

펄토초 레이저에 의한 SUS 가공 특성 및 리플 생성

손익부[†], 고명진, 김영섭, 노영철

광주과학기술원 고등광기술연구소 미세광학연구실

Ripple Formation and Polarization Effects in Femtosecond Laser Drilling

Ik-Bu Sohn, Myeong-Jin Ko, Youngseop Kim, Young-Chul Noh

Advanced Photonics Research Institute, GIST

ABSTRACT

Ripple formation of femtosecond laser in stainless steel is investigated using 184 fs pulses with a center wavelength of 785 nm. The effect of the laser polarization relative to the translation direction is observed. For drilling with a certain aspect ratio, reflections at the hole walls take place, leading to a non-uniform intensity distribution deep inside the formed hole. Finally, it is shown that a circular polarization during the drilling process significantly improves the quality of the produced holes.

Key Words : Femtosecond laser, micromachining, ripple formation, polarization dependence

1. 서론

펄토초 레이저는 열효과를 최소화하여 모든 재료에 대하여 미세한 가공이 가능하다는 장점이 있으며 현재 다양한 분야에서 폭넓게 적용이 되고 있다. 레이저 가공 분야에서 편광 방향에 따른 프로세스 효율은 잘 알려져 있으며, 펄토초 레이저를 이용한 미세 홀 가공 형상은 레이저 빔의 편광에 큰 영향을 받는다. 일정한 aspect ratio로 드릴링을 하면 가공된 홀의 내부에서 불규칙적인 세기 분포가 홀의 내벽에서 일어나는 반사에 의해서 야기되며 그로 인해 원형이 아닌 모양의 홀 가공 결과를 만든다. 홀을 제작할 때 원편광을 사용하게 되면 이러한 편광 의존성을 줄일 수 있다.^{1,3} 이러한 편광에 따른 가공 특성은 가공면을 세부적으로 들여다보면 확인할 수 있는 나노 리플(Ripple)과의 연관성도 중요할 것으로 판단된다.

레이저에서 유도된 주기적 표면 구조인 리플(ripple)이라는 이름의 LIPSS (Laser-induced periodic surface structures)는 1965년 Birnbaum에 의해 처음 관측되었다.⁴ Birnbaum은 ruby 레이저를 몇 종류의 반도체에 조사하여 반도체 표면에서 리플이 생성됨을 확인하였고, 그 이후 많은 연구자들

에 의해 유전체, 금속과 같은 다양한 물질에서 LIPSS 형성이 관측되고 있다. LIPSS에 의한 리플은 마이크로미터와 같은 작은 부품 작동 시에 두 물체간의 표면장력으로 발생하는 응착력을 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 마모를 줄여주고, 윤활제를 보관하는 작용 등, 부품의 수명을 증가시키는 기능을 수행하는 것으로 알려져 있다. 이러한 요인으로 현재 재료 표면에 나노 스케일의 미세 구조를 형성시키는 레이저 가공법에 대한 많은 연구가 진행 중에 있다. 특히, 펄토초 레이저는 열적 효과가 전달되기 전에 리플을 생성함으로써 다양한 물질에서 미세한 나노 패턴을 생성하는데 많이 이용되고 있다.^{5,6} 리플 형성에 영향을 미치는 중요한 광학적 요소로는 레이저 파장, 편광도, 조사빔의 각도 등이 있다. 최근에는 파장보다 훨씬 작은 나노패턴의 공간적 주기를 갖는 결과들이 발표되고 있으며, 여러 물질들에 대한 조사가 병행되고 있다. 리플은 입사된 레이저 빔과 반사되거나 산란된 빔의 간섭에 의한 주기적인 레이저 빔 세기 변화(intensity modulation)에 의해서 생성이 된다.⁷ 전통적으로 리플 방향은 레이저 빔의 편광에 수직(perpendicular)한 방향으로 형성이 된다. 본 논문에서는 편광에 따른 펄토초 레이저의 다양한 가공 조건에 따른 나노 리

