

## 극초단 펄스 레이저를 이용한 재료가공기술

이 글에서는 극초단 펄스레이저인 펨토초 레이저 및 피코초 레이저를 이용한 미세가공에 대하여 소개하고 극초단 펄스의 특성, 재료반응 특성, 및 향후 과제 등을 내용으로 하고 있다.

- ✉ 조 성 학 / 한국기계연구원 나노공정그룹, 선임연구원      e-mail : shcho@kimm.re.kr
- ✉ 신 동 식 / 연세대학교 금속공학과, 박사과정
- ✉ 이 제 훈 / 한국기계연구원 레이저응용시스템그룹, 책임연구원

### 극초단 펄스 레이저

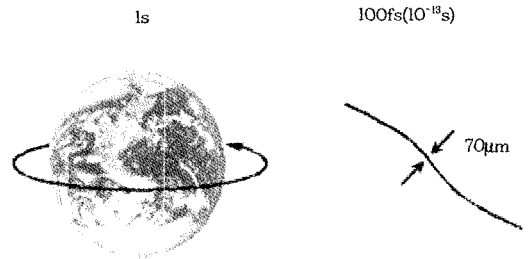
레이저를 이용한 재료가공은 1970년대 초에 처음 소개되기 시작하여 지금은 다양한 산업분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 이 중 레이저를 이용한 마이크로 제거가공은 1980년대 처음 소개된 이후 최근 활발히 연구 진행되고 있는 분야이다. 초기의 레이저 가공은 연속파(continuous-wave) 또는 긴 펄스(long-pulse)를 주로 사용하였는데 레이저 빔과 재료의 상호 반응시 발생하는 열로 인하여 정밀도의 한계에 도달하였고, 이를 극복하기 위해 '90년대에 이르러 극초단 펄스레이저가 개발되기 시작하였다. 극초단 펄스란 레이저의 조사시간이 열이 발생하는 시간인 10피코초보다 빠른 펄스를 의미하고 일반적으로 Nd:YVO<sub>4</sub>를 레이저 매질로 사용하는 피코초 레이저와 Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 펨토초 레이저가 있다. 여기서 피코초(picosecond)란 시간의 단위로써 1조 분의 1초(10<sup>-12</sup>)이며 1펨토초(femtosecond)는 1,000조분의 1초(10<sup>-15</sup>)에 해당한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 100펨토초는 빛이 머리카락 두께의 반도 진행하지 못하는 시간으로 비유된다. 빛은 초당 지구를 7.5바퀴 지날 수 있는 속도를 가지고 있기 때문에 펨토초는 상

상하기 힘들 정도의 짧은 시간에 불과하다.

또한, 펨토초 레이저는 극도의 높은 출력을 가지는데 순간적으로 펄스 당 수백GW(giga watt)까지의 첨두출력을 방출한다. 한국전력의 2003년도 통계에<sup>(1)</sup> 의하면 우리나라의 모든 발전소가 동시에 생산할 수 있는 최대전력이 47GW라는 사실과 비교해보면 펨토초 레이저의 펄스가 경이로운 첨두출력값을 가진다는 것을 알 수 있다.

기존의 펄스 레이저는 0.1ms보다 긴 펄스시간을 가지는 램프 여기방식과 나노초의 펄스시간을 방사할 수 있는 Q-스위칭방식<sup>(2)</sup>이었다. 이에 반해 피코초와 펨토초 펄스는 기존의 방식과 다른 모드 잠금(mode-locking)기술을<sup>(2)</sup> 사용하고 있다. 모드 잠금 기술이란 레이저 공진기에서 발생하는 많은 수의 무질서한 중축방향모드들을 규칙적으로 재배열하여

100 펨토초의 길이?



빛의 진행 거리:

