

1. 서론

펄스 레이저 초정밀 가공은 레이저 가공에서 성취할 수 있는 궁극적인 정밀도를 추구하는 극한의 기술로, 가공되는 소재에 발생하는 열에 의한 영향을 거의 완전히 제거할 수 있을 뿐 아니라 거의 모든 재료의 가공이 가능하며, 일반적인 레이저 가공에서는 발생하지 않는 비선형현상을 이용하여 나노가공을 가능하게 하는 등의 특성으로 인해 최근 들어 레이저가공분야 연구를 주도하고 있는 기술이다. 펄스 레이저 가공은 레이저에서 발생하는 광펄스의 길이가 수 수백 펄스초로 (1펄스초=10⁻¹⁵초로 빛이 머리카락 두께 정도의 길이를 통과하는 시간) 짧은 레이저를 이용하는데 현재 가장 많이 활용되고 있는 펄스 레이저는 타이타늄-사파이어 (Ti-Sapphire) 레이저이다. 이와 같

레이저 가공을 다른 레이저 가공과 구별 짓는 두가지 큰 특징으로 초정밀 가공이 가능하게 할 뿐 아니라 일반 레이저 가공에서는 볼 수 없는 비선형, 비평형 현상들의 응용을 가능하게 한다.

2. 레이저 에너지의 흡수

펄스 레이저를 포함한 모든 레이저 가공은 일단 레이저에서 발생된 빛에너지가 가공하고자 하는 소재와 상호작용을 일으키는 과정에서 이루어지게 된다. 레이저 빛이 소재의 표면에 도달하게 되면 소재는 레이저 빛을 흡수함으로써 새로운 에너지를 얻게 되며 이 에너지는 소재에 열적, 광화학적, 광물리적 현상을 포함한 모든 가공현상을

특집 ┃ 펄스 과학 ┃

펄스 레이저를 이용한 초정밀 가공의 원리 및 현상

정성호*

이 짧은 펄스길이는 펄스레이저 가공이 기존에 산업용으로 많이 활용되고 있는 이산화탄소 (CO₂) 레이저, 야그 (Nd-YAG) 레이저, 및 엑시머 (excimer) 레이저 등에 의한 가공과 물리적으로 매우 다른 원리에 의해 일어나게 하는 기초가 된다. 펄스 레이저의 짧은 펄스길이는 또한 매우 높은 에너지 강도의 확보가 가능하게 한다. 레이저 가공에서 에너지 강도 (intensity 혹은 irradiance라고 함)는 단위시간 및 단위면적당 입사되는 빛에너지의 양으로 정의되는데 수백 펄스초의 펄스길이를 갖는 레이저의 경우 10¹²-10¹⁴ W/cm²의 에너지 강도를 쉽게 얻을 수 있으며 이 에너지 강도는 레이저 빛에 노출된 거의 모든 재료를 순식간에 제거할 수 있는 크기이다.

짧은 펄스길이 및 이로 인한 높은 에너지 강도는 펄스초

일으키는데 사용된다. 이때 소재가 레이저 에너지를 흡수하는 물리적 현상이 펄스초의 경우와 나노초의 경우가 매우 다르며 이로 인해 두 영역에서 가공된 소재는 최종 형상 및 정밀도, 표면 품질 등에서 다른 결과로 나타난다.

레이저 빛이 고체소재의 표면에 조사되면 미시적으로는 전자가 빛의 광자와 상호작용을 일으키게 된다. 금속의 경우 내부에 있는 자유전자 (free electron)가 입사되는 레이저 빛을 흡수하여 여기상태 (excited state)에 도달하게 되는데 이때 전자는 빛을 직접 흡수하지 않는 격자 (lattice, 전자와 함께 물질을 이루고 있는 기본구조)에 비해 훨씬 높은 에너지 상태 혹은 높은 온도에 도달하게 된다. 여기상태의 전자는 흡수한 에너지를 매우 짧은 시간 안에 열에너지 형태로 방출하면서 원래 상태로 되돌아가

