

피코초 레이저를 이용한 금속재료의 미세가공

Micromachining of Metals with Picosecond Lasers

한국기계연구원 정보장비연구센터 손현기, 이제훈, 서정, 김정오

I. 서론

극초단 펄스 레이저(ultrashort lasers)의 등장으로 다양한 산업분야에서 미세 구조물의 제작이 더욱 용이하게 되었다. 현재 여러 레이저 제조업체로부터 피코초(picosecond) 레이저 및 펨토초(femtosecond) 레이저가 생산되고 있다. 특히, 최근 제작되고 있는 피코초 레이저는 평균출력(average power)과 펄스 반복율(repetition rate)이 높을 뿐만 아니라 레이저빔 품질(laser beam quality)이 매우 좋은 편이다 따라서 이를 이용하여 전자 산업 등에서 소요되는 부품의 미세 형상가공(micro structuring), 미세 드릴링, 미세 절단 등의 대표적인 미세가공공정에서 공정 재현성(reproducibility)을 확보하고, 공정비용을 절감한 사례들이 보고 되고 있다

본 글에서는 최근 개발된 피코초 레이저를 이용한 최신 금속재료의 미세가공 사례에 대해 살펴본다

II. 극초단 펄스 레이저를 이용한 미세제거가공

극초단 펄스 레이저가 개발되기 이전에 미세가공에 주로 사용되었던 나노초(nanosecond) 레이저를 이용한 가공은 열공정(thermal process)이다. 따라서 금속과 같이 열전달율이 높은 재료를 가공하는 경우에 열반응으로 인한 가공부위의 녹음(melting)과 재용고(re-solidification)에 의한 손상, 버(burr), 크랙 등의 문제점이 발생하였다. 이로 인해 가공 정밀도가 제한되었으나, 극초단 펄스 레이저를 사용하면 이러한 제약들을 극복할 수 있다. 이것은 극초단 펄스 레이저의 펄스폭(pulse duration)이 가공부위 주위로 펄스 에너지가 전달되는 시간보다 짧기 때문이다. 이와 같은 이유로 극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공을 cold ablation'이라 칭하게 된 것이다. 즉 소재가 열적 반응에 의해 녹는 현상을 거의 완벽하게 방지할 수 있으며, 가공부위에서 소재가 실질적으로 승화(sublimation)되는 것을 의미한다.

극초단 펄스 레이저를 이용한 제거(ablation) 공정이 갖는 장점을 정리하면 다음과 같다. 열적 반응에 의해 재료를 제거하는 나노초 레이저 가공에 비해 더욱 안정적이고 재현성이 높다. 가공 소재의 녹음, 구조 변화, 재결정, 버, 크랙 등의 발생을 피할 수 있으므로, 고품질의 미세 형상가공 및 드릴링이 가능하다. 또한 비선형 흡수현상(non-linear absorption)에 의한 투명재료의 가공이 가능하다.

이러한 장점들은 여러 응용에서 실험적으로 증명되었으며, 현재까지 실제 산업에서 이를 대체할 만한 공정이 없는 실정이다. 산업적 응용에 있어서는 품질뿐만 아니라, 공정 재현성 및 가공비용이 매우 중요한 기준이 된다. 레이저 가공에 있어서 사용된 레이저 기술의 복잡성은 가공의 신뢰성(reliability)과 직결된다. 부품당 생산 단가는 기본적으로 극초단 펄스 레이저의 펄스 반복율과 관계된다. 고부가가치, 높은 펄스 반복율에 근거한 생산성, 신뢰성 있는 레이저 기술 등의 요구 조건들을 모두 만족시킬 수 있는 것은 현재까지 diode-pumped 피코초 레이저뿐이다.

피코초 레이저가 대량생산에 응용된 첫 번째 사례는 Photonics West 2005에서 보고 되었다. 펄스 에너지가 1 μJ, 펄스폭이 20 ps인 피코초 펄스를 이용하여 50 μm 두께의 스틸 박막(steel foil)에 동심의 링을 가공한 예이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 서로 다른 동심원들

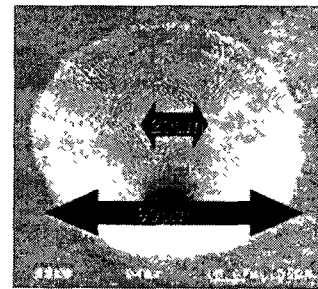


그림 1 피코초 레이저(1μJ, 20 ps)로 가공된 원뿔형 잉크젯(ink-jet) 노즐

은 원판이 되고, 서론 다른 원판 형태로 재료가 제거되어 원뿔 드릴링 공정이 이루어진다 이것은 고분해능 (600 dpi) 프린터 헤드의 잉크젯 노즐로 사용된 예이다.