지구 주위의 7.5번 회전

머리카락 직경의 절반

그림 1 빛의 진행거리로써 비교한 펨토초

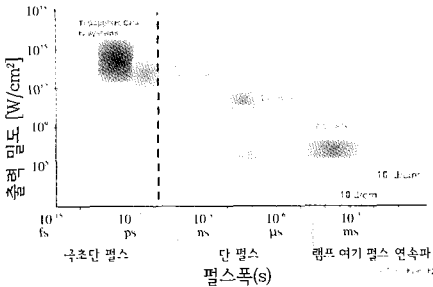


그림 2 펄스폭과 출력밀도에 따른 레이저의 종류

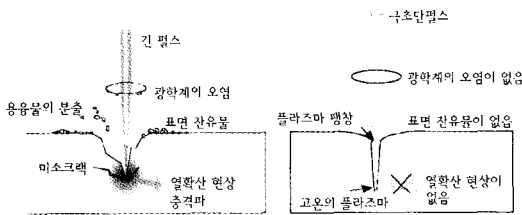


그림 3 장펄스 레이저와 극초단 펄스 레이저의 재료가공<sup>(5)</sup>

서로 보강 및 상쇄간섭과정을 거쳐 펄스폭이 짧으면서 큰 첨두출력의 펄스를 생산하는 방식이다. 이러한 모드잠금 방식을 사용한 극초단 펄스는 염료 레이저 (dye laser)를 이용하여 연구되기 시작하였는데 시스템이 너무 복잡하고 작업하기 까다로워 본격적으로 연구하기에는 많은 한계성을 드러냈다.

이후 1990년대 초 Kerr 렌즈 모드잠금기술이 개발되면서<sup>(3)</sup> Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 고체 펄스 레이저 기술이 등장하였고 반도체 포화 흡수거울(SESAM : Semi-conductor Saturable Absorber Mirror)을 이용한 새로운 모드잠금기술의 개발로 극초단 펄스 레이저는 고성능화를 이루었다. 추가적으로 극초단 펄스를 증폭단의 손상 없이 효율적으로 증폭시키는 CPA(Chirped-Pulse Amplification) 기술<sup>(4)</sup>은 Ti:Sapphire 펄스 레이저를 측정용이 아닌 미세 재료가공용으로 적용되는데 주된 역할을 했다. 이로 인해 더욱 더 광범위한 분야에 걸쳐 펄스 레이저가 적용될 수 있었다. 최근에는 Cr- 및 Yb-재질에 기반을 두고 다이오드 여기 방식을 채택한 레이저가 등장하여 간결하고 효율이 좋은 펄스 레이저로 진화하게 되었다.

그러나 Ti:Sapphire 펄스 레이저는 광학계의 특성상 평균출력이 기존의 레이저에 비해 낮은 점을 보유하고 있다. 즉 첨두출력은 앞서 설명한 바와 같이 수백GW이지만 평균출력은 일반적으로 2W 미만의 값을 가진다. 평균출력은 첨두출력에 초당 펄스수와 펄스폭을 곱하여 이루어지는 값으로서 산정할 수 있는데 이는 재료의 가공량을 나타내는 지표가 되므로 금속, 세라믹과 같이 결합력이 강한 재질을 가공할 때에는 중요한 변수 중에 하나이다.

이와 같은 펄스 레이저의 단점을 보완하기 위하여 Nd:YVO<sub>4</sub>를 매질로 사용하는 피코초 레이저가 최근 개발되어 상품화되기 시작하였다. 이는 펄스 레이저에 비하여 고출력 특성을 나타낼 뿐만 아니라 내부 구성이 펄스 레이저에 비하여 간략하며 비선형 매질(SHG, THG, 및 FHG)을 이용하여 고조파를 발생시키므로 자외선도 비교적 쉽게 조사할 수 있다. 피코초 레이저의 경우 일반적으로 10W의 평균출력을 내는 빔도 큰 어려움 없이 조사할 수 있으므로 금속가공에서는 펄스 레이저에 비해 가공속도가 뛰어난 장점이 있다.

### 재료반응 특성

극초단 펄스를 이용한 레이저 가공에서 가장 큰 특징은 레이저와 재료의 상호반응 시 발생하는 열이 전파되는 시간을 갖지 못하기 때문에 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는 장점이 있다. 다시 말하면, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적인 레이저 가공에서 나타나는 열확산 현상은 거의 발생되지 않는다는 의미이다. 열확산은 취성이 높은 재질인 경우 미소크랙(micro-crack)을 유발하므로 극초단 펄스 레이저는 세라믹과 같은 취성재료에도 유리하다고 할 수 있다.

이와 같이 극초단 펄스 레이저는 열확산을 방지하는 효과 외에 가공물의 주변에 형성되던 용융물(melt), 및 잔유물(debris)의 발생도 대부분 억제할 수 있고 발생된다 하더라도 매우 미세한 파우더 형태이며 쉽게 제거할 수 있다.