* 광주과학기술원 기전공학과

펄스 레이저를 이용한 초정밀 가공의 원리 및 현상

게 되는데 이때 방출된 열에너지는 격자로 전달된다. 열이 격자로 전달되면 비로소 전체 소재의 온도가 올라가게 되며 열전도를 통해 주변재료의 가열을 유도한다. 이와 같이 전자가 빛을 받아 여기상태를 거쳐 원래 상태로 되돌아오면서 주변의 격자에 열에너지를 전달하는데 걸리는 시간을 완화시간 (relaxation time) 이라고 하며 금속의 경우 보통 1-100 피코초 (1피코초=10⁻¹²초) 정도이며 실리콘과 같은 반도체 재료에서는 이보다 더 길다. 이 완화시간의 크기는 앞에서 얘기한 펄스 레이저의 펄스길이보다는 훨씬 길지만 (수십에서 수만 배) 나노초 레이저의 펄스길이보다는 훨씬 짧은데 (수백에서 수만 분의 일) 나노초 레이저에 의한 가공과 펄스 레이저에 의한 가공의 특성을 결정짓는 중요한 역할을 한다.

나노초 레이저 가공의 경우 전자에 의해 흡수된 빛에너지가 열로 변환되는 시간이 레이저 펄스길이 보다 훨씬 짧으므로 기본적으로 소재는 재료내부에 발생하는 열에 의해 가공이 일어나며 이때 전자와 격자는 열적 평형을 이루어 동일한 온도에 있다. 이와 같이 펄스의 길이가 완화시간보다 길어 재료내부에서 전자와 격자간의 열적평형상태가 이루어진 경우에는 레이저 빔이 조사된 재료의 온도를 다음과 같은 일반적인 열전도방정식을 통해 구할 수 있다.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + I_0(t)(1-R)\alpha \exp(-\alpha x)$$

여기서 설명을 위해 일차원 문제로 가정하였으며 ρ , C , k 는 각각 소재의 밀도, 비열, 및 열전도도를, I_0 는 에너지의 강도를, R 은 소재표면의 반사율을, α 는 흡수계수(absorption coefficient)로 레이저 빛이 소재내부로 얼마나 깊이 투과되는지를 나타낸다.

한편 펄스 레이저의 경우 레이저 펄스의 길이가 완화시간보다 훨씬 짧다. 따라서 레이저 빔이 조사되는 동안 빛 에너지는 전적으로 전자에 의해 흡수될 뿐 아니라 전자의 에너지는 아직 격자로 전달되지 않은 상태를 유지하게 된다. 이는 다시 말해 재료내부에서 전자와 격자가 서로 다른 온도를 유지하고 있다는 것을 말해준다. 이와 같이 전자와 격자가 서로 열적인 비평형상태에 있을 경우 재료내부에서 발생하는 현상을 규명하기 위해서는 최소한 전자의 온도와 격자의 온도를 분리해서 생각하여야 하며 이론적 계산에 있어서도 아래와 같이 각각의 온도를 나타내는 미분방정식을 연립으로 풀어야 한다 (이중온도모델)⁽¹⁾.

$$\rho_e C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) - \gamma_{e,l}(T_e - T_l) I_0(t)(1-R)\alpha \exp(-\alpha x)$$

$$\rho_l C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_l \frac{\partial T_l}{\partial x} \right) + \gamma_{e,l}(T_e - T_l)$$

