

전 호 정 한국과학기술연구원 생체재료연구단 선임연구원, 과학기술연합대학원대학교 의공학과 조교수 | e-mail : jeonhj@kist.re.kr

금속, 세라믹, 고분자 등 다양한 소재에 적용이 가능한 고출력 광에너지인 레이저 기반의 마이크로-나노스케일 표면가공기술의 기본 원리 및 응용 분야를 소개한다.

### 마이크로나노 표면가공 응용분야

전문 시장분석기관인 BCC Research에서 보고한 바에 따르면 나노 표면가공 세계 시장 규모는 2012년에 1억 8,300만 달러를 기록했으며, 연평균 복합성장률 27.7%로 성장하여 2022년에는 약 25억 달러에 달할 것으로 예상하고 있다. 이처럼 큰 세계시장규모를 갖는 나노 표면가공기술은 주로 자연에 존재하는 마이크로, 나노 구조물에서부터 연구개발 동기부여를 받고 있다. 식물의 잎, 곤충, 도마뱀 발, 갑각류 등의 생태계에 존재하는 동식물의 효율적인 에너지 활용이나 우수한 생존 능력에서 착안하여 흥미로운 구조에 내재된 물리적, 화학적 특성을 규명하는 것으로 연구가 시작된다. 그리고 최근 발달하고 있는 마이크로나노 공정기술을 도입하여 다양한 상업 용도에 적합한 마이크로-나노스케일의 가공된 표면을 설계할 수 있는 가능성이 커졌다.

표면 마이크로나노 가공은 수많은 공업적 공정과 상용화된 제품에 적용이 되고 있으며, 대표적으로 초소수성 표면 및 광촉매 코팅 기술이 적용된 셀프클리닝 유리를 예로 들 수 있다. 시장규모로 봤을

때는 현재 기술의 상용화가 많이 이루어진 셀프클리닝 유리와 시멘트, 방현성을 가지는 알루미늄과 플라스틱 건축자재를 개발하고 있는 건축자재 시장이 앞으로 시장의 많은 부분을 차지할 것으로 예상된다. 또한 전자기기 분야가 두 번째로 큰 시장을 차지하고 있으며 초소수성 방수가공, 소유성 가공, 디스플레이용 나노가공 등이 개발될 것으로 전망된다. 연구개발의 전망을 생각해보면, 2018년 이후 시장이 급증할 것으로 예상하고 있는 에너지/환경, 의생명 분야가 촉망되는 연구분야라 할 수 있을 것이다. 마이크로나

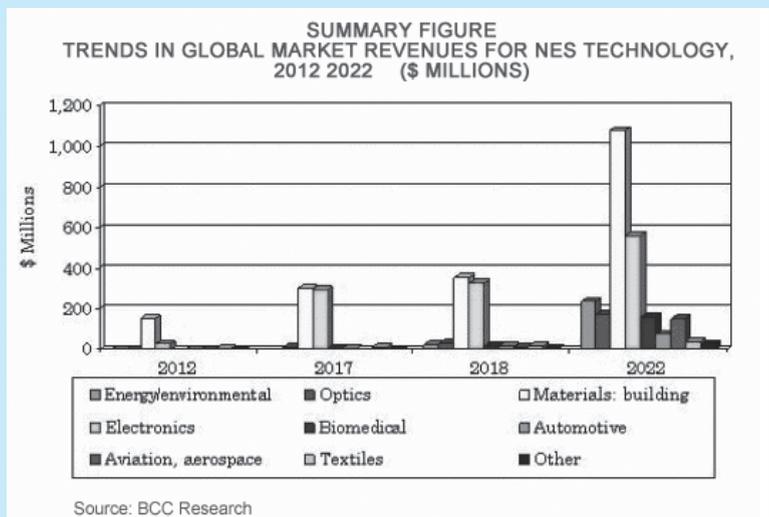


그림 1 나노표면가공(Nanoengineered surface) 기술의 세계시장 규모(출처 : BCC Research, 2013)

