

레이저 광 실시간 제어 및 가공 공정 제척

최근에 들어 레이저를 이용한 초미세 가공기술은 높은 생산성으로 나노기술의 산업적 응용 가능성을 보여주고 있으며, 이러한 산업 응용을 위한 공정제척기술은 레이저 가공기술의 중요성이 부각되고 있다. 이 글에서는 레이저 가공 공정의 제척 및 가공과 관련된 레이저 공정 변수에 대하여 소개한다.

☞ 한재원 / 연세대학교 기계공학과, 교수 e-mail: jaewahn@yonsei.ac.kr

레이저를 이용한 가공에 있어서 산업의 발전에 따라 요구되는 초미세 가공의 가장 중요한 공정 중의 하나는 강력한 레이저 광을 재료 표면에 집속하여 재료 물질을 미세하게 제거하는 ablation이다. 이러한 ablation은 공구를 사용하는 기계적인 가공과는 달리 비접촉 방식으로 재료를 고속으로 가공할 수 있고, 가공의 정밀도는 집속된 광의 크기에 의존하여 마이크로 단위 이하의 치수까지 정밀하게 가공할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이런 ablation을 이용한 가공 공정은 가공 변수로 작용하는 레이저 광의 세기, 공간분포 및 시간변화 등에 민감하게 변화하므로, 초미세 가공의 정밀도와 균일도를 확보하기 위해서는 레이저 광의 특성을 실시간으로 계측하여 시공간을 제어하는 기술이 필요하다. 또한 레이저 가공에 있어서 공정의 기작은 사용하는 레이저 광, 가공할 재료의 종류 및 표면의 상태 등에 따라 달라지므로 초정밀 가공을 위해 레이저 가공의 상태를 가시화하여 실시간으로 공정을 계측하는 기술이 필요하다.

실질적으로 열전달, 용융, 기화와 같은 현상은 거의 일어나지 않고 순간적인 재질 분자의 결합부에 충격적 분리가 일어나게 된다. 즉, 레이저로부터 방출된 UV 광자는 재료의 분자를 전자적 여기, 결합파괴, 가열에 의한 화학적 분해, 제거, 증발 등의 여러 가지 프로세스가 복합적으로 작용하여 일어난다. 레이저 분해의 경우 가공대상물의 주변 분위기 가스는 가공 프로세스에 큰 영향을 주지 않으므로 응용목적에 따라, 진공 중, 대기 중, 또는 특별히 제어된 분위기 가스를 사용하기도 한다. 레이저의 높은 흡수율과 짧은 펄스는 정밀하게 제한된 면적에 최소 열영향부를 갖고 에너지를 부여할 수 있는 특징이 있다. 따라서 조사하는 레이저 펄스에 따라 ablation 깊이가 일정하게 조정 가능하며 이는 재질에 따라 정해진다. 일반적으로는 분해 깊이는 폴리머의 경우 0.3~0.7 μm , 세라믹의 경우는 0.1~0.2 μm , 다이아몬드는 0.05~0.1 μm 그리고 금속의 경우 0.1~1.0 μm 가 펄스 당 가능하다고 알려져 있다.⁽¹⁾

레이저 ablation 정의 및 기작

레이저를 이용한 미세 가공의 가장 중요한 공정 중 하나는 레이저 ablation이다. 여기서 ablation이라는 것은 다원자 분자에서 작은 단편에 이르는 여러 가지 성분으로 분해하여 순간적으로 분출시키는 가공현상을 말하며, 좁은 영역에 조사된 레이저빔은 수십 나노 초, 경우에 따라서는 피코 초 범위의 아주 짧은 시간 동안에 펄스 형태로 가공 재질에 열과 충격을 전달하게 된다. 그러나 이러한 짧은 시간 동안은

레이저 가공의 가공 변수

레이저 가공에 있어서 가공 변수는 레이저 빔, 가공 재료, 레이저 빔의 집속장치와 취입가스로 크게 분류를 할 수 있다. 이런 가공 변수 중 레이저 빔은 일반 기계가공의 공구와 같은 역할을 하는 중요한 변수로 작용을 하므로, 가장 중요한 변수라고 할 수 있다. 레이저 빔으로 결정지어지는 가공변수들을 나열하여 보면, 레이저의 작동모드(CW, 펄스), 레이저의 파장과 파워, 빔의 확산각도, 빔의 시·공간 모드

이다. 특히 펄스 레이저의 경우 펄스의 반복률과 폭 등에 대해서도 고려를 해야 할 것이다.