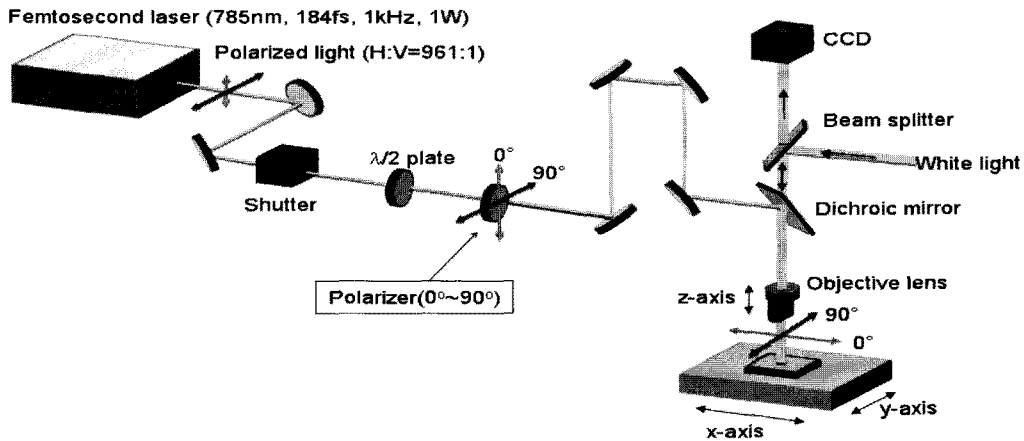


Fig. 1 펄초 레이저 가공 시스템 및 편광 상태 개념도.

플의 생성을 실험적으로 확인하였으며, SUS 기관 홀 가공 특성을 연구하였다. 또한, 원편광을 이용하여 홀 가공시 발생하는 편광 의존성을 어느 정도 해결할 수 있음을 실험적으로 보였다.

2. 실험 및 결과

실험에 사용된 펄초 레이저는 Chirped pulsed amplification 기술을 이용한 regenerative amplifier 시스템(IFRIT, Cyber Laser Inc)이다. 레이저 빔의 펄스폭은 785 nm 파장에서 184 fs이다. 펄스 반복률은 1 kHz이고 regeneration amplifier에서 방출된 레이저 빔 profile은 거의 Gaussian 형태를 가지며 출력빔은 선편광을 가진다. 평균 출력 에너지는 1 W 정도이고, 선형 편광된 레이저 빔은 편광 방향은 편광기에 의해서 조절된다. 샘플 표면에서의 레이저 강도를 조절하기 위해 Neutral Density filter를 사용하였으며, 샘플에 조사되는 레이저 펄스 수는 X-Y Linear stage 속도를 변화시키면서 조절하였다. 레이저 조사 후 샘플 표면의 나노 리플을 확인하기 위해 SEM을 사용하여 분석하였다. 펄초 레이저 가공 시스템 및 편광 상태 개념도는 Fig. 1에 나타내었다.

2.1 편광에 따른 나노 리플 생성 특성

펄초 레이저 펄스를 스테인레스 강(SUS304) 표면에 조사하여 나노 리플을 생성할 수 있다. 펄초 레이저 펄스 세기와 펄스 중첩도를 미세하게 조절하여 SUS 표면에 균일한 나노 리플을

형성시킬 수 있다. 나노 리플의 공간적 주기는 광학적 특성과 물질의 특성 등에 밀접한 관련이 있으며, 조사된 빔과 시료표면에서 굴곡에 의해 발생하는 산란된 빛과의 간섭에 의해 생성된다. 일반적으로 샘플에 레이저 빔이 조사되어 발생한 공간적 주기는 조사빔 파장과 밀접한 관계가 있고, 그 주기 배향은 레이저 편광 방향과 수직방향으로 배열된다. 이론적으로 주기적인 리플의 간격(Λ)은 $\Lambda = \lambda / (1 + \sin\theta)$ 에 의해서 결정된다.⁸ θ 는 입사각이며 λ 는 입사되는 빔의 파장이다. 레이저 빔이 샘플에 수직으로 조사 되었을 때 표면의 융해 임계값(melting threshold value)은 주기적으로 초과하게 되고 재빨리 녹은 물질은 얇은 층으로 고체화 되면서 물질 구조를 야기하며, 반파장 정도의 간격을 가지는 리플을 형성하게 된다.

