



# THEME 02

## 레이저를 이용한 마이크로 및 나노 가공

정 성 호 | 광주과학기술원 기전공학부, 교수 | e-mail : shjeong@gist.ac.kr

레이저 마이크로 및 나노 가공은 공기 중에서 고속으로 실행이 가능하여 산업적으로 응용이 가능한 거의 유일한 초미세가공기술로서 반도체, 전자, 마이크로유체소자 등과 같은 분야에 널리 응용되고 있고 기존 기술의 한계를 뛰어 넘는 새로운 기술을 창출하는 데 기여하고 있다.

레이저의 특징은 에너지를 자외선이나 적외선, 가시광선과 같이 특정한 파장을 갖는 빛의 형태로 발생시키는 것으로서 레이저에서 발생된 빛은 에너지 밀도가 매우 높고 직진하므로 거울이나 광섬유 등을 이용하여 주변으로의 에너지 손실이 거의 없이 원하는 위치에 조사하기가 편리한 장점이 있다. 특히 레이저 에너지는 빛의 형태를 띠고 있으므로 적절한 집속렌즈를 이용하여 수~수십마이크로미터 크기의 매우 작은 영역 안에 에너지를 집속시킬 수 있으며, 이는 레이저 가공의 기초가 된다. 예를 들어, 배율이 20인 대물

렌즈를 이용할 경우 손쉽게 레이저빔(beam)을 렌즈 초점 위치에서 약 10 $\mu$ m 이내의 크기로 집속시킬 수 있는데 이와 같이 에너지를 작은 영역 안에 집속할 경우 높은 에너지 밀도를 얻을 수 있어 재료가공 시 재료의 용융이나 증발을 쉽게 일으킬 수 있으며, 또한 작은 초점 크기는 정교한 가공이 가능하게 한다. 이에 반해 우리에게 친숙한 열에너지나 전기에너지의 경우 이와 같이 수마이크로미터 영역 내로 에너지를 손실 없이 집속하는 것이 거의 불가능하거나, 가능하다고 하더라도 에너지 밀도가 상당히 떨어지는 경우가 대부분이다.

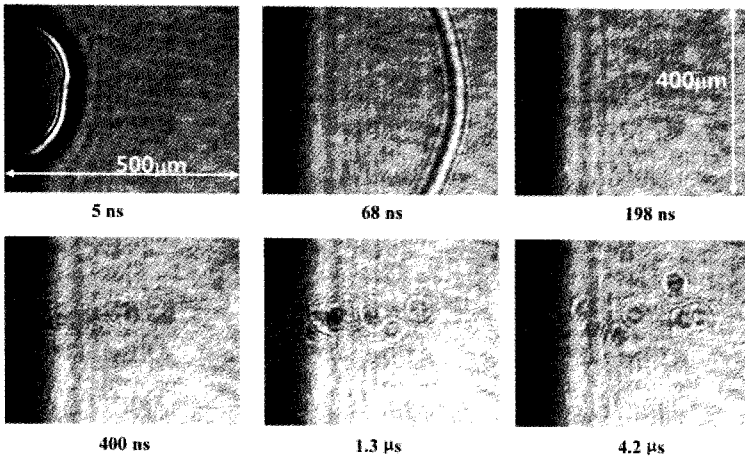


그림 1. 실리콘에 파장 266nm, 펄스폭 3나노초의 펄스레이저를 조사했을 때 발생하는 충격파 및 재료의 제거 모습. 각 그림에서의 시간은 레이저빔이 조사된 시점부터의 경과시간(에너지강도=3.9 $\times 10^{10}$ W/cm<sup>2</sup>)

레이저는 레이저빔이 방출되는 형태에 따라 연속빔(continuous wave) 레이저 혹은 펄스(pulse) 레이저로 구분된다. 연속빔 레이저의 경우 레이저빔이 끊어짐 없이 지속적으로 방출되는 레이저로서 주로 절단이나 용접 등에 많이 사용되며 에너지의 세기는 출력(power; W)으로 표시되고, 펄스레이저는 레이저빔이 짧은 시간 동안만 방출되는 레이저로 다양한 형태의 가공에 활용되며 에너지의 세기는 각 펄스에 포함된 에너지의 양 즉 펄스에너지(pulse energy; J) 및 레이저