여기서 첨자 e 와 l 은 각각 전자와 격자를 나타내며 $\gamma_{e,l}$ 은 전자와 격자간의 에너지 전달을 나타내는 계수 (coupling constant)이다. Fig. 1은 금과 니켈 박막에 펄스 레이저를 조사했을 때 전자와 격자의 온도 변화를 이중 온도모델로 계산한 결과이다. 그림에서 레이저 펄스가 조사된 직후 전자는 바로 수천 도까지 온도가 올라가지만 재료의 대부분을 차지하고 있는 격자는 원래의 온도에서 아무 변화가 없는 것을 알 수 있다. 시간이 경과함에 따라 전자의 에너지가 격자로 전달되면서 전자의 온도는 점차적으로 감소하는 반면 격자의 온도는 증가하여 결국 완화시간 이상에서는 두 개의 온도가 일치하는 평형상태에 도달하는 것을 보여준다. 참고로 나노초 레이저 가공의 경우 Fig. 1에서 두 온도가 일치하는 시간보다 훨씬 이후에 가공현상이 일어나게 된다.

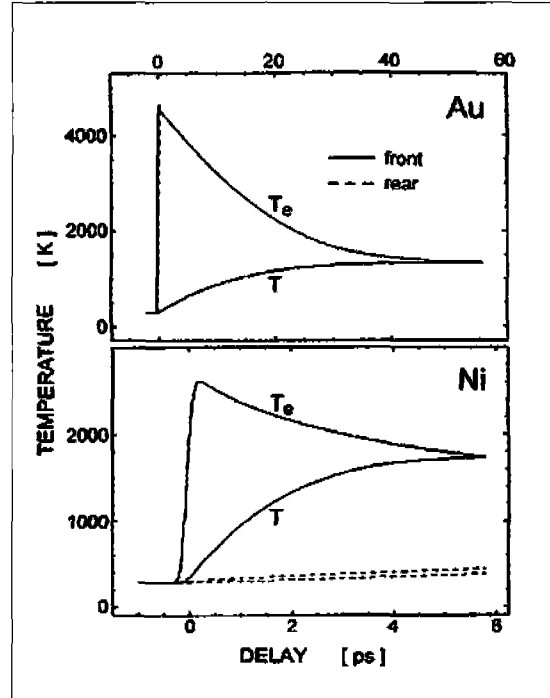


Fig. 1 Temporal dependence of electron temperature, T_e , and lattice temperature, T , of 100nm films of Au and Ni irradiated with 200fs pulses(wavelength=400nm, energy=23mJ/cm²) (1)

3. 금속가공

레이저 가공에 있어서 수 마이크로미터 혹은 그 이상의 정밀도를 갖는 초정밀 가공이 가능하게 하는 기술로 엑시머레이저에 의한 광화학적(photochemical) 가공기술이 있다. 엑시머레이저 미세가공은 기본적으로 엑시머레이저의 짧은 파장(157-351 nm)을 이용하여 폴리머와 같이 화학적 결합으로 구성되어 있는 재료의 원자결합을 단절함으로써 재료가 원자 혹은 분자 형태로 제거되어 용융, 재응고 등과 같은 열적 현상이 거의 없이 정밀한 가공이 가능하게 한다^[2]. 그러나 금속의 경우 화학적 결합구조로 이루어진 재료가 아니므로 광화학적 반응이 일어날 수 없고, 엑시머레이저 가공의 경우에도 재료는 레이저 가열에 따른 용융 및 증발 현상이 일어나며 에너지가 높은 경우 플라즈마 발생과 함께 보일링 등도 발생한다. 이와 같이 금속 재료가 용융 및 증발을 거치게 되면 소재에는 거의 예외 없이 레이저 빔이 조사된 영역을 중심으로 열영향부

를 형성하게 되며 용융된 재료의 재응고 등으로 인해 매우 복잡한 표면형상을 갖게 된다. 이같은 열적현상은 엑시머레이저 뿐 아니라 야그레이저 및 이산화탄소레이저와 같은 나노초 레이저에서 공통으로 일어나며 금속의 레이저 가공에 있어서 정밀도에 한계를 갖게 하는 주된 요인이 되고 있다.

