

레이저를 이용한 재료가공

황경현 · 이성국

한국기계연구소 가공기술실
(1990년 2월 8일 받음)

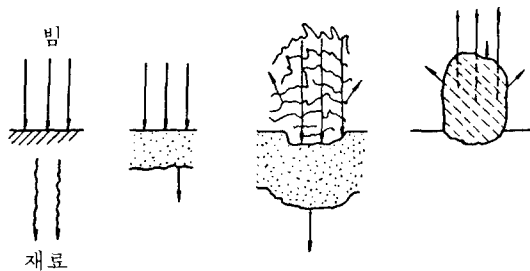
I. 머리말

레이저에 의한 재료가공은 레이저를 열원으로 사용하여 재료의 물리적, 화학적 또는 내부조직에 변화를 주어 재료를 가공하는 방법이다. 따라서 이 방법의 기본원리는 고에너지 레이저 빔과 재료 사이의 상호작용으로서 여러 가지 레이저 빔의 특성과 가공시키려는 재료의 성질에 따라 가공이 좌우된다. 모든 산업분야에서 경쟁력을 유지하기 위해서는 가공기술이 설계 개념의 빠른 변화에 부응될 수 있어야 한다. 계속 변화하는 시장에 적응할 수 있기 위해서는 가공방법의 유연성이 필수적이다. 이러한 요구는 값비싼 공구변화없이 여러 가지 공정을 수행할 수 있는 기계를 필요로 하는데 이러한 문제를 해결해 줄 수 있는 방법으로 레이저 가공이 각광을 받고 있다.

따라서 레이저가 재료가공에 이용되는 특성과 장단점을 검토하여 보고 레이저 가공기, 발전시스템, 여러 형태의 가공방법과 응용범위, 한계성에 대한 현황을 살펴봄으로써 레이저 가공의 타당성과 실용화에 대한 지침을 얻는 것이 중요하다.

II. 레이저 가공의 특성과 장단점

레이저 가공기술의 특성을 알기 위해서는 레이저 광의



(a) 열전도 (b) 용융 (c) 증발 (d) 플라즈마 발생
그림 1. 레이저 빔과 재료와의 상호작용.

특성을 살펴볼 필요가 있다. 레이저 광의 특성 중 단색성(monochromaticity), 지향성(directionality) 혹은 퍼짐성(divergence)이 적은 성질, 모드(mode)가 낮은 성질, 시간섭성(coherence) 등을 이용하여 레이저를 이용한 재료가공이 이루어진다. 또한 레이저의 에너지밀도가 증가됨에 따라 그림 1과 같이 금속표면에서 일어나는 현상이 변하게 되는데 에너지밀도가 10^5 W/cm^2 이하에서는 그림 1(a)와 같이 금속내부로 열전달만이 일어나게 된다. 10^5 W/cm^2 정도가 되면 용융점에 도달되어 용융계면이 그림 1(b)와 같이 금속 내부로 전달된다. $10^5 - 10^7 \text{ W/cm}^2$ 정도가 되면 용융계면은 내부로 이동됨과 동시에 표면온도가 비등점 이상이 되어 그림 1(c)와 같이 재료의 증발이 시작되며, 그림 1(d)는 레이저밀도가 더욱 증가되어 $2.5 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$ 이상이 되면 레이저 에너지가 이들 증발되는 물질에 흡수되어 원자를 이온화시켜 플라즈마를 발생시키는 것을 보여준다. 레이저 에너지밀도의 증가에 따라 재료표면에서 그림 1과 같이 가열(heating), 용융(melting), 증발(vaporizing)이 일어나고 표 1에서 보는 바와 같이 가공 공정들이 있다.

레이저에 의한 금속 및 비금속 가공의 장점 및 단점은 다음과 같다.

-장 점-

- 레이저 빔은 편성이 없다. 그러므로 고속에서도 고속 출발과 정지가 가능하다.
- 고속가열가공을 하기 때문에 열변형층이 좁다(0.6 mm 미만).
- 광으로 가공하기 때문에 가공력은 매우 적으며 또한 가공으로 인한 재료의 변형이나 오염이 없다.
- 레이저는 매우 단단하거나 취성이 많은 재료도 가공할 수 있다(티타늄, quartz).
- 공구와 치구가 비교적 간단하고 비접촉이므로 공구의 마모가 없다.
- 열성질이 잘 맞지 않은 금속들을 접합가능하고 용접시 용접봉이 필요없다.
- 대기 중에서 수행하므로 진공을 필요로 하지 않으며

표 1. 레이저 가공분류.

