

# LASER SOLUTIONS for industrial 4.0

Korean Society of Laser Processing

04 | 2017 APRIL  
Vol.20, No.1

**최신 디스플레이의 디바이스 가공분야에 산업용 엑시머레이저의 확대보급**

## 고출력레이저 이용

프라스틱용접 최적의 품질 언다

## 미세패턴가공

펨토초레이저 기술  
초미세가공기술 실현

## 레이저나노가공기술

펨토초/피코초 레이저를  
응용 개발한 나노 융합 가공 시스템  
국내외의 다양한 첨단 분야에  
적용 가능성



한국레이저가공학회  
홈페이지에서도  
보실 수 있습니다

ISSN 1229-0963

# 레이저 펄스 폭이 가공에 미치는 영향

한국기계연구원(KIMM) 조성학

## 1. 서론

1960년 처음 레이저 발진을 성공 한 이후 의료, 통신, 가공 등 수많은 분야에서 레이저를 이용한 다양한 어플리케이션이 개발, 적용되었다. 폭발적인 레이저 어플리케이션의 증가는 레이저 가공의 특성인 고 에너지 기반 비 접촉 가공 방식의 특성에서 기인된 것으로, 가공품의 높은 품질과 정밀도를 보장받을 수 있는 장점을 가진다. 특히, 레이저를 이용해 기계적 가공으로는 도달할 수 없는 고 집적 재료의 가공 적용을 위한 미세가공기술 개발에도 다양한 시도가 이루어져왔다.[1] 높은 품질과 정밀도를 결정짓는 키 파라미터로 펄스 폭(Pulse width)을 들 수 있는데, 이 펄스 폭이 길어질수록 레이저 빔에 의한 열 영향부가 커지는 결과를 가져온다. 재료에 가해지는 열 영향과 순간출력에 직접적으로 연관이 있어서 어플리케이션에 따라 레이저 소스를 결정하는 중요한 인자로 손꼽힌다. 최근 들어서 나노초의 펄스 폭 보다 짧은 펨토초의 펄스 폭을 가지는 레이저가 산업에 적용되기 시작했다. 간략하게 펨토초 레이저 개발 히스토리를 살펴보면, 펨토초 레이저가 개발된 초기에는 짧은 펄스 폭 때문에 순간출력이 높아 펨

토초 레이저를 이루는 광학계가 손상되어 기존의 방법으로는 펨토초 레이저를 증폭할 수 없었다.

이런 문제를 G. Mourou 와 D.E. Spence 에 의하여 각각 처프 펄스 증폭기술(Chirped pulse amplification, CPA)과 커 렌즈 모드락킹(Kerr lens mode locking, KLM)기술에 의하여 해결되었고 펨토초 레이저에 대한 연구가 더욱더 가속되었다. 이에 따라 순간 출력이 페타와트(Petawatt)급으로 증가되면서 펨토초 레이저의 응용영역이 급격하게 확대되었다. 이러한 펨토초 레이저와 적절한 광학계를 동반한 가공시스템의 결합으로 다양한 재료를 고속으로 다양한 방법으로 정밀하게 가공하는 것이 가능하게 되었다.

현재 산업적으로 적용되는 Sub micro대펄스레이저를 펄스 폭으로 구분할 때 크게 나노초(nanosecond,  $10^{-9}$ S), 피코초(picosecond,  $10^{-12}$ S), 펨토초(femtosecond,  $10^{-15}$ S) 레이저로 구분되어 사용되고 있다. 본 글에서는 펄스레이저에서 펄스 폭의 차이가 가져오는 가공 결과의 차이와 그 원인에 대해 나노초 레이저와 펨토초 레이저의 원리와 가공 결과를 비교하며 정리하는 기회를 가지고자 한다.

