

레이저 미세가공의 원리 및 현상

정 성 호

(광주과학기술원 기전공학과)

1. 서 론

레이저 미세가공은 다른 방법으로는 가공이 힘든 마이크로미터 크기 혹은 그 이하의 정밀도로 가공이 가능하다는 것과 세라믹, 유리, 스테인레스강 등과 같이 기계적 가공이 곤란한 재료도 비교적 쉽게 가공할 수 있다는 잇점으로 인해 초정밀을 요하는 반도체, 전자, 광통신, 의료분야 등에서 널리 활용되고 있다. 레이저 미세가공이 가능한 배경에는 레이저 빛을 광학부품을 사용하여 수 마이크로미터에서 수백 마이크로미터 크기로 집속할 수 있다는 특성이 존재한다. 기계적 방법으로는 가공부를 수백 마이크로미터 혹은 그 이하의 크기로 유지하기가 매우 힘들 데 비하여 레이저의 경우 적절한 렌즈의 선택을 통해 초점크기를 손쉽게 수십 마이크로미터 이하로 만들 수가 있으므로 매우 정밀한 홈이나 구멍을 상대적으로 용이하게 가공할 수 있다. 기계적가공 외에도 90년대 이후부터는 반도체 제조공정의 일부인 포토리소그라피(photolithography) 공정에서 마스크(mask)의 회로패턴을 실리콘 웨이퍼(wafer)에 이미징할 때 사용하는 광원으로 레이저를 사용함으로써 정밀도(resolution)를 $0.25\mu\text{m}$ 이하로 낮추었다. 이 경우에는 단순한 레이저 빛의 집속특성뿐 아니라 파장이 짧을수록 더 정밀한 패턴의 제작이 가능하다는 빛의 회절 특성까지 고려하여 초 집적 메모리 반도체의 생산이 가능하게 되었다.

레이저 미세가공은 절단이나 친공에서처럼 레이저 빔을 이용하여 기계적 가공 효과를 내는 경우와 포토리소그라피에서처럼 광원으로 활용되는 경우, 또 레이저 빔을 미소크기의 에너지 공급원으로 사용하면서 가공물에 열적·화학적 현상을 유도하는 경우(laser induced process) 등으로 구분될 수 있다. 각 경우에서 레이저 가공의 최종결과는 다르지만, 기본적으로는 레이저 빛이 가공될 소재에 흡수되고 흡수된 빛이 열적 또는 광화학적 현상을 일으키는 과정을 통해 가공이 가능하게 된다는 측면에서는 공통점을 갖고 있다. 레이저 미세가공기술의 응용 및 개발을 위해서는 레이저 빛이 고체소재의 표면에 조사될 때 일어나는 열적, 화학적, 물리적 현상들이 레이저 빛의 파장, 에너지, 펄스길이

등과 같은 레이저 조건과 소재의 열 및 광물성치에 따라 어떻게 변화하는가를 이해하는 것이 매우 중요하다.

2. 레이저 빛의 흡수 및 반사

레이저 빛이 고체소재의 표면에 조사되면 그림 1에서 나타난 것처럼 입사되는 에너지의 일부는 반사되어 주변 환경에 의해 소실되고 나머지는 재료내부에 흡수된다. 단위시간 및 단위면적당 입사되는 에너지의 강도(irradiance 또는 intensity)를 I_0 라고 할 때 반사되는 에너지의 양은 $R \cdot I_0$ 가 되며 나머지 에너지는 소재표면을 투과하여 내부에서 흡수된다. 여기서 R 은 소재표면의 반사율을 나타낸다. 소재표면을 투과한 레이저 에너지의 강도는 표면에서부터 지수적으로 감소하는데 깊이 z 에서의 에너지 강도는 아래식으로 표시된다.

$$I(z) = (1-R)I_0 \exp(-\alpha z)$$

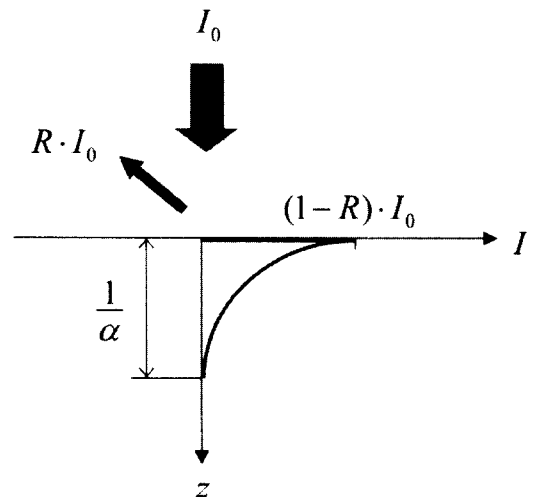


그림 1. Schematic diagram for the reflection and absorption of laser energy by a solid.

여기서 α 는 흡수계수(absorption coefficient)로 레이저 빛이 소재내부로 얼마나 깊이 투과되는지를 결정하며 $1/\alpha$ 를 침투깊이(penetration depth)라고 한다. 흡수계수는 또 $\alpha=4\pi\kappa/\lambda$ 로 나타내어지는데 여기서 κ 소광계수(extinction coefficient), λ 는 레이저 빛의 파장을 나타낸다. 이 식에서 볼 수 있는 것처럼 레이저 빛의 침투깊이는 파장이 짧을수록 작아짐을 알 수 있다.

