

기술논문

펨토초 레이저에 의한 폴리이미드 가공 특성

민철기, 이만섭

한국정보통신대학교

Micromachined Properties of a polyimide by a femtosecond laser

Chulki Min, Manseop Lee

ICU

ABSTRACT

Polyimide is one of the useful materials in industry. The surface treatment of polyimide by a femtosecond laser can help accurate and fine fabrication of microstructure. And it can change the transmittance and reflectance of polyimide, too. We put femtosecond laser pulses on polyimide for rectangular or square type surface treatments and observe the change of transmittance and reflectance. Pulsewidth is 172 fs, laser power changes for fabrication are from 5 mW to 20 mW, and transmittance and reflectance are measured under 20m W, 300m W, and 920 mW. Pulse patterning is stable and almost no unwanted surface damage is shown. As power increases, working depth increases but working line width does not increase significantly. As speed changes, they also have same results. It shows the efficiency of a femtosecond laser is good and thermal damage is small for polyimide.

Key words : Femtosecond laser, polyimide processing, micro machining, optical property

1. 서론

산업 발전에 따라 함께 사용되는 여러 물질들의 전기적 광학적 기계적 특성의 고품질화가 요구됨에 따라 미세공정의 기술 발전은 최우선 당면 과제가 되고 있는데, 극초단 펄스 레이저는 상기 목적을 위한 가장 촉망 받는 기술 중 하나이다. 특히 가공 시 재료의 열적, 기계적 손상을 최소화 해야 한다는 측면에서 극초단 펄스 레이저는 가장 우수한 가공기술 중 하나로 평가 받고 있다^[1]. 일반적으로 각 분야에서 원하는 특성의 소재들이 다르기 때문에 가공면의 균일성, 가공면 이외의 열적 파괴 최소화, 최적의 가공 조건 등을 찾는 것은 소재의 재질에 따라 매우 판이한 양상을 보인다.

폴리이미드 (Polyimide)는 카메라, 휴대전화 등의 flexible PCB 기판이나 방열 필름 등 여러 용도로 사용 가능한 재질이다. 따라서 폴리이미

드 필름을 레이저를 이용해 가공하는 연구 등이 활발히 이루어지고 있다^[2-5]. 폴리이미드는 유연성이 좋고 반투명하며 부도체의 특성을 가지므로 각종 전자, 광학적 분야에서 응용가능성이 높으나 열에 약하고 경도가 낮아 정밀 가공이 어려운 단점이 있다^[6]. 기계적인 절단 및 가공으로 얻을 수 있는 정밀도에는 한계가 있으며, 현재 요구되는 마이크로 레벨의 정밀 가공은 요원한 실정이다. 이에 레이저를 이용해 가공 하는 방법이 연구 되고 있으나 역시 열에 약한 점은 넘어야 할 과제로 볼 수 있다. 펨토초 레이저는 다른 기존 레이저 가공 장비에 비해 열적 손상을 극소화 시킬 수 있으므로 이에 대한 연구가 필요한 시점이다.

극초단 펄스 레이저는 유리 등 비정질 물질에서부터 세라믹, 실리콘, 구리 등 각종 금속까지 가공할 수 있는 재료의 폭이 매우 넓다는 장점을 가지고 있다. 또한 가공 오차도 수 마이크로 미

터 내외의 초정밀 가공을 수행하는 데 있어 극초단 레이저를 사용하는 것은 가장 간단한 작업공정으로 최선의 결과를 얻을 수 있는 방법이라 할 수 있다. 다만 공정속도 측면에서 타 공정 기술에 비해 매우 낮은 공정속도가 극초단 펄스 레이저가 현실적으로 산업 현장에 적용되기 위해 넘어야 할 가장 시급한 문제라고 할 수 있다.

