



펨토초 레이저를 이용한 극미세 가공기술

김재구, 신보성, 장원석, 최지연, 황경현 / 한국기계연구원

오늘날 이른바 6T라 불리는 정보기술(IT), 생명기술(BT), 나노기술(NT), 항공우주기술(ST), 환경기술(ET), 문화기술(CT)은 눈부신 발전을 거듭하고 있다. 이중에서도 나노기술이 다른 여타 분야의 발전에 많은 영향을 미치는 중요한 기술이라 할 수 있으며, 나노기술을 크게 보면 나노 크기로 가공하는 기술, 나노 영역에서 나타나는 새로운 물리 현상을 응용하여 장비의 성능을 향상 시키는 기술, 그리고 미세한 영역의 현상을 측정, 예측하는 기술로 나눌 수 있고, 나노 크기로 가공하는 기술 중 한 분야로 레이저를 응용한 기술을 들 수 있다. 기존의 레이저 가공 방법을 통해 나노 영역, 즉 100에서 10 나노미터에 이르는 영역까지 가공하는 것은 무리가 있지만, 이에 근접하는 서브마이크로 영역의 가공기술은 많이 연구 되어왔다. 나노 영역의 가공을 위해서는 레이저와 다른 공정을 융합한 기술을 이용하는 것이 필요하며, 이를 통해 나노 영역에 도달하는 연구가 활발한 추세이다.

레이저 가공의 역사는 1960년대 레이저의 개발이 이루어진 직후부터 급속하게 발전하였다. 레이저를 이용한 용접, 절단, 천공 등의 가공기술은 이미 레이저의 역사와 함께 태동하였고 의료 분야의 수술 및 문화재의 복원분야에까지 활발하게 적용되고 있다. 이토록 많은 분야에 이용되고 있는 레이저 가공의 장점을 한마디로 축약하자면 비접촉식으로 많은 에너지를 좁은 영역에 빠르게 조사하여 짧은 시간 안

에 손상이 거의 없이 가공할 수 있다는 점이다. 따라서 높은 첨두 출력과 짧은 펄스폭을 얻을수록 미세한 정밀가공이 가능해진다. 기술발전과 비례하여 요구되는 부품의 크기가 상상을 초월할 정도로 작아지는 요즘의 기술추세에 따르자면 극초단 펄스 레이저 가공은 초미세 부품제작을 위한 강력한 도구로서 많은 의미를 지닌다. 많은 연구자들이 펨토초(1fs = 10⁻¹⁵sec) 레이저를 이용한 극미세 가공기술을 연구하는 까닭도 여기에 있다.

극초단 펄스 레이저의 응용은 가공이외의 많은 분야에 활용되고 있지만 여기서는 미세 가공 또는 제작의 관점에서 기술하기로 한다.

왜 펨토초 레이저인가 : 펨토초 레이저 가공의 이점

레이저를 발전방법으로 크게 분류하자면 연속발전레이저 (Continuous laser) 와 펄스레이저 (pulse laser)로 나눌 수 있다. 펄스레이저는 짧은 시간 안에 상대적으로 높은 출력을 조사할 수 있기 때문에 물질의 가공 임계치(threshold)를 쉽게 넘을 수 있어 절단, 천공 등 국부적인 물질제거에 기초한 가공에 특히 유리하다. 연속발전 레이저 (CW laser) 로부터 펄스레이저의 높은 출력을 이끌어내기 위해 제일 처음 개발된 기술은 Q-switching으로서 이를 통해 나노초(1ns = 10⁻⁹sec)급의 펄스폭을 얻는 것이 가능하