금속의 레이저 가공에 있어 정밀도가 열적현상에 의해 크게 제한을 받으므로 만약 가공 중에 발생하는 열적현상을 피할 수 있다면 정밀도를 크게 향상시킬 수 있을 것이라고 생각해 볼 수 있다. 앞 절에서 설명한대로 펨토초 레이저 가공의 경우 레이저빔과 소재간의 상호작용이 소재가 열적 평형상태에 도달하기 전에 완료되므로 펨토초 레이저 가공을 통해 열적현상을 피할 수 있을 것으로 예상할 수 있다. Fig. 2는 금속 박판에 나노초 레이저와 펨토초 레이저로 구멍을 가공한 결과를 보여준다. 나노초 레이저의 경우 용융된 재료가 구멍 주변에 불규칙한 모양으로 재응고 되어 구멍의 형상이 분명하지 않을 뿐 아니라 응고된 재료가 원래 소재의 표면보다 높이 솟아 있어 표면품질이 나쁘고 가공부 주변에 열영향부가 뚜렷하게 나타난 것을 볼 수 있다. 이에 비해 펨토초 레이저로 가공된 구멍은 나노초 레이저 가공에서 관찰된 용융 및 재응고의 흔적 없이 거의 완전한 원형의 구멍 가공이 가능하고 가공부 주변에도 손상을 주지 않는 깨끗한 가공이 이루어진 것을 볼 수 있다.

펨토초 레이저 가공을 통해 Fig. 2(b)에 나타난 것과 같이 열적현상 없이 깨끗한 가공이 가능하게 되는 이유에 대

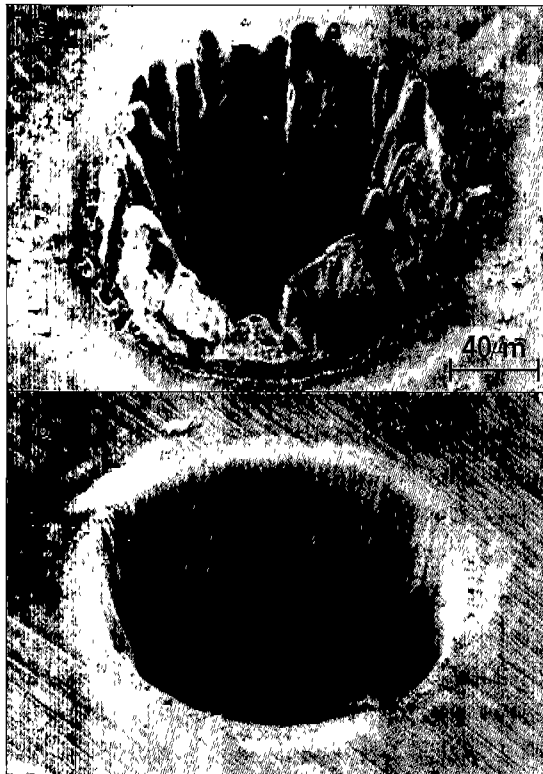


Fig. 2 SEM pictures of holes fabricated in a 100µm thick steel foil with (a) 3.3ns pulse, 4.2J/cm² (b) 200fs pulse, 0.5J/cm², 780nm Ti-Sapphire laser [1]

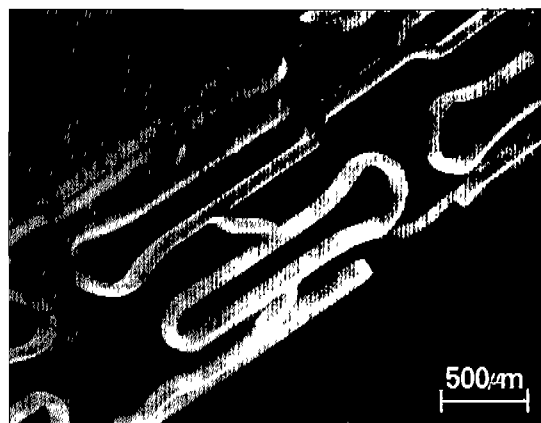


Fig. 3 Stent fabricated from a Ta tube by femtosecond laser machining (wavelength=780nm, energy=21J/cm², 1kHz) [1]

펄토초 레이저를 이용한 초정밀 가공의 원리 및 현상

해 많은 연구가 이루어지고 있지만 아직 완전한 설명은 힘들다. 펄토초 레이저 가공에서 재료는 여기상태로 떨어져 나가거나, 레이저 빔이 조사된 재료내부의 초고압 및 팽창, 상폭발, 비선형 광흡수 등이 일어나는 것으로 설명하고 있으며 아마도 이러한 현상들이 복합적으로 작용한다고 보아야 할 것이다.