빔이 방출되는 시간의 길이 즉 펄스폭(s)에 의해 결정된다. 실제 재료가공 시 재료의 변화는 조사되는 에너지의 강도에 의해 결정되는데, 에너지 강도는 단위면적 및 단위시간당 조사되는 에너지로서 단위는  $W/cm^2$ 이 주로 사용된다. 예를 들어 레이저빔의 초점 직경이  $100\mu m$ 일 경우  $1kW$ 의 출력을 내는 연속빔 레이저의 경우 초점에서의 에너지 강도가 약  $1.3 \times 10^7 W/cm^2$ 인데 비해, 펄스에너지가  $0.1J$ 이고 펄스폭이  $10$  나노초( $1나노초=10^{-9}초$ )인 펄스레이저의 경우 초점에서의 에너지 강도가 약  $1.3 \times 10^{11} W/cm^2$ 으로 연속빔 레이저에 비해 훨씬 높은 순간 에너지 강도를 얻을 수 있다. 이와 같은 높은 에너지 강도로 인해 펄스에너지를 활용할 경우 거의 모든 재료를 순간적으로 용융 및 증발시킬 수 있으며, 급격한 재료의 증발과 팽창은 그림 1에서와 같이 강력한 충격파(shock wave)를 발생시키기도 하며 대부분의 경우 레이저 플라즈마의 발생이 동반된다.

초기의 레이저 가공기술은 주로 금속의 절단, 용접 등을 중심으로 발전하였으며 레이저 절단 및 용접 기술은 현재 자동차, 선박, 철강 등과 같은 산업분야에서 핵심공정기술로 활용되고 있다. 레이저의 마이크로 및 나노가공으로의 응용은 다양한 방식으로 가능한데, 우선적으로 레이저의 높은 에너지를 이용하여 그림 1에서와 같이 재료를 용융, 증발시키면서 재료를 제거해나가는 방식을 어블레이션(Ablation)가공이라고 한다. 적절한 파장 및 에너지의 레이저를 사용할 경우 금속, 유리, 세라믹 등과 같은 거의 모든 재료의 어블레이션가공이 가능하며 대부분 펄스레이저가 사용된다. 특히 세라믹이나 유리와 같이 경도가 높고 기계가공이 힘든 재료의 경우에도 어려움 없이 가공이 가능한데 그림 2는 펄스레이저를 이용하여 알루미늄이나 세라믹 및 유리에 구멍을 가공한 결과를 보여주고 있다. 알루미늄 세라믹의 결과에서 약  $180\mu m$  직경의 미세한 구멍을 반복적으로 가공이 가능함을 알 수 있

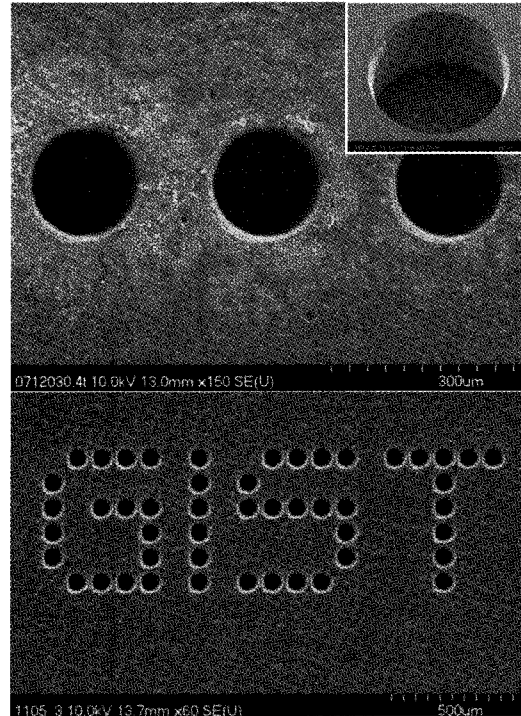


그림 2 두께  $400\mu m$ 의 알루미늄( $Al_2O_3$ ) 세라믹에 펄스레이저를 이용하여 미세구멍을 가공한 결과(직경= $180\mu m$ ). 상단의 작은 그림은 유리에 펄스레이저로 미세구멍을 가공한 예(직경= $1.5mm$ )

