

극초단 펄스 레이저 응용 미세가공기술

손현기, 이제훈, 김재구, 신동식 | 한국기계연구원

1. 서론

레이저는 1970년대 초 처음으로 재료가공분야에 적용되었으며, 1980년대부터 미세가공분야에 응용되기 시작하였다. 이후 자동차, 조선, 항공우주, 전자, 반도체 등 다양한 산업분야에서 용접, 절단, 표면처리, 마킹 등의 공정 개발에 널리 활용되어 왔다.

레이저 미세가공기술에서 가공정밀도를 결정하는 중요한 인자 중에 하나가 펄스폭(pulse width)이다. 펄스폭은 레이저빔과 재료 간의 상호작용 시간을 결정짓는 인자이기 때문에 일반적으로 펄스폭이 길어질수록 레이저빔에 의한 열영향부(heat affected zone)가 넓어져서 가공정밀도가 떨어지게 된다. 이에 레이저의 펄스폭을 줄이기 위한 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며, 1990년대에 이르러 극초단 펄스 레이저(ultrashort pulse laser)가 개발되기 시작하였다.

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공은 비열적(non-thermal) 가공이다, 즉, 펄스폭이 극단적으로 짧기 때문에 레이저빔에 의한 열영향부를 최소화할 수 있어 sub- μm 급 가공이 가능하다. 또한, 극초단 펄스 레이저의 비선형(non-linear) 광학현상으로 인한 재료 무의존성(independency)을 가지고 있기 때문에 어떠한 재료도 가공할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점을 가진 극초단 펄스 레이저를 첨단산업분야인 IT/BT/NT 분야의 초정밀 핵심부품 제작에 응용하고자 하는 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다.

본 글에서는 극초단 펄스 레이저의 특성과 이를 이용한 미세가공기술 분야의 동향에 대해 간략하게 소개하고자 한다.

2. 극초단 펄스 레이저

레이저빔이 재료 표면에 조사되면 전자의 진동이 발생하고, 이 진동이 격자로 전달되어 재료에 열이 발생하게 된다. 이 현상을 열확산(thermal relaxation)이라고 한다. 재료에 따라 열확산 시간이 다르지만, 금속재료의 경우에는 수십-수 피코초(picosecond) 사이에서 열확산 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 극초단 펄스 레이저는 그 펄스폭이 재료의 열확산 시간보다 짧기 때문에 레이저빔이 조사되는 부분만 제거되어 초정밀 가공이 가능하게 된다.

현재까지 개발된 극초단 펄스 레이저는 Nd:YVO₄를 매질로 사용하는 피코초 레이저와 Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 펨토초(femtosecond) 레이저가 있다. 여기서 피코초는 시간의 단위로서 1조분의 1초(10⁻¹²)이며, 펨토초는 1000조분의 1초(10⁻¹⁵)에 해당한다(그림 1 참조). 이것은 극도로 짧은 시간으로, 예를 들면, 100 펨토초는 빛이 머리카락 두께의 반도 진행하지 못하는 시간이다. 또한, 펨토초 레이저는 극도의 높은 출력을 가지는데 순간적으로 펄스 당 수백 GW까지의 첨두출력(peak power)을 방출한다. 한국전력의 2003년도 통계에^[1] 의하면 우리나라의 모든 발전소가 동시에 생산할 수 있는 최대전력이 47 GW라는 사실과 비교해 보면 펨토초 레이저의 펄스가 경이로운 첨두출력 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