에너지 밀도에 의한 열 효과	가공공정
가열 (heating)	국부어닐링/연화 열처리/변태 경화 레이저 이용 절삭 레이저 이용 화학반응
용융 (melting)	솔드링 (soldering) 브레이징 (brazing) 용접 (welding) 표면합금 (surface alloying) 용융경화 (fusion hardening)
증발 (vaporizing)	절단/스크라이빙 (scribing) 드릴링 (drilling) 마킹/조각 (engraving) 충격경화 (shock hardening)

분위기를 만드는 경우 제어하기 편리하다.

- 복잡한 부품에 매우 복잡한 모양도 가공할 수 있으며 매우 미세한 용접도 가능하다.
- 가공시 부품의 진동과 소음 등이 없고 작업환경이 깨끗하다.
- 상온에서 가공이 가능하고 레이저 빔의 밀도가 높다.
- 같은 기계로 여러 종류(절단, 드릴링, 표면합금, 용접, CVD 등) 가공을 수행할 수 있다.
- 단 점 -
- 투자비용과 작동비용이 큰 고가공정이다.
- 비교적 새로운 기술이어서 위험성을 내포하고 있으며 훈련된 인력이 부족하다.
- 에너지 효율이 떨어지고 절단되는 두께와 천공되는 깊이에 제한을 받는다.
- 레이저로 천공된 구멍의 크기와 절단면의 폭이 일정하지 못하고 약간의 테이퍼가 지므로 정밀성을 요하는 부품에 마무리공정이 필요하다.
- 반사율이 큰 재료의 절단과 드릴링이 용이하지 않다.

위에 언급한 바와 같이 레이저 가공은 여러 가지 장점에도 불구하고 아직 해결해야 할 단점도 있어 기존의 가공방법이 경제적이고 제품의 질에 결함이 없으면 레이저에 의한 방법이 사용되기 힘들다. 그러나 열에 민감한 재료로서 매우 적은 열변형 구간을 필요로 하는 경우,

다이아몬드 등 매우 단단하거나 취약한 재료의 천공 등 통상적인 방법으로는 힘든 경우에는 레이저를 이용함이 바람직하다.

레이저에 의한 새로운 가공법을 도입함에는 기술적인 타당성 검토 위에 경제적인 타당성, 장비 및 운전의 신뢰성 등 여러 가지 문제를 검토해야 한다. 특히 비교 및 경쟁되는 기술이 있을 때는 더욱 그러하다. 레이저의 공업적인 응용은 다음 세 가지 범위의 하나에 속해야만 실용화가 가능하다. 첫째 기존의 가공방법에 비해 제품의 질과 가격면에서 경쟁력이 있어야 하고 둘째 특정 가공에서 레이저만이 가공이 가능한 경우이며, 마지막으로 레이저가 생산공정을 혁신함으로써 전체적인 생산비가 저렴해지는 경우에 가능하다. 그러나, 실제 제작에 있어서 유연성 (flexibility)을 증가시키고 시제품을 만드는데 빠른 왕복시간을 보장하여 주고 다이의 필요성을 감소시켜 다품종 소량생산을 하는 경우에 적용할 수 있다.

III. 재료가공에 이용되는 레이저 시스템

1. 레이저 발전장치

일반적으로 레이저의 파장, 출력, 빔 모드, 발전 형식 등이 가공하려는 재료의 가열에 영향을 미치는데 파장은 재료의 흡수율과 관련이 있으며 또한 집중된 빔의 크기에 영향을 미쳐 가공 정확도에 관련이 있다. 이러한 인자들은 레이저 종류와 광학 시스템에 의해 결정되며 냉각 시스템과도 관련이 있다.

재료가공에 가장 많이 이용되는 레이저는 CO₂ 레이저와 Nd:YAG 레이저, 엑시머 레이저이다. 발전형식에 따라 연속파 (continuous wave) 발전과 반복 펄스에 의한 발전으로 구분되며 Super pulse의 최대 출력 (peak power)는 보통 연속파의 4-8배 정도이고 절단면의 품질이 CW 보다 우수하나 속도는 떨어지며 박판가공이나 후판가공에 사용된다.