재료의 반사율 및 흡수계수는 레이저 빛의 파장에 따라 달라지게 되는데 그림 2는 실리콘, 알루미늄, 금의 파장에 따른 물성치 변화를 보여주고 있다[1]. 일반적으로 금속은 레이저 빛에 대해 불투명하므로 빛이 표면부근에서 거의 다 흡수되며 침투깊이는 약 10 나노미터 정도로 매우 짧다. 금속의 반사율은 굴절율(n)과 소광계수의 함수로 다음식으로 나타내어지는데 $R=[(n-1)^2+\kappa^2]/[(n+1)^2+\kappa^2]$ [2], 파장이 길수록 반사율이 높아 금이나 은, 구리 같은 금속의 적외선 반사율은 거의 1에 가깝다. 따라서 이와 같은 금속을 Nd-YAG 레이저($\lambda=1.06\ \mu\text{m}$) 혹은 CO₂ 레이저($\lambda=10.6\ \mu\text{m}$)로 가공하는 것은 반사에 의한 에너지 손실이 커서 매우 비효율적이 된다.

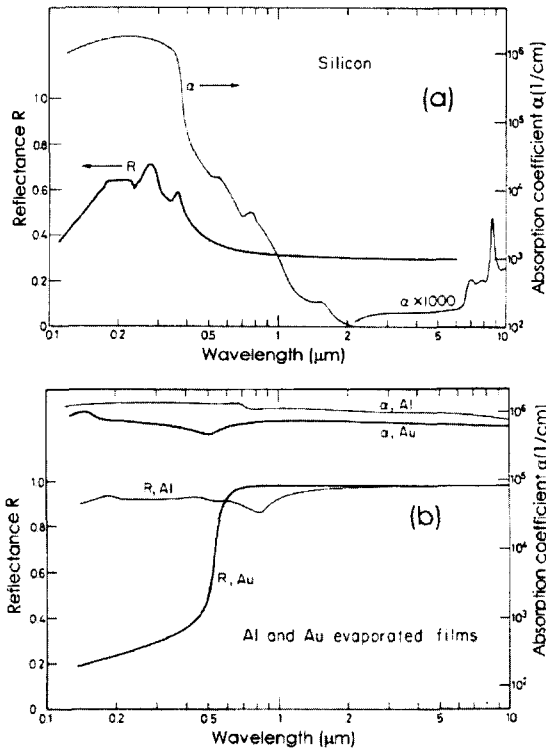


그림 2. Reflectance and absorption coefficient as a function of wavelength for different materials; (a) silicon, (b) aluminum and gold[1].

실리콘의 경우 적외선 영역에서는 빛이 수백 마이크로미터 이상까지 투과되지만 자외선 영역에서는 침투 깊이가 거의 금속과 같은 정도로 짧은 특성을 나타내므로 레이저

의 파장에 따라 가공현상은 현저히 달라질 수 있다. 흡수계수와 반사율은 온도에 따라서도 영향을 받는데 실리콘의 경우 온도가 증가함에 따라 흡수계수와 반사율 모두 증가하며 용융상태에서는 거의 금속에 가까운 값을 갖는 것으로 보고되고 있다[3].

3. 레이저 가공시 발생하는 물리적 현상

3.1. 레이저 가열, 용융 및 증발

레이저 가공시 소재에 흡수된 레이저 빛은 먼저 소재 내부의 전자에 의해 흡수되고 전자는 에너지를 다시 레티스(lattice) 혹은 포논(phonon)이라고 부르는 재료의 격자에 전달하며 격자의 진동에 의해 에너지는 최종적으로 열의 형태로 주변소재로 전달되게 된다. 보통 전자와 격자간의 에너지 전달(electron-phonon relaxation)은 수-수십피코초(1피코초= 10^{-12} 초) 안에 일어나므로 이보다 펄스의 길이가 짧아서 전자로부터 격자로 에너지를 전달할 여유가 없는 경우(예를 들면 펨토초 레이저 가공의 경우)를 제외한 거의 대부분의 레이저 가공에서는 레이저 에너지는 일단은 열로 변환되어 활용된다.

레이저 가공이 일반적인 가공기술과 다른 특징 중의 하나는 열로 변환되는 에너지의 강도가 다른 가공방법에 비해 월등히 높다는데 있다($10^6\ \text{W}/\text{cm}^2$ 이상). 레이저 가공시 이와 같은 높은 에너지 강도를 낼 수 있는 첫번째 요인은 앞에서 언급한 것처럼 레이저 빛을 매우 작은 초점크기로 집속이 가능하기 때문이다. 에너지 강도를 높일 수 있는 또 다른 요인으로는 미세가공에 많이 활용되는 엑시머 레이저나 Nd-YAG 레이저와 같은 펄스레이저의 경우 펄스 길이가 대부분 수십 나노초 이하로 짧다는 데 있다. 레이저 가공에서의 높은 에너지 강도는 대부분의 재료를 용융 혹은 증발상태로 만들 수 있으므로 가공에서 재료 의존도를 크게 줄일 수 있게 해준다.