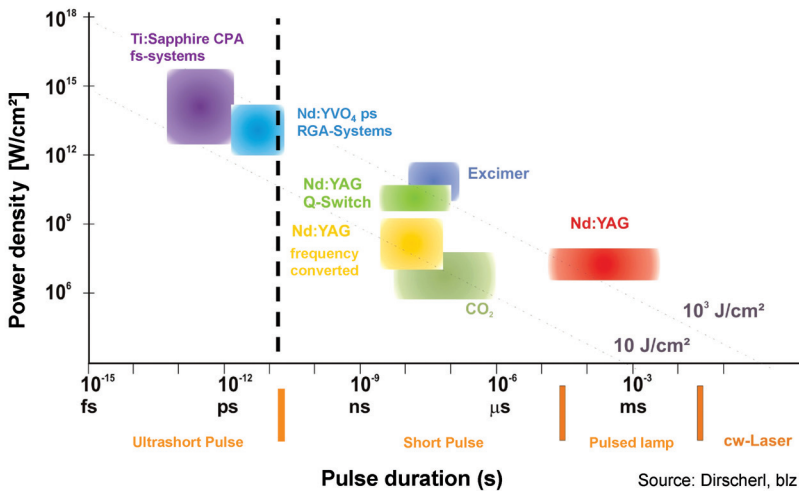


그림 1. 레이저의 펄스폭(pulse duration)과 출력밀도(power density) 분포

기존 펄스 레이저의 여기방식은 그 펄스폭에 따라 램프 여기방식 또는 Q-스위칭 (switching) 방식^[2]이다. 이에 반해 피코초와 펨토초 레이저는 모드잠금(mode-locking)방식^[2] 사용하고 있다. 모드잠금방식은 공진기 내부에서 발생하는 수많은 무질서한 종축방향모드들을 규칙적으로 재배열하여 서로 보강 및 상쇄간섭과정을 거쳐 펄스폭이 짧고, 첨두출력이 큰 펄스를 생산하는 방식이다. 1990년대 초 Kerr 렌즈 모드잠금방식이^[3] 개발되면서 Ti:Sapphire를 매질로 사용하는 고체 펨토초 레이저 기술이 등장하였고, 반도체 포화 흡수거울(Semiconductor Saturable Absorber Mirror: SESAM)을 이용한 새로운 모드잠금방식이 개발되면서 극초단 펄스 레이저의 출력 및 안정성이 크게 향상되었다. 또한, 극초단 펄스를 손실 없이 효율적으로 증폭시키는 CPA(chirped-pulse amplification) 기술^[4]의 개발은 Ti:Sapphire 펨토초 레이저가 측정이 아닌 미세가공공정에 적용되는데 주요한 역할을 하였다. 최근에는 Cr- 및 Yb-매질을 이용한 다이오드 여기(diode-pumping) 방식을 채택한 간결하고 효율적인 펨토초 레이저가 개발 되었다. 그러나 Ti:Sapphire 펨토초 레이저는 구성 광학계의 특성상 평균출력(average power)이 기존의 레이저에 비해 낮은 단점을 보유하고 있다. 즉 첨두출력은 수백 GW이지만 평균출력은 일반적으로 2 W 미만의 값을 가진다. 평균출력이란 첨두출력에 초당 펄스 수(Hz)와 펄스폭(s)을 곱한 값으로서, 이는 재료의 가공량을 나타내는 지표가 되므로 금속, 세라믹과 같이 결합력이 강한 재질을 가공할 때 중요한 변수로 작용한다.

이러한 펄스 레이저의 단점을 보완하기 위하여 Nd:YVO₄를 매질로 사용하는 피코초 레이저가 최근 개발되어 상용화되었다. 이는 펄스 레이저에 비하여 고출력 특성을 나타낼 뿐만 아니라 내부 구성 광학계가 펄스 레이저에 비하여 간략하며, 비선형 매질(SHG, THG, 및 FHG)을 이용하여 고조파를 발생시키므로 자외선도 비교적 쉽게 조사할 수 있다. 피코초 레이저의 경우 일반적으로 10 W의 평균출력을 갖는 레이저빔도 큰 어려움 없이 조사할 수 있으므로, 금속가공에서 열반응을 최소화하는 범위 내에서 펄스 레이저에 비해 가공속도가 뛰어난 장점이 있다.

3. 극초단 펄스-재료 반응 메커니즘

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공의 가장 큰 특징은 레이저빔과 재료 간의 상호반응 시 발생하는 열이 전파되는 시간을 갖지 못하기 때문에 재료의 열적손상이나 구조변화를 발생시키지 않는다는 것이다. 즉, 재료의 국부적인 부분이 극도의 짧은 시간 내에 제거되어 일반적인 레이저 가공에서 나타나는 열확산 현상은 거의 발생되지 않는다. 열확산은 취성이 높은 재질인 경우 미소크랙(micro-crack)을 유발하므로 극초단 펄스 레이저는 세라믹과 같은 취성재료가공에도 유리하다고 할 수 있다. 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 분말형태이므로 쉽게 제거할 수 있다 (그림 2 참조).