으며, 유리에서도 주변의 손상이 없이 내부표면이 매끈한 형태로 가공이 가능함을 알 수 있다. 레이저를 이용한 정밀한 마이크로 구조물 가공을 위해 최근에는 펄스레이저의 활용이 크게 증가하고 있는데, 펄스레이저는 펄스폭이 약  $100$ 펄토초( $1펄토초=10^{-15}초$ ) 내외로 짧은 펄스폭을 갖는 레이저를 말한다. 펄스레이저의 경우 짧은 펄스폭으로 인해 수  $\mu J$ 의 작은 펄스에너지에서도 수백  $GW/cm^2$ ( $1GW=10^9W$ ) 이상의 높은 에너지 강도를 얻을 수 있어 최근 펄스레이저 초정밀 가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 마이크로 및 나노가공 분야에 다양한 응용기술이 개발되고 있다. 펄스레이저와 같이 펄스에너지는 작으면서도 에너지 강도는 매우 큰 경우 초정밀가공에 특히 유리한데 그 이유는 펄스에너지가 작으면

작을수록 재료에 궁극적으로 가해지는 에너지의 총량이 작아서 가공 시 재료 내부에 축적되는 열에너지의 양을 최소화할 수 있기 때문이다. 레이저 가공에서 가공품질을 결정하는 중요한 요인 중의 하나가 열영향 및 용융에 따른 현상으로 펄스폭이 나노초 이상으로 긴 경우 그림 3에서와 같이 재료의 용융에 따른 표면 형상 불균일, 가공 중에 용융상태의 재료가 주변으로 튀긴 후 달라 붙어 응고되는 현상, 용융상태의 재료가 레이저빔의 가장자리를 따라 응고되는 현상 등으로 인해 가공부의 치수정밀도가 떨어지고 가공공정의 제어가 힘든 반면, 펄스초레이저와 같이 펄스에너지가 작고 펄스폭이 짧은 경우 높은 에너지강도로 인해 가공부의 용융이 거의 없이 원자상태로 재료의 제거가 가능하여 그림 3과 같이 균일하고 정밀한 가공이 가능하다.

레이저 어블레이션 가공은 수마이크로미터 크기의 작은 레이저 초점을 이용하여 시편을 가공하므로 작은 구조물의 정밀한 가공에는 매우 유리하지만 가공 영역의 크기가 커질수록 가공에 걸리는 시간이 급격히 증가하므로 생산성이 낮은 단점이 있다. 초정밀 가공의 입장에서 보면 전자빔이나 이온빔의 경우 수십 나노미터 크기의 구조물 가공도 가능하므로 정밀도 측면에서는 레이저에 비해 우수하지만 기본적으로 진공환경에서 가공이 이루어져야 하고 가공속도가 극히 느려 산업용으로는 사용이 불가능하다. 이에 반해 레이저의 경우 공기 중에서 가공이 가능하며, 수 마이크로미터 크기 구조물의 직접 가공 및 간섭현상을 이용할 경우 약 200nm 크기의 구조물 가공도 가능하고, 갈바노스캐너(Galvanometric scanner)와 같은 광학기구를 사용할 경우 고속으로 가공이 가능하여 산업적 측면에서 수~수십 마이크로미터 크기의 구조물 가공 시 현실적으로 활용 가능한 거의 유일한 기술이다. 이러한 레이저의 초정밀 고속가공 장점이 가장 잘 활용되고 있는 산업분야로는 레이저 마킹(marking), 레이저