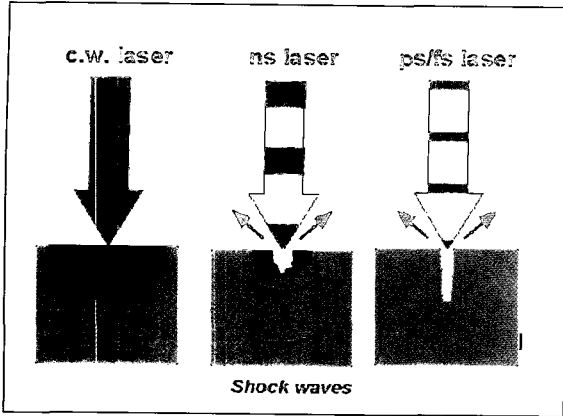


그림 1 레이저의 펄스폭에 따른 가공개념도

게 되었고 뒤이어 mode-locking 기술을 통해 피코초($1\text{ps} = 10^{-12}\text{sec}$) 이하의 극초단의 펄스폭을 얻는 것이 가능해졌다. 100펨토초는 레이저 광이 공간상에 약 $30\mu\text{m}$ 의 길이로 진행하고 있는 것을 의미한다. 하지만 가공에 사용하기 위한 레이저의 조건으로서 극초단 펄스폭뿐만이 아니라 출력도 중요한데 1980년대 중반 G. Mourou 와 D. Strickland에 의해 CPA (Chirped pulse amplification)방법이 개발되고 나서 극초단 펄스와 테라와트(10^{12}W)이상의 고출력을 얻는 것이 가능해졌고, 펨토초 레이저를 통한 가공기술도 급속도로 발전하게 되었다. 펨토초 레이저를 포함한 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공의 장점은 물론 앞서 언급한대로 짧은 시간동안 고출력의 빔을 조사할 수 있다는데 있다. 펨토초 레이저를 포함한 극초단 펄스 레이저에서 더욱 강조되는 것은 극히 '짧은' 시간이다. 많은 논문들을 통해 물질내부의 전자-격자간 열전달속도가 10ps 이내라는 것이 알려져 있다. 물질에 조사되는 펄스폭이 전자-격자간 열전달속도보다 짧아지게 되면 전자계와 격자계의 온도간의 비평형(non-equilibrium) 상태가 발생하고 격자의 온도가 크게 변하지 않는 상태에서 가공을 끝마칠 수 있다. 이것은 가공부 주위의 HAZ(Heat Affected Zone)를 극적으로 감소시킬 수 있음을 뜻한다. 그림 1에서 연속발진레이저와 ns 레이저, fs 레이저간의 가공현상의 차이를 도식적으로 표시하

었다.

또한 높은 침투 출력을 얻게 되면서 기존의 레이저로는 가공하기 힘들었던 소재에 대한 정밀가공이 가능해졌다. 일례로 유리등의 투명재질에 대한 가공을 들 수 있는데 일반적으로 유리와 같은 투명재질은 가시광에서 근적외선에 이르는 파장대역에서 빛의 흡수율이 극히 적지만 펨토초 레이저를 이용하면 쉽게 가공할 수 있는데 이것은 높은 침투 출력하에서 일어나는 비선형흡수로 인해 투명재질에서의 광자흡수율이 높아지기 때문에 가능한 현상이다. 한편 흡수율이 높아지면 한 펄스당 가공되는 깊이를 미세하게 조절할 수 있으므로 서브 마이크로급의 극미세 가공이 가능하게 되었다.