레이저 가열된 재료에 발생하는 열적 현상은 재료의 상변화를 수반하지 않는 단순한 가열에서부터 재료의 용융, 증발, 보일링 및 증발된 증기가 입력되는 에너지에 의해 이온화되어 플라즈마를 형성하는 현상까지 매우 복잡하다. 일반적으로 고출력 레이저에 의한 고체소재 가공시에는 재료의 용융, 증발, 플라즈마 및 입자 발생 등이 거의 동시에 일어나는데 이와 같이 레이저-소재간의 상호작용에 의해 발생하는 현상을 총괄적으로 레이저 어블레이션(ablation)이라고 부른다. 레이저 미세가공기술의 응용시 위와 같은 현상들을 목표하는 공정에 따라 적절히 제어함으로써 원하는 현상은 촉진시키고 원하지 않는 현상은 억제할 수 있는 기술로의 개발이 필요하다.

레이저 가공시 재료의 증발 없이 단순가열 혹은 용융 및 재용고 만들 이용하는 기술로 금속의 표면처리, 액정화면의 열처리, 컴퓨터 하드디스크의 텍스처링(texturing) 등이 있다. 이러한 공정에서 재료는 표면부가 급속히 용융되었다가



재용고 되면서 새로운 기계적, 물리적 성질을 갖는 재료로 되거나 용융재료의 유동에 의해 가열부에 입체적 형상을 만든다. 레이저 텍스처링의 경우 고도로 평평한 하드디스크 표면에 레이저 빔을 쬐서 지름 10~20 μm, 높이 약 40 nm의 초미세 요철구조를 만들어 하드디스크 표면과 헤드의 고착(stiction) 문제를 해결하였다[4,5]. 레이저 가열시 용융된 재료는 레이저 빛에 노출되지 않은 주변소재로 열을 빼앗기게 되므로 가운데 부분이 온도가 가장 높고 가장자리로 갈수록 온도가 낮아진다. 따라서 용융면에 온도차에 의한 표면장력이 발생하고 이에 의해 액체의 유동이 발생하게 되는데 표면이 다시 냉각되어 고체화되면 입체적인 형상을 형성한다. 레이저 텍스처링은 이와 같은 원리를 이용하였는데 이때 증발에 의해 입자들이 발생하면 하드디스크에 치명적인 결함을 유발할 수 있으므로 미세한 영역의 용융만을 위한 정확한 양의 에너지를 원하는 시간동안 공급해야 한다.

레이저를 이용한 전자부품의 저항을 미소하게 조절하는 트리밍(trimming), PCB(printed circuit board)의 절단 및 천공, 전자부품이나 의료용기구, 실리콘 웨이퍼 등에 문자나 일련번호를 새겨 넣는 마킹, 잉크젯 프린터의 노즐 가공 등과 같은 가공의 경우 대부분 재료가 소재로부터 제거되는 과정을 거치게 된다. 소재로부터 재료가 제거되는 형태는 증발에 의한 증기상태, 액체방울 상태, 혹은 고체상태 등이 있을 수 있다. 레이저 가공중에 발생하는 소재의 증발은 증발점 이상으로 가열된 소재에서는 예외 없이 일어난다. 펄스레이저를 이용한 가공의 경우 실제 재료의 용융, 증발, 재용고 등이 수십나노초 사이에 종료되므로 레이저 펄스시간 동안의 소재표면 온도나 압력을 실시간으로 측정하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 레이저 가열 도중의 소재 표면온도 및 압력 등은 이론적으로 예측하는 경우가 대부분이며 레이저의 초점크기가 침투깊이에 비해 비교적 큰 경우에는 아래의 일차원 열전도 방정식을 통해 소재의 온도를 예측할 수 있다.

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

여기서 ρ, C, k는 소재의 밀도, 비열, 및 열전도도를, v는 용융면이 고체내부로 전파되어가는 속도를 나타내며 입사되는 레이저 에너지는 시간에 따라 변화하는 것으로 나타내었다. 위의 식을 이용해 계산된 예를 보면 펄스레이저 가공시 소재표면의 온도는 증발점 이상, 압력은 수십 기압까지 쉽게 상승하는 것을 알 수 있다[6]. 레이저 가열시 재료에서 발생하는 고압의 증기는 거의 순간적으로 주변의 공기를 압축함으로써 인해 그림 3에 나타난 것과 같은 충격파(shock wave)를 생성하게 된다[7,8,9]. 이때 충격파의 팽창 속도는 용융면에서의 증기 압력 및 온도에 따라 달라지게 되므로 공기 중에 전파되는 충격파 및 증기유동은 용융면에서의 소재상태를 간접적으로 나타내주는 중요한 관찰 요소이며 이에 관한 많은 연구가 수행되고 있다.