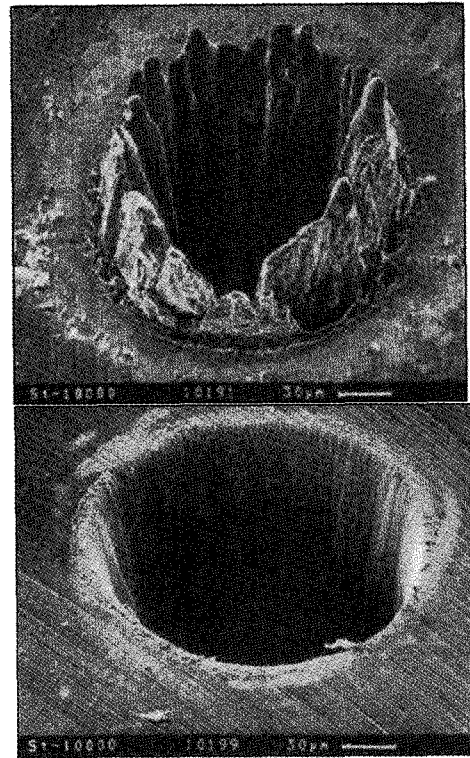


그림 3 나노초레이저를 이용하여 100 $\mu$ m 두께의 강판에 구멍을 가공한 결과(왼쪽, 펄스에너지=1mJ, 펄스폭=3.3나노초)와 펄스초레이저를 이용하여 가공한 결과(오른쪽, 펄스에너지=120 $\mu$ J, 펄스폭=200펄토초)(출처: International Journal of Electrical Machining, Vol. 4, p.1, 1999)

라벨링(labeling), 인쇄전자회로기판의 드릴링(PCB drilling) 등을 들 수 있다. 그림 4는 레이저 마킹을 이용해 반도체칩 및 자동차 내부 계기판에 상표와 로고를 마킹한 예로 이외에도 금속, 유리, 폴리머, 나무 등 다양한 재료에 적용이 가능하다.

레이저 마이크로 및 나노가공의 주요한 장점 중의 하나는 임의의 가공 패턴을 따라가면서 가공이 가능하다는 것이다. 영어 표현을 따라 다이렉트 라이팅(direct writing) 혹은 직접묘화라고도 부르는 이 기술은 기본적으로 레이저빔을 미세한 크기로 집속할 수 있으며, 아울러 집속된 빔을 갈바노스캐너 혹은 초정밀 이송장치를 이용하여 정밀하게 원하는 경로를 따

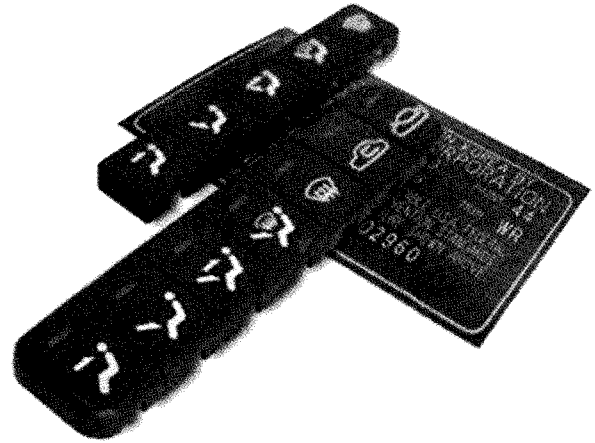
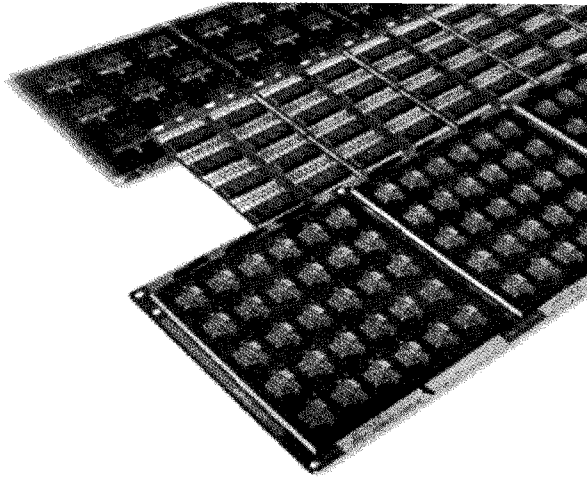


그림 3 반도체칩(왼쪽) 및 자동차 계기판(오른쪽)의 레이저 마킹 예(출처 : 이오테크닉스, www.eotechnics.com)