2. 실험장치 및 실험 방법

본 논문에서는 극초단 펄스 레이저 중에서도 펄초 펄스 레이저를 이용해 실험 폴리머를 가공 하는데 있어 표면 가공 후 반사율, 투과율의 변화 특성을 보고자 한다. 실험에 사용한 레이저는 Cyberlaser 사의 IFRIT 시스템으로, 펄스 폭은 172 펄초로 맞추었고, 파장은 781 nm이며, 집광에 쓰인 렌즈는 NA(Numerical aperture)가 0.24 이고 초점거리가 50 mm 인 Sigma Koki 사의 ATL-30-30PY2 렌즈를 사용하였다. 레이저 헤더 부분에서 방출되는 펄초 레이저는 4개의 광학 거울과 빔 셰이퍼를 지난 후 대물렌즈에 의해 집광 되어 가공 샘플의 원하는 위치에 초점이 맞추어 지도록 되어 있다. 폴리머 필름은 두께가 125 마이크로미터이고, 집광 렌즈의 수직 하부에 놓여진 후 컴퓨터로 제어되는 스테이지에 의해 움직임이 제어 되게 된다. 레이저의 출력은 시료 면에 집광되는 출력을 기준으로 650 mW 까지 제어 할 수 있다. 집광 초점은 폴리머 필름의 상단 표면에 일치되도록 했으며, 출력되는 펄스의 반복률(Repetition rate)은 1 kHz로 하였다. 가공 표면에서의 빔의 크기는 대략 20 마이크로 미터 정도이다. 펄초 레이저는 가공 시 열 적 손상을 재료에 거의 입히지 않는 것으로 알려져 있고, 폴리머는 열에 강하지 않고 또 경도가 높은 재료가 아니기 때문에, 펄초레이저를 이용한 절단이나 드릴링 등의 작업은 크게 어렵지 않다. 표면 가공에 적절한 파워로 일정 면적을 모두 스크래치 한 후 가공 면의 구조를 광학적 현미경으로 살펴보고, 또 가공하지 않은 면과 가공한 면의 펄초 레이저 펄스에 대한 반사율과 투과율, 그리고 가공 특성을 측정 하였

다. 결과 분석 시 가공된 단위 길이당 유효 에너지를 고려하여 분석하는 것이 바람직 한데, 이는 레이저 출력을 이송속도로 나눈 값으로 나타낼 수 있다. 본 논문에서 수행된 실험들은 이송 속도를 5 mm/s로 고정하여 수행하였으므로, 레이저 출력 값만 고려해도 충분히 유효한 분석을 할 수 있으므로 레이저 출력값으로 표시하였다. 상기 기술한 실험장치 구성도는 Fig. 1과 같다.

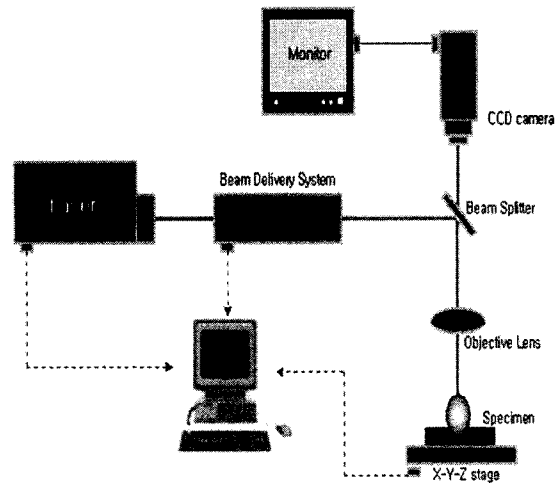


Fig. 1 Schematic of a femtosecond laser system.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2와 3은 위의 실험 방법에서 기술한 방법대로 수행된 폴리머 필름에 대한 펄초 펄스 레이저의 표면 가공 결과를 광학적 현미경으로 관찰한 것이다. 측정은 500배율의 광학적 현미경을 통하여 측정하였다. 라인들의 연속으로 이루어낸 면적 가공이므로 라인 간격이 가공 후 밑면에도 반영되는 것을 볼 수 있다. 파워는 5~15 mW로 하였는데 파워가 너무 높을 경우 그을음 같은 것이 형성되기도 하고 표면 가공을 하기엔 너무 많이 재료의 식각이 이루어져 좋지 않다. 선 가공에서 라인의 두께는 파워 및 스테이지의 이동속도에 따라 다소 달라질 수 있지만 5~15 mW 정도의 빔 파워와 5 mm/s의 속도를 주었을 경우 가공 되는 위 표면 기준으로 약 20 μ m 정도로, 라인 간격을 20 μ m이상으로 둘 경우 원하는 면적 전체의 가공이 이루어지지 않고 라인의 반복 패턴이 보이는