레이저 가공 실시간 모니터링

많은 산업에 있어서 레이저 가공을 이용한 레이저 가공기의 작동 상태는 기술의 효율과 비용, 그리고 제품의 질에 직접적인 영향을 미치므로, 레이저 가공 상태의 모니터링은 무시할 수 없는 큰 영향력을 가지고 있다. 특히 레이저 가공의 가장 핵심적인 요소로 작용을 하고 있는 레이저 빔에 있어서 빔의 적절치 못한 거동으로 인한 효과는 크게 두 가지의 예로 표현될 수 있다.

첫 번째는 높은 생산부피에 대한 손실로, 시간당 생산 가능한 개수에 대하여 레이저 빔의 적절치 못한 거동으로 인해 나타나는 판매 불가능한 제품의 개수와 그에 따른 시간적 손실을 들 수 있다.

두 번째로는 생산제품의 높은 가치성에 대한 손실을 들 수 있다. 제품의 가치에 대하여 레이저 빔의 적절치 못한 거동으로 인해 나타나는 판매 불가능한 제품으로 인해 얻어지지 못하는 제품의 판매비용과 그 제품을 생산한 시간에 대한 손실을 들 수 있다.^[2]

위의 두 가지 예에서 볼 수 있듯이, 레이저 빔의 거동의 영향은 산업에의 응용에 있어서 큰 장애물로 나타날 수 있다. 또한 이러한 장애물은 비단 레이저 빔의 거동에서만 나타나는 것이 아니라 레이저 가공을 하는데 있어서 고려해야 할 많은 가공 변수들을 통해서도 나타나게 되므로, 가공에서 고려해야 할 많은 부분들에 대하여 실시간 모니터링을 하고 이를 통해

적절한 제어를 함으로써 레이저 가공의 효율성을 증대시켜야 할 것이다.

레이저 빔 자체에 대한 실시간 모니터링

레이저 빔의 계측에 관한 기술로는 현재 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫 번째는 가장 일반적인 방식으로 생각이 되는 기술로 기계적인 기술을 사용한 레이저 빔의 형상화 방식이다. 이는 회전하는 슬롯이나 작은 구멍 장치들 혹은 카메라를 바탕으로 하는 화상진단 장치로 생각할 수 있다. 두 번째는 첫 번째의 경우보다는 좀더 정교한 방법으로 M^2 나 시간적인 빔의 형상 혹은 하나의 장치에서 빔의 파워, 시간적인 빔의 형상 등을 복합적으로 측정하는 방식이다. 세 번째는 실시간 빔 측정 시스템으로 분류할 수 있다.

빔의 focus-ability는 조사되는 다중모드 빔을 집속렌즈를 통하여 집속시켰을 때 동등한 지름을 가진 가우시안 TEM₀₀모드를 집속렌즈를 통과 시켜 집속시켰을 때와 비교하여 얼마나 벗어났느냐를 말하는 것으로 그 수치는 M^2 라 말한다.

그림 1에서 보는 것과 같이 실제로 존재하는 레이저 빔은 $M^2=1$ 인 이상적인 가우시안 빔이 아니므로 집속된 빔의 크기는 더 크게 나타난다. 집속된 빔의 지름은 그림 2의 좌에 나와 있는 것과 같이 다음의 식으로 정의 된다.

$$d_o = M^2 \frac{M^2 4\lambda f}{\pi D_o} \quad (1)$$

식 (1)을 살펴보면, 레이저의 파장 λ 와 초점 거리 f 는 레이저 가공의 경우 고정이 되어있다고 할 수 있

으므로, 실제적으로 집속된 빔의 지름에 영향을 미치는 부분은 M^2 와 D_o 라 할 수 있다. 여기서 M^2/D_o 을 beam focusability factor로 정의하면 이 값은 집속된 빔의 점 크기의 안정성을 효과적으로 측정하는 데 사용될 수 있다. 또한 이 값은 공간적인 빔의 형상을 추가시킬 경우 사용자에게 레이저 빔의 질을 평가하는 데 강력한 도구로 사용될 수 있다. 이 beam focusability factor는 빔 확산각인 θ 와

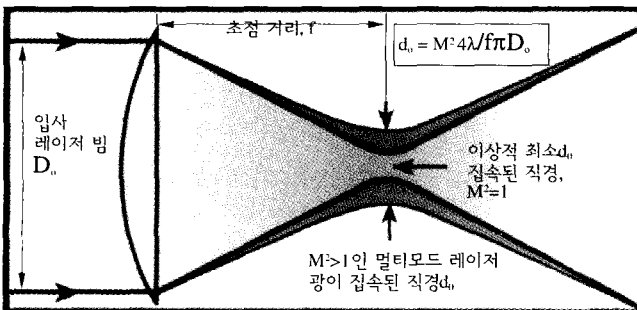


그림 1 가우시안 TEM₀₀ 모드 집속 빔 지름과 다중모드의 집속된 빔 지름

테마기획 ■ 첨단레이저 기술

관계가 있다. 이를 확인하기 위해 식 (1)에 대하여 자세하게 유도를 하여 보면 그 관계를 알 수 있다.