라 이송할 수 있다는 것을 바탕으로 하고 있다. 위에서 설명한 레이저 마킹의 경우도 직접 라이팅의 한 예이며, 이외에도 레이저 국소증착이나 레이저에칭, 마이크로광조형 등과 같은 공정에도 유용하게 활용된다. 앞에서 언급한 바와 같이 레이저 마이크로 가공의 경우 광학계의 사용을 통해 상당히 빠른 속도로 가공이 가능하지만, 반도체 생산공정 등에 비해서는 여전히 생산성이 매우 낮은 것이 사실이므로 대량생산을 기반으로 하는 산업에서는 아직 적용이 용이하지 않은 측면이 있다. 그러나 레이저만의 장점인 정밀성과 비교적 작은 영역 내에서의 높은 가공속도는 기존의 대량생산 공정과 상호 보완적인 역할을 통해 산업생산에 매우 효과적으로 활용되고 있다. 예를 들면, 텔레비전이나 컴퓨터 모니터 등에 사용되는 TFT-LCD 유리기판의 경우 크기가 1m×2m 이상이며 반도체 공정을 통해 회로패턴을 생성한다. 그런데, 만일 공정상의 이유로 유리기판의 한 부분에서 회로에 결함이 발생했을 경우 유리기판을 통째로 폐기하는 것은 매우 큰 손실이므로 적절한 수정과정을 거쳐 원래의 목표대로 회로를 완성하는 것이 필요하다. 만일 회로가 없어야 할 부분에 회로가 생성된 경우에는 불필요한 부

분의 회로를 손쉽게 레이저 어블레이션으로 제거할 수 있다. 이때 레이저는 이송계 위에 설치되어 결함이 있는 위치로 자동이송되고 자동초점 장치를 통해 수 마이크로미터 크기로 초점을 조절하여 결함부위만 어블레이션 시킴으로써 정상회로로 복구한다. 한편, 회로가 있어야 할 부분에 회로가 생성되지 않은 결함의 경우 유리 위에 별도의 도선을 만들어 전기가 통하게 해줘야 하므로 훨씬 공정이 복잡하고 어렵게 된다. 이와 같은 형태의 결함을 원상복구 할 수 있는 회로보정 기술은 현재로서는 레이저 국소증착이 유일한 방법으로 TFT-LCD 생산공장에서 널리 활용되고 있다. 레이저 국소증착은 그림 5에서와 같이 금속도선을 생성하고자 하는 위치에 레이저를 조사하면 레이저가 조사된 위치의 시편온도가 상승하게 되고 높은 온도로 인해 시편주변에 있던 반응기체의 열분해가 일어나서 기판의 표면에 금속은 증착되고 나머지 기체성분은 부산물로 제거되는 과정을 통해 이루어진다. TFT-LCD 유리기판의 회로수정을 위해서는 유리에서 흡수가 일어나는 자외선영역의 레이저를 사용해야 하며 약 10μm 이내의 선폭을 갖는 회로패턴의 증착이 가능하다. 그림 5에서와 같이 열분해 반응을 유도하기

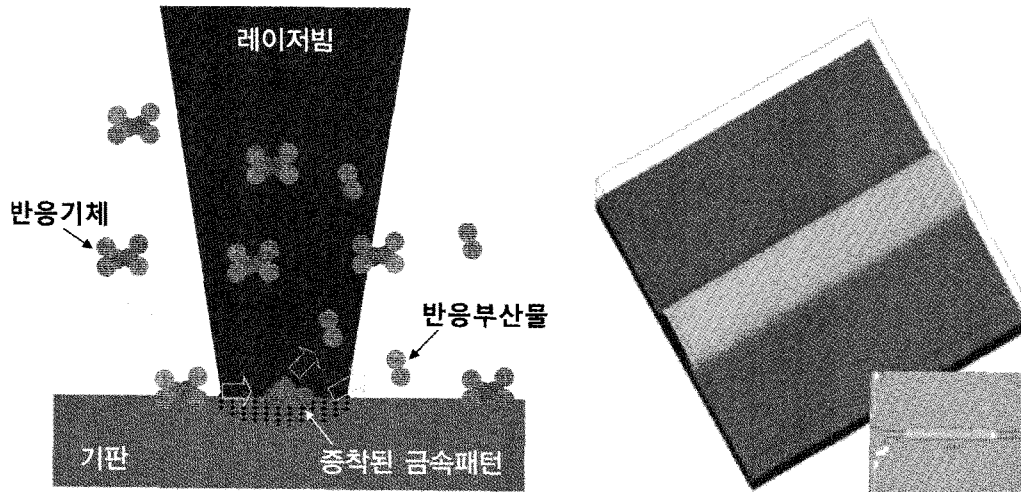


그림 5 레이저 국소증착의 원리(왼쪽) 및 유리기판에 레이저 국소증착 공정을 이용해 텅스텐을 증착한 예(작은 그림은 회로수정 적용 예)(오른쪽)