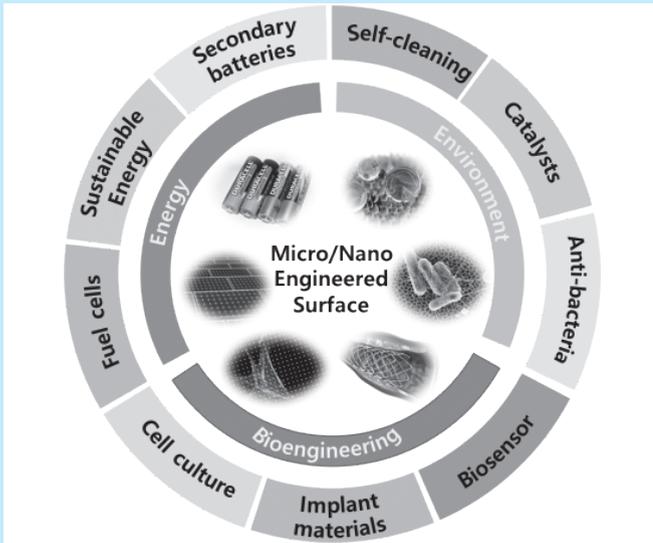


그림 2 마이크로나노 표면가공 적용 연구분야

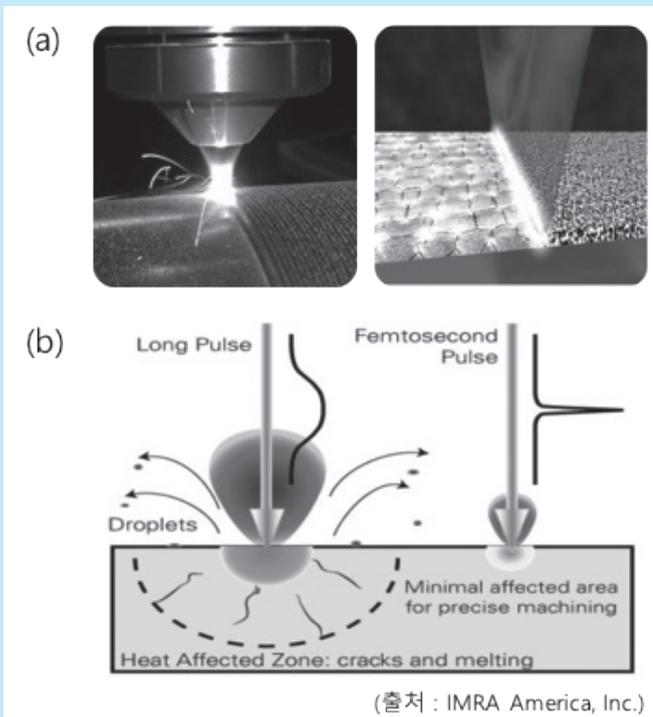


그림 3 (a) 레이저 기반 마이크로나노 표면가공; (b) 레이저 펄스에 따른 열흡수 및 전달 차이

노 표면가공 기술은 이차전지, 재생에너지, 연료전지, 셀프클리닝, 촉매, 항균, 조직공학, 생체재료, 바이오

센서 등의 에너지/환경/의생명 분야에 적용할 수 있으며, 그림 2에 정리하였다.