형태로 가공이 되게 된다. 20 μm 이하로 라인 간격을 설정한 경우 원하는 영역 전체의 면적이 빔에 의해 표면 가공 되는 것을 볼 수 있고, Fig. 2와 Fig. 3에서와 같이 가공 밑 면에 초점을 맞춰 관찰할 경우 라인 간격과 일치하는 주기적인 패턴을 볼 수 있다. 또한 가공 후의 면에서의 열적 데미지 및 변성이 거의 관찰되지 않음을 볼 수 있다.



Fig. 2 10mW, 10 μm pitch 1-D process.

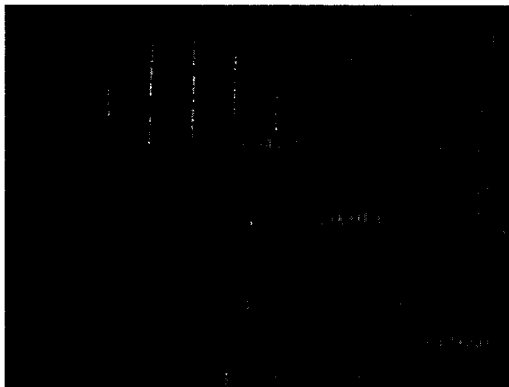


Fig. 3 10mW, 20 μm pitch 1-D process.

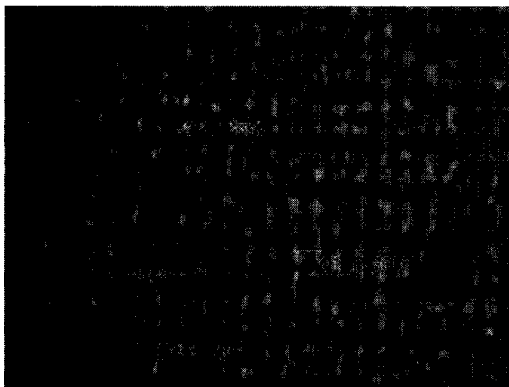


Fig. 4 15mW, 20 μm ×20 μm , 2-D process.

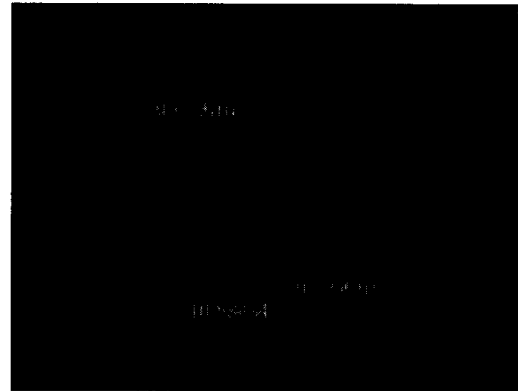


Fig. 5 15mW, 10 μm ×20 μm , 2-D process.

All numbers in the figures are measured in μm .
*Fig.2 ~ Fig. 5 are performed in 5mm/s.

Fig. 4와 5는 폴리이미이드 필름에 대해 펄스 레이저를 서로 수직인 방향으로 동일한 면적에 두 번 가공한 후 광학 현미경 500 배로 관찰한 결과이다. Fig. 4는 15 mW 빔 파워, 5 mm/s 이동속도를 이용해 20 μm 라인 간격을 가지고 X축 방향으로 반복 왕복 진행한 후 같은 간격으로 Y축 방향으로 반복 왕복 진행을 한 결과이다. 그림에서 보듯 가공 라인 간격과 일치하는 가로 세로 20 μm 정도의 정방형 무늬들이 일정하게 나타남을 알 수 있다. 폴리이미이드 표면에 초점을 맞추어 가공할 경우 가공 면의 깊이는 상기 제시된 파워와 속도, 그리고 라인 간격에 의존한다. 15 mW, 5 mm/s, 20 μm 라인 간격을 두고 가공할 경우 약 9~10 μm 정도의 가공 깊이를 가짐을 확인 할 수 있었다. 깊이 방향으로 가공은 가우시안 빔 프로파일을 가정할 경우 중심부가 가장 깊이 가공 되고 주변부는 덜 깊이 가공 될 것이므로 가공 후 면적에 새겨진 빔의 흔적의 경우, 빔의 간격은 물론 가공 시 설정한 라인 간격, 즉 이 경우 20 μm 를 유지하지만 빔 피크 흔적의 두께는 그 보다 얇은 8 μm 정도이다. 이는 재료의 특성, 그리고 레이저 빔의 파워 및 속도, 라인 간격 등에 따라 정해지게 된다. 따라서 수 마이크로미터 정도의 요철을 우리가 원하는 간격만큼 일정하게 주기적으로 만들 수 있음을 시사한다. 이는 마이크로 구조 제작 및 μm order의 표면 처리로 인한 물질의 특성 변화 등에 응용 할 수 있다. Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조