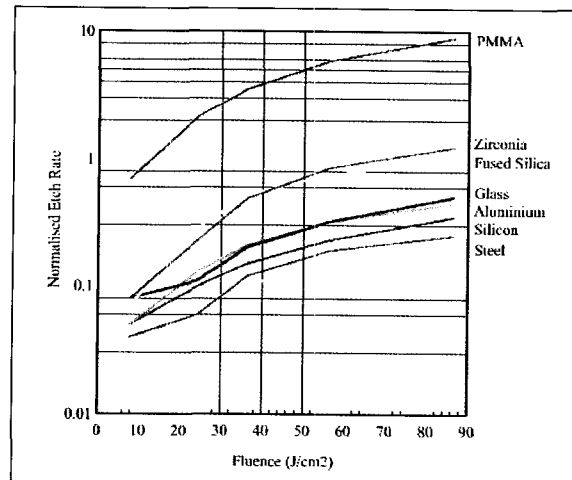
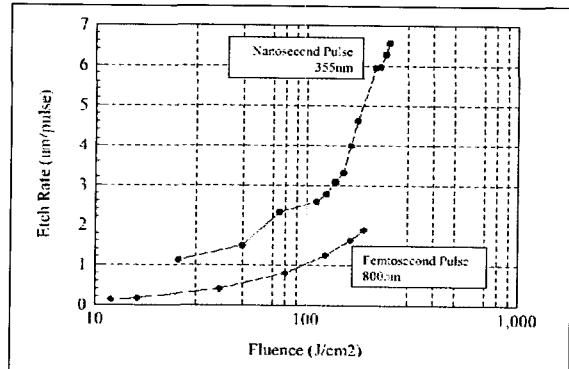
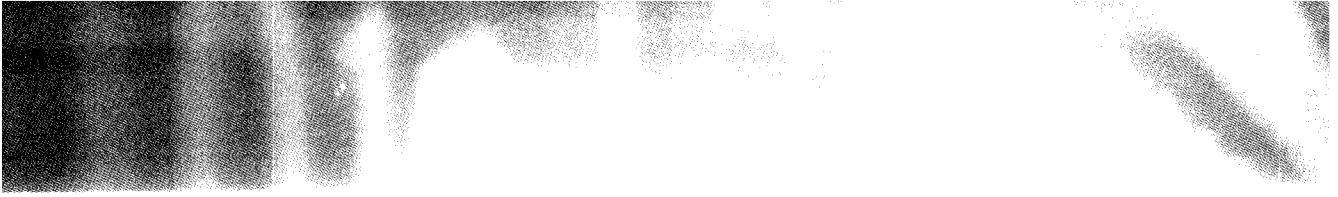


그림 2 나노초 레이저와 펨토초 레이저의 에칭을 비교(위) 및 가공재료의 에칭비율(아래)



펄스 레이저 가공기술의 현황

최근 펄스 레이저의 이용영역이 급속도로 확대되면서 6T라 불리는 첨단기술에 적극적으로 활용되고 있으며 심지어 의료분야에까지 직접 접목되어 괄목할만한 성과를 거두고 있다. 펄스 레이저를 이용한 미세가공 연구현황을 분류해보면 다음과 같은 경향으로 크게 나눌 수 있다. 첫째는 기존의 레이저 가공의 연장선에서 가공정밀도 및 열영향부(HAZ : Heat Affected Zone)를 감소시키고 광학적인 회절 한계에 근접한 정밀가공을 구현하고자 하는 연구이며 다른 하나는 극히 짧은 펄스폭과 높은 출력강도라는 극한의 물리적 조건아래에서 기존의 레이저가공으로 불가능했던 새로운 개념의 미세가공에 대한 시도이다.

재료가공분야에 있어서는 광학적 회절한계에 근접한 정밀가공이 가능해짐으로써 광자격자와 같은 미세구조의 정밀가공을 수행하고 있다. 그림 3은 이와 같은 광자결정의 한 예로서 서브마이크로급의 주기적인 격자를 가공한 사진이다.

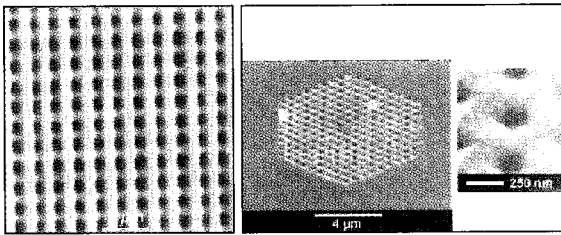


그림 3 광자결정제작 및 나노형상의 한 예
(사진제공 : www.lzh.de)

그림 4는 펄스 레이저를 이용하여 각막 절개수술을 시행한 사진이다. 나노초 레이저를 사용한 외과수술은 수술영역주변에 심각한 열적 변형으로 인한 손상을 일으키지만 펄스 레이저를 이용하면 주위 세포에 영향을 주지 않고 국소적으로 수술을 할 수 있다. 그림 5는 2광자 중합반응 물질을 이용하여 높이 0.5cm의 비너스상을 제작한 예이다. LZH(Laser Zentrum Hannover, 독일)에서는 다른