위해서는 시편주변을 반응기체로 채워줘야 하는데, 시편의 크기가 작은 경우에는 시편을 반응기체가 채워진 챔버에 넣은 후 레이저를 조사해주면 되지만 TFT-LCD 유리기판과 같이 큰 시편은 챔버에 넣는 것이 거의 불가능하므로 유리기판 위에 수 밀리미터의 간격을 두고 반응가스를 레이저조사 위치에 제트(jet) 형태로 분사해주는 방식을 사용하고 있으며 반응가스의 유출을 방지하기 위해 공기를 분사하여 공기커튼을 형성하는 이중구조의 노즐을 활용하고 있다. 그림 5에는  $W(CO)_6$ 를 반응기체로 사용하여 유리기판 위에 351nm 파장의 연속빔Nd:YLF 레이저를 조사하여 텅스텐 도선을 증착한 예와 실제 회로수정에의 응용예를 보여주고 있다.

레이저 국소증착과 다이렉트라이팅 기술을 활용하면 최근 활발한 연구가 이루어지고 있는 탄소나노튜브(Carbon Nanotube)나 그래핀(Graphene)과 같은 나노구조를 원하는 위치를 따라 성장시킬 수도 있다. 나노구조체 성장의 기본적인 원리는 그림 5와 동일하며 다만 탄소나노튜브 및 그래핀을 성장시키기 위해서는 각 나노구조체의 성장에 가장 적합한 시편 및 반응기

체, 공정조건 등을 최적으로 설정할 필요가 있다. 그림 6은 아세틸렌을 반응기체로 사용하고 유리기판 위에 금속촉매층을 활용해 폭  $10\mu\text{m}$  이내의 다중벽탄소나노튜브 패턴을 제조한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 레이저 국소증착을 통해 매우 균일하고 높은 반복성으로 탄소나노튜브 패턴의 제조가 가능함을 알 수 있다. 또한, 동일한 방법으로 그림 6의 오른쪽 사진에서와 같이 탄소나노튜브 다발의 수직성장도 가능하며 이와 같이 수직성장시킨 탄소나노튜브 다발의 경우 전계방출 디스플레이(Field emission display) 등에 활용이 가능하다. 최근에는 동일한 방법으로 그래핀을 증착한 결과가 보고된 바 있으며, 향후 그래핀 회로 제조 등에 활용이 가능할 것으로 기대된다.

한편, 레이저 빛을 이용하여 광화학반응(Photochemical reaction)유도함으로써 마이크로 및 나노구조물을 가공하는 것도 가능하다. 레이저 유도 광화학반응을 기반으로 한 마이크로구조물 제조의 가장 대표적인 예로는 광조형기술이 있는데, 광조형은 빛에 민감한 액체상태의 수지(resin)에 레이저를 조사하여 에너지가 높은 레이저의 초점부근에서만 고체로의 경