입사광의 강도는 형성되는 나노 리플을 형성하는데 중요한 요소이다. 본 연구에서도 SUS 표면에 형성되는 나노 리플을 확인하기 위해 여러 레이저 펄스 에너지에서 형성되는 나노 리플을 관측하였다. 펄초 레이저에 의해서 생성되는 나노 리플은 편광 방향에 수직하게 형성이 된다. 펄초 레이저 펄스 에너지를 210 nJ로 고정하고 가로와 세로 방향으로 진행하며 SUS 표면에 나노 리플을 생성하였다. Fig. 2는 편광 방향에 수직으로 형성된 나노 리플 구조를 측정된 SEM 이미지이다. 레이저 펄스 세기가 가공 임계값(threshold) 보다 약하면 샘플 표면에 아무런 물리적 현상이 발행하지 않고, 그보다 너무 높으면 가공이 깊게 되어 나노 리플이 제대로 보이지 않게 된다. 따라서 가공 임계값 근처에서 적당한

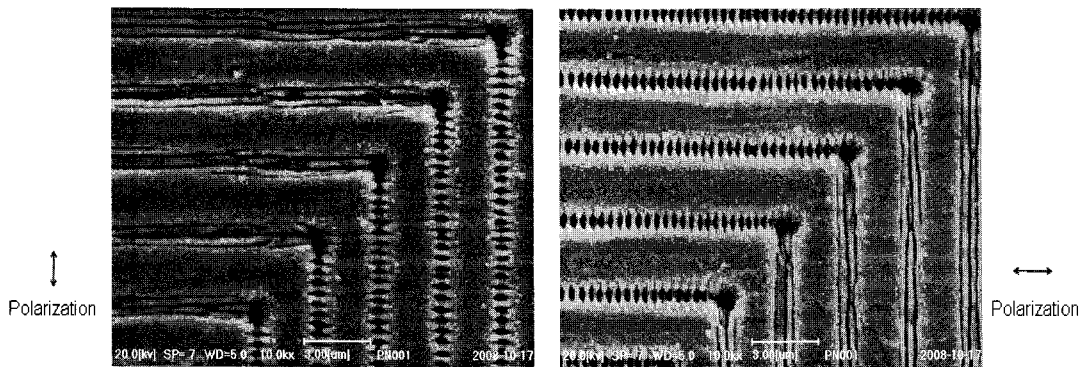


Fig. 2 펄스 레이저를 이용하여 SUS 표면에 생성한 리플 패턴 SEM 이미지.