현재 25KW 까지의 CO₂ 레이저가 상품화되어 있고 실험적으로 100KW 까지 개발 중이고 유럽에서는 250KW 레이저도 개발 예정이다. 2KW 이상의 레이저는 횡류 (transverse flow)이고 Multi mode 빔을 제공한다. 축류 (axial flow)와 고속 축류 (fast axial flow) 레이저는 저차 모드 레이저를 만들 수 있다. 드릴링의 경우 펄스 출력을 가진 Transversely Excited Atmospheric (TEA) 압력 CO₂ 레이저가 증발에 필요한 고피크출력을 위해 사용된다. 상업적으로는 300 Hz 까지의 반복률을 가진 75 J/pulse 레이저를 제공한다.

펄스 Nd:YAG 레이저가 드릴링에 가장 많이 이용되

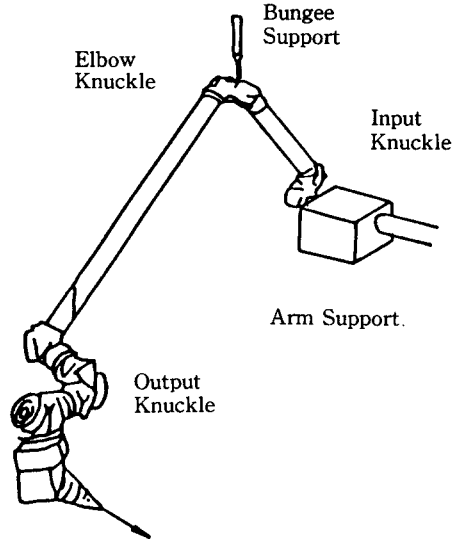
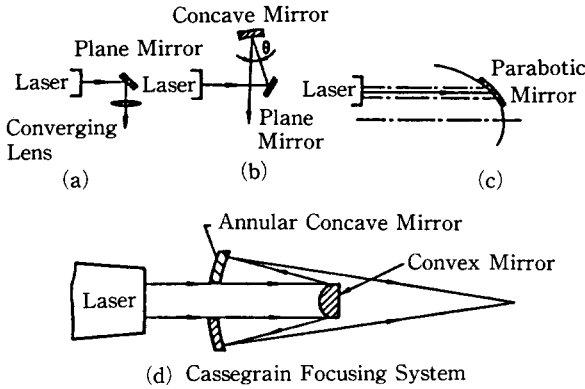


그림 2. Flexible beam delivery system.

는데 400 Hz 까지의 반복률을 갖고 50 J/pulse 까지 펄스 에너지가 제공된다. 800 W 의 연속파 Nd : YAG 레이저가 시판 중이며 평형 (balancing), Resistor trimming 과 전자회로 Trimming 과 같은 미세가공을 위해서는 펄스 Nd : YAG 레이저가 이용된다. 최근에는 Excimer 레이저가 전자부품을 가공하는데 많이 이용된다. 가장 응용성이 높은 분야는 전자회로에 대해 μm 이하의 해상도를 가진 재료의 CVD 기술이다. 250 Hz 까지의 반복률을 가지고 50-500 mJ/pulse, 펄스폭이 20 ns 인 레이저가 많이 이용된다. 500 mJ 까지, 반복률 100 kHz 까지의 레이저가 이용되기도 한다. 불행하게도 현재 상업적으로 사용되는 시스템은 높은 빔 퍼짐성을 가지고 있다. 이러한 단점이 UV 파장레이저의 완전한 잠재능력을 막는 장애물인데

$$D_b \approx f\theta \tag{1}$$

D_b : 빔 직경

θ : 조사레이저 빔 $\alpha (\lambda/\pi D)$ 의 빔 퍼짐각의 반

UV 파장 레이저의 빔 직경은 α 에 비례한다.

Gaussian 에너지 분포를 갖는 레이저에 대해 Spot 직경 D_b 는

$$D_b = \frac{1.27 f \lambda}{D} \tag{2}$$

f : 렌즈나 광학기의 초점거리

D : 집속되지 않은 빔 직경

λ : 레이저 빔의 파장

Multimode 나 평면파 레이저 빔에 대해서는 회절 제한 Spot 직경은

$$D_b = \frac{2.44 f \lambda}{D} (2m+1) \tag{3}$$

m : 모드 수

그러므로 CO_2 레이저 ($\lambda = 10.6 \mu\text{m}$) 에 대해서 가장 적은 빔 직경은 $27 \mu\text{m}$ 이고 엑사이머 레이저 ($\lambda = 193 \text{ nm}$) 는 $0.49 \mu\text{m}$ 이다.