지난 몇 년간 대부분의 극초단 펄스 레이저 제조업체는 펨토초 레이저의 개발에 집중해 왔다 펨토초 레이저는 복잡한 CPA(churped pulse amplification) 기술을 필요로 하는 데 이것은 첨두출력(peak power) 밀도를 증폭 단계에서 파괴적 임계값 아래에 두기 위한 것이다 이를 통해서 펄스 에너지를 수 mJ급까지 올릴 수 있으나, 펄스 반복율이 수 kHz로 제한되었다 수 100 μ J급 펄스 에너지는 비교적 높은 것으로 종횡 비가 큰 두꺼운 재료의 드릴링과 절단에 유리하다 일례로 디젤 엔진의 분사 노즐의 드릴링을 들 수 있다 1 mm 두께의 스틸 재료를 피코초 레이저로 가공 후 클리닝 공정이 필요 없을 정도로 정밀하게 드릴링하였다

피코초 펄스가 재료 표면에 입력되면 cold ablation이 발생하지만 경우에 따라 빠르게 팽창하는 플라스마(plasma)의 영향에 의해 재료에 열반응이 일어날 수 있다 따라서 극초단 펄스 레이저를 이용한 미세세제 가공에 있어서 적절한 공정기술 또한 매우 중요하다고 할 수 있다 그림 2는 피코초 레이저를 이용하여 스틸 판재에 작은 구멍을 가공한 예를 보여주고 있다 버와 열반응에 의한 크랙이 발생한 것을 볼 수 있는데 이러한 손상은 적절한 공정기술에 의해 피할 수 있다.

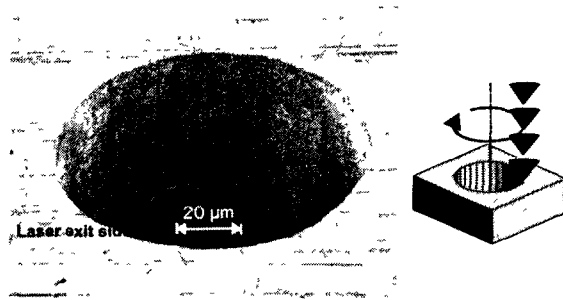


그림 2 피코초 레이저(1 W, 1064 nm)를 이용한 스틸 판재의 드릴링(trepanning)

피코초 레이저는 기계, 화학 또는 유체 소자용으로 설계된 금속 부품의 표면가공에 응용될 수 있다 피코초 레이저를 이용하면 어떠한 형상의 표면 구조물에 대해서도 재현성이 높은 미세가공이 가능하다 그림 3에서 터빈 블레이드의 표면에 50 kHz, 532 nm, 스폿 직경이 25 μ m인 피코초 레이저를 이용하여 ripple를 가공한 것을 나타내었다 이것은 블레이드의 마찰력을 줄임으로써 연료 소비와 환경적 손상을 줄이기 위한 것이다 그림 3에서와 같은 표면 가공을 위해서는 레이저 펄스를 조절하는 것이 매우 중요하다 레이저 셔터(shutter)의 지연시간이 펄스폭에 비해 긴 경우에는 원하지 않는 레이저 펄스가 소재 표면에 입력될 수 있기 때문이다 최근에는 TTL 방식으로 외부에서 펄스를 조절할 수 있는 피코초 레이저가 개발되었다 TTL 방식에서는 외부 트리거(trigger) 펄스에 의해 레이저 펄스가 재료 표면에 입력되기 때문에 이러한 문제점을 해결할 수 있다

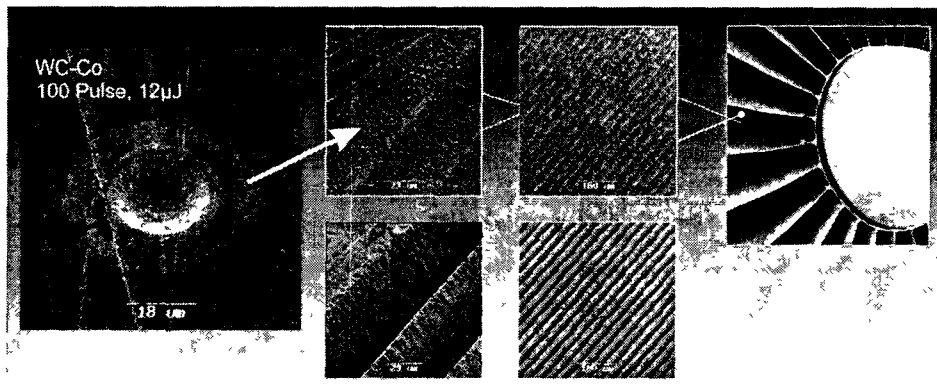


그림 3 마찰을 줄이기 위해 터빈 블레이드 표면에 피코초 레이저를 이용하여 가공된 ripple(50 kHz, 532 nm)