건에서 라인 간격을 세로줄 간격10 마이크로미터와 가로줄 간격20 마이크로 미터로 바꾸어 가공한 결과이다. 역시 지정된 라인 간격에 맞는 마이크로 주기 구조가 형성 됨을 확인 할 수 있다. 열적 손상 역시 앞의 실험들과 같이 거의 보이지 않는 가공면을 관찰할 수 있다.

미세 가공의 해상도에 영향을 미치는 것은 재료의 특성, 빔 파워, 가공 속도, 라인 간격, 그리고 스테이지의 해상도에 의존하는데, 본 실험의 사용된 기계적 스테이지의 동작 오차는 2 μm 수준이었다.

Fig. 6은 폴리이미드 가공 표면과 비가공 표면의 투과율을 측정된 결과이다. 폴리이미드의 반투명성을 이용한 필터 등 광학 부품으로의 가공 및 응용가능성을 타진해볼 수 있기도 하려니와 한번 가공된 면에 재차 레이저 가공을 하였을 때 첫번째 가공시 잡아놓은 최적 가공 조건이 재차 가공할 때는 적용 되지 않는 경우가 종종 있는데 투과율 변화 측정은 그러한 원인을 분석하는 하나의 방법으로 적용할 수도 있다. 광원은 펄스 레이저를 사용하였다. 미가공 표면의 경우 빔이 수직 입사시 투과율은 대략 80% 정도로 780 nm 대의 근적외선 파장에 대해 대다수가 투과되는 것을 볼 수 있다. 펄스 레이저를 렌즈를 사용하여 집광하지 않은 상태로 20m W, 300m W, 920m W 의 파워를 주어 반복 측정하였는데 투과율은 일정하게 나타났다. 이는 광원의 파워나, 펄스 폭에 의존하지 않고 대체로 일정한 값을 나타냄을 의미한다.

가공 표면에 대해 투과율을 측정할 때도 입사 레이저 펄스의 파워에 상관없이 일정한 값을 나타내고, 입사각을 증가시키에 따라 투과율이 낮아지는 현상을 볼 수 있지만 투과율이 낮아지는 비율이 미가공 표면 경우에 비해 높고 또한 전체적인 투과율 자체도 미 가공 표면의 경우에 비해 절반도 되지 않는 낮은 값을 기록하고 있다. 이때의 측정 조건은 미가공면 측정과 동일한 파워들로 측정하였으며, 가공 라인 간격은 10 μm , 15 μm , 20 μm 변화시켜 가공한 표면에 대해 측정을 반복하였지만 동일한 입사각에 대해 투과율은 일정하게 나타났다. 이는 표면 가공에 의해 생긴 표

면에 생긴 패턴이나 가공 면 아래 재료 내부에 생긴 광학적 변화들로 인해 광 손실 및 반사가 증가했음을 의미한다. 따라서 표면 가공 이후 추가적인 가공을 할 때에 레이저 빔에 대한 재료의 반응 특성이 달라 질 수 있음을 의미하고, 가공을 통한 미세 구조가 광학적으로 응용 될 수 있을 것으로 판단된다. 가공 라인 간격이 레이저 빔의 파장 길이 보다 훨씬 길기 때문에 주기적인 라인 간격에 따른 간섭 현상이라고 보긴 어렵고, 가공 시 생긴 표면의 미세 요철 때문에 난반사가 증가하는 것으로 보인다.