일반적으로 Q-스위칭 및 램프여기방식으로 사용되고 있는 기존의 레이저는 재료가공 시 많은 잔유물

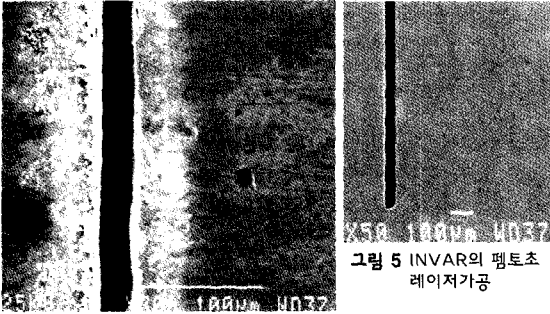


그림 4 INVAR의 나노초 레이저 가공

을 형성시킨다. 이와 같은 잔유물은 재료에 따라 다르지만 가공 시 고온이 된 후 표면에 부착된 것으로서 제거하기 까다로운 경우가 대부분이다. 그림 4 및 그림 5에서 볼 수 있듯이 나노초 레이저에 의한 초 내열강(INVAR)의 가공은 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공과 비교하면 용융물 및 잔유물에 의한 오염이 심각하다. 또한 열 영향부가 넓게 형성되었으며 재응고된 용융물층이 가공면을 따라 존재한다. 이러한 이유로 정밀가공을 위해서는 잔유물 제거를 위한 후처리공정이 따로 필요 없는 극초단 펄스 레이저가 필요하다는 것을 알 수 있다.

극초단 펄스 레이저의 또 하나의 특성은 서브 마이크론 크기의 가공특성이다. 만약 가공의 목적이 빛을 이용하여 가장 작은 구조물을 제작하는 것이라면 가능한 가장 작은 초점을 만드는 것이 중요하다. 레이저의 초점크기는 몇몇 변수에 의해 결정되는데 광학적인 한계를 가지고 있다. 즉 파장이 0.8마이크론이라면 만들 수 있는 가장 작은 초점은 그 이하가 되기 힘들다. 또한 기존의 레이저 사용자 가공크기는 열영향도 고려해야 하므로 10마이크론 이하의 재료가공은 어려운 실정이다. 그렇지만 열영향이 거의 없는 극초단 펄스 레이저는 이러한 가공을 가능하게 만들고 있다.

가우시안 빔을 가지는 펄스의 경우 가운데 부분이 높은 에너지 밀도를 가지고 가운데에서 멀어지면서 에너지는 순차적으로 감소한다. 여기서 등장하는 극초단 펄스 레이저 가공의 중요한 메커니즘 중 하나는 임계치 가공(threshold process)특성이다. 만약 가공물의 표면에 초점을 위치시켰을 경우 빔의 에너

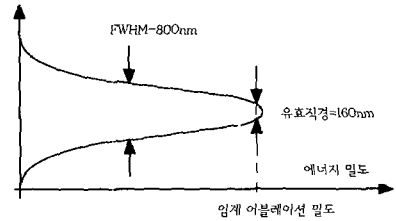


그림 6 서브 마이크론 가공의 원리

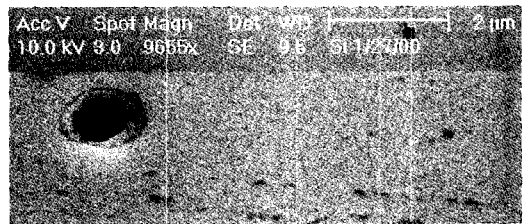


그림 7 실리콘의 서브 마이크론 가공

지가 임계값 이상이면 가공이 이루어진다. 그때 매우 제한적인 부분에서 재료를 제거할 수 있으며 초점크기의 1/5이 될 수도 있다. 즉 800nm의 파장을 가지는 펄스 레이저를 이용하여 160nm의 직경을 가지는 홀을 가공할 수 있다는 의미이다<sup>(5)</sup>.

## 금속가공

금속의 표면층에서 레이저 에너지가 일단 열에너지로 변환되면 표면 열원으로 생각할 수 있게 되며, 이 표면 열원이 금속내부로 전도되어 가열이 이루어지게 된다. 이때 금속 내부의 열전달은 금속의 열전도도에 비례하고, 그 비열에 반비례한다. 레이저 빔과 재료의 반응초기에는 레이저 빔은 준자유전자(quasi-free electron)에 에너지를 전이시킨다. 이는 빔의 조사와 거의 동시에 이루어지며 이후 원자, 분자, 및 결정격자로 전이가 일어나는데 약 10 피코초 가량의 시간이 소모된다<sup>(6)</sup>. 즉 레이저가 조사되고 난 뒤 열이 발생하는 데까지 걸리는 시간은 약 10피코초라는 의미이다. 금속가공에서 결정격자의 열반응은 펄스폭에 의해 결정이 되는 것이 아니고 재료의 반응시간(relaxation time)에 의해 정해진

다. 이는 금속가공에 있어서는 동일출력의 피코초 레이저와 펨토초 레이저의 가공 성능은 큰 차이가 없다는 의미가 되기도 한다.