엔진의 연료 소모량은 호닝(honing) 가공된 실린더 내벽에 윤활제가 들어갈 수 있는 미세 포켓(pocket)을 가공하면 크게 줄일 수 있다. 디젤 엔진의 연속 공정 중에 나노초 레이저를 이용하여 미세 포켓을 가공하였으나, 이 경우에는 열반응에 의해 발생한 버를 제거하기 위해 후공정이 반드시 필요하다. 이러한 미세 포켓을 가공하는데 피코초 레이저가 유망한 대안이 될 수 있다. 피코초 레이저를 이용하면 깊이가 5-25 μm 인 미세 포켓 구조를 빠르고, 정확하게 제작할 수 있다. 이 공정은 가공시간 측면에서 시장 경쟁력이 있으며, 후처리가 필요하지 않다.

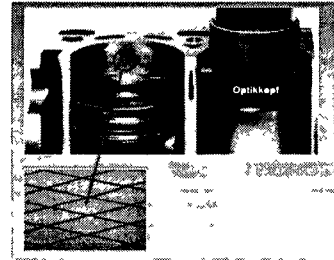


그림 4 피코초 레이저를 이용한 디젤 엔진 실린더 내벽의 미세 포켓 가공

절삭공구로 사용되는 카바이드(carbide) 금속은 높은 기계적 강도와 내마모성을 가지고 있는 재료이다. 카바이드 절삭공구의 수명은 절삭날(cutting edge)의 기하학적 형상에 크게 영향을 받는다. 매우 날카롭고, 거칠고, 깨지기 쉬운 절삭날을 둥글게 가공하면(rounding) 그 수명을 크게 늘일 수 있다. 또한 반경방향으로 라운딩 반경을 변화시키면 드릴에 작용하는 절삭력을 조절할 수도 있다. 이와 같이 피코초 레이저를 이용하여 특정한 절삭 공정 또는 가공 소재에 적합하도록 절삭 공구를 제작할 수 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이 초기에 날카로운 절삭날에 피코초 레이저 펄스를 조사하여 원하는 반경을 갖도록 가공할 수 있다.

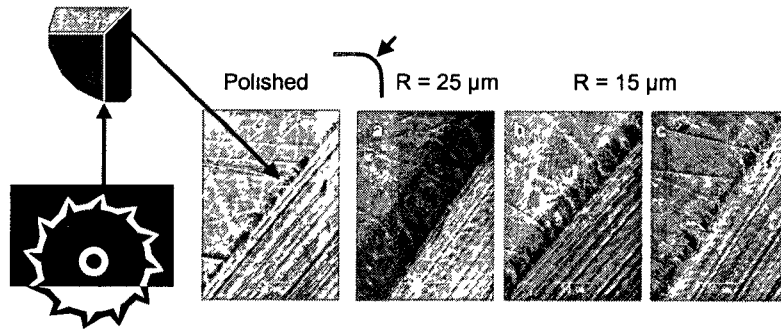


그림 5 피코초 레이저를 이용한 고경도(carbide) 금속 공구의 품질 향상 및 수명 연장가공

III. 결 론

피코초 레이저는 현재 산업현장에서 사용되고 있는 극초단 펄스 레이저이다. 피코초 레이저는 간단하고, 강건하며, 또한 펄스 반복율이 높기 때문에 산업현장에서 경제적으로 활용될 수 있다. 또한 피코초 레이저의 가공성($1 \text{ mm}^3/\text{mun}$)과 가격 면에서 고출력 UV 나노초 레이저에 필적할 만 하다. 현재 레이저를 이용한 미세가공 산업분야는 빠르게 성장하고 있으나, 이 중 극초단 펄스 레이저가 차지하는 비중은 그다지 크지 않다. 그러나 향후 그 비율은 높게 증가할 것이며, 이것은 극초단 펄스 레이저, 특히 피코초 레이저의 여러 장점들이 명백하고, 높은 펄스 반복율이 산업계의 요구를 충족시키고 있기 때문이다.

후기

본 연구는 산업자원부 지원사업인 “첨단레이저 응용 미세가공기술 개발” 과제의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

IV. 참고문헌

- 1 X. Liu, "Industrial applications of ultrahigh precision short pulse laser processing", Panasonic, Laser 2005, Proceedings of SPIE 5713-56
- 2 D Breitling, A Ruf, F. Dausinger, 'Fundamental aspects in machining of metals with short and ultra short laser pulses", Proc of SPIE Vol 5339
3. Bo Gu, "*Ultra fast laser processing for next generation memory repair and semiconductor manufacturing*", GSI Lumonics, Laser 2005, Proceedings of SPIE 5714-04
- 4 H K. Tnshoff, A Ostendorf, C Kulik, F. Siegel: *Finishing of cutting tools using selective material ablation*, Proceedings of the 1st international CIRP seminar on micro and nano technology, Copenhagen, Denmark, November 2003, 77-80