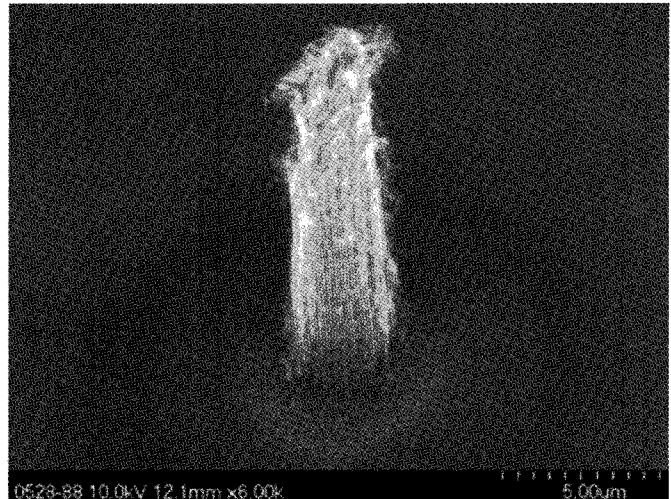
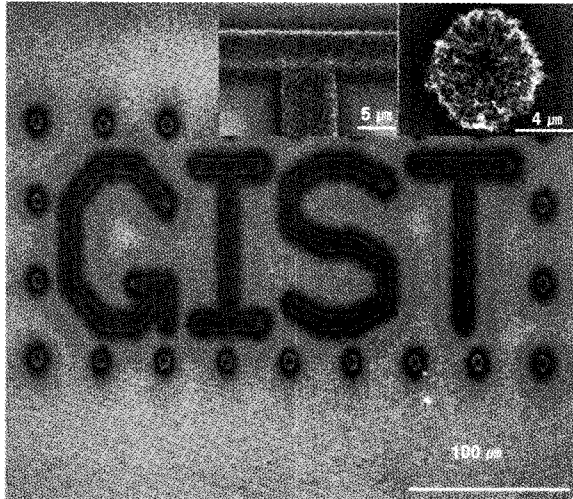


그림 6 레이저 국소증착을 이용해 제조한 탄소나노튜브 패턴(왼쪽) 및 수직성장 다중벽탄소나노튜브 다발(오른쪽)

화현상이 일어나도록 하면서 제조하고자 하는 구조물의 형상을 따라 레이저빔을 이송시키면 레이저빔의 궤적을 따라 구조물이 만들어지는 원리를 이용한다. 그림 7은 이와 같은 광조형의 원리를 활용하여 약  $10\mu\text{m}$  크기의 황소모형을 제조한 예로 작은 크기에도 불구하고, 황소의 형상이 매우 섬세하게 나타나 있음을 통해 높은 정밀도로 구조물 제조가 가능함을 알 수 있으며, 오른쪽 그림에서 나타난 바와 같이 레이저 조사조건을 적절히 조절함으로써 경화되는 구조물의 최소 크기를 약  $100\text{nm}$  크기로 제어할 수 있음을 보여준다. 마이크로 광조형기술은 마이크로유체소자 등과 같은 다양한 형태의 마이크로 구조물 제조에 매우 유용하여 최근까지 많은 연구가 이루어지고 있다. 그림 7의 마이크로 광조형은 펨토초레이저를 이용하여 제조한 결과로 펨토초레이저 가공기술의 특징 중에 하나인 이광자흡수 현상(Two photon absorption)을 이용하여 초미세 구조물을 제조한 사례이다. 대부분의 펨토초레이저는 적외선 빛을 발생시키며 적외선은 보통 액체수지에 거의 흡수가 일어나지 않지만, 펨토초레이저와 같이 초점에서 매우 높은 에너지강도를 얻을

수 있는 경우에는 에너지강도가 가장 높은 초점의 가운데 영역에서만 비선형적인 광흡수현상이 일어나는데 이를 이광자흡수라고 하며, 이때 재료에서는 광화학반응이 일어나게 된다. 그림 7에서와 같은 마이크로 구조물의 제조를 위해서는 컴퓨터로 레이저빔을 가공하고자 하는 구조물의 형상을 따라 이송시키면서 경화반응이 일어나게 함으로써 최종적으로 원하는 형상의 고체구조물을 얻게 된다. 이에 반해 낮은 에너지영역에서도 광화학반응을 유도하기 위해서는 광자(Photon)에너지가 큰 자외선 빔을 사용할 수 있는데, 자외선의 경우 액체수지의 표면에서부터 흡수가 일어나므로 액체수지 내부 임의의 원하는 위치에 구조물을 제조하는 데는 불리한 단점이 있다. 광경화수지 이외에도 빛에 민감한 특성을 가진 유리 등에 펨토초레이저를 조사하여 유리의 내부에 광화학반응을 유도함으로써 일체형 마이크로유체소자 혹은 광도파로(waveguide) 등의 제조도 활발히 이루어지고 있다.