## 레이저 표면가공 기술의 특징

레이저(LASER)는 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation(방사의 유도 방출에 의한 광의 증폭)의 앞 글자로 이루어진 단어로 물리 현상을 이용한 광원장치를 지칭하며 단일 파장의 빛을 집중해서 보내는 특징을 갖고 있다. 레이저 표면가공은 레이저광을 에너지원으로 활용하여 소재의 표면에 변화를 일으키는 것이다. 레이저광이 소재에 닿으면 소재의 광학적 특성에 따라 반사 및 흡수되는 에너지의 차이가 발생하며, 흡수되는 레이저광은 열에너지로 전환된다. 즉, 레이저광을 열에너지 공급원으로 활용할 수가 있는 것이다. 일반적으로 열처리를 위해 사용하는 용광로와 열에너지로서의 레이저광의 가장 큰 차이점은 레이저광은 소재의 표면에서 주로 흡수되기 때문에 소재 전체의 물성에는 영향을 주지 않으며 표면만 열처리가 가능하다는 점과 일반적으로 렌즈를 활용하여 광을 집속하기 때문에 국부적인 열처리가 가능하다는 점을 들 수 있다. 표면가공에 활용할 수 있는 레이저는 레이저광 펄스의 길이에 따라 연속파(continuous wave), 마이크로초(microsecond), 나노초(nanosecond), 피코초(picosecond), 펨토초(femtosecond) 레이저로 구분할 수 있다. 특히, 연속파 레이저를 제외한 펄스 레이저들은 레이저광이 지속되는 짧은 시간 동안 높은 에너지를 소재에 흡수시키기 때문에 순간적으로 소재 표면의 온도를 아주 높게 올리는 특징을 갖고 있다. 펄스 레이저는 아주 짧은 시간에 순간적으로 고온으로 온도를 올리기 때문에 열처리 시간을 단축하거나 마이크로, 나노 표면가공이 가능하다. 이때 마이크로초에서부터 나노초의 펄스 길이

를 가지는 레이저광은 광조사 시간이 길어수록 소재 내부로 흡수되는 열이 증가하며 따라서 열전달에 의한 영향을 받는 범위가 증가한다. 반면에 펄스폭이  $10^{-11}$ 초(10 picosecond)보다 짧은 피코초레이저나 펨토초레이저의 경우에는 열에 의한 영향이 최소화되며 초정밀 가공에 활용할 수 있다. 특히 펨토초레이저를 사용하는 경우 아주 짧은 펄스폭으로 인하여 열과 쇼크로 인한 시료의 손상을 최소화할 수 있으며, 가공 시 발생하는 잔재물과 시료의 형상 변화가 적다. 또한 펨토초스케일의 단일 펄스는 아주 높은 에너지 밀도를 갖게 된다. 이는 물질의 비선형 광학 특성 중 하나인 다광자 흡수(multiphoton absorption)를 유발하여, 선형광 흡수가 거의 없는 투명한 물체에서도 레이저광의 흡수를 유발한다. 다음 장부터는 완전히 다른 메커니즘으로 가공을 하는 나노초레이저와 펨토초레이저 표면가공의 예시와 메커니즘에 대해 좀더 구체적으로 설명하도록 한다.

### 나노초레이저 기반 마이크로나노 표면가공

나노초레이저 표면가공은 주로 금속소재에 활용되고 있으며, 나노초(펄스폭  $10^{-7} \sim 10^{-9}$ 초)의 레이저광이 소재 표면에 조사될 경우 금속 표면의 온도가 순간적으로 아주 높게 올라가면서 금속의 녹는점을 넘어서며 액체 상태로 변하게 된다. 이때 레이저광의 중심부와 가장자리 및 조사된 영역의 주변부의 온도구배로 인한 대류 유동 현상(Marangoni effect)에 의해 표면에 미세한 구조가 형성되고 빠른 시간 내에 다시 온도가 내려가며 다시 고체상태로 되면서 미세표면 구조가 남아 있게 된다[그림 4(a)]. 나노초레이저를