그러나 광학계에서의 생략이나 레이저 빔의 불완전 때문에 가장 적은 Spot 크기는 적어도 4배 정도이다. 열원으로 레이저 빔의 또 하나의 장점은 레이저 빔이 적용 목적에 따라 광학적으로 형상이 바뀌어질 수 있다는 사실이다. 그림 2(a)-(c)에는 빔을 모으기 위한 여러 가지의 광학 장치가 있는데 식 (2)와 (3)에서 광학기기의 초점 Spot 크기와 초점거리를 바꾸어 출력밀도가 쉽게 변해진다. 그림 2(d)에서는 작업거리가 큰 경우 이용되는 방법이 소개되었는데 비교적 적은 초점거리를 이용한다.

2. 빔 전달장치 (beam delivery system)

레이저 발전기에서 생성된 레이저를 피가공물로 전달하는 장치를 말한다. 레이저 가공은 일반적으로 다음 세 가지 방법으로 행하여진다.

- a) Laser beam 을 고정시키고 피가공물을 이동
- b) 피가공물을 고정시키고 레이저 빔을 이동
- c) 레이저 빔과 가공물을 이동

이에 따라 빔 전달도 다음과 같은 몇 가지 방법으로 수행된다.

- a) 관절이 붙은 거울을 사용 (articulated mirror)
- b) Fiber optics 사용
- c) Compact laser head 사용

상기와 같은 방법은 특히 레이저의 파장에 의하여 그

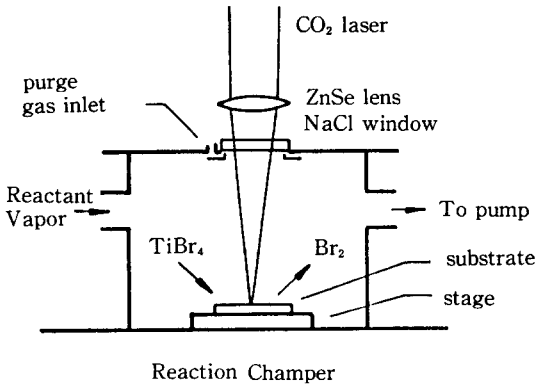


그림 3. 작동 Chamber.

사용이 제한된다. 예를 들어 CO₂ 레이저의 Waveguide로 Fiber optics는 사용되지 못한다. 그림 3에는 flexible beam delivery 시스템의 대충 모양을 도시한 것이다.

제조회사에 따라 사용되는 거울 갯수도 다른데 CO₂ 레이저의 경우 Photon Sources사(5kW)는 9개, Coherent사(4kW)는 10개, Spectra-Physics사(1.5kW)는 6개이다. Compact laser head 제조가 가능하면 로봇의 팔에 부쳐서 피가공물 부근에서 전달장치없이 가공할 수 있다. 이런 Compact 레이저 개발로서 소형이고 가벼운 Discharge head의 CO₂ 레이저가 있는데 5kW까지의 출력, 크기는 1.0×0.3×0.3m 정도이고 무게는 70kg 정도이다. 또 solid state slab laser도 이런 목적으로 개발되고 있는데 몇 kW의 출력이 가능하고 또 체적에 비해(laser-glass의 체적) 표면적이 크므로 냉각이 용이하고 Optical design에 유연성이 있어 빔 질(quality) 조정이 쉬운 것이 특징이다. 아직 개발 단계에 있으며 laser glass의 제작이 극히 어려운 것이 결점이다.

Slab articulated mirror의 사용시 각 거울은 고출력 레이저 빔을 반사해야 하므로 손상 등의 문제가 있다. 이러한 단점을 해결하는 한 방법으로 Active mirror를 사용하는 연구가 진행 중이다. Active mirror는 고체 상태 레이저의 한 증폭기 방법으로 한번 반사할 때마다 Gain이 4 정도까지 증폭이 된다. 냉각이 항상 계속되고 있기 때문에 반복률을 높힐 수 있어 평균출력을 크게 증가시킬 수 있다. 사용되는 렌즈의 재료는 ZnSe, GaAs 등이고 1.5", 2.5", 5", 7.5", 10"의 초점거리를 가진 렌즈가 사용된다. 형태로는 Meniscus, Plano-Convex, Focusing mirror 등이며 거울 재료로는 Si(은도금, 금

도금), Cu(몰리브덴도금) 등이 이용된다.