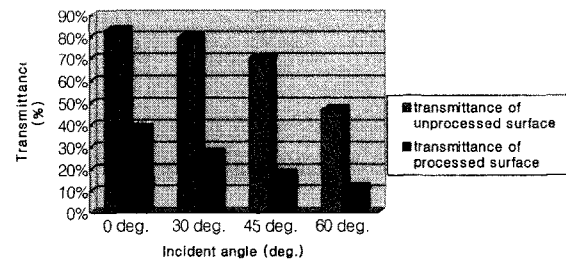


Fig. 6 Transmittance of unprocessed/processed polyimide surfaces by a femtosecond laser.

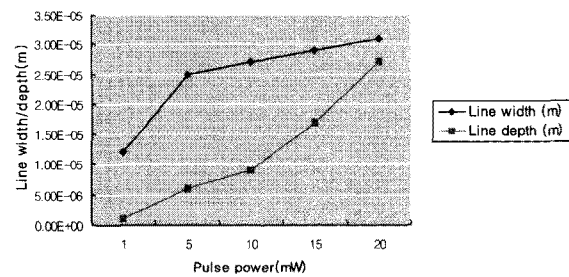


Fig. 7 Line width and depth of polyimide surface with laser power variation.

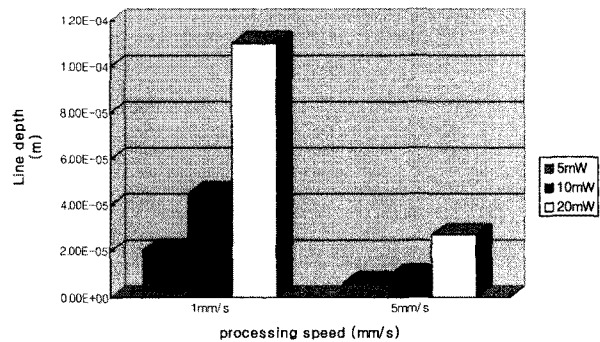


Fig. 8 Line depth of polyimide surface with different processing speeds.

같은 가공 면 및 비 가공 면에 대해 반사율을 측정해보았을 때 입사각에 따라 특정 방향이나 각도로 반사되는 현상이 전혀 보이지 않았고 비가공면에 비해 가공 면의 반사율을 쥔 때 반사 빔의 파워가 특정 방향과 무관하게 전반적으로 수 mW 정도 높게 측정되는 것은 위와 같은 현상을 뒷받침 한다.

다음으로 폴리이미이드를 가공 할 때 가공 조건들에 따라 가공 결과에 어떤 영향을 주는 지 알아보기 위해 레이저의 파워, 가공 속도 등을 바꾸어 가면서 폴리이미이드 표면에 가공을 해 보았다. Fig. 7은 가공 파워에 따른 폴리이미이드 표면의 가공 선폭 및 깊이를 나타낸 것이고 Fig. 8은 가공 속도에 따른 폴리이미이드 표면의 가공 깊이를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 보듯 폴리이미이드는 펨토초 레이저의 작은 파워에도 가공이 용이하게 됨을 알 수 있다. 또한 파워를 높임에 따라 가공 깊이는 어느 정도 비례하여 증가하는 반면 가공 선폭 변화는 그리 크게 나타나지 않는다. 이것은 펨토초 레이저가 폴리이미이드를 가공함에 있어 불필요한 표면 손상, 특히 열적 손상을 적게 준다는 것을 의미한다. 레이저의 파워의 깊이 방향 가공으로 전환 효율이 높아 절삭에도 용이하며, 표면의 열 손상이 적어 정밀 가공 쪽으로 응용하기에도 알맞은 것을 알 수 있다. Fig. 7은 5 mm/s 가공속도로 고정하여 얻은 값이다.