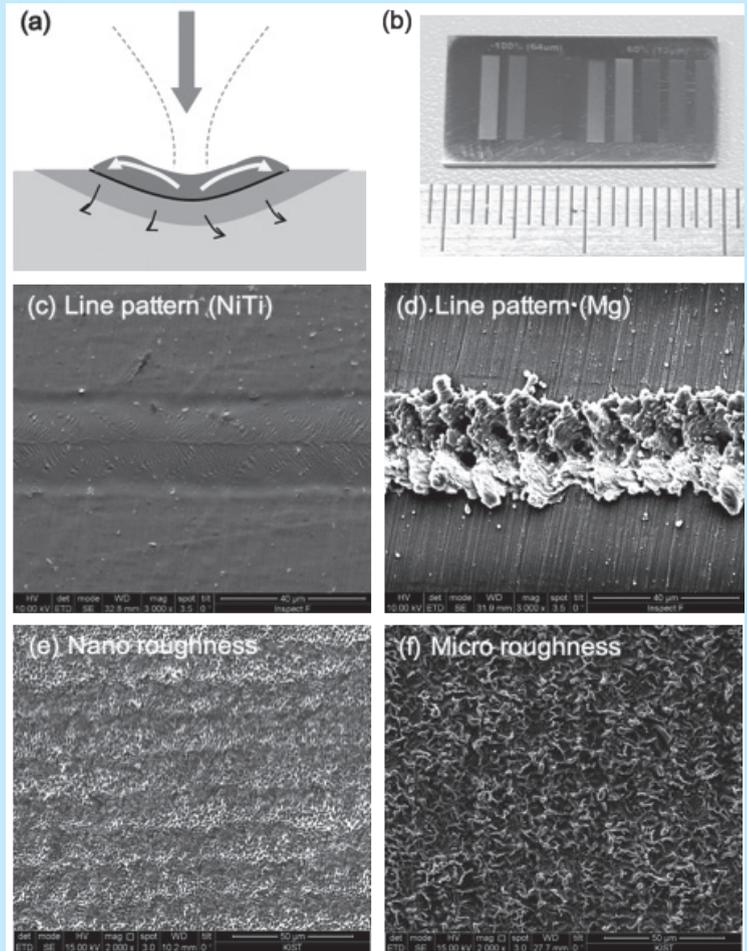


그림 4 나노초레이저 표면가공 : (a) 온도구배에 따른 대류 유동(Marangoni effect); (b) 표면 거칠기에 따른 색 차이; (c) 니켈타이타늄 합금 표면에 단일 선 패턴링; (d) 마그네슘 표면에 단일 선 패턴링; (e) 나노 스케일 거칠기 표면; (f) 마이크로스케일 거칠기 표면

이용한 표면가공은 레이저광의 에너지를 조절함으로써 표면에 형성되는 구조의 크기를 수십~수백 마이크로미터에서부터 서브마이크로미터까지 조절이 가능하다. 그림 4(b)는 나노초레이저의 스캐닝을 통하여 니켈타이타늄 합금의 약  $1.5\text{mm} \times 5\text{mm}$  영역에 다양한 크기의 마이크로나노 표면가공을 한 결과이며, 산화타이타늄층의 생성 및 표면의 거칠기 차이에 의하여 각기 다른 색을 띠는 것을 확인할 수가 있다. 또한 열에너지를 이용하는 나노초레이저 표면가공의 경우에 소재의 열전도도가 표면가공의 정밀도를 정

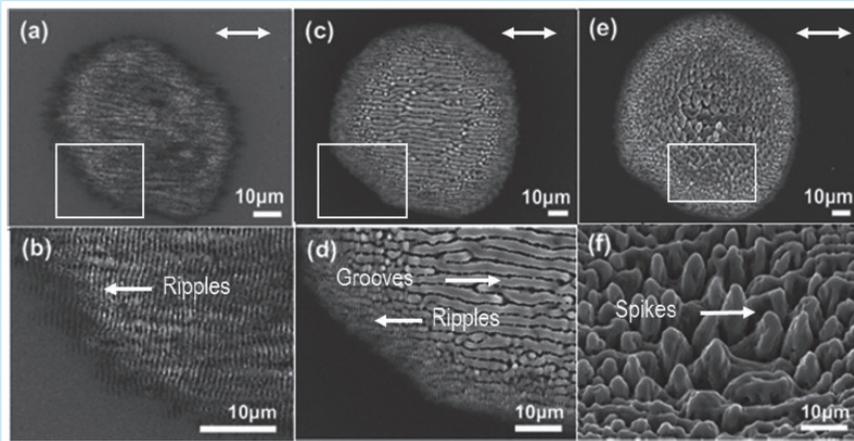


그림 5 펄초레이저를 이용한 실리콘(Si) 표면의 나노공정. 레이저광 펄스 개수=10(a), 40(c), 100(e)이며 (b), (d), (f)는 위 이미지의 확대이미지. (Tsibidis et al., Physical Review B, 92, 041405, 2015)