펄토초 레이저를 이용한 금속가공은 가공중의 열적현상을 현저히 제거함으로써 인해 지금까지 거의 불가능해 보였던 금속재료의 초정밀 가공을 가능하게 하였을 뿐 아니라 밴드갭에너지 (band gap energy) 가 큰 절연체 및 산화물 재료의 가공도 가능하게 하였다. 아래에 펄토초 레이저를 이용한 금속재료의 초정밀 가공예를 보였다.

4. 다광자 흡수를 이용한 가공

펄토초 레이저의 에너지 강도는 다른 레이저에 비해 월등히 높다는 것을 앞에서 설명하였다. 보통 10^{12}W/cm^2 이상의 에너지 강도를 손쉽게 얻을 수 있는데 이러한 높은 에너지 강도는 다른 레이저 가공에서는 관찰할 수 없는 비평형, 비선형 광현상이 일어나게 한다.

레이저 빛에 대해 투명한 재료의 경우 빛은 재료에 흡수되지 못하고 그냥 통과하게 되어 재료에 아무런 변화를 일으키지 않는다. 이것은 미시적으로 보면 재료내부의 전자가 빛에 의해 여기 되지 않는다는 것을 말한다. 일반적으로 재료에 레이저 빛이 조사될 경우 광자(photon)에너지는 입사되는 빛의 파장에 따라 $E_p = hc/\lambda$ 로 표시된다. 여기서 h 는 플랑크 상수, c 는 빛의 전파속도, λ 는 입사되는 빛의 파장을 나타낸다. 전자가 여기 되기 위해서는 입사되는 빛의 광자에너지가 전자가 여기상태에 도달하는데 필요한 에너지 (밴드갭에너지) 보다 크거나 같아야 하는데 파장이 긴 적외선이나 가시광선 레이저의 경우 거의 불가능하다. 그런데 레이저의 에너지 강도가 펄토초 레이저에 서처럼 매우 높을 때에는 전자가 여기 되기 위해 필요한 에너지를 2개 이상의 광자를 동시에 흡수함으로써 확보하게 되는 비선형 광흡수 현상이 일어나게 되는데 이러한 현상을 다광자 흡수 (multiphoton absorption) 라고 한다. 재료 내에서 다광자 흡수현상이 일어날 확률은 I^n (I : 에너지 강도, n : 동시에 흡수되는 광자의 수)에 비례하여 증가하므로 에너지 강도가 높을수록 급속히 일어나는 경향이



Fig. 4 (a) Microsculpture and (b) functional oscillator fabricated with a Ti-sapphire femtosecond laser(780nm, 76MHz, 150fs) using two-photon absorption processes.(3)

있다.

Fig. 4는 광폴리머에 2-광자흡수 현상을 이용하여 초정밀형상을 가공한 대표적인 예로써 일본 오사카대학의 Kawata 그룹에 의해 발표된 후 유명해졌다. 그림에서 길이막대의 크기는 2마이크로미터로 Fig. 4(a)의 황소조각의 전체 크기는 약 10마이크로미터이다. 이와 같이 정밀한 가공이 가능하기 위해서는 레이저 초점에서 가공 정밀도 (resolution) 가 수백 나노미터 정도로 높아야 한다. 일반적으로 레이저 빔을 현미경렌즈 (objective lens) 로 집속할 경우 수 마이크로미터 이하의 초점크기를 얻기 힘들다. Kawata 등은 나노미터크기의 초점을 얻기 위해 펄토초 레이저에 의한 2-광자흡수 현상을 이용하였다. 가공을 위한 재료로는 적외선 빛에 대해 투명한 광폴리머를 사용하였는데 광폴리머는 레이저 빛을 흡수할 경우 액체에서 고체로 변하는 특성이 있다. 펄토초 레이저의 파장은 780nm로 정상적인 경우 광폴리머에 흡수가 되지 않는다. 그러나 펄토초 레이저를 현미경렌즈로 집속하여 광폴리머