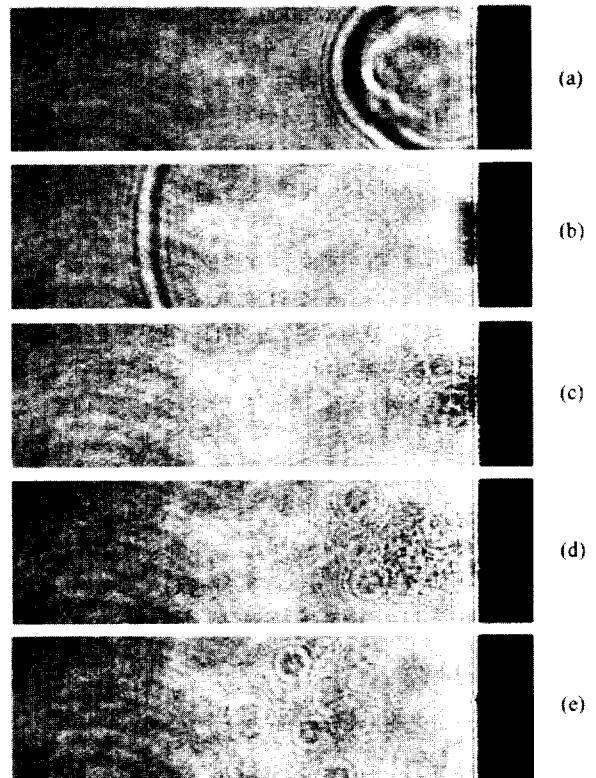


그림 3. Shock wave and vapor plume generated during frequency quadrupled Nd-YAG laser (λ = 266 nm) irradiation of polished aluminum. Laser intensity was about 10⁹ W/cm². Elapsed times after the laser pulse are (a) 44 ns, (b) 478 ns, (c) 1.82 μs, (d) 5.16 μs, and (e) 16.8 μs. Shock waves are clearly seen in (a) and (b) while the vapor expanding into the surrounding air is shown from (b) through (e)[7].

용융면에서 발생하는 고압의 증기는 액체상태의 재료에도 반발압력(recoil pressure)을 작용하는데 그 크기는 소재 표면에서의 포화증기압을 P라고 했을 때 약 0.54P 정도 된다[1,10]. 소재표면의 온도분포와 마찬가지로 압력도 레이저 초점의 중앙부에서 가장 높고 가장자리 쪽으로 갈수록 낮아지는 불균일한 분포를 갖게 되는데 이러한 압력차에 의해 표면의 용융재료는 가장자리 방향으로의 불안정한 유동을 형성하며 표면 불안정성은 미소한 액체 방울의 생성으로 이어지기도 한다[11]. 반발압력은 또 순간적으로 강력한 압축파를 소재 내부에 발생시키므로[8] 취성이 강한 재료인 경우 그림 4에 나타난 것처럼 재료의 내부에 균열을 일으키거나 소재가 고체 상태로 떨어져 나가게 하기도 한다[12]. 따라서 입자의 발생이 가공의 최종결과에 큰 영향을 미치지 않는 공정의 경우에는 문제가 되지 않겠지만 미소한 입자들에 의해 치명적 결함을 일으킬 수 있는 전자부품이나

클린룸에서의 공정 등은 레이저 가공중에 발생할 수 있는 입자에 대해 충분한 고려가 필요하다. 한편 재료 내부에서의 압력과 혹은 충격과 발생은 재료를 효과적으로 파괴할 수 있는 요인이 되기도 하므로 의료분야에서는 신체 내부에 발생한 결석을 분쇄 제거하기 위한 방법으로 활용된다.

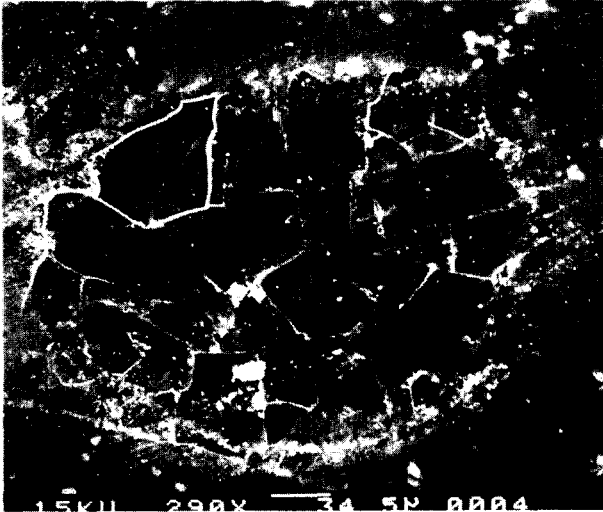


그림 4. Scanning electron microscope image of a glass sample ablated with a Nd-YAG laser ($\lambda=266$ nm) with pulse duration of 5 ns. Laser pulse energy and spot diameter were 0.85 mJ and 120 μ m, respectively. A large piece of the cracked sample was removed from the laser spot. Experiment to obtain this result was conducted for single pulse ablation (12).

3.2. 플라즈마 발생 및 보일링

레이저 발생시 생성되는 고온의 증기는 높은 온도로 인해 부분적인 이온화가 일어나며 이때 입사되는 레이저 에너지의 일부는 증기중의 이온 및 여기상태의 원자들에 의해 직접 흡수된다. 증기에 의한 레이저 빛의 직접 흡수는 증기의 온도를 더욱 상승시키는 결과를 가져오게 되므로 증기의 이온화는 더욱 촉진되고 마침내는 증발이 일어나는 용융면의 바로 위쪽에 플라즈마를 형성하게 된다.