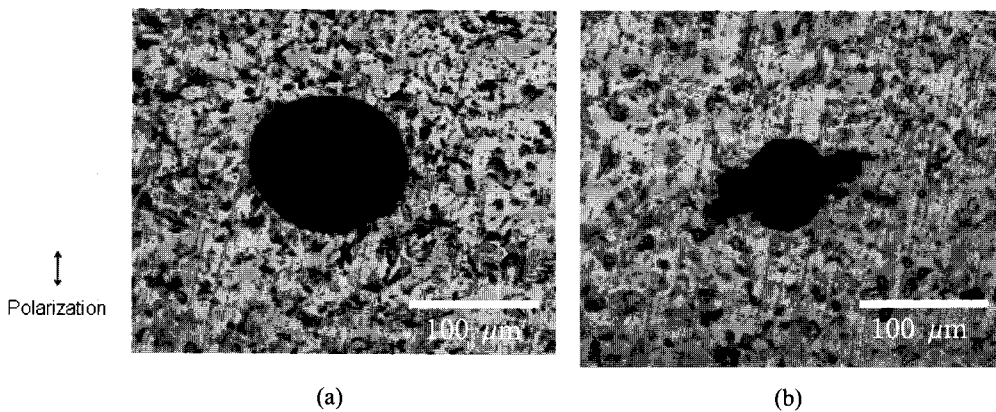


Fig. 3 펄스 레이저 편광에 따른 SUS 홀 가공 측정 사진. (a) 100 µ m 두께의 SUS 기판을 5.51 µ J로 직경 100 µ m 홀 가공한 입구(윗면) 부분, (b) 출구(아랫면) 부분.

세기를 찾기 위해 펄스 중첩도를 고정하고 레이저 펄스 세기를 조절하면서 실험을 수행하였다. 그리고 레이저의 편광 방향은 편광기를 통해서 조절하여 실험하였으며 SEM 이미지로 부터 편광 방향에 따른 리플의 주기와 방향에 대한 정보를 얻을 수 있다. Fig. 2에서 레이저의 편광 방향에 수직인 방향으로 리플이 생성되며 나노 리플의 공간적 주기가 사용된 레이저 파장인 785 nm의 절반인 약 350 nm 정도임을 확인할 수 있다. 이것은 레이저 광원의 파장과 물질에 의존적이며 펄스 레이저 펄스 세기는 210 nJ에서 가장 깨끗한 리플을 얻을 수 있었으며, 그 이후의 높은 펄스 에너지에서는 가공이 깊게 되어 리플을 관찰하기가 어려웠다. 집광 렌즈는 50배율(NA = 0.42)을 사용하였으며 펄스 중첩도는 약 98% 정도로 실험하였다. 펄스 레이저에 의해서 생성된 나노 리플의 방향은 레이저 편광 방향과 수직이며, 가공 진행 방향과 수직이나 수평으로 형성이 되었다. 그런데 여기서 중요한 것은 형성된 나노 리플과 가공 진행 방향이 수직인 경우(threshold = 120 nJ)가

수평(Threshold = 130 nJ)인 경우에 비해서 가공이 좁고 깊게 됨을 알 수 있었다. 나노 리플과 가공 진행 방향이 수직이거나 수평일 때의 가공율(etching rate)이 다르게 되고 이것이 원형 홀을 가공하는데 있어서 중요한 변수가 될 것으로 예측하고 본 연구에서 나노 리플과 가공 진행 방향이 SUS 홀 가공에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다.

2.2 편광에 따른 SUS 홀 가공 특성

Fig. 3, 4, 5는 펄스 레이저를 이용한 SUS 홀 가공 후 광학현미경으로 측정된 이미지이다. 편광을 제외한 모든 실험 조건은 Fig. 3, 4, 5에서 보여준 결과와 동일한 변수들로 실험되었다. 184 fs 펄스를 이용하여 윤곽이 뚜렷하고 burr가 없는 SUS 홀을 가공할 수 있다는 것을 보여준다. 표면에 있는 debris들은 초음파 세척이나 닦아내는 방법으로 쉽게 없앨 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 0.1 mm 두께의 SUS 판 뒷면까지 원형의 원모양을 유지할 수 없다. 원형 모양에 두 개의