노즐재료는 구리합금이 이용되고 크기는 $\phi 1.2, 1.5, 2.5$ mm 등이 이용된다. 그 밖의 빔 전달장치로는 Beam guard tube, Beam bender, Beam splitter 등이 있다.

IV. 레이저 가공의 종류와 응용에

1. 절 단

레이저에 의한 절단은 용융에 의한 축출(ejection)과 증발에 의해 이루어진다. 보조가스를 사용함으로써 절단에 필요한 에너지를 줄일 수 있는데 산소를 이용하여 연강(mild steel)을 절단하는 경우 30%는 순수 레이저 빔에 의한 절단이고 70%는 산소와 철의 발화에 의한 절단이다. 레이저에 의한 절단은 5가지 방법에 의해 수행된다.

- 증발절단 : 증발온도 이상까지 가열하여 증발과 축출에 의해 수행되며 에너지 밀도는 10^8 W/cm^2 정도가 필요하다. 용해절단의 10배 정도의 에너지가 필요하다.

- 용해절단(fusion cutting) : 용융상태로 만들어 보조가스를 사용함으로써 절단 구간으로부터 용융물을 붙어냄으로써 절단이 이루어진다. 보조가스 절단보다 2배 정도의 에너지가 필요하다.

- 보조가스절단(reactive gas cutting) : 레이저 빔이 발화(kinding)온도까지 가열시켜 보조가스에 의해 타게 된다. 보조가스는 또한 드로스(dross)를 치우는 역할을 한다.

이 방법은 열응력 파괴 절단보다 10배 정도의 에너지가 필요하다.

- 제어파괴절단(thermal stress cracking or controlled fracturing) 빔 에너지가 취성재료에서 열응력을 발생시키고 어떤 방향으로 크랙을 유도하여 절단하는 방법이다.

- 스크라이빙(scribing) : 먼저 방법을 약간 변형시킨 것으로 기계적인 충격을 가하여 스크라이브된 선을 따라 절단이 된다.

다섯 가지 방법 중에서 용해절단과 보조가스 절단이 가장 많이 이용되는데 용해절단의 절단 역학은 다음과 같다.

- ① 레이저 빔이 공작물에 부딪혀 에너지의 약간 부분은 반사되고 나머지는 흡수되어 적은 구멍을 만드는 증발이 이루어진다.

- ② 이 적은 구멍(keyhole)은 흑체(black body) 역할을 하여 에너지를 흡수한다. 이 구멍은 용융물벽으로 둘러싸여져 있어 증발 분출물의 빠른 흐름에 의해 위치를

유지한다.

③ 용융물이 공작물로 파고들며 보조가스 제트로 용융물이나 드로스를 불어낸다.

④ 가공물이 slot를 남기며 움직이고 hole도 움직인다. 레이저 빔이 슬롯의 선단부위를 친다. 용융물의 흐름이 gas에 의해 없어진다.

이 Process는 10^5-10^7 W/cm^2 의 출력을 필요로 하는데 절단폭(kerf width)은 일반적으로 증발절단에 의해 얻어진 것보다 크며 에너지 소모는 증발에 필요한 에너지의 1/10이다.

· 레이저 절단 변수

주요 변수는 빔 에너지 밀도, 보조가스(압력, 속도 및 성분), 절단속도와 흡수율이다. 빔의 파장과 출력 특성(펄스 혹은 연속파)도 중요한 인자이다. 절단면의 평가 기준으로는 절단폭, 절단 두께, 표면조도, 드로스 생성 여부, HAZ 등이다.