θ 가 밀리라디안 정도로 작다고 가정할 수 있고, 이를 통해, 식 (2)라고 할 수 있다.

$$\tan\theta = \theta \frac{d_0}{f} \quad (2)$$

여기서 d_0 는 초점위치에서의 빔의 지름을 나타내며, f 는 초점거리를 나타낸다. 식 (2)로부터 식 (1)은 식 (3)으로 표현이 되고, 식 (3)을 통해 빔 확산각은 beam focusability factor에 비례한다고 할 수 있다.

$$\theta = \frac{M^2 4\lambda}{\pi D_0} \quad (3)$$

이를 통해 M^2 가 실제로 조사된 레이저 빔과 같은 빔의 지름으로, 집속 렌즈를 통해 집속된 가우시안 TEM₀₀모드와 비교할 때 얼마나 벗어났는가를 판단하여 준다면 빔의 확산각(혹은 beam focusability factor)는 레이저가 작동 중일 때 집속된 빔의 안정성을 결정지어 준다고 할 수 있다.

위의 식들에서 가장 중요한 것은 조사된 레이저 빔이 집속 렌즈를 통해서 집속이 되었을 때 그 집속된 빔의 점 크기이다. 집속된 빔의 점 크기는 빔의 강도와 직접적인 관계가 되고 빔의 강도는 결국 레이저의 가공 효율과 정밀도에 있어서 직접적인 관계가 있기 때문이다. 따라서 식 (2)를 통해 집속된 빔의 점 크기는 빔의 확산각 θ 와 비례하고 식 (3)에서 알 수 있듯이 θ 는 beam focus-ability factor와 비례하는 관계에 있으므로 집속된 빔의 점 크기는 결과적으로 beam focus-ability factor에 비례한다고 판단할 수 있다.

집속된 레이저 빔의 크기는 M^2 에 비례한다고 할 수 있으므로, 위의 예를 레이저 모니터링을 통해 살펴본 레이저의 빔 형상을 보면 다음과 같다. 위의 예와 그림에서 M^2 값과 빔의 집속된 크기는 밀접한 관계가 있고 이는 결국 레이저 가공의 효율에 지대한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. Focus-ability의 측정을 위하여 실제적으로 실시간 감시를 위하여 구성된 시스템의 개략도는 그림 2와 같다.

위의 개략도를 살펴보면, 조사된 야그 레이저의 빔은 beam splitter를 통하여 조사된 빔의 0.4%

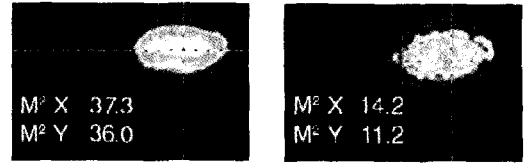


그림 2 레이저의 집속된 점의 크기에 따른 빔의 형상과 M^2 값

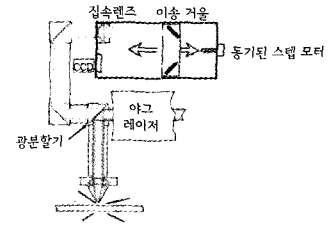


그림 3 레이저 가공에서 빔의 focus-ability 실시간 감시 시스템 개략도

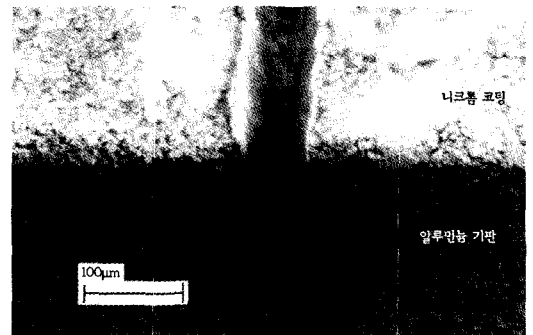


그림 4 코팅 중 가공에서 나타난 펄트초 레이저 가공

만 모니터링 시스템을 위한 장치로 들어가고 이 빔은 집속 렌즈를 통하여 CCD 카메라로 집속이 된다. 이는 데이터 획득과 제어 장치를 통해 자동적으로 테스트, 계산 및 화면을 통해 나타내어 주고 결과를 저장하는 시스템으로 구성이 된다. 전형적인 데이터 화면은 다음과 같다.