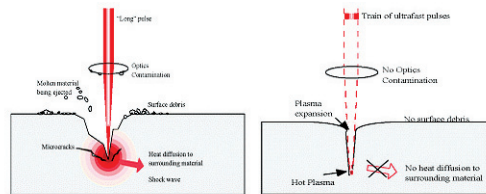


그림 2. 장파장 펄스 레이저와 초단파 펄스 레이저의 가공 특성 비교^[5]

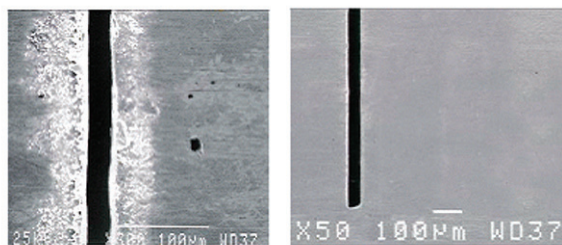


그림 3. 나노초 펄스(좌)와 극초단 펄스(우)를 이용한 INVAR의 슬롯(slot) 가공

일반적으로 램프 여기방식 또는 Q-스위칭 방식을 사용하는 기존의 레이저는 재료가공 시 많은 잔유물이 발생한다. 이 잔유물은 재료에 따라 다르지만 가공 시 고온이 된 후 표면에 부착된 것으로서 제거하기 까다로운 경우가 대부분이다. 그림 3에서 나노초(nanosecond) 레이저와 펄스 레이저를 이용하여 초내열강(INVAR)을 가공한 예를 나타내었다. 나노초 레이저에 의한 초내열강의 가공은 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공과 비교하면 용융물 및 잔유물에 의한 재료표면의 오염이 심각한 것을 볼 수 있다. 또한 열 영향부가 넓게 형성되었으며 재응고된 용융

물 층이 가공면을 따라 존재한다. 이러한 이유로 정밀가공을 위해서는 잔유물 제거를 위한 후처리공정이 필요 없는 극초단 펄스 레이저가 필요하다는 것을 알 수 있다^[5].

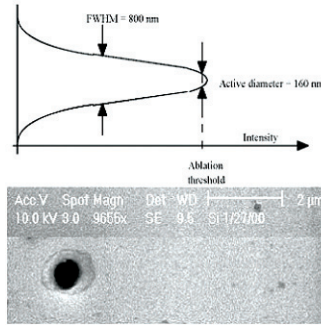


그림 4. 극초단 펄스 레이저를 이용한 sub- μm 급 가공 예(실리콘 소재 홀 가공)

극초단 펄스 레이저는 sub- μm 급 초정밀 가공이 가능하다는 특징이 있다. 레이저 미세가공공정에서 레이저빔의 스폿크기 (spot size)는 가공정밀도에 큰 영향을 미치는 변수들 중 하나이다. 실제 가공에서 레이저빔이 광학계를 이용하여 재료 표면까지 이송되기 때문에 레이저빔의 스폿크기는 광학적인 한계에 의해 제한된다. 즉, 파장이 0.8 μm 이라면 레이저빔을 이용하여 재료를 가공하는 경우에 스폿의 최소 크기를 파장이하로 만들기 어렵다. 또한 레이저빔에 의한 열영향부를 고려하면 기존의 레이저를 이용하는 경우에는 sub- μm 급 초정밀가공은 어렵다고 할 수 있다. 그러나 극초단 펄스 레이저의 경우에는 임계치 가공(threshold process) 특성을 이용하면 이것이 가능하다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 가우시안(Gaussian) 에너지 분포를 갖는 레이저빔은 빔의 중심 부분에서 에너지 밀도가 상대적으로 매우 높다. 따라서 재료 표면에 초점을 위치시켰을 때 실제 가공이 일어나는 부분은 레이저빔의 에너지가 임계값 이상인 부분으로 국한된다. 경우에 따라서 초점직경의 1/5이 될 수도 있다. 즉 파장이 800 nm인 펄스 레이저를 이용하여 160 nm의 직경을 가지는 홀을 가공할 수 있다는 의미이다^[5].