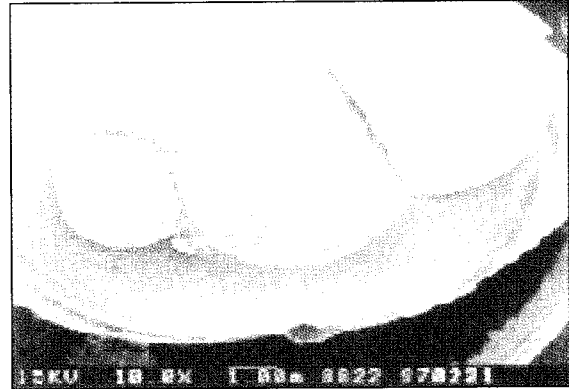


그림 4 펄스 레이저를 이용한 각막수술
사진제공 : University of Michigan, CUOS

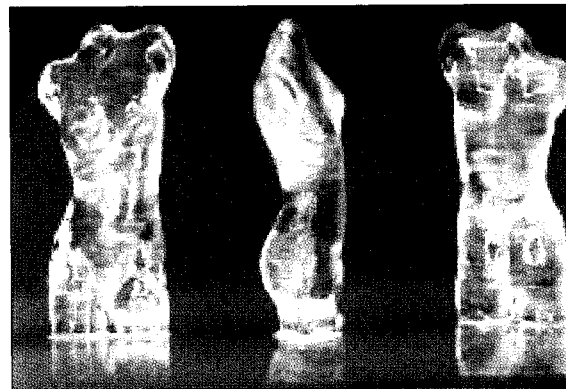


그림 5 마이크로구조체 제작(높이 0.5cm)
사진제공 : www.lzh.de

포커싱 기술을 이용하면 10 μ m의 크기도 제작가능하다고 말하고 있다.

극초단 펄스 레이저를 이용한 가공기술은 기존의 광통신 디바이스 제작에도 새로운 바람을 불러일으켰다. 그림 6은 벌크유리의 내부에 광도파로를 생성하는 그림이다. 투명매질에서의 다광자 흡수를 이용한 물질가공은 이와 같이 레이저빔의 강도를 임의로 조절하여 일정강도 이상의 레이저빔에 노출된 영역에만 비선형흡수를 일으키도록 조절함으로써 투명재질 내부에 임의의 3차원 형상가공이 가능하도록 한다. 또한 극초단 펄스 레이저를 이용하여 유리의 표면강도를 비약적으로 증가시키는 기술에 대한 연구도 일부에서 수행되고 있다.

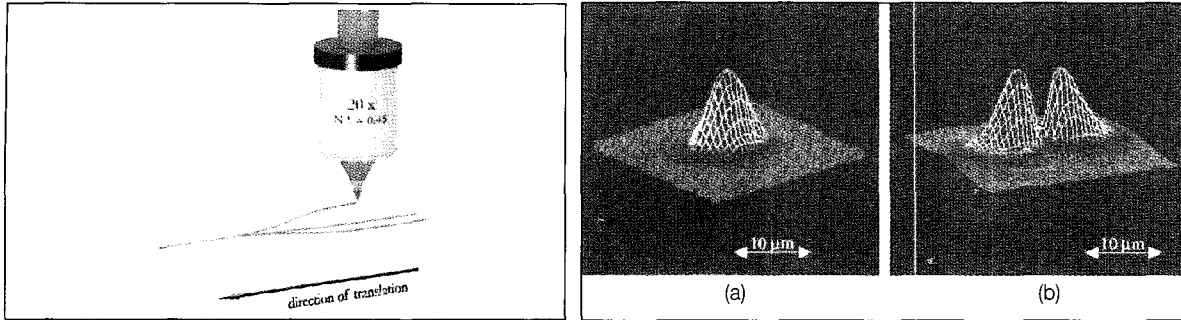


그림 6 펨토초 레이저로 광도파로를 생성하는 모양(좌) 및 가이드된 빔의 구조(우)
 (좌 : S. Nolte et al. Appl. Phys. A, 2003, 우 : P. R. Herman et al. ICALAO 2002)

또한 극초단 펄스 레이저가 발생시키는 white-light continuum을 이용해서 시료를 관찰하고자 하는 microscopy 분야도 진단 및 영상분야에서 활발하게 연구되고 있다.