레이저 플라즈마가 발생하면 레이저와 소재간의 에너지 전달 현상은 매우 복잡해진다. 첫째로 플라즈마에 의한 레이저 에너지의 차단이 일어날 수 있다. 플라즈마에 의한 레이저 에너지 흡수는 증기의 이온화 정도와 온도에 따라 달라지는데 이온화 정도 및 온도가 높을수록 흡수계수가 커진다. 흡수계수가 큰 플라즈마가 용융면 상부에 형성되면 입사되는 레이저 에너지의 상당 부분이 소재 표면에 도달하기 전에 플라즈마에 의해 흡수되므로 소재에 흡수되는 에너지의 양은 플라즈마 생성 이전보다 감소하게 되는데 이와 같이 플라즈마가 소재 표면을 레이저 빛으로부터 차

단하는 것과 같은 효과를 플라즈마 실딩(plasma shielding)이라고 부르며 대부분의 고체에서 에너지 강도가 약 0.5×10^9 W/cm² 정도에 이르면 발생하는 것으로 보고되고 있다 [13]. 이와는 반대로 플라즈마의 발생에 의해 소재로의 에너지 전달 효율이 증가되는 경우도 발생할 수 있는데, 예를 들면 대부분의 금속은 적외선 빛에 대한 반사율이 커서 실제 가공에서 에너지 효율이 매우 낮는데 플라즈마가 생성되면 플라즈마의 레이저 에너지 흡수율이 금속표면의 흡수 효율보다 현저히 커서 고온의 플라즈마에서 소재로의 에너지 전달을 통해 소재로 전달되는 전체 에너지가 증가하는 것을 말한다. 이와 같은 플라즈마에 의한 에너지 전달의 증가는 플라즈마가 소재표면과 거의 접촉 상태에서 생성될 때 가능하며 플라즈마가 소재표면에서 분리될 경우에는 플라즈마와 소재간의 에너지 전달 효율이 현저히 줄어들므로 오히려 플라즈마 실딩 효과를 나타내게 된다.

레이저 가공시 플라즈마가 발생하면 플라즈마에 의한 에너지는 모든 방향으로 균일하게 확산되므로 레이저 초점 크기보다 훨씬 큰 면적에 대한 가열이 일어나게 되며 소재표면에서의 에너지 분포는 레이저 빔에 의한 에너지 분포와 상당히 달라질 수 있다. 이와 같이 레이저 가공시 플라즈마의 발생은 소재와 레이저간의 에너지 전달 및 에너지 분포 등에 크게 영향을 미치므로 실제 가공조건에서의 플라즈마 생성 및 그에 따른 공정의 변화 등에 대한 이해가 요구된다.

일반적으로 소재의 증발은 용융면의 표면에서 일어나지만 용융액체의 온도가 거의 열역학적 임계온도(thermodynamic critical temperature) 부근까지 상승하면 표면 뿐 아니라 용융표면 아래쪽의 내부 재료에서도 기포가 생성될 수 있다. 용융액체 전체에서 기포가 생성될 경우 재료의 체적은 급격히 증가하며 용융액체 전체가 마치 폭발하는 듯한 양상으로 팽창하는데 이와 같은 현상을 상폭발(phase explosion)이라고 한다. 상폭발이 일어나면 용융 상태의 재료 대부분이 팽창압력에 의해 수 많은 액체방울 형태로 소재로부터 분출되므로 소재에서 제거되는 재료의 양은 증발에 의한 경우보다 훨씬 큰 것으로 보고되고 있다[14,15,16].

3.3. 엑시머 레이저에 의한 광화학적 현상

레이저 미세가공이 실질적으로 생산현장에 적용 가능할 뿐 아니라 다른 가공방법에 비해 우수한 제품을 생산할 수 있게 하는 기술이라는 것을 인식하게 된 데에는 엑시머 레이저가 결정적인 역할을 하였다. 엑시머 레이저는 기본적으로 파장이 짧은 자외선 영역의 빛을 출력하는데 엑시머 레이저에서 활용 가능한 파장 영역은 157~351 nm 정도이다.

엑시머 레이저 빛의 파장이 위에서 언급한 것처럼 짧다는 사실은 레이저 미세 가공에서 매우 중요한 의미가 있다. 우선 포토리소그라피 공정에서는 마스크에 있는 회로 패턴을 실리콘 웨이퍼에 이미징하여야 하는데 이때 이미지의 최소크기 R 은 $R \approx 0.8 \lambda / NA$ 로 [17] 표시되며 여기서 NA 는 수차(numerical aperture)이다. 이 식에서 알 수 있듯이 파장이 짧을수록 회로간의 최소간격을 작게 유지할 수가 있으며 이것은 다시 말해 단위면적당 회로집적율을 증가시킬



수 있다는 것을 나타낸다.

엑시머 레이저의 짧은 파장은 포토리소그라피 이외의 미세가공에도 매우 유리한 특성을 갖고 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 레이저 에너지는 대부분의 경우 물체에 흡수되면 열에너지로 변환되는데 이때 레이저 빛과 물체와의 상호작용은 빛을 구성하는 광자(photon)의 에너지에 크게 좌우된다. 폴리머와 같은 재료는 물체 자체가 화학적 결합(chemical bonding)으로 구성되어 있으므로 원자간의 결합 에너지(bonding energy)에 해당하는 만큼의 에너지가 공급되면 결합이 끊어지게 된다. 레이저 파장에 따른 광자의 에너지는 $E_p=hc/\lambda$ 로 표시되는데 여기서 h 는 플랑크 상수이다. 이식에서 보는 것처럼 레이저 빛의 파장이 짧을수록 광자의 에너지는 크며 따라서 파장이 짧은 자외선 영역의 빛을 내는 엑시머 레이저의 경우 Nd-YAG나 CO₂ 레이저에 비해 광자에너지가 훨씬 크다. 레이저의 유형에 따른 파장 및 광자에너지의 크기와 대표적인 화학결합에서의 결합에너지를 그림 5에 나타내었다[17].