4. 금속가공

금속재료 표면에 조사된 레이저 에너지가 금속 내부로 전달되는 메커니즘은 다음과 같다. 재료 표면에 도달한 레이저 빔은 준자유전자(quasi-free electron)에 에너지를 전이시킨다. 이것은 레이저빔의 표면에 조사됨과 거의 동시에 이루어지며, 이후 순차적으로 원자, 분자 및 결정격자로 전이가 일어나는데 약 10 피코초 가량의 시간이 소요되는 것으로 알려져 있다^[6]. 다시 말하면, 레이저빔이 조사되고 난 후 재료내부에 열이 발생하는데 까지 걸리는 시간이 약 10 피코초라는 의미이다.

금속가공의 경우에 결정격자의 열반응은 펄스폭에 의해 결정이 되는 것이 아니고 재료의 열확산 시간에 의해 정해진다. 이는 금속가공에 있어서는 펄스폭이 열확산 시간보다 짧은 경우에는 동일 출력의 피코초 레이저와 펄스 레이저의 가공 성능은 큰 차이가 없다는 것을 의미한다. 그러나 펄스 레이저의 경우 광학적 한계로 인하여 피코초 레이저 보다 높은 출력특성을 가지기 힘들다. 재료가공시간 및 가공량은 평균출력에 의해 좌우되므로 금속재료

를 가공하는 경우에는 상대적으로 높은 평균출력을 가진 피코초 레이저가 다소 유리하다고 볼 수 있다.

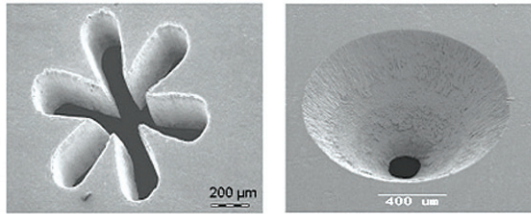


그림 5. 피코초 레이저로 제작한 금속 노즐^[7]

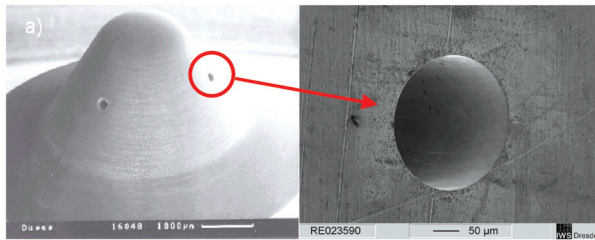


그림 6. 피코초 레이저를 이용한 사출성형 몰드의 노즐 가공 (출처 : R. Giedl, GFH)

5. 광투과재료의 내부가공

유리, 폴리머 등의 투과재료의 내부가공에는 주로 펨토초 레이저가 사용된다. 800 nm의 파장을 가지는 Ti:Sapphire 펨토초 레이저빔은 일반유리 및 수정(crystal)을 투과하나, 다광자 흡수(multi-photon absorption) 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^[8]. 이와 같은 방법은 300 nm 이하의 미소공간에서 굴절률 변화를 유기하거나 발광성 결함을 생성하여 1.2 Tbit/cm³의 기록밀도를 가지는 고밀도 3차원 광메모리(optical memory)도 제작할 수 있다.

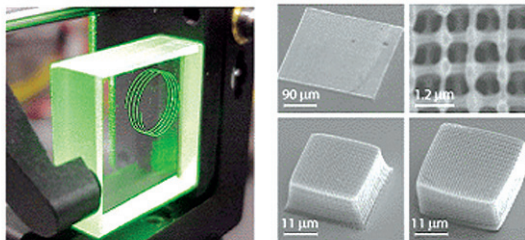


그림 7. 펨토초 레이저로 유리내부에 제작한 3차원 광도파로(좌)와 폴리머 광결정 격자(우)

펨토초 레이저를 이용하여 광도파로(optical waveguide), 3차원 광결정(photonic crystal) 등과 같은 광통신 소자를 제작할 수 있다. 그림 7은 펨토초 레이저를 이용하여 제작된 광도파로에 녹색광을 조사하여 가시화한 사진의

로서 유리의 내부에 3차원 형상가공이 용이하다는 것을 보여주고 있다^[5]. 또한 펨토초 레이저를 이용한 투과물질 내의 3차원 형상가공은 무기물뿐만 아니라 폴리머와 같은 유기물에도 적용할 수 있다. 펨토초 레이저를 이용한 폴리머 가공의 대표적인 예로서 단량체(monomer)가 함유된 레진(resin) 내부에 레이저빔의 초점이 맺히게 하면 이광자 공정(two-photon process)이 유도되는 것이다. 이를 이용하면 국부적으로 폴리머(polymer)를 형성시킬 수 있다^[9]. 이러한 이광자 공정에 의해 생성된 선폭은 200 nm로서 해상도 한계보다 치수영역에서 광결정 격자를 제작할 수 있다.