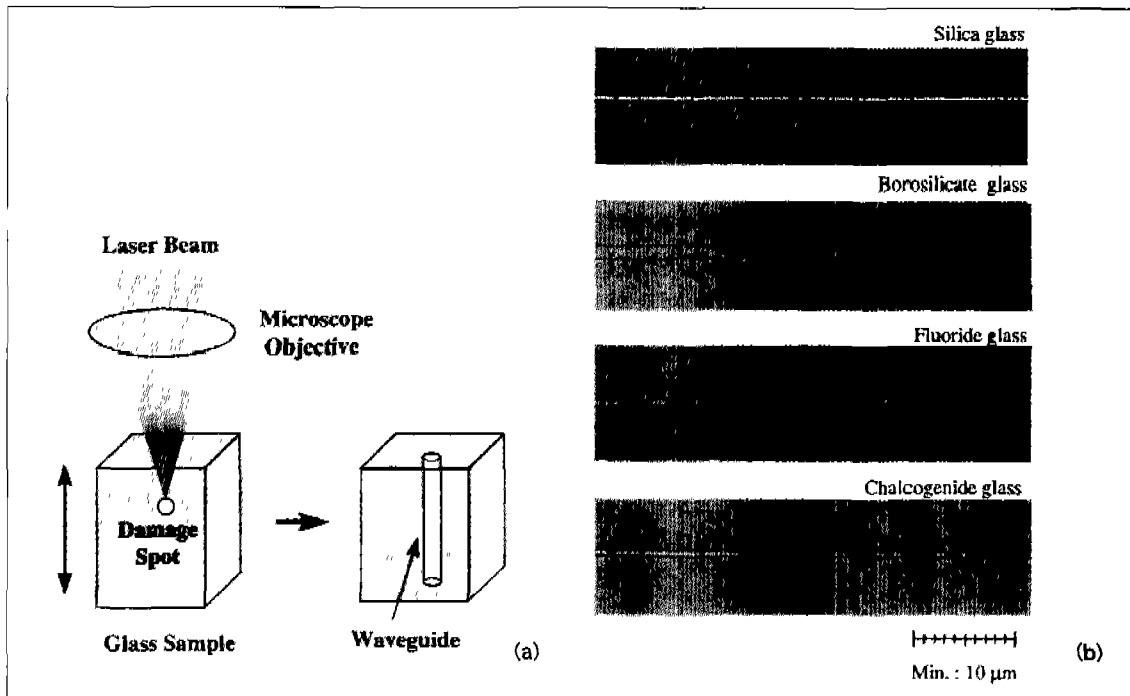


Fig. 5 (a) Schematic diagram of optical waveguide writing by high repetition femtosecond laser (800nm, 120fs, 200kHz)
 (b) Microscope photographs of photowritten optical waveguides in various glasses (7)

에 조사할 경우 초점부근에서는 매우 높은 에너지 강도를 갖게 되며 그 가운데서도 가장 에너지 강도가 높은 가운데 부분에서 비선형 2-광자흡수 현상이 일어나게 된다. 가우스분포 (Gaussian distribution) 를 갖는 레이저 빔의 경우 2-광자흡수 현상이 일어나는 영역의 크기가 수백나노미터 이하로 제한되어 Fig. 4에서와 같은 초정밀 가공이 가능하게 된다.