위와 같이 펨토초 레이저는 극미세 가공뿐만 아니라 기존 레이저 가공에서 가졌던 것보다 고품질 및 가공영역의 다양성을 가지므로, 레이저 발전기 제작 관련기관에서는 좀 더 짧은 펄스폭, 높은 출력을 갖는 레이저 광원의 개발과 산업에서 응용 가능하도록 하는 신뢰성 향상에 주력하고 있다.

기계연구원 나노공정그룹의 현황

본 연구그룹에서는 수년전부터 엑시머 레이저 및

Nd:YVO₄ 3rd harmonic DPSSL 등의 UV 레이저를 이용한 산업소재의 정밀가공기술을 연구해오고 있다. 이에 따라 나노초급 레이저의 장점과 한계를 충분히 파악하고 펨토초 레이저를 이용한 극미세 가공의 연구의 중요성을 인지하여 지난해부터 이에 대한 연구를 수행해왔다. Ti:sapphire Femtosecond Laser 및 Regenerative Amplifier System을 도입하고 펨토초 레이저용 광학시스템 및 제반장비를 설치함으로써 극미세가공 연구에 필요한 적절한 환경을 구축하였다. 그림 7은 본 연구그룹에 의해 구축된 펨토초 레이저 미세가공 시스템의 사진이다. 항온항습이 유지되는 독립부스에 레이저를 설치하고 정밀급 스테이지, 스캐너 및 주변장치를 운용하고 있으며, 극초단 펄스의 시간 폭을 측정하기 위한 auto-