6. 기타 재료의 가공

극초단 펄스 레이저는 세라믹과 반도체의 미세가공에도 많이 사용된다(그림 8,9 참조). 특히 웨이퍼 절단의 경우 열영향이 없고 잔유물이 없기 때문에 여러 공정을 거쳐 패틴이 형성된 마이크로 칩을 정밀하게 분리하기에 용이하다고 판단된다. 그림 9에서 웨이퍼 상에 복잡하게 형성된 마이크로 칩의 절단 예를 보여주고 있다. 이러한 경우 휠 커터를 사용하는 방법에 비하여 다양한 자유도의 이동경로를 가지고 있으므로 복잡한 형상의 모양도 쉽게 자를 수 있는 장점이 있다는 것을 알 수 있다^[10].

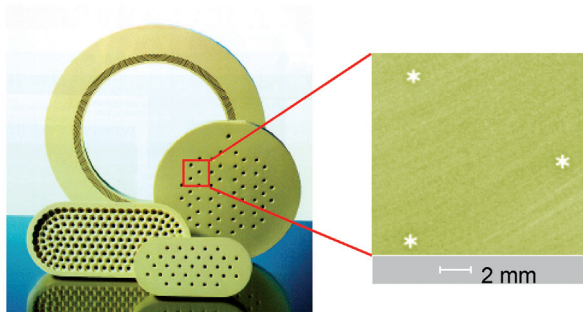


그림 8. 피코초 레이저를 이용한 세라믹 노즐 가공

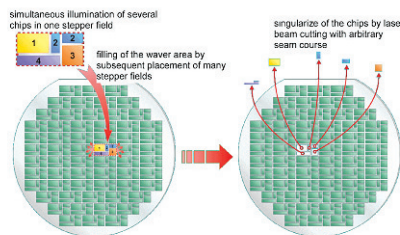


그림 9. 극초단 펄스 레이저를 이용하여 웨이퍼 상에 제작된 마이크로 칩을 분리하는 공정 개념도(출처: Xsil Ltd., Ireland)

의료분야에서도 극초단 펄스 레이저를 이용하여 외과수술을 하게 되면 수술부위 주위에 열손상없이 깨끗한 수술이 가능하다. 미국의 국립 로렌스 리버모어 연구소 등에서는 수술용 펨토초 레이저 시스템을 개발하고 있다^[11].

7. 국내외 미세가공기술 동향

역사적으로 펨토초 레이저와 재료 간의 상호 작용에 대한 연구는 1990년대 중반부터 미국의 국립연구소인 LLNL을 중심으로 진행되었으며, CPA기술의 개발로 고효율 펨토초 레이저 펄스의 생성이 가능해짐에 따라 1990년대 후반부터 펨토초 레이저를 이용한 재료가공에 대한 연구가 선진국의 일부 국립연구소에서 진행되었다.

미국에서는 Purdue 대학, MIT, Harvard 대학, LLNL 등을 중심으로 레이저 미세가공기술에 대한 연구가 진행되어 왔다. Harvard 대학의 E. Mazur 그룹은 광메모리 소자 개발을 목표로 파장이 800 nm, 펄스폭이 100 펨토초인 펨토초 레이저 펄스를 유리 내부에 집광시킴으로써 비선형(non-linear) 현상인 자기집속현상(self-focusing)을 이용하여 직경이 200 nm인 구조개질을 얻었다. 이는 차세대 광메모리로 제작에 응용이 기대되나 집적도를 더욱 높일 수 있는 기술의 개발이 요구되고 있다. Michigan 대학의 Ultrafast optical science 센터의 Mourou 교수진을 비롯하여 Los Alamos Laboratory, UC Berkeley, UCLA, UC Santa Barbara, UC San Diego, Stanford, CREOL, Illinois 대학 등지에서 NSF 과제로 펨토초 레이저와 관련한 다양한 분야에 대해 많은 연구를 수행하고 있으며, 국가차원에서 이 분야의 중요성을 일찍부터 인식하여 많은 투자가 이루어지고 있어 상당한 기술 진척이 이루어진 것으로 알려져 있다. 그 가운데 펨토초 레이저를 시각교정 및 생체치료에 응용하는 연구도 진행되고 있다.