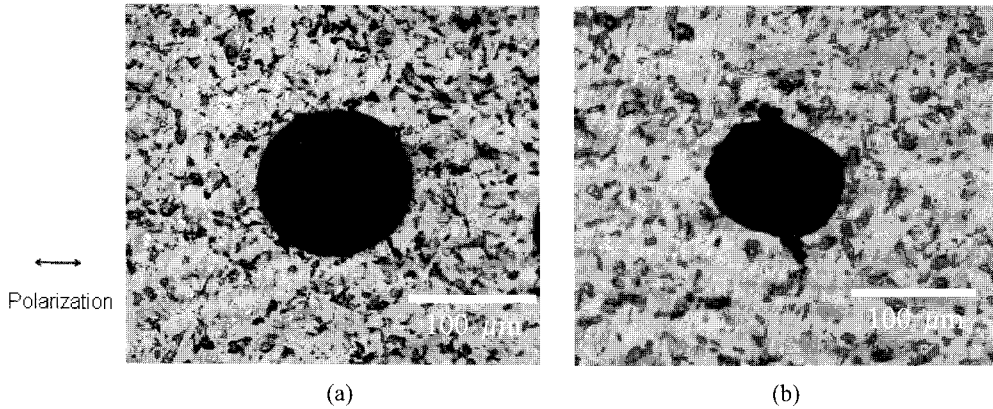


Fig. 4 펄스 레이저 편광에 따른 SUS 홀 가공 측정 사진. (a) 100 μm 두께의 SUS 기판을 5.51 μJ로 직경 100 μm 홀 가공한 입구(윗면) 부분, (b) 출구(아랫면) 부분.

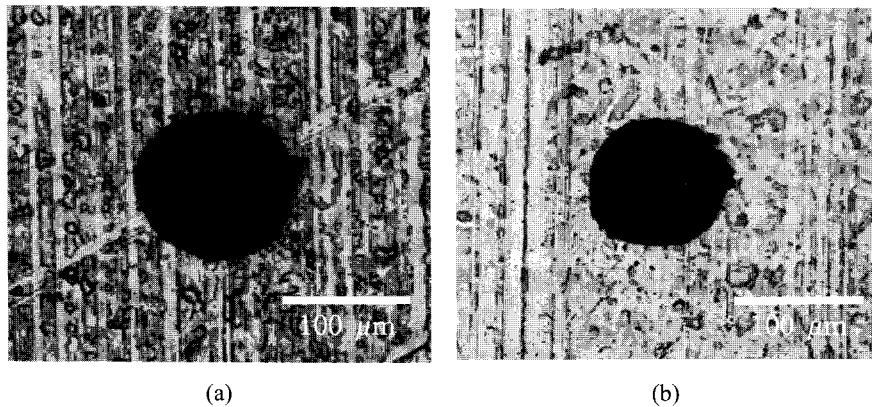


Fig. 5 펄스 레이저 원편광을 사용한 SUS 홀 가공 측정 사진. (a) 100 μmm 두께의 SUS 기판을 5.51 μJ로 직경 100 μm 홀 가공한 입구(윗면) 부분, (b) 출구(아랫면) 부분.

부풀어 오름(bulge) 같은 것들이 존재한다. 서로 마주 보며 위치하고 레이저 빔의 편광 상태에 거의 수직인 방향에 위치한다. 홀은 매우 불규칙하며 편광에 수직인 방향으로 확장 가공이 되었다. 이러한 현상의 원인은 앞에서 언급한 편광에 의존적인 리플의 방향과 가공 진행 방향에 따른 가공 특성 차이에서 기인한 것으로 판단되어진다. Fig. 3은 펄스 레이저 편광에 따라서 가로 방향으로 리플이 형성이 되며, 이러한 상황에서 원의 위쪽과 아래쪽에 비해서 상대적으로 좌, 우가 빨리 가공이 되면서 바닥면에서 홀이 좌우로 길게 가공이 되는 것을 보여준다. Fig. 4는 펄스 레이저 편광에 따라서 세로 방향으로 리플이 형성이 되며, 이 경우에는 원의 왼쪽과 오른쪽에 비해서 상대적으로 위, 아래가 빨리 가공이 되면서 바닥면에서 홀이 상하로 길게 가공이 되는 것을 보여준다. 바닥면에도 원형 모양을 유지하기 위한 방법으로는 레이저의 선 편광을 회전을 하면서 가공을 하게 되면 해결할 수 있다¹, 또 다른 방법은