하는 중요한 요인이 된다. 그림 4의 (c)와 (d)는 니켈 타이타늄합금과 마그네슘 소재에 각각 동일한 에너지와 속도로 레이저를 조사했을 경우의 결과를 보여주고 있으며, 두 경우 모두 레이저광에 의해 녹은 흔적을 볼 수 있다. 소재가 니켈타이타늄인 경우에는 마그네슘보다 녹는점이 높아 레이저광이 조사된 부분에 나노미터 스케일의 주름이 형성되는 반면에 마그네슘의 경우에는 마랑고니 현상이 강하게 나타나면서 마이크로 및 나노스케일이 혼합된 복잡한 형태의 구조물이 형성되는 것을 확인할 수가 있다. 따라서 이러한 현상들을 잘 조합하면 나노미터 수준의 거칠기를 조절할 수 있는 표면가공[그림 4(e)]과 마이크로미터 수준의 거칠기를 조절하는 표면가공[그림 4(f)]을 할 수가 있다.

### 펄초레이저 기반 마이크로나노 표면가공

펄초레이저의 레이저광은 나노초레이저보다 백만배가 더 짧은 펄스폭으로 인해 아주 높은 에너지 밀도를 갖게 되고, 비선형 광학 특성 중 하나인 다광자 흡수(multiphoton absorption) 현상을 통해 금속뿐만 아니라 해당 레이저광의 파장대에 투명한 물질인

고분자, 유리, 세라믹 등에도 미세한 공정이 가능하다. 또한 짧은 펄스폭은 레이저광이 흡수된 부분에서도 열에 의한 영향이 최소화되기 때문에 나노초레이저 표면가공과는 다른 메커니즘으로 표면에 마이크로, 나노미터 스케일의 구조물이 만들어진다. 특히 소재 표면에서 어블레이션이 되지 않은 낮은 출력의 레이저광을 조사하였을 경우에 LIPSS(Laser-induced periodic surface structures)라고 불리는

반복적인 나노패턴(ripple)이 형성되며, 이 나노패턴의 간격은 레이저의 파장보다 작게 형성되기 때문에 레이저광 조사로만 이루어지는 단일 공정 과정으로 100nm 미만의 구조물을 만드는 것도 가능하다 (Bonse et al., Journal of Laser Applications 24, 042006, 2012). 그림 5에서 보듯이 동일한 레이저 펄스에너지( $E=0.7 \text{ J/cm}^2$ , 430 fs)의 레이저광을 조사하였을 경우, 펄스 개수에 따라 형성되는 나노구조물의 크기와 형태가 달라진다. 특히 10개 펄스의 레이저광을 조사한 경우에는 수십나노미터의 반복되는 주름이 형성되며, 펄스 개수가 40개가 되면 수마이크로미터의 요철이 형성되고 100개의 펄스가 조사될 경우에는 스파이크 구조의 표면이 형성되는 것을 알 수 있다. 이러한 나노표면이 형성되는 메커니즘은 아직 완벽하게 밝혀지지 않았기 때문에 여기서 자세히 설명하지는 않겠으나, 일반적으로 표면 플라즈몬 자극(surface plasmon excitation)과 마랑고니 대류(Marangoni convection) 현상이 복합적으로 작용하면서 형성되는 것으로 알려져 있다(Tsibidis et al., Physical Review B, 92, 041405, 2015). 또한 펄초레이저 표면가공의 경우에는 나노초레이저에 비해서 소재에 열적 손상을 덜 입히기 때문에 어블레이션

이 일어나는 고출력의 레이저광을 조사하는 경우에도 수백나노미터 수준의 정밀도로 표면가공이 가능하다(Jeon et al., Nature Materials, 14, 918-925, 2015). 레이저 어블레이션을 이용하여 표면을 가공하는 경우에는 거칠기를 제어하는 수준이 아닌 특정 패턴을 디자인하고 공정할 수 있어서 그 응용 범위가 더 넓다고 할 수 있다.