방사(radiation), 전도, 대류에 의한 열손실을 무시하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다

$$P/V_t = \xi W\rho (C_p \Delta T + L_f + m' L_v) \quad (4)$$

여기서

P : 흡수된 출력=조사출력 $\times (1-\gamma_f)$

γ_f : 반사율, V : 절단속도, W : 절단폭

ξ : 공정효율의 역수, t : 두께, ρ : 공작물 밀도

C_p : 공작물 비열, ΔT : 용융점 T_m 의 온도 상승

L_f : 용해잠열, m' : 용융, 증발되는 양, L_v : 증발잠열

2. 드릴링

레이저 빔의 세기에 따라 조사된 빔은 공작물에 여러 가지 방법으로 작용한다. Power density I 를 연속적으로 조사하면 용융점까지 온도가 상승하고 용해선단이 재료속으로 전파되어간다. 표면온도가 증발온도까지 상승하면 증발선단이 재료속으로 움직이기 시작하고 용융물층의 두께를 감소시킨다. 그럼에도 불구하고 빠른 증발이 일어나면 I 두께가 Rykalin과 Uglov에 의해 평가된 얇은 유막에 의해 증발표면이 앞서간다. 증발선단에 의해 발생된 구멍이 깊어지면 조사 빔은 좀더 효과적으로 받아들여지고 모든 면이 얇은 유막으로 덮히게 된다. 증발하는 증기와 이 막사이의 상호작용은 Flushing 역할을 만들게 되고 그 근처 유체가 구멍밖으로 휩쓸리게 되어 수직 드릴링의 경우 구멍 밑바닥에 유체가 떨어지는 것을 막게 되어 구멍이 형성된다. 재료의 제거 비

율은 빔 밀도와 시간 펄스레이저인 경우에 순간적인 출력형태에 따라 변한다. 드릴링 역학은 펄스 지속시간과 밀도에 따라 증발에서 용해로 조절된다.

· 중요한 공정변수

주요 공정변수로는 출력, 파장, 작용시간, 광학계, 빔 직경, 빔 퍼짐성에 관련된 Cavity optics, 공작물의 열특성, 펄스레이저인 경우 펄스폭과 반복률 등이다. 가공 판단기준으로는 구멍직경, 구멍깊이, 구멍형태, 종횡비, 재구조층, 표면상태와 재료 제거물 등이다. 구멍깊이는 어떤 한계점까지 에너지밀도가 증가하면 커지는데 Hamilton과 James에 의하면 두께/총 투입 에너지가 $5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 일 때 최대라고 한다. 이보다 낮으면 과다 에너지는 전도와 용융에 의해 손실되고 높으면 가스 파손과 이온화에 의한 플라즈마에 의해 손실된다. 구멍깊이는 초음파 진동에 의해 증가될 수 있는데 Mori와 Kumehara는 5J 펄스루비레이저를 사용하는 경우 공작물을 진동시켜 $25 \mu\text{m}$ 크기의 초음파 진동을 줌으로써 구멍깊이를 10% 증가시켰다. 구멍 직경은 조사된 빔 직경에 관련이 있는데 Cavity optics, Focusing optics와 레이저 파장에 의해 빔 직경은 결정된다. Chun과 Rose에 의하면 첫 $10 \mu\text{sec}$ 동안에 레이저 펄스를 지속시켜줌으로써 재료의 질량이 천천히 감소한다. Spitz에 의하면 제거되는 재료의 양은 다음과 같다.

$$V = V_0 [1 - \exp(-\beta S)] \quad (5)$$

V_0 : 무한정 조사에 의한 한계 제거체적

S : 조사횟수, β : 상수

Andrew 등에 의해 측정된 천공속도는 열손실이 없다고 가정하여 증기/액체 계면의 속도 V_{ss} 는

$$V_{ss} = \frac{(1-R)I}{[\rho H_v + \rho C_p (T_v - T_0)]} \quad (6)$$

로 표시된다.

여기서 I : 출력밀도, ρ : 밀도

H_v : 증발잠열, C_p : 비열, T_v : 증발온도

T_0 : 최초온도, R : 반사율

이 공식은 천공이 증발에 의한 경우만 유효하다.

3. 용 접

레이저에 의한 용접은 전자 빔 용접과 비슷한데 'key hole'에 의해 에너지가 전달된다.