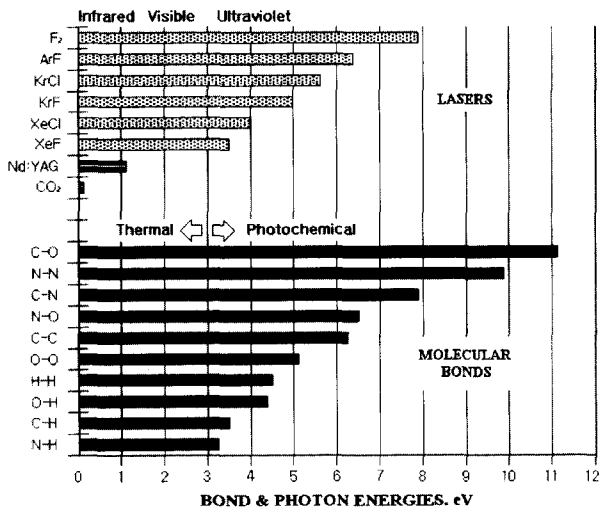


그림 5. Strengths of some common molecular chemical bonds compared with excimer laser photon energies[17].

그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 엑시머 레이저의 경우 광자에너지가 화학적 결합에너지와 거의 같은 크기이므로 엑시머 레이저 빛이 폴리머에 조사되면 결합에너지가 비교적 작은 부분이 끊어지면서 화학적 결합의 파괴를 통해 재료가 원자 혹은 분자 형태로 제거된다. 이때 레이저 에너지는 열에너지로 바뀌는 대신 바로 화학결합의 파괴에 이용되므로 열적 현상은 매우 작고 따라서 초점부 주변 재료의 용융 및 재응고 등과 같은 현상이 크게 줄어든다. 이 같은 엑시머 레이저에 의한 폴리머 가공의 특성을 미세가공에 적용할 경우 레이저 빛에 노출된 부분에서만 재료가 제거되고 주변 재료에 거의 영향을 미치지 않는 정밀한 가공이 가능하게 된다(그림 6). 이와 같이 광자에 의해 화학적 결합의 파괴를 유도하여 재료를 제거하는 공정을 포토어블레이션

(photoablation)이라고 하며 플라스틱이나 세라믹, 피부조직 등과 같은 재료를 대상으로 적용되고 있다. 그러나 금속의 경우 화학적 결합구조로 이루어진 재료가 아니므로 광화학적 반응이 일어날 수 없고 엑시머 레이저 가공의 경우에도 열적 현상을 피할 수 없다.

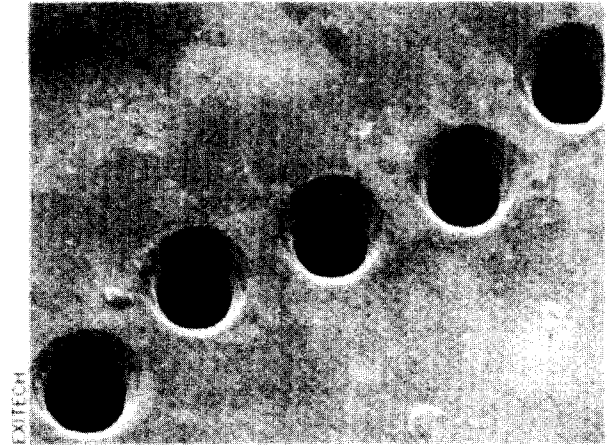


그림 6. Ink-jet printer nozzles drilled by an excimer laser. The diameter of the nozzles is about 30 μm and the substrate is polyimide[18].

3.4. 펄스초 레이저에 의한 가공

레이저 미세가공에 있어서 펄스초(10^{-15} 초) 펄스레이저에 대한 관심이 최근 크게 증가하고 있다. 펄스초 레이저는 보통 펄스길이 수백 펄스초 정도 밖에 되지 않는데 이 시간은 빛이 약 수십 마이크로미터 즉 머리카락 굵기 만큼의 길이를 통과하는 시간 밖에 되지 않으므로 펄스초가 얼마나 짧은 시간인지 짐작할 수 있다.

이처럼 짧은 펄스로 인해 펄스초 레이저는 다른 레이저에서는 얻을 수 없는 특징을 갖고 있다. 우선 펄스초 레이저의 경우 에너지 강도가 매우 높다. 보통 수백 펄스초의 펄스길이를 갖는 레이저의 경우 $10^{12} \sim 10^{14}$ W/cm²의 에너지 강도를 나타내는데 이 에너지 강도는 레이저 빛에 노출된 거의 모든 재료를 순식간에 제거할 수 있는 크기이다. 펄스초 레이저 가공에서 소재로부터 재료가 제거되는 메카니즘은 정확하게 규명되어 있지는 않지만 나노초 레이저 가공과는 매우 다른 현상들이 일어난다. 앞에서 설명한 것처럼 레이저 가공시 빛 에너지는 일단 전자에 의해 흡수된 다음 격자로 전달되며 이때 에너지 전달이 일어나는 시간은 대략 피코초(10^{-12} 초) 정도이다. 펄스초 레이저의 경우 레이저 펄스길이가 전자와 격자간의 에너지 전달시간보다 짧기 때문에 펄스길이 동안에는 전자의 에너지가 아직 격자로 전달되지 못한 상태라고 볼 수 있다. 따라서 펄스초 레이저 가공의 경우 재료는 비평형상태의 복잡한 메카니즘을 수반하게 된다. 펄스초 레이저의 경우 나노초 레이저에서 흔히 볼 수 있는 용융 및 열영향부가 거의 관찰되지 않으며 가공부의 경계 및 표면이 매우 뚜렷하여 정밀가공 및

열에 의한 손상 등이 우려되는 경우에 적합한 것으로 보고되고 있다. 그림 7은 동물의 이빨을 나노초 레이저 및 펨토초 레이저로 어블레이션 했을 때의 소재 표면을 나타내는데 펨토초 레이저의 경우 매우 깨끗한 표면을 얻을 수 있을 뿐 아니라 나노초 레이저 가공에서 발견된 가공부의 용융 및 손상 등이 전혀 없다[19].