### 레이저 마이크로나노 표면가공의 응용분야

레이저 표면공정은 다른 공정들과 달리 진공을 필요로 하지 않고 대기 중에서 공정이 가능하며, 직접리소그래피 공정에 속하기 때문에 마스크 제작 과정이 필요 없다. 또한 레이저와 소재 간의 상호작용에 의해서 표면의 변화가 생기기 때문에 3차원 곡면의 표면공정도 가능한 장점을 가지고 있다. 따라서 그 응용분야가 점점 늘어나고 있으며, 나노초레이저는 펄스초레이저에 비해서 약 1/10 정도로 저렴한 가격에 장비의 유지 관리도 쉬운 편이라 이미 산업현장에서 많이 활용되고 있다. 가장 널리 쓰이는 분야는 레이저 커팅, 용접 등의 분야이지만 표면가공용으로도 응용처가 다양하다고 할 수 있다. 특히 레이저 공정은 3차원 곡면에도 쉽게 적용이 가능하기 때문에 자동차, 전자기기 등 다양한 산업분야에서 마킹, 텍스처링 용으로 활용되고 있다. 최근에는 펄스초레이저도 다양한 발전방식으로 개발이 되고 있으며, 레이저 작동의 안정성이 증가하면서 산업현장에서도 사용이 가능한 레이저가 출시되고 있다. 앞에서 기술한 바와 같이 펄스초레이저는 열적 손상을 최소화할 수 있고 공

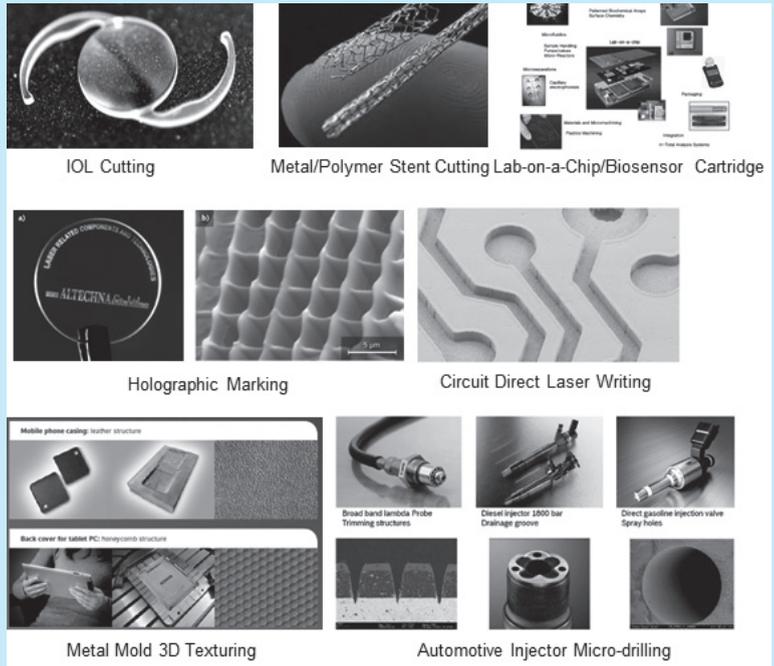


그림 6 레이저 표면가공이 활용되고 있는 산업 분야

정밀도가 높아서 최근에는 나노초레이저를 활용하던 산업 분야에서도 펄스초레이저로 대체하려는 경향이 있다. 국내 기업들 중에 레이저 공정 장비를 개발하는 업체는 많지만, 아쉽게도 국내에는 레이저를 생산하는 업체가 없으며 유럽이나 미국의 회사에서 레이저 소스를 구입해야 한다. 또한 레이저 및 레이저 공정분야는 광물리, 기계공학, 전자공학, 재료공학 등 다양한 분야의 지식이 융합된 분야라 할 수 있으며, 그 응용분야까지 생각하면 융합 학문의 범위가 더욱 확대되기 때문에 관련 분야 전문가의 양성이 필요한 실정이다. 레이저의 기계적 성능은 점점 좋아지고 있으며 융합 학문에 대한 관심과 투자가 증가가 이어지면서 앞으로 레이저 표면가공 기술의 발전 및 응용분야의 확대가 기대된다.