레이저 유도 플라즈마 분광법을 이용한 가공의 실시간 모니터링

펄트 초 레이저 가공의 단점을 보완하기 위해 실시간 모니터링을 하고 제어하는 방식으로 레이저 유도 플라즈마 분광법을 이용한 방식이 최근 소개가 되었다. UV파장의 레이저를 사용하여 가공을 하는 나노 초 단위의 가공기를 가지고 연구를 수행하고 있는 본

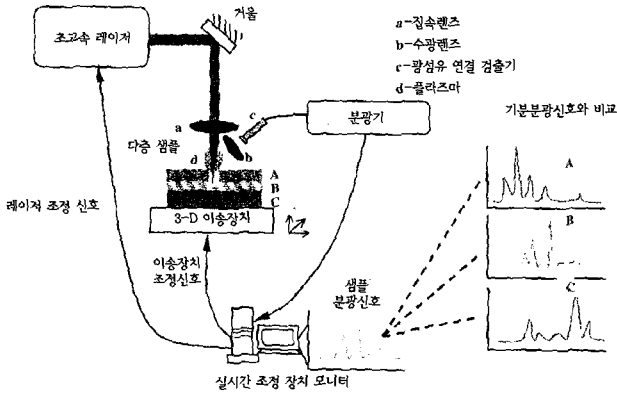


그림 5 레이저 유도 플라즈마 분광법을 이용한 시스템의 개략도

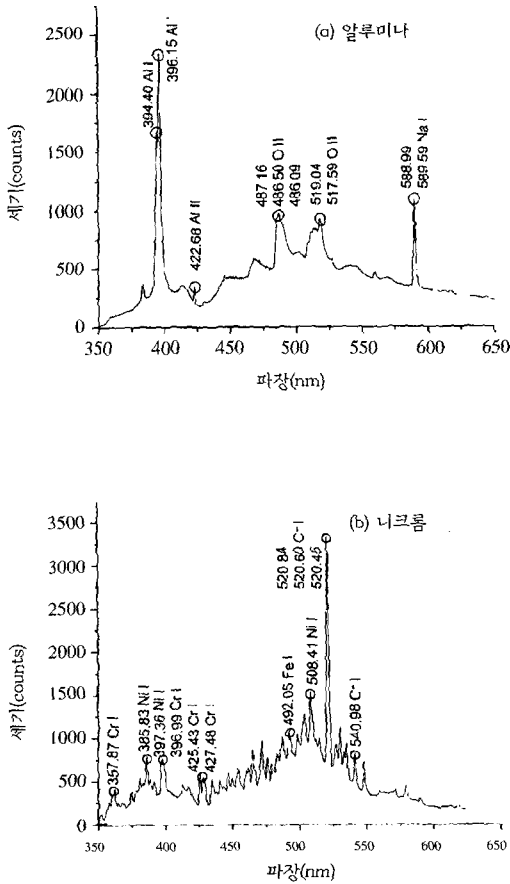


그림 6 연구에 사용된 물질의 측정된 레이저 유도 플라즈마 분광법 스펙트럼

과제에 있어서의 적용을 하기에는 레이저 유도 플라즈마 분광법이 나노 초 단위의 가공에서 가지는 몇 가지 문제점이 있지만, 그 모니터링의 방법론적인 부분에 대해 도움을 주는 부분이 있어 그 방법에 대해서 알아보고자 한다.

펄스 레이저 가공은 기존의 타 가공에 비해 가공의 질과 효율적인 면에서의 우수성을 장점으로 가지고 있지만, 다중 층상이나 이종의 성분으로 구성된 마이크로구조 물질에 있어서 정확한 가공의 제어를 하는데 한계를 가지고 있다. 그 예로 센서 구조물 제작에 있어서 알루미늄 접착기면 위에 니크롬 코팅을 한 가공재료에서 니크롬 코팅 부분만을 가공하려 했으나 알루미늄에 깊이 절려져 나간 형상을 그림 4에서 볼 수 있다.