Fig. 8은 두 개의 다른 가공 속도에 따라 같은 파워를 주었을 때 얼마만큼의 가공성을 보이는가 하는 것을 알 수 있는데, 동일 파워에 있어서도 가공 속도에 따라 가공 선폭 및 깊이가 확연히 차이 나는 것을 알 수 있다. 다만 속도를 다섯 배로 올린다고 해서 가공 깊이가 5분의 1로 줄어 들지는 않음을 볼 수 있는데, 이는 펨토초 레이저의 비선형 효과에 의해 가공 초점 부위만 타격을 주는 특성에 기인한다. 펨토초 레이저 가공에 있어 가장 문제시 되는 가공 속도의 관점에서 보면, 가공 속도의 증가가 가공 깊이의 감소보다 더 크므로 폴리이미이드가 펨토초 레이저로 가공하기에 적합하다는 반증이며 펨토초 레이저 가공시 가장 문제가 되는 가공 속도 부분에서 유리한 재질이라는 뜻이기도 하다. 한편 가공 선폭에 대해서는 속도에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

4. 결 론

본 논문에서는 폴리이미이드 필름을 재료로 하여 펨토초 레이저 펄스를 표면 초점을 잡아 표면 가공을 하였을 때 가공 라인에 따라 정밀 가공됨을 확인 하였고 가공 조건의 변화에 따라 일정 주기를 가지는 패턴을 만들 수 있음을 확인 하였다. 또한 가공에 사용된 레이저와 동일한 레이저 펄스를 이용하여 측정한 투과율 및 반사율 에서 미가공면 보다 가공 면에서 투과율이 현저히 낮아 지는 것을 발견 할 수 있었다. 이는 표면 가공으로 인한 미세 패터닝들에 의한 효과로 광학적 특성을 바꾸어 줄 수 있음을 나타낸다. 특정 방향으로의 전반사율이 높아지는 것이 아닌 난반사의 증가가 투과율 감소의 주 원인으로 보이는데 이는 필터 등으로 사용 할 수 있을 것으로 판단된다. 빔 파워 및 가공 속도를 변화 시키면서 폴리이미이드 표면에 생긴 가공 선 두께 및 가공 깊이를 관찰 한 결과 역시 펨토초 레이저는 가공시 표면에 열적 손상을 최소화 하고 빔 파워의 깊이 방향 가공 효율이 좋다는 것을 알 수 있었다. 특히 일반적인 관점에서 동일 파워 조건에서 가공 속도와 가공 깊이는 반비례 할 것이라는 추측과 달리 속도의 증가분 보다 가공 깊이의 감소분이 적음을 확인하여 폴리이미이드에 대한 고속 가공의 가능성을 볼 수 있었다. 또한 가공 조건을 좀 더 극대화 시킨다면 특정 파장 대에 대한 광학적특성만을 변화시키는 등의 여러 활용 분야를 접목시킴에 있어서 펨토초 레이저는 매우 우수한 가공 특성을 보여준다는 것을 확인하였다.

폴리이미이드를 미세 가공할 수 있는 기술에서부터 한번에 절단할 수 있는 기술까지 펨토초 펄스 레이저는 가공 정밀도 및 재료 손상의 최소화를 만족시키는 가공 방법으로 여러 응용이 가능할 것으로 보인다.

참고문헌

- 1) 민철기, 이만섭, "Femtosecond Pulse laser applications for display panels," *Lasers in Manufacturing (LIM)*, 2007.

- 2) Li M., Lu Q.H., Yin J., "Periodic micro-structure induced by 532 nm polarized laser illumination on poly(urethane-imide) film; orientation of azobenzene chromophore," Applied surface science, 2002.
- 3) Li M., Lu Q.H., Yin J., "Preparation of periodic sub-micrometer structure by visible laser on poly(urethane-imide) surface," Chem. Jour. Of Chinese universities, 2002.
- 4) C.R. Mendonca 외, "Femtosecond laser micro-machining in the conjugated polymer MEH-PPV," Applied surface science, 2007.
- 5) 민철기, 이만섭, "펄토초 레이저를 이용한 폴리마이드 가공 연구," 레이저 가공 학회, 2007.
- 6) 신동식, "KrF 엑시머 레이저 빔을 이용한 폴리머의 가공 시 광화학 반응기구에 대한 연구," 박사논문.