparent materials", Ph.D. thesis, Harvard University, (2001).