위의 단점 사항을 보완하기 위하여 제시된 방식으로 레이저와 가공재료와의 상호작용 동안에 생성된 플라즈마 방사를 레이저 유도 플라즈마 분광법을 이용하여, 신호를 검출하고 가공된 물질의 구성 요소 확인을 통해 분석을 하여, 이를 신호로 피드백 하는 방식으로 레이저 가공을 제어하는 방법을 제시하였다. 레이저 유도 플라즈마 분광법을 이용한 가공 공정의 모니터링과 제어에 대한 실험적 개략도는 그림 5와 같다.

레이저 유도 플라즈마 분광법을 이용한 시스템에서의 스펙트럼을 관찰하는데 있어서 광학 분해능이 1.3nm로 다소 낮은 분해능을 가지고 있는 분광계를 사용하지만, 분광계가 소형이고, 가벼우며, 광섬유와 커플링이 되고, 비싸지 않으며,

실험적 사용이 간단하다는 장점을 가지고 있어 실제적인 적용이 용이하다.

실험에 대한 스펙트럼의 비교·분석은 우선 기준에 보고가 되어 있는, spectral line data와 실험에서 도출된 스펙트럼을 비교 분석하는 방식으로 되며, 다중층상의 가공재료는 두 가지 이상의 재료로 구성되어 있으므로, 스펙트럼의 변화를 관찰하여 제어를 하는 방식이다. 실험의 결과 값의 일부를 살펴보면 그림 6과 같다.

그림 6은 연구에 사용하기 위해 기존에 연구가 되어 나와 있는 알루미늄과 니크롬의 스펙트럼이다. 두 스펙트럼을 보면 알 수 있듯이 유사함을 알 수 있다. 따라서 신뢰성 있는 결과라 할 수 있으며, 이 두 스펙트럼을 모니터링을 통해 비교·분석 하여 시스템을 제어한다. 제어의 과정은 분광 스펙트럼 데이터의 변화를 파악하여 다른 분광이 나오는 순간 레이저의 펄스 반복률을 줄여 가공재료의 손상을 최소화 하는 방식이다. 또한, 가공 공정상의 분광 분석 데이터를 모니터링 하여 다중층상 구조의 가공물을 가공 공정을 제어할 수 있다.

맺 음 말

이 글에서는 지면 관계상 레이저 광 실시간 제어 및 가공 공정 계측에 관한 많은 기법 중에 몇 가지 대표적인 예를 소개하였다. 이 이외에도 레이저 빔의 특성과 관련하여 전자광학 소자를 이용한 빔의 세기 제어, 공간 광학 소자 혹은 회절 소자를 이용한 공간 분포 제어 기술에 대한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 레이저 가공기술의 중요한 줄기는 레이저 광의 광학적 특성을 잘 활용하여 기계적인 가공의 품질을 향상시키고 가공의 효율성을 높이는 것이다. 따라서, 레이저 광공학적 지식과 기계 가공에 관련된 지식을 결합하여 새로운 가공기술에 대한 연구개발이 가능할 것으로 기대되며, 이러한 레이저 관련 원천기술을 확보하여 고부가 가치의 지능형 첨단 레이저 가공장치 개발을 적극 추진하여야 할 것이다.

[감사의 글]

이 글의 작성에 첨단레이저 응용 미세가공기술 개발' 과제의 지원을 받았으며, 원고 작성을 도와준 연세대학교 나노 광자공학 연구실 박승우 군께 감사합니다.

기 계 용 어 해 설

변동계수(COV)

일반적으로 엔진에서 측정된 실린더 압력으로부터 구할 수 있는 사이클 변화에 관련된 가장 중요한 인자중의 하나로서 도시평균유효압력의 변동계수이다. 이것은 도시평균유효압력의 표준편차를 평균유효압력으로 나눈 것으로 통상 백분율(%)로 나타낸다. 또한 변동계수는 사이클 당 도시일에서 사이클 변동성을 정의되고 있고 통상적으로 변동계수가 약 10%를 초과할 때 차량의 운전성에 문제가 있는 것으로 본다.

질량연소분율(Mass Burned Fraction)

질량연소율은 열역학 제 1법칙으로부터 열발생률(rate of heat release: RHR)을 구함으로써 얻을 수 있다. 열발생률은 단위 크랭크 각에 대한 발생열을 말하며 가스 상태방정식을 적용한다. 따라서 질량연소율은 총 발생열에 대하여 임의 시점에서의 발생열의 비로 정의된다. 또한 질량 연소율은 연소기간, 점화시기에 영향을 받으며 엔진의 전체 실린더 압력에서 실린더의 체적변화 그리고 연소에 의한 압력증가에 의하여 변하게 된다.