그러나 펨토초 레이저의 경우 광학적 한계성으로 인하여 피코초 레이저보다 높은 출력 특성을 가지기 힘들다. 즉, 재료가공시간 및 가공량은 평균 출력에 의해 좌우되므로 높은 결합력을 가진 재료에 대한 빠른 가공시간을 필요로 하는 작업의 경우는 상대적으로 높은 평균출력을 가진 피코초 레이저가 다소 유리하다고 볼 수 있다.

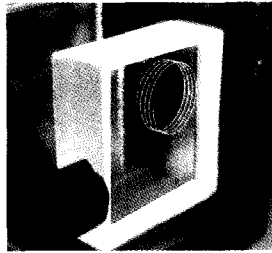


그림 9 광도파로 제작

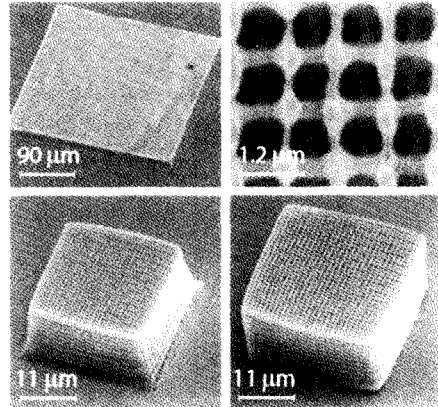


그림 10 광결정격자(photonic crystal lattice)

### 투과물질의 내부가공

투과물질의 재료 내부가공은 주로 펨토초 레이저를 이용하여 수행되고 있다. 800nm의 파장을 가지는 Ti:Sapphire 펨토초 레이저 빔은 일반유리 및 크리стал을 투과하나 다광자 흡수 및 터널이온화 등의 비선형 광학현상이나 양자현상이 유기되어 다수의 운반매체가 극히 짧은 시간영역에서 생성하고, 조사부위에 남겨진 정전하를 갖는 핵이 쿨롱(Coulomb)폭발을 일으키는 빠른 프로세스가 공간형성에 기여한다<sup>(9)</sup>. 이와 같은 방법은 300nm 이하의 미소공간에서 굴절률의 변화를 유기하거나 발광성 결합이 생성하여 1.2Tbit/cm<sup>5</sup>의 기록밀도를 가지는 고밀도 3차원 광메모리도 제작할 수 있다.

펨토초 레이저를 이용한 미세 광학은 미소 기계장치에도 이용할 수 있고 광도파로, 및 3차원 광결정

같은 광통신 소자의 제작에도 이용할 수 있다. 그림 9는 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 광도파로에 녹색광을 조사하여 가시화한 사진으로서 유리의 내부에 3차원 형상가공이 용이하다는 것을 보여주고 있다<sup>(7)</sup>. 또한 펨토초 레이저를 이용한 투과물질 내의 3차원 형상가공은 무기재료뿐만 아니라 폴리머와 같은 유기물에도 적용할 수 있다. 그림 10은 펨토초 레이저를 이용하여 폴리머의 가공에 적용한 대표적인 예로서 모노머(monomer)가 함유된 레진(resin) 내부에 빔의 초점이 맺히게 하면 이광자 공정(two-photon process)이 유도된다. 이를 이용하면 국부적으로 폴리머(polymer)를 형성시킬 수 있다<sup>(9)</sup>. 이러한 이광자 공정에 의해 생성된 선풍은 200nm로서 해상도의 한계보다 낮은 선풍을 가진 광결정격자를 제작할 수 있었다.