이러한 key hole은 출력밀도가 공작물의 증발을 발생시키는데 충분한 경우에 발생되며 구멍(crater)에 있는 증기에 의해 발생하는 압력은 hole의 벽을 따라 위로 용

용융속물이 움직이게 된다. 이 hole 은 후체역할을 하는데 열을 재료 내부로 분산시키게 할 뿐만 아니라 레이저 빔의 흡수를 도와준다. 반면에 대부분의 통상적인 용접 공정에서는 열이 재료의 표면에 모여져서 전도에 의해 내부로 전달된다. 레이저 용접 중 에너지와 재료의 흐름 조건이 Klemens에 의해 이론적으로 연구되었다. 연속적으로 발생하는 증기가 Cavity 안에 머물러 있을려고 하는 유체의 흐름과 표면장력은 Cavity 를 없애려고 한다. 빔이 들어오는 곳에 Cavity로부터 나오는 재료의 흐름이 있다. 빔이 움직이면 이러한 'key hole'은 정상상태를 이룬다. 즉 용융구간을 가진 Cavity와 빔이 빔 전진속도에 의해 형성된 속도로 앞으로 움직인다. 반면에 증발에 의해 손실된 재료는 고형화된 용융물에서 함몰 형태로 공작물의 기공이나 내부 변형으로서 혹은 이 두 개를 합친 것으로 나타난다.

충분한 증기가 정상상태를 유지시킨다는 조건은 정상상태를 유지하기 위한 최소 전진속도를 결정시킨다. 빔의 작용에 의해 결정된 속도에서 Cavity가 고체와 유체를 통과하는 동안 재료는 Cavity의 앞에 있는 영역에서 뒤에 있는 영역으로 연속적으로 움직여야 한다.

이러한 사실은 Sickman 과 Morijin 등에 의해 실험적으로 확인되었다.

· 용접변수

주요한 레이저 용접공정변수는 다음과 같다.

- (1) 조사된 레이저 출력
- (2) 빔 직경
- (3) 흡수율
- (4) 용접속도

이외에도 용접설계, 쉬일딩 가스, 버트 용접의 간극크기와 촛점거리 등도 주요한 인자들이다. 용접의 평가기준으로는(중속변수) (1) 용접깊이 (2) 미세조직과 금속학적 특성 등이다.

용접깊이는 레이저 빔의 밀도와 직접 관련이 있으며 조사된 빔과 빔 직경의 함수이다. 일반적으로 일정한 빔 직경에서 빔 출력이 증가하면 침투가 잘 된다.

4. 열처리

철 합금들은 레이저 열처리를 하기에 적당한 재료들이다. 얇은 층이 레이저에 의해 오스테나이트 온도까지 재빨리 가열되고 또한 매우 빨리 냉각되어 전도에 의한 자가 퀴칭(self quenching)에 의하여 마르텐사이트 조직이 된다.

레이저 가열 중 열전달은 역 Bremsstrahlung 효과에 의해 얻어진다. 즉 레이저 빔의 양자와 공작물의 자유전

자와의 작용에 의한다.

레이저 가열에 의한 열처리를 하기 위해서는 다음의 3 가지 조건을 만족시켜야 한다.

- ① 경화되는데 필요한 온도는 Austenitizing 구간에 잘 도달해야 한다.
- ② 가열과 냉각사이클 사이에서 공작물은 탄소 확산을 위해 오스테나이트 온도에서 오랫동안 머물러야 한다.
- ③ 자가 퀴칭(self-quenching)에 의한 냉각률이 '임계 퀴칭률' 조건을 만족시키기 위하여 충분한 질량이 되어야 한다. 보통의 열처리 방법과 레이저 열처리 방법은 다음과 같은 점에서 차이가 난다.

- ① 레이저의 급속가열과 냉각은 저탄소강의 경화를 비교적 쉽게 할 수 있는데 통상적인 방법보다는 탄소강과 합금강의 경화성의 차이가 크게 부각되지 않는다.
- ② 보통의 통상적인 열처리방법보다도 더 높은 경도를 얻을 수 있는데 국부적이고 급속한 가열 냉각에 의한 비정상적으로 높은 구속 조건하에서 마르텐사이트가 형성되기 때문이다.

구상화탄화물이나 그라파이트를 포함하고 퍼얼라이트가 없는 주물같이 침액(soaking)시간이 긴 합금은 레이저 열처리에 적합하지 않다.

이것은 탄소를 확산하는데 필요한 긴 침액시간이 레이저 작동변수를 제한시켜 레이저가 갖고 있는 본래의 장점을 잃어버리기 때문이다. 그렇지만 그라파이트와 퍼얼라이트를 가진 주물은 열처리를 할 수 있는데 퍼얼라이트 변태는 경화 역학에서 큰 역할을 한다.

열전달과 질량전달이 레이저 열처리 공정에서 결정적인 역할을 한다. 이러한 두 가지 현상은 출력밀도와 작용시간과 같은 공정변수에 영향을 받는다.