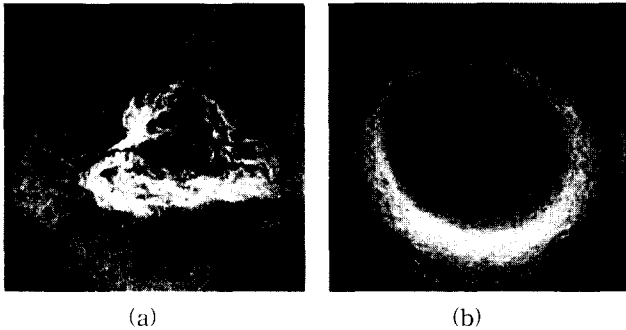


그림 7. Tooth samples ablated with a nano-second laser with 1.4 ns pulse width and 30 J/cm² energy density, (a), and with a femtosecond laser with 350 fs pulse width and 3 J/cm² energy density, (b). The sample in (a) shows cracking and local heating while that in (b) shows a clean hole with no damage on the base material.[19] These photographs were originally taken by researchers at the Lawrence Livermore National Laboratory in USA.

3.5. 레이저 유도 가공공정

위에서 설명한 현상들은 전부 레이저 빛이 직접적으로 소재를 가열, 용융, 증발 혹은 화학적 결합의 파괴 등을 일으킴으로써 원하는 가공을 수행하는 경우이다. 그러나 레이저 미세가공에 있어서 레이저 빛을 단지 화학적 현상을 일으키기 위한 열에너지 혹은 광에너지의 공급원으로만 활용하고 가공자체는 식각이나 증착 등과 같은 추가적인 화학 반응을 통해 일어나게 할 수가 있다. 이와 같은 가공법의 대표적인 기술로는 레이저 유도증착[20], 레이저 유도식각[21], 레이저 미세패속조형(microstereolithography)[22] 등이 있다.

레이저 유도가공은 대부분 2차원 혹은 3차원 형상을 제작하기 위해 개발되고 있는데 가공원리는 다음과 같다. 레이저 유도식각의 경우 실리콘이나 니켈 같은 금속을 부식성이 강한 용액속에 넣고 집속된 레이저 빔으로 부식을 일으키고자 하는 부분을 가열해준다. 이때 레이저 빔에 노출된 영역은 다른 영역에 비해 온도가 상승하게 되며 따라서 상대적으로 식각액에 의한 부식작용이 활발히 일어난다. 레이저 빔에 노출된 영역과 노출되지 않은 영역간의 부식속도 차이에 의해 레이저 빔에 노출된 부분에서만 식각패턴

이 형성된다. 시편의 표면에 문자나 회로 등을 식각하기 위해서는 레이저 빔 또는 시편을 형상을 따라 움직여주어야 하며 정밀한 이송시스템이 필요하게 된다. 레이저 증착도 레이저 식각과 기본적으로 같은 개념을 적용하는데 이 경우 식각용액 대신 증착기체를 사용하며 레이저 가열된 부분에서만 화학적 반응의 결과로 증착이 일어난다.

레이저 유도가공을 활용할 경우 3차원 미세구조물을 비교적 쉽게 제작할 수 있으므로 평면 구조물을 만드는데 최적화 되어 있는 반도체 가공공정으로 제조가 힘든 MEMS 구조제작 및 마이크로시스템 기술과 연계되어 앞으로 응용 및 기술개발이 기대되는 분야이다.

4. 결 론

레이저 미세가공에서 발생하는 물리적 현상 및 각 현상이 가공에 미치는 영향을 검토하였다. 레이저 절단, 용접, 천공, 마킹 등과 같은 가공기술은 기본적으로 집속을 통해 가공부의 크기가 작고 에너지 강도가 높은 빛을 공급하여 재료를 용융, 증발시킴으로써 원하는 가공이 가능하게 하는 방법이며 이 경우 레이저와 재료의 상호작용에 의해 발생하는 열적 및 비열적 현상을 가공조건에 따라 정확히 분석하는 것이 요구된다. 가공부의 가열 냉각에 따른 재료의 변형, 파손, 입자발생, 불균일한 표면형상 등과 같이 열적현상에 의해 야기될 수 있는 품질 저하를 피하기 위해서는 엑시머 레이저와 같은 자외선 레이저를 이용한 광화학적 가공공정의 적용을 검토할 수 있지만 폴리머 등의 재료에만 적용이 가능한 제한이 있다. 재료에 제한을 받지 않으면서 초정밀 가공이 가능한 기술로 펨토초 레이저 가공이 있으며 이 경우 세라믹이나 폴리머 뿐 아니라 금속의 경우에도 가공면과 가장자리가 깨끗하고 열영향부의 발생이 거의 없어 초정밀 가공에 적합하며 앞으로 많은 기술 개발이 기대된다. 그러나 펨토초 레이저의 경우 아직은 가격이 다른 레이저에 비해 월등히 비싸고 사용자가 선택할 수 있는 제품이 많지 않은 단점이 있다. 최근 들어 활발한 연구가 활발히 이뤄지고 있는 MEMS 기술과 연계되어 미소 3차원 부품의 가공기술로 레이저 유도가공이 많은 관심을 끌고 있으며 마이크로시스템 기술의 발전과 함께 응용분야가 확대되어갈 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