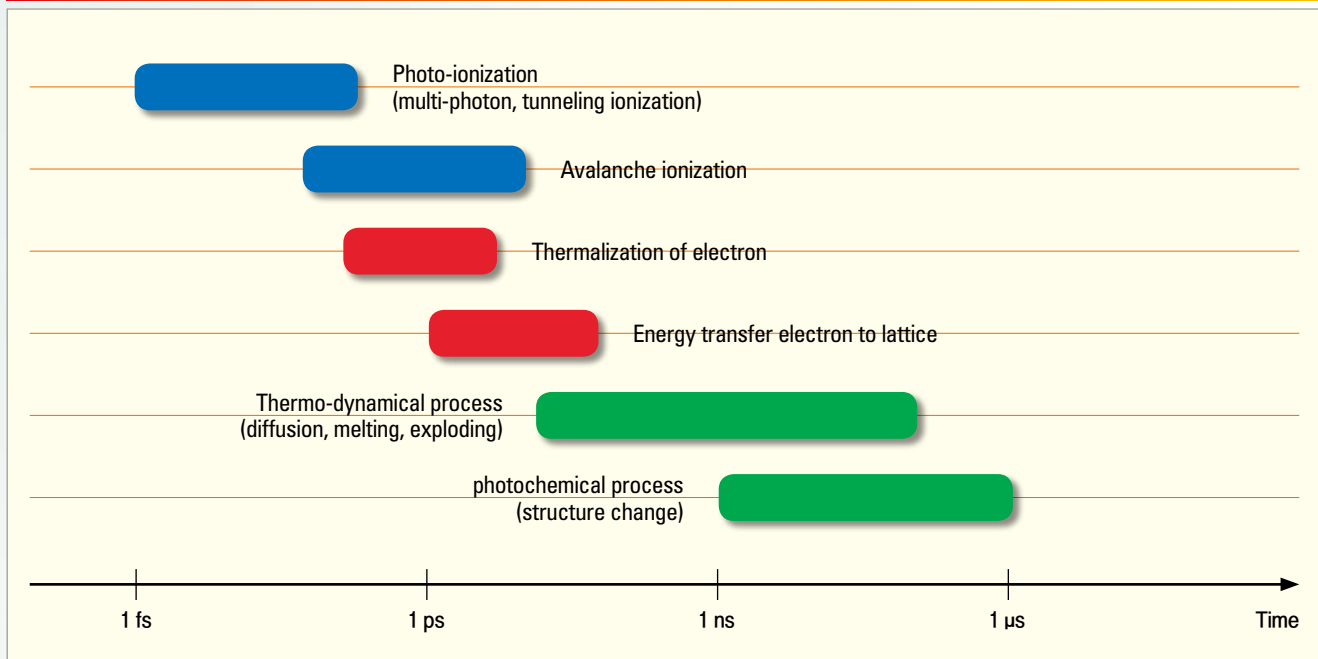
## 2. 펄스 폭에 따른 가공 메커니즘

그럼 짧은 펄스 폭을 가진 레이저 광원을 가공 툴로 사용 시 어떠한 장점이 있을까? 나노초 레이저를 이용한 금속 가공 시 나타나는 현상을 예로 살펴보겠다. 펄스 폭이 길수록 가공 대상물의 열 영향부가 커지게 되는데, 이는 광자 에너지와 재료간의 에너지 전달 메커니즘과 연관이 있다.

레이저 빔은 빛이기 때문에 광자 에너지의 형태로 재료에 흡수되게 된다. 레이저 빔이 조사 되고 재료를 구성하고 있는 물질의 자유전자가 광자 에너지를 흡수하게 되면 광-전자 가열(photon-electron heating)이 일어난다. 이렇게 가열에 사용된 에너지는 약 1~10ps 정도의 시간이 지나면 다시 안정화된 구조로 돌아가려 하는 자유전자로부터 재료를 구성하는 격자로 열 에너지형태로 전달된다. 전달된 열 에너지는 조사된 영역 기준으로 주변으로 열 에너지 형태로 ~ns 영역에서 전파가 이루어지게 되고, ~us 영역에서 전달 에너지가 소진 되기 전 까지 연속적으로 진행되며 대상 구조물 형상의 변화에 영향을 주는 용융과 어블레이션이 진행된다.[1], [2]