이외에도 2광자흡수 현상을 이용한 초정밀 가공의 예로 광결정⁽⁴⁾, 광정보저장 및 광도파로⁽⁵⁾, 미소기계(MEMS)⁽⁶⁾ 등과 같이 나노미터 정밀도를 요구하는 초정밀 가공에 응용되고 있다.

5. 실리콘 및 비금속 재료의 가공

위에서 설명한 펄초 레이저의 특성은 금속이외에도 실리콘, 석영 (quartz), 유리, 폴리머 등과 같은 재료에 다른 가공기술로는 얻기 힘든 결과를 얻거나 나노초 레이저에서는 얻기 힘든 우수한 표면품질 및 정밀한 가공을 위해

응용되고 있다. 아래에 이와 관련한 예를 소개한다.

Fig. 5는 펄초 레이저를 이용해 다양한 종류의 유리에 광도파로를 직접 제작하는 방법과 예를 보여주고 있다.⁽⁷⁾ 대부분의 광도파로 가공이 증착과 식각을 반복하는 복잡한 반도체 공정을 이용하는데 비해 펄초 레이저를 이용할 경우 그림에서와 같이 단순히 레이저 빔을 원하는 유리 내부에 집속하여 그림을 그리듯이 이동시키면 초점부에서 앞에서 설명한 바와 같은 다광자 흡수 및 광브레이크다운 (optical breakdown)이 일어나서 초점의 이동경로를 따라 굴절율이 다른 재료로 변화하게 되어 도파로가 형성된다. 이러한 방법을 활용하면 다른 방법에 비해 간단히 광도파로를 제작할 수 있는 잇점이 있다.

펄초 레이저는 또한 투명한 재료의 내부에 3차원 패턴을 제조하기 위해 기술로 활발히 연구되고 있다. 펄초 레이저 빔은 집속되지 않은 경우 투명한 재료를 통과하지 만 렌즈를 통해 투명체 내부에 초점이 오도록 집속할 경우 표면에는 아무 손상 없이 재료의 내부에 원하는 패턴을 형성할 수 있게 한다. 그 예로 포토리지스트 (photoresist) 에 펄초 레이저 빔의 간섭을 유도하여 광결정을 제조하

펄토초 레이저를 이용한 초정밀 가공의 원리 및 현상

거나^[8] 실리카 유리 (fused silica) 에 점 데이터 평면을 반복적으로 생성하여 광정보저장이 가능하게 하며^[9], 펄토초 레이저의 높은 에너지 강도를 이용하여 실리카 유리 내부에 3차원 통로를 가공^[10]하는 기술 등이 개발되고 있다.

이외에도 펄토초 레이저를 근접장 현미경에 연결하여 수십-백 나노미터 크기의 가공이 가능하게 하는 기술이 있다. 근접장 현미경의 탐침은 개구부의 크기가 100나노미터 이하로 빛의 파장보다도 훨씬 작은 크기이다. 이로 인해 보통의 레이저 빔이 탐침을 통과하면 산란에 의한 손실이 매우 커서 가공에 활용할 수 없게 된다. 펄토초 레이저의 경우 에너지 강도가 워낙 높으므로 탐침에 의한 손실 이후에도 재료의 가공에 이용될 수 있을 만큼의 에너지 강도를 유지하게 되며 이러한 원리를 이용하여 포토마스크 (photomask)의 수정에 응용한 예가 보고되고 있다.^[11]