일본에서는 Kyoto 대학, RIKEN 연구소, Osaka 대학 등지에서 레이저 미세가공공정에 대한 연구가 진행되어 왔다. Osaka 대학의 Kawata 그룹에서는 이광자 흡수현상을 이용하여 폴리머 내부에 특정형상이 나노 크기인 3차원 황소 형상을 제작하였다(그림 10 참조). 펨토초 레이저는 종래에 레이저와 달리 다양한 비선형 현상을 유지하므로 기존의 레이저 가공에서 불가능했던 다양한 형태의 3차원 가공이 가능하다는 것을 보여준 사례이다. Tokushima 대학의 Misawa 그룹에서는 레이저 미세가공공정을 화학 에칭공정과 결합함으로써 투명재료인 사파이어에 10-50 μm 의 미세 채널을 형성하였다. 이러한 투명재료 내부에 3차원 마이크로 채널을 형성하는 기술은 향후 바이오칩 및 μ -TAS(Total Analysis System) 등에 응용이 가능하다. 또한, 광경화성 폴리머 내부에 이광자 흡수 현상을 이용하여 3차원 광결정 격자를 제작하고, 그 광학특성을 조사했다. 반사율이 20%정도로 향후 반사율을 높일 수 있는 기술적 보완이 요구되고 있다. 이와 같은 광결정 격자의 광단힘 효과를 이용하면 미소 공진기 제작이 가능하며 이를 집적화하여 광도파로나 광집적회로 분야에 적용이 가능하다.

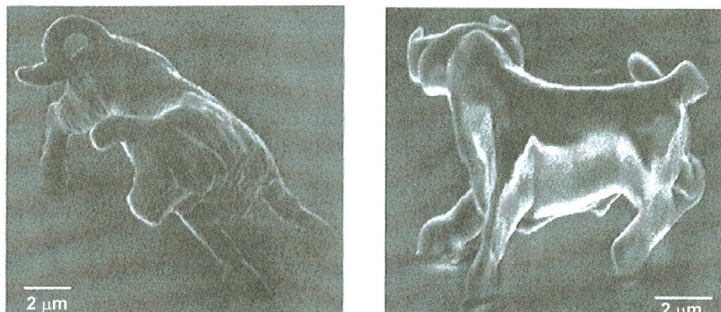


그림 10. 펨토초 레이저의 이광자 흡수법을 이용한 10 μm 크기의 황소 (Osaka 대학)

한편 독일에서는 Max-Born 연구소, Siemens 사, IFSW, LZH 등에서 연구가 진행되고 있다. Max-Born 연구

소에서는 레이저 펄스에 의해 유기된 내부 개질이 펄스 수가 증가함에 따라 표면 쪽으로 성장하는 메커니즘을 규명하였다. 또한 최근 Lumeras사는 Diode-pumped Nd:YVO₄ 피코초 레이저를 개발하였다. 100 kHz의 펄스 반복률(repetition rate), 300 μ J의 펄스에너지로서 펄스폭이 13 피코초인 STACCATO와 500 kHz, 40 μ J, 10 피코초인 RAPID를 출시하였다. 이는 재료가공 시 짧은 펄스폭을 이용하는 장점 외에도 높은 광에너지를 가지는 자외선 영역의 빔을 방출하므로 특히, 금속재료의 미세가공에 유리한 것으로 판단된다.

국외의 연구 활동에 비교하여 국내의 펨토초 및 피코초 레이저에 대한 연구는 몇몇 정부 출연연구소, 대학, 업체 등에서 진행되고 있으나, 국외의 기술 및 연구 수준에 비해서는 아직 초보 단계라고 할 수 있다.