Quarter wave plate를 이용하여 선 편광을 원 편광으로 바꾸어 가공하는 것으로 간단하게 편광 의존성을 해결할 수가 있다. Fig. 5는 이와 같이 원 편광을 사용하여 가공한 SUS 기판의 홀 가공 사진이다. 가공된 홀의 내벽에서 일어나는 S파와 P파의 반사도 차이에 의해서 야기 되는 원형이 아닌 홀 가공 현상이 사라지고 비교적 정 원에 가까운 결과를 얻을 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 펄스 레이저를 SUS 표면에 조사하여 생성되는 나노 리플과 이것이 홀 가공에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 리플은 레이저 광원의 편광에 수직인 방향으로 생성이 되며 공간적인 리플의 주기는 파장과 물질에 의존적이다. 레이저 펄스 세기가 가공 임계값(threshold) 보다 약하면 샘플 표면에 아무런 물리

적 현상이 발행하지 않고, 그보다 너무 높으면 가공이 깊게 되어 나노 리플이 제대로 보이지 않게 된다. 펨토초 레이저 펄스 세기는 가공 임계값 보다 조금 높은 210 nJ에서 가장 깨끗한 리플을 얻을 수 있었다. 선 편광된 펨토초 레이저 펄스를 이용하여 가공한 홀이 일정한 aspect ratio를 가지더라도 보통 반대편 부분에서는 그 모양을 유지하지 못한다. 편광에 따른 리플 방향과 가공의 진행 방향에 따라서 가공 특성이 다르기 때문에 문제가 야기된다. 리플과 가공 진행 방향이 수직인 경우에 평행인 경우와 비교해서 가공이 더 깊게 된다. 이러한 원인 때문에 윤곽이 뚜렷하고 burr가 없는 SUS 홀을 가공할 수 있지만 SUS 판 뒷면까지 원형의 원모양을 유지할 수가 없다. 앞으로 편광에 따른 나노 리플 생성 및 홀 가공에 대한 보다 명확한 메커니즘을 규명하기 위해서는 상세한 이론적 분석과 체계적인 실험적 연구가 수행되어야 할 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1) S. Nolte, C. Momma, G. Kamlage, A. Ostendorf, C. Fallnich, F. von Alvensleben, H. Welling, "Polarization effects in ultrashort-pulse laser drilling," *Appl. Phys. A* 68, pp. 563-567, 1999.
- 2) T. H. R. Crawford, A. Borowiec, H. K. Haugen, "Femtosecond laser micromachining of grooves in silicon with 800 nm pulses," *Appl. Phys. A* 80, pp. 1717-1724, 2005.
- 3) A. Borowiec, H. K. Haugen, "Femtosecond laser micromachining of grooves in indium phosphide," *Appl. Phys. A* 79, pp. 521-529, 2004.
- 4) M. Birnbaum, *J. Appl. Phys.* 36, pp. 3688-3689, 1965.
- 5) D. V. Tran, H. Y. Zheng, Y. C. Lam, V. M. Murukeshan, J. C. Chai, D. E. Hardt, *Optics & Laser Eng.* 43, pp. 977-986, 2005.
- 6) 최성철, 이영락, 노영철, 이종민, 고도경, 이정훈, 김강윤, 김창중, 이웅상, 허명구, "펨토초 레이저를 이용한 금속 나노패턴 형성 연구", *한국광학회*, Volume 17, Number 2, pp. 203-206, April 2006.
- 7) T. Okada, H. Kawahara, Y. Ishida, R. Kumai, T. Tomita, S. Matsuo, S. Hashimoto, M. Kawamoto, Y. Makita, M. Yamaguchi, "Cross-sectional TEM analysis of laser-induced ripple structures on the 4H-SiC single-crystal surface," *Appl. Phys. A* 92, pp. 665-668, 2008.
- 8) A. Weck, T. H. R. Crawford, D. S. Wilkinson, H. K. Haugen, J. S. Preston, "Ripple formation during deep hole drilling in copper with ultrashort laser pulses," *Appl. Phys. A* 89, pp. 1001-1003, 2007.