- [1] Martin von Allmen and Andreas Blatter, *Laser-beam interactions with materials*, Physical principles and applications, Springer, 1995.
- [2] G. R. Fowles, *Introduction to modern optics*, 2ed., Dover, 1975.
- [3] R. O. Bell, M. Toulemonde, and P. Siffert, Calculated temperature distribution during laser annealing in silicon and cadmium telluride, *Applied Physics*, 19.



- 1979, pp. 313~319.
- [4] P. Baumgart, D. J. Krajnovich, T. A. Nguyen, and A. C. Tam, A new laser texturing techniques for high performance magnetic disk drives, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 6, 1995 pp. 2946~2951.
- [5] A. C. Tam, I. K. Pour, T. A. Nguyen, D. J. Krajnovich, P. Baumgart, T. Bennett, and C. Grigoropoulos, Experimental and theoretical studies of bump formation during laser texturing of Ni-P disl substrates, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No. 5, 1996, pp. 3771~3773.
- [6] S. H. Jeong, R. Greif, and R. E. Russo, Laser heating of metal targets including the influence of the background pressure, *Proceedings of the ASME heat transfer division, HTD Vol. 351*, 1997, pp. 63~73.
- [7] S. H. Jeong, R. Greif, and R. E. Russo, Shock wave and material vapor plume propagation during excimer laser ablation of aluminum samples, *Journal of Physics D: Applied Physics* 32, 1999, pp. 2578~2585.
- [8] D. Kim M. Ye, and C. P. Grigoropoulos, Pulsed laser-induced ablation of absorbing liquids and acoustic-transient generation, *Applied Physics A*, 67, 1998, pp. 169~181.
- [9] R. Kelly and A. Miotello, Pulsed-laser sputtering of atoms and molecules. Part I: Basic solution for gas-dynamic effects, *Applied Physics B*, 57, 1993, pp. 145~158.
- [10] V. A. Batanov, F. V. Bunkin, A. M. Prokhorov, and V. B. Fedorov, Evaporation of metallic targets caused by intense optical radiation, *Soviet Physics JETP*, Vol. 32, No. 2, 1973, pp. 311~322.
- [11] A. B. Brailovsky., S. V. Gaponov, V. I. Luchin, Mechanisms of melt droplets and solid-particle ejection from a target surface by pulsed laser action, *Applied Physics A*, 61, 1995, pp. 81~86.
- [12] S. H. Jeong, O. V. Borisov, J. H. Yoo, X. L. Mao, and R. E. Russo, Effects of particle size distribution on inductively coupled plasma mass spectrometry signal intensiy during laser ablation of glass samples, *Analytical Chemistry*, Vol. 71, No. 22, 1999, pp. 5123~5130.
- [13] X. Mao, W. T. Chan, M. Caetano, M. A. Shannon, and R. E. Russo, Preferential vaporization and plasma shielding during nano-second laser ablation, *Applied Surface Science*, 96-98, 1996, pp. 126~130.
- [14] R. Kelly and A. Miotello, Comments on explosive mechanisms of laser sputtering, *Applied Surface Science*, 96-98, 1996, pp. 205~215.
- [15] K. H. Song and X. Xu, Explosive phase transformation in excimer laser ablation, *Applied Surface Science*, 127~129, 1998, pp. 111~116.
- [16] J. H. Yoo, S. H. Jeong, R. Greif, anf R. E. Russo, Explosive change in crater properties during high power nanosecond laser ablation of silicon, *Journal of Applied Physics*, Vol. 88, No. 3, 2000, pp. 1638~1649.
- [17] R. C. Crafer and P. J. Oakley, *Laser processing in manufacturing*, 1993, Chapman.
- [18] M. C. Gower, Excimers tackle micromachining, *Industrial laser solutions for manufacturing*, April 1999, pp. 14~18.
- [19] B. Craig, Ultrafast pulses promise better processing of fine structures, *Laser Focus World*, September, 1998, pp. 79~88.
- [20] K. Williams, J. Maxwell, K. Larsen, and M. Boman, Freeform fabrication of functional microcoils, electromagnets and helical springs usinghigh-pressure laser chemical vapor deposition, *Proceedings of IEEE International Conference, MEMS 1999*, pp. 232~237.
- [21] T. M. Bloomstein and D. J. Ehrlich, Laser-chemical three-dimensional writing for microelectromechanics and application to standard-cell microfluidics, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 10(6), 1992, pp. 2671~2674.
- [22] A. Bertsch, H. Lorenz and P. Renaud, 3D microfabrication by combining microstereolithography and thick resist UV lithography, *Sensors and Actuators* 73, 1999, pp. 14~23.

저 자 소개



정 성 호(鄭 聖 浩)

1962년 11월 12일생. 1986년 경북대 공대 기계공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(공학석사). 1997년 University of California at Berkeley 기계공학과 졸업(공학박사). 현재 광주과학기술원 기전공학과 조교수.