2002년에 한국표준연구원에서 펄스폭이 130 펨토초, 펄스 반복율이 1 kHz인 펨토초 레이저의 이광자 흡수현상을 이용한 미세가공에 대한 연구결과를 처음 발표하였다. 한국기계연구원에서는 높은 펄스 반복율(>100 kHz)의 펨토초 레이저를 이용하여 절연체 및 금속재료의 초고속 극미세가공에 대한 연구를 진행하고 있으며, 최근 펄스폭이 10 피코초, 펄스 반복율이 500 kHz, 최대평균 출력이 약 10 W 인 피코초 레이저가 설치되어 이를 이용한 금속재료의 미세가공에 대한 연구가 진행되고 있다. 그림 11은 국내 펨토초 레이저 가공업체인 (주)포코에서 가공한 광도파로용 U-그루브를 나타낸다. 한국과학기술원에서는 펨토초 레이저의 이광자 흡수현상을 이용하여 액상의 폴리머 내부에 나노급 패터닝 실험을 수행한 바 있다.

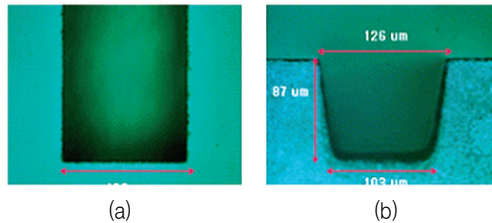


그림 11. 펨토초 레이저로 가공된 광도파로용 U-그루브
(a)상면 (×500), (b)전면 (×500)

8. 맺음말

극초단 펄스 레이저를 이용한 미세가공공정은 레이저빔과 재료 간의 반응시간이 재료의 열확산 시간보다 짧은 비열적 공정이다. 따라서 레이저빔에 의한 열영향부가 거의 발생하지 않으므로, 기존의 레이저 가공공정에서는 불가능했던 sub- μ m급 초미세가공이 가능하다. 또한, 유리 및 폴리머 등의 투과물질 재료의 내부에 sub- μ m급 크기의 3차원 패터닝 가공이 가능하기 때문에 광통신 분야, 전자, 반도체, 바이오 관련 산업 등의 광범위한 첨단산업분야에서 고부가가치 초정밀 핵심부품제작에 폭넓게 응용될 것으로 전망된다.

이를 위해서는 가공 메커니즘의 규명, 광학계 조작 및 구성의 간편화, 레이저와 재료의 반응 시 발생하는 X-선의 차단, 생산성을 향상시키기 위한 출력 및 펄스 반복율 향상 등을 통한 새로운 미세가공기술 개발을 위한 연구가 지속적으로 진행될 수 있도록 국가차원의 지원이 필수적이다.

❁ 참고 문헌

- [1] <http://www.kepco.co.kr>
- [2] B. E. A. SALEH, and Malvin Carl Teich, “Fundamentals of Photonics”. New York: Wiley, p. 522, 1997
- [3] D.E. Spence, P. N. Kean, and W. Sibbett, “60-fsec pulse generation from a self mode-locked Ti:Sapphire laser”, Opt. Lett. 16, p. 42, 1991
- [4] D. Strickland, and G. Mourou, “Compression of amplified chirped optical pulses”, Opt. Commun. 56, p. 219, 1985
- [5] <http://www.cmxr.com>
- [6] D. Breitling, A. Ruf, and F. Dausinger, “Fundamental aspects in machining of metals with short and ultrashort laser pulses”, SPIE 5339 p. 49-63, 2004
- [7] <http://www.lumera-laser.com>
- [8] 오기동, “펨토초 레이저를 이용한 재료의 미세가공”, KISTI 기술동향, 2004
- [9] Y. C. Powell, “Two-photon process cures hybrid polymers into photonic-crystal lattices” laser focus world, p. 32, 2004
- [10] M. Schmidt, and G. E. er, “The Future of Lasers in Electronics”, ICALEO, p. 112, 2003
- [11] 이종민, “펨토 과학기술 연구개발 현황”, 레이저기술, p. 28, 2003



손 현 기

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 피코초 레이저 응용 미세가공
· E-mail : hsohn@kimm.re.kr



이 제 훈

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 센터장
· 관심분야 : 레이저 및 전자빔 응용 가공기술 및 시스템
· E-mail : jaeholee@kimm.re.kr



김 재 구

· 한국기계연구원 나노공정장비연구센터 선임연구원
· 관심분야 : 레이저 미세가공
· E-mail : gugu99@kimm.re.kr



신 동 식

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 연구원
· 관심분야 : 엑시머 레이저 응용 미세제거가공
· E-mail : dsshin@kimm.re.kr