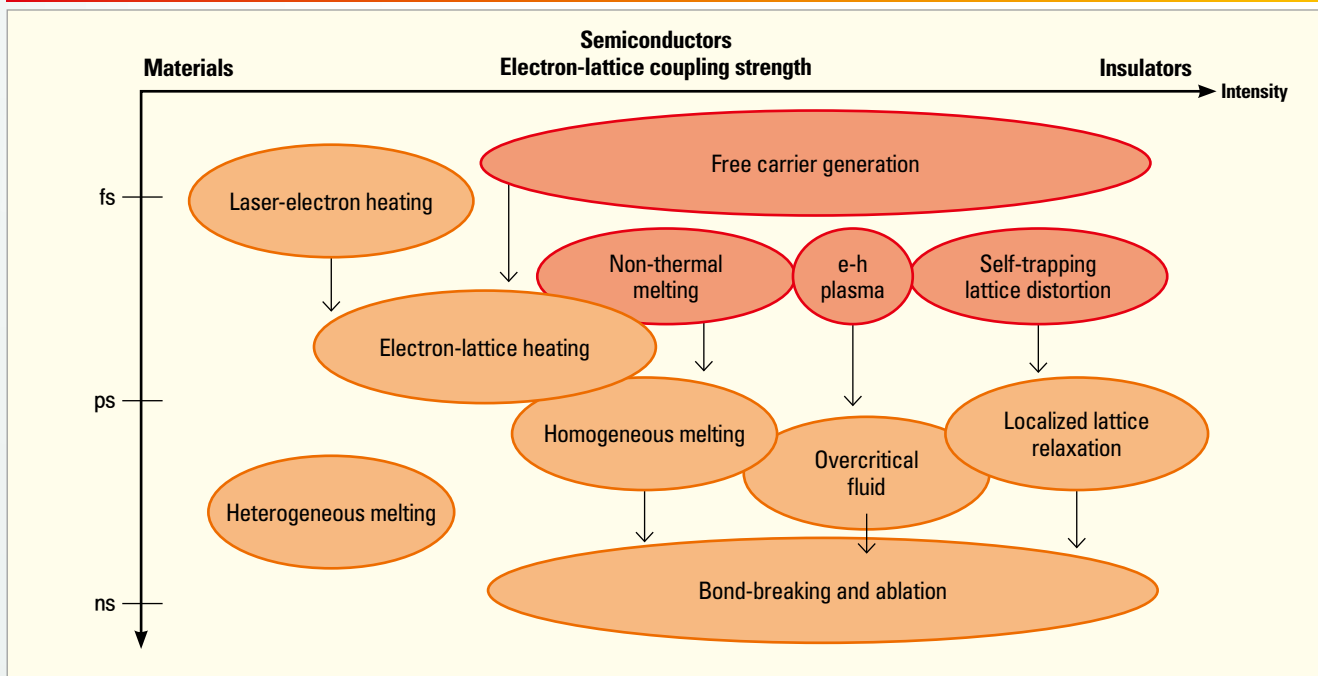
레이저에 의한 어블레이션은 자유전자의

Fig. 2 Time sequence of Laser-Material interaction



[ Fig. 2 Time sequence of Laser-Material interaction ]

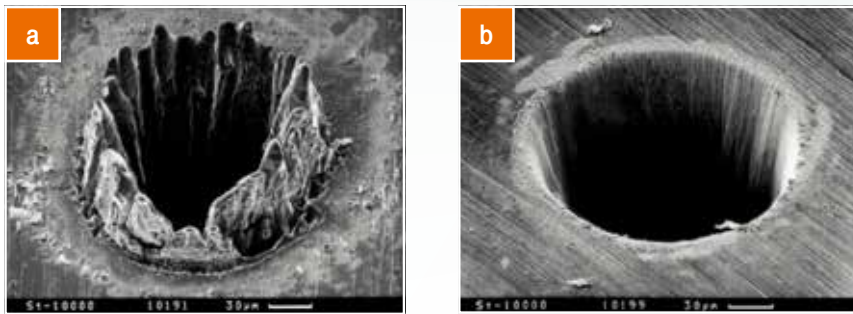
Fig. 3 Time sequence of Laser-variable material interaction



[ Fig. 3 Time sequence of Laser-variable material interaction ]

Reference

1) J.K. Park. (2012), "Femtosecond-pulse Laser Interactions with Materials: Fundamentals and Applications for Non-thermal Ultra-precise Machining", Ph.D. Thesis, University of Science and Technology, Daejeon 2) H. Hu. et al (2011), "High-fluence femtosecond laser ablation of silica glass effects of laser-induced pressure", JOURNAL OF PHYSICS D: APPLIED PHYSICS, Vol. 44



【 Fig. 1 SEM Image of Steel foil ablation: (a) 3.3 ns, 200 fs 】

레이저 에너지 흡수와 흡수된 에너지의 주변 격자로의 전달에 의해 발생한다. 이를 위해 충분한 밀도의 자유전자가 존재해야 하며, 이를 임계밀도(critical density)라 한다.

자유전자를 생성해야 하는 유전체보다 자유전자가 많은 금속이 상대적으로 쉽게 가공이 가능하다. 임계밀도 이상의 자유전자에 레이저가 조사되면 자유전자로 레이저 에너지가 흡수되고 주변 격자로 에너지가 전달되어 원자의 격자구조가 붕괴되어 어블레이션이 발생한다. 이때 전자에 의한 광자의 흡수는 약  $10^{-15}$ S(1 femto-second)동안 이루어지고, 전자에서 격자로 에너지가 전달되는 시간은 약  $10^{-12}$ S(1 pico-second)정도이다. 그리고 광의 침투깊이에 열전도에 의한 격자 내 열 확산(electron-lattice heat diffusion)시간 또한 1 pico-second 정도이다.[1], [16]

나노초 레이저의 경우 전자가 레이저 에너지를 흡수하고 격자에서의 열 확산이 일어나는 시간 이상으로 레이저가 조사되므로 열 영향이 필연적으로 발생하게 된다. 이는 금속 소재 기준으로 볼 때 용융(melting)과 어블레이션(ablation)이 유사 시간영역에서 발생되는 의미이다.