6. 결론

펄토초 레이저 초정밀 가공의 원리와 응용기술을 레이저 에너지 흡수를 중심으로 검토하였다. 펄토초 레이저는 시스템의 가격이 비싸고 선택할 수 있는 모델이 한정적이며 레이저 하드웨어 자체도 여전히 발전 단계에 있으므로 아직 산업용으로 적용되지는 못하고 있는 것이 현실이다. 그러나 펄토초 레이저 가공은 재료에 제한을 받지 않으면서 세라믹이나 폴리머 뿐 아니라 금속의 경우에도 가공면과 가장자리가 깨끗하고 열영향부의 발생이 거의 없어 다른 가공방법이나 나노초 레이저로는 불가능한 초정밀, 고품질 가공을 가능하게 하며 반도체 가공공정과 같은 복잡한 공정을 단순화하는 잇점으로 인해 관심과 연구가 더욱 증대되고 있다. 펄토초 레이저 가공기술은 최근의 레이저 가공기술 연구를 주도하고 있으며 다양한 가공기술의 개발과 함께 최근 크게 관심을 끌고 있는 나노기술 및 광통신, 마이크로시스템, 3차원 미소구조 등으로 응용분야가 확대되어갈 것으로 전망된다.

참고문헌

- (1) D. Bauerle, *Laser Processing and Chemistry*, Springer, (2000) p.259.
- (2) 정성호, "레이저 가공의 원리 및 현상", *대한전기학회지*, Vol. 50, No. 5, 2001, pp.22-28.
- (3) S. Kawata, H.B. Sun, T. Tanaka, K. Takada, "Finer features for functional microdevices", *Nature*, Vol.412, No.16, 2001, pp.697-698.
- (4) H.B. Sun, S. Matsuo, H. Misawa, "Three-dimensional photonic crystal structures achieved with two-photon-absorption photopolymerization of resin", *Appl. Phys. Lett.* Vol.74, No.6, 1999, pp.786-788.
- (5) B.H. Cumpston, S.P. Ananthavel, S. Barlow, D.L. Dyer, J.E. Ehrlich, L.L. Erskine, A.A. Heikal, S.M. Kuebler, I.S. Lee, D. McCord-Maughon, J. Qin, H. Rockel, M. Rumi, X. Wu, S.R. Marder, J.W. Perry, "Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication", *Nature* Vol.398, 1999, pp.51-54.
- (6) S. Maruo, K. Ikuta, K. Hayato, "Light-driven MEMS made by high-speed two-photon microstereolithography", *The 14th IEEE international conference on MEMS*, 2001, 594-597.
- (7) K. Miura, J. Oiu, H. Inouye, T. Mitsuyu, K. Hirao, "Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser", *Appl. Phys. Lett.* Vol.71, No.23, 1997, pp.3329-3331.
- (8) T. Kondo, S. Matsuo, S. Juodkazis, H. Misawa, "Femtosecond laser interference technique with diffractive beam splitter for fabrication of three-dimensional photonic crystals", *Appl. Phys. Lett.* Vol.79, No.6, 2001, pp.725-727.
- (9) E.N. Glezer, M. Milosavljevic, L. Huang, R.J. Finlay, T.H. Her, J.P. Callan, E. Mazur, "Three-dimensional optical storage inside transparent materials", *Opt. Lett.* Vol.21 No.24, 1996, pp.2023-2025.
- (10) K. Itoh, W. Watanabe, K. Yamada, D. Kuroda, J. Nishii, Y. Jiang, "Three-dimensional hole drilling of silica glass from the rear surface with femtosecond laser pulses", *Opt. Lett.* Vol.26 No.23, 2001, pp.1912-1914.
- (11) K. Lieberman, Y. Shani, I. Melnik, S. Yoffe, Y. Sharon, "Near-field optical photomask repair with a femtosecond laser", *Journal of Microscopy*, Vol. 194, 1999, pp.537-541.

약 력



정성호

현재근무처 : 광주과학기술원 기전공학과
 학력 :
 1997. 5 University of California at Berkeley 박사
 1988. 2 한국과학기술원 석사
 1986. 2 경북대학교 학사
 주요경력
 1988-1992 : 포항산업과학연구원 선임연구원
 1997-1999 : 미국 Lawrence Berkeley National Laboratory 박사후 연구원
 1999-현재 : 광주과학기술원
 주관심분야 : 레이저 미세 3차원 가공, 근접장이용 나노가공, 레이저-물질 상호작용