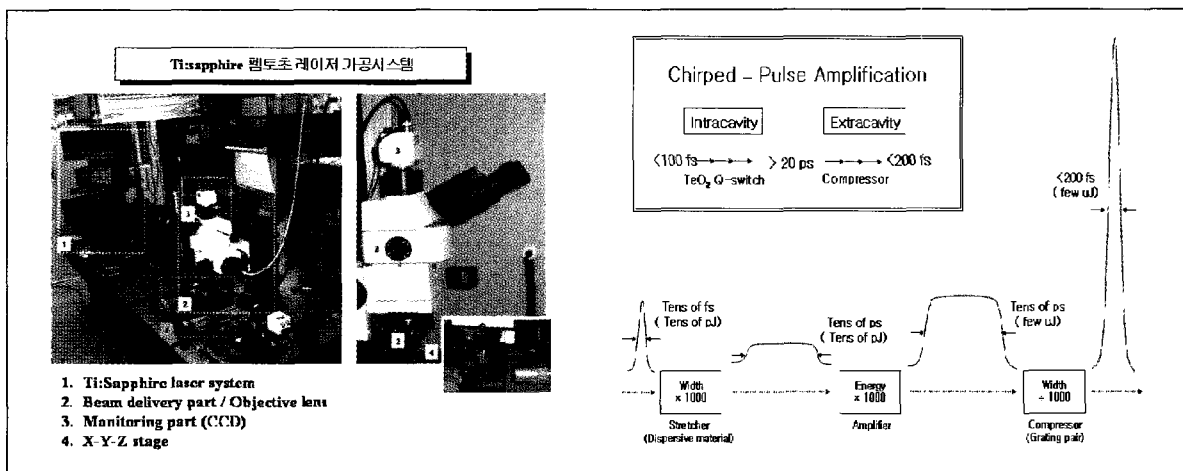


그림 7 본 연구그룹에 의해 구축된 펨토초 레이저 미세가공 시스템

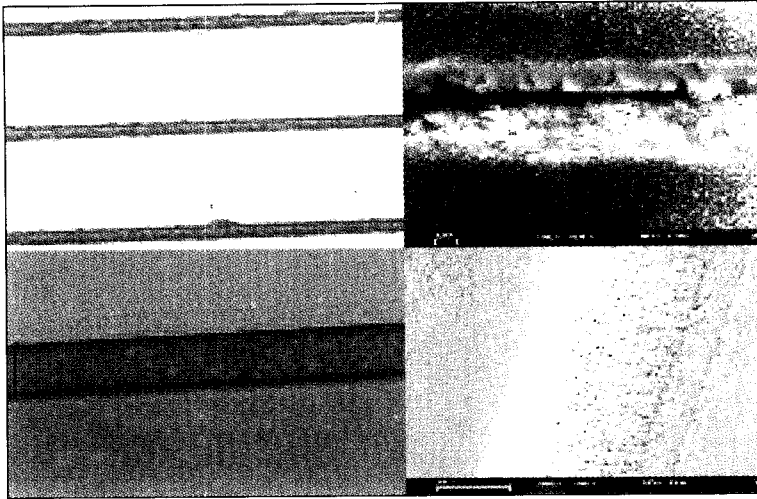
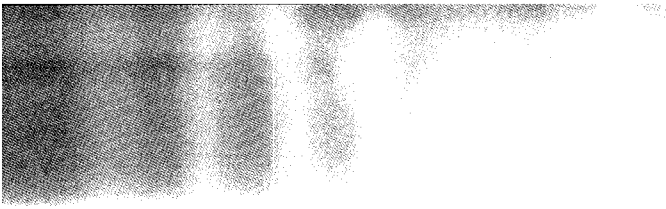


그림 7 나노초(위) 및 펨토초(아래) 레이저로 가공된 유리시료의 모습 (우:SEM이미지)

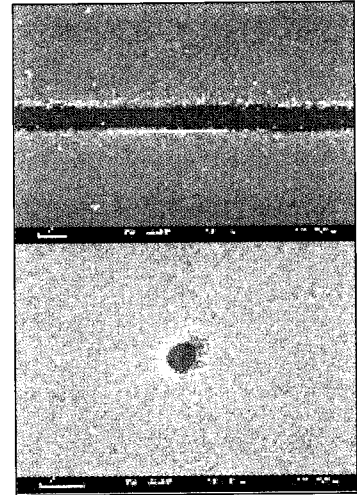


그림 8 서브마이크론 이하의 점 선 재료 : 크롬 박막

correlator가 갖춰져 있다.

본 시스템을 이용하여 연구하고자 하는 분야는 크게 2가지로 나눌 수 있다. 우선 종래의 레이저 가공법의 연장선에서 극초단 펄스 레이저의 장점을 이용하여 초미세가공을 수행하고자 하는 연구를 진행하고 있고, 한편으로는 펨토초 레이저 및 나노 프로브를 이용하여 근접장 효과를 이용한 수십~수백nm급의 나노 패터닝을 구현하는 새로운 개념의 패터닝 기법을 연구함으로써 BT등에 활용할 수 있는 차세대 기반기술을 지향하는 국가 프로젝트를 수행하고 있다. 그림 7, 8은 본 그룹에서 펨토초 펄스를 이용한 가공된 예이다.

이를 통해 본 연구그룹에서는 극초단 펄스 레이저를 이용한 초미세가공기술을 확보하고 그 결과를 산업분야에 접목하기 위한 응용기술을 개발하는데 초점을 두고 있다. 현재까지 실험실 수준에서 펨토초 레이저를 이용한 초미세가공기술에 대한 연구 결과는 활발하게 발표되고 있으나 산업적으로 충분히 응용 가능한 신뢰도확보가 어려웠기 때문에 아직까지는 실험실을 떠나 산업적으로 적극 활용되

는 분야가 일부기술에 국한되어 있다. 이러한 상황으로 미루어볼 때 본 연구원에서 첨단 과학기술의 산물을 산업적으로 응용하기 위한 극초단 펄스 레이저 가공기반기술을 연구하는 것은 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

맺는 글

현재 각국에서 연구되고 있는 극초단 펄스 레이저를 이용한 기술현황과 본 연구원에서 수행하고 있는 초미세 가공기술 연구에 대하여 살펴보았다. 앞서 살펴본 대로 펨토초를 포함한 극초단 펄스 레이저를 이용한 가공기술은 많은 연구그룹에서 경쟁적으로 중요하게 연구되고 있으나 아직 산업적으로 널리 적용될 만큼 확립된 기술은 아니다. 따라서 펨토초를 이용한 극미세 가공기술은 국내의 많은 물리, 화학, 생물학 등의 자연과학자들과 기계, 전자, 재료 등의 공학자들이 연계하여 안정적인 공정을 확보하는 것과 다양한 응용분야를 개척할 필요가 있다.