그러나 펨토초 레이저와 같은 극초단 레이저의 경우 전자에서 격자로 에너지가 전달되기 전에 펄스가 종료되므로 모든 에너지가 표면에 저장되고 주변으로 열 전달이 일어나지 않는다. 저장된 에너지가 재료의 임계에너지를 넘어서게 되면 어블레이션이 진행되고 재료가 제거된다. 이때 주변으로의 에너지 전

달이 없으므로 최초 레이저 에너지를 흡수한 부분만 제거가 이루어진다.[1], [2]

금속가공의 경우에는 열 확산 시간이 가공 형상 및 품질에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다. 이는 열 확산 시간이 펄스 폭 보다 긴 경우에는 유사한 결과를 가져올 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 대상물의 특성에 따라 펨토초 레이저와 수 피코 영역대의 펄스 폭을 가지는 피코초 레이저의 가공 품질이 유사할 수도 있다. Fig. 1은 나노초와 펨토초 레이저의 금속 홀 가공 사진이다.[1]

유리 같은 유전체 가공 시에는 자유전자가 거의 없어서 금속과는 다른 메커니즘으로 가공이 진행된다. 자유전자가 거의 없다는 말은 광자 에너지를 흡수할 수 있는 조건이 열악하다는 뜻이며, 나노초 레이저를 이용해 유리를 가공 할 경우 이와 같은 이유로 레이저 가공이 되지 않는다. 그러나 펨토초 레이저와 같은 극초단 레이저 펄스에서는 높은 에너지 밀도에 의하여 광자 에너지의 흡수가 가능하다. 펨토초 펄스는 부족한 자유전자를 가전도대(balance band)에서 전도대(conduction band)로 흥분(excite)시켜 자유전자를 생성한다. 이와 같은 자유전자가 생성되는 메커니즘은 재료에 따라 레이저의 인텐시티(Intensity)에 따라 조금 다른 현상이 일어난다.

자유전자가 있는 금속의 경우 자유전자 밀도가 임계자유전자밀도 이상이므로 자유전자의 생성 없이 광-전자 가열이 일어나고 나노초 레이저이면 전자-격자 열 확산이 일어나고 이후 용융이나 어블레이션이 발생한

다. 임계자유전자밀도 미만인 경우에는 자유전자를 생성하는 과정이 선행되는데, 레이저의 인텐시티에 따라 충격 이온화(impact ionization), 아발란체 이온화(avalanche ionization), 터널링 이온화(tunneling ionization)가 일어난다. 이러한 현상으로 인해 유전체가 임계자유전자밀도이상 보유하게 되면 금속체 가공 시 현상과 같이 용융이나 어블레이션이 발생할 수 있다.

자유전자가 거의 없는 유리 같은 유전체가 가공되기 위해서는 자유전자를 생성하는 과정이 반드시 선행되어야 하며, 펨토초 레이저의 높은 인텐시티는 이를 충족시킬 수 있을 만큼 높은 인텐시티를 가지므로 투명한 유리 재질도 가공이 가능하게 한다.[1] Fig. 2는 레이저와 재료 간 발생하는 현상을 시간의 순서로 나열된 그림이며, Fig. 3은 각 재료별 레이저와 재료간의 발생하는 현상들을 시간의 순서로 나열한 그림이다.[1]

### 3. 결론

지금까지 펄스레이저에서 펄스 폭의 차이가 가져오는 가공 결과의 차이와 그 원인에 대해 간략하게 정리하였다. 짧은 펄스 폭을 가지는 레이저 기반 미세가공의 특징점은 짧은 펄스 폭으로 기인되는 높은 인텐시티와 광자 에너지-재료 간 열 확산 시간의 극소화이다. 이는 가공물 측면에서 정밀한 영역의 어블레이션이 가능하게 하고, 가공 영역 주변의 열 영향을 최소화 하여 높은 품질 구현이 가능하게 하며, 초미세가공 적용 가능성을 열게 해준다. 또한 기존 레이저 가공 공정에서는 불가능한 유전체의 가공도 가능하게 한다. 펄스 폭이 가공 성능에 영향을 미치는 이유와 펨토초 레이저, 나노초 레이저 가공의 차이에 대해 이해하는데 조금이나마 도움이 되었으면 한다.