이상에서 레이저의 마이크로 및 나노가공 응용에 대해 간단히 살펴보았다. 앞에서 언급한 바와 같이 레이저는 산업적 규모의 마이크로 및 나노구조물 제조



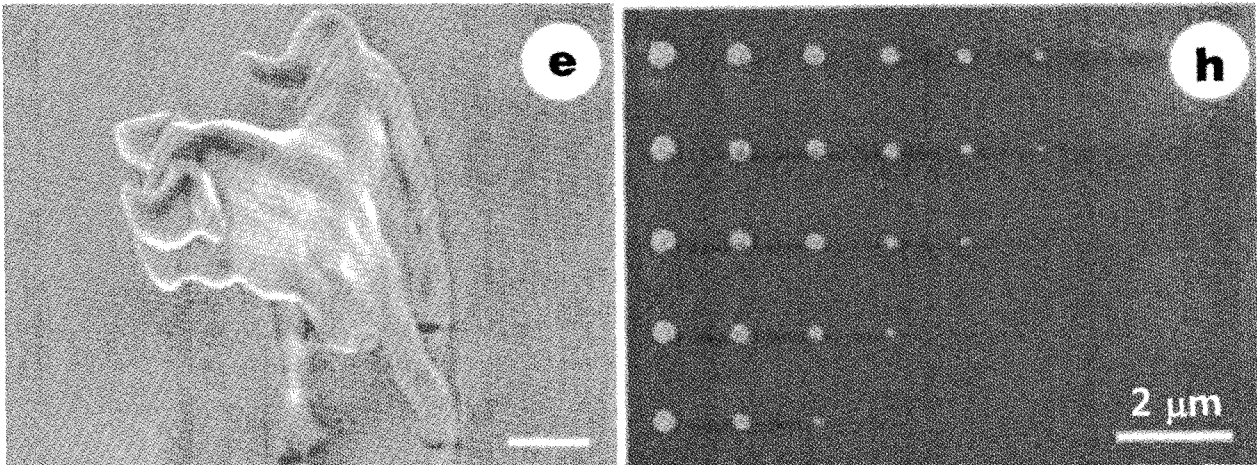


그림 7 펨토초레이저마이크로광조형기술을 이용하여 약 10 $\mu$ m 크기의 황소를 제조한 예(왼쪽) 및 레이저빔 조사 조건에 따른 나노구조체의 크기 변화(오른쪽) (출처 : Nature Vol. 412, p.697, 2001)

를 위해 적용가능한 거의 유일한 수단으로 현재 제조업 분야에서 다양하게 활용되고 있으며 대량생산을 위해서는 비교적 에너지가 큰 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)레이저나 나노초야그(Nd:YAG)레이저 등이 주로 많이 사용된다. 최근에는 펨토초레이저를 이용한 초정밀 마이크로 및 나노구조물 가공기술이 크게 발달하고 있고, 특히 펨토초레이저의 높은 에너지강도에 기반한 이광

자흡수현상을 이용한 가공기술들이 초미세가공에 많이 적용되고 있다. 레이저 마이크로 및 나노가공 기술은 반도체 및 전자산업 분야에서 매우 효과적으로 활용되어 오고 있으며, 향후 실리콘웨이퍼다이싱(dicing), 유리절단, 세라믹 등의 난가공재 가공 등의 핵심기술로 자리잡을 것으로 기대된다.



**기계용어해설**

**침수건조(Water Seasoning)**

일정 염분을 함유한 물 속에 목재를 담가 두어 목재 속의 수액과 외부의 수분을 바꾸어 이후의 건조를 쉽게 하는 것.

**백심가단주철(白心可鍛鑄鐵; White Beart Malleable Cast Iron)**

백주철을 밀 스케일 등의 산화철과 함께 950~1,050℃로 장시간 가열하여 탈탄시키고 표면부를 페라이트 조직으로 하여 늘인 것.

**백심가단주물(白心可鍛鑄物; White Beart Malleable Casting)**

백선주물을 탈탄제와 함께 풀림상자에 넣고 장시간 동안 고온으로 가열한 후 서서히 냉각하여 탈탄시켜 가단성을 갖게 한 것.

**연수장치(Water Softening Plant)**

넓은 의미로는 수중의 용해물질을 제거하는 장치이며, 일반적으로는 수중에 용해한 칼슘염, 마그네슘염을 침전시켜 제거하는 장치.