### 기타 재료

이외에도 기계가공이 어려운 알루미늄, 실리콘 카바이드 등과 같은 세라믹, 및 반도체의 미세가공에도 많이 사용된다. 특히 웨이퍼 절단의 경우 열영향이 없고 잔유물이 없기 때문에 여러 공정을 거쳐 패턴이 형성된 마이크로 칩을 정밀하게 분리하기에 용이하다고 판단된다. 또한 휠 커터를 사용하는 방법에 비하여 다양한 자유도의 이동경로를 가지고 있으므로 복잡한 형상의 모양도 쉽게

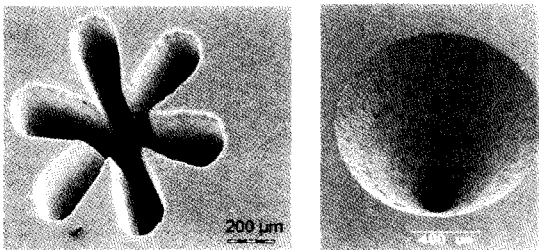


그림 8 피코초 레이저를 이용한 금속노즐의 가공 예<sup>(7)</sup>

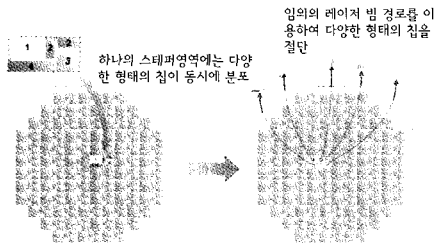


그림 11 웨이퍼의 절단예(Source: Xsil Ltd., Ireland)

자를 수 있는 장점도 있다<sup>(10)</sup>.

의료분야에서도 극초단 펄스 레이저를 이용한 외과수술을 하게 되면 주위의 열손상 없이 깨끗한 수술이 가능하다. 이를 위해 미국의 국립 로렌스 리버모어 연구소 등에서는 수술용 펄스 레이저 시스템을 개발하고 있다<sup>(11)</sup>.

### 극초단 펄스 레이저 가공의 향후 과제

극초단 펄스 레이저는 재료의 열반응 속도보다 빠른 시간 내에 빔을 조사하므로 비열적 성질을 가지고 있다. 이를 이용하여 기존의 레이저 가공법으로는 시도할 수조차 없었던 서브미크론 가공 및 비열적 가공특성을 이루어냈다. 또한 투과물질 재료의 내부에도 서브미크론 크기의 패턴을 3차원으로 가공하여 광통신 분야, 전자, 및 바이오 관련 산업의 광범위한 분야에 응용될 것으로 전망된다.

그러나 현재 극초단 펄스 레이저는 몇몇 한계점을 보이고 있다. 특히 펄스 레이저의 경우 광학계의 조작 및 구성이 점차 간편해지고 있으나 비전문가가 운용하기에는 아직도 복잡하며 재료반응 시 X-선이 발생하므로 양산화 시 고려되어야 한다. 또한 생산성을 향상시키기 위해서 고출력화가 이루어져야 되고 동시에 펄스 반복률도 높아져야 된다. 이외에도 극초단 펄스 레이저는 빔이 재료에 도착하기 전 공기 중에서 발생하는 비선형광학현상과<sup>(6)</sup> 일부 폴리머의 가공시 발생하는 열영향도<sup>(12)</sup> 해결해야 될 과제로서 남아 있다.

### [참고 문헌]

- (1) <http://www.kepco.co.kr>
- (2) B. E. A. SALEH, and Malvin Carl Teich, 1997, "Fundamentals of Photonics". New York: Wiley, p. 522.
- (3) D. E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, 1991, "60-fsec pulse generation from a selfmode locked Ti:Sapphire laser", Opt. Lett. 16, p. 42.
- (4) D. Strickland, and G. Mourou, 1985, "Compression of amplified chirped optical pulses", Opt. Commun. 56, p. 219.
- (5) <http://www.cmxr.com>
- (6) D. Breitling, A. Ruf, and F. Dausinger, 2004, "Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses", SPIE 5339, pp. 49~63.
- (7) <http://www.lumera-laser.com>.
- (8) 오기동, 2004, "펄스 레이저를 이용한 재료의 미세가공", KISTI 기술동향.
- (9) Y. C. Powell, 2004, "Two-photon precess cures hybrid polymers into photonic-crystal lattices" laser focus world, p. 32.
- (10) M. Schmidt, and G. E er, 2003, "The Future of Lasers in Electronics", ICALEO, p. 112.
- (11) 이종민, 2003, "펄스 과학기술 연구개발 현황", 레이저기술, p. 28.
- (12) S. Baudach, J. Bonse, J. Kruger, and W. Kautek, 2000, "Ultrashort pulse laser ablation of polycarbonate and polymethylmethacrylate", Appl. Surf. Sci. 154-155, p. 555.