· 열처리 변수

주요 독립변수로는 조사된 빔 출력, 빔 직경, 흡수율, 열처리 속도 등이며 가공물의 열 특성도 주요 인자이다. 종속변수로는 경화깊이, HAZ의 형상, 열처리된 부분의 금속학적 특성 등이다.

Courtney 와 Steen 에 의하면 En8 강(0.36% C ; 0.58% Mn ; 0.22% Si ; 0.25% Ni ; 0.5% Cu ; 0.08% Cr ; 0.015% P ; 20% S)의 경화깊이는 $P/(D_b V)^{1/2}$ 로 나타내어진다고 한다. 여기서 P는 레이저 출력, D_b 는 빔 직경, V는 속도이다. 대부분의 저 합금강의 열특성은 이와 비슷하므로 강의 열처리 공정을 결정하는데 대략적인 지침으로 사용할 수 있다. 열처리 속도는 작용시간을 결정하는데 경화깊이에 반비례한다.

변태 경화에 필요한 최소시간은 10^3 W/cm^2 가 넘는 출력밀도를 사용하면 10^{-2} 초이다. 금속의 적외선 흡수는

자유전자에 의한 전도 흡수에 주로 관련이 있는데 철합금의 경우 15% 정도이다. 'key hole'이 형성되면 흡수율이 증가하는데 열처리 중에는 용융이나 key hole 형성이 되어서는 안된다. 그러므로 약간의 흡수막이 레이저 열처리 중에 사용되며 흡수막에 이용되는 것으로는 Colloidal graphite, Manganese phosphate, Zinc-Phosphate, Black paint 등이다.

Sodium 과 Potassium silicate 의 혼합물이 또한 고 흡수를 위해 사용된다. 이러한 피막은 흡수율을 80% 이상까지 향상시킨다.

5. 표면개질

· LCVD(Laser Chemical Vapor Deposition)

경화피막이나 반도체 재료의 국부적인 Deposition 에 대한 요구는 LCVD의 두 개의 주요 수요처이다. 열처리에서 마찬가지로 출력밀도와 작용시간 그리고 가스 상태 화학을 포함한다.

LCVD는 광해리나 열해리에 의해 얻어진다. 광분해에서는 레이저 양자가 연속체 전자전이 상태에서 직접 흡수되고 열분해에서는 레이저 양자가 온도를 상승시킴으로써 가공물에 흡수되도록 하는 것인데 필요한 침전을 유발시키는 적당한 가스하에서 흡열(endothermic)반응을 포함한다. 그림 4에 Pyrolysis에 의한 LCVD가 기술되어 있다.

레이저는 투명창문과 투명과 투명반응물에 접촉되어 공작물에 반응된다. 반응이 일어나는 곳에 국부적인 hot spot 를 형성하는데 반응물과 공작물의 흡수율은 사용되는 레이저의 파장을 결정한다. 침전(deposition)이 열에 의해 행해지면 LCVD는 통상적인 CVD와 비슷한데 다음과 같은 점에서 다르다.

- a) 레이저의 특성에 의한 국부적인 침전
 - b) 접착률이 통상적인 것 보다 2-4배 정도 크다.
 - c) 넓은 범위의 가열과 냉각이 가능하다.
 - d) 반응물의 예열은 매우 짧은 시간에 매우 높은 표면 온도를 발생시킴으로써 필할 수 있다.
 - e) 이 방법은 주로 표면 반응에 의해 조절되기 때문에 또한 반응물이 가열되기 때문에 반응운동학이 보통의 방법과 다르다.
 - f) 접착률은 광에 의한 가열이기 때문에 접착의 성질에 달려있다. 예를 들면 금속필름을 접착할 때 반사율은 증가하는데 산화물을 접착할 때는 흡수율이 감소하여 높은 에너지 흡수가 필요하다. 표면조도는 흡수에 영향을 미치고 접착률에도 영향을 미친다.
- 광분해에 의한 LCVD는 열분해에 의한 것보다 속도가 늦다. 이 공정에서는 레이저 빔이 공작물에 평행하게 할 수 있다.
- 주요변수로는 a) 조사출력 b) 빔 직경 c) 횡단속도 혹은 작동시간 d) 표면 반사율 e) 반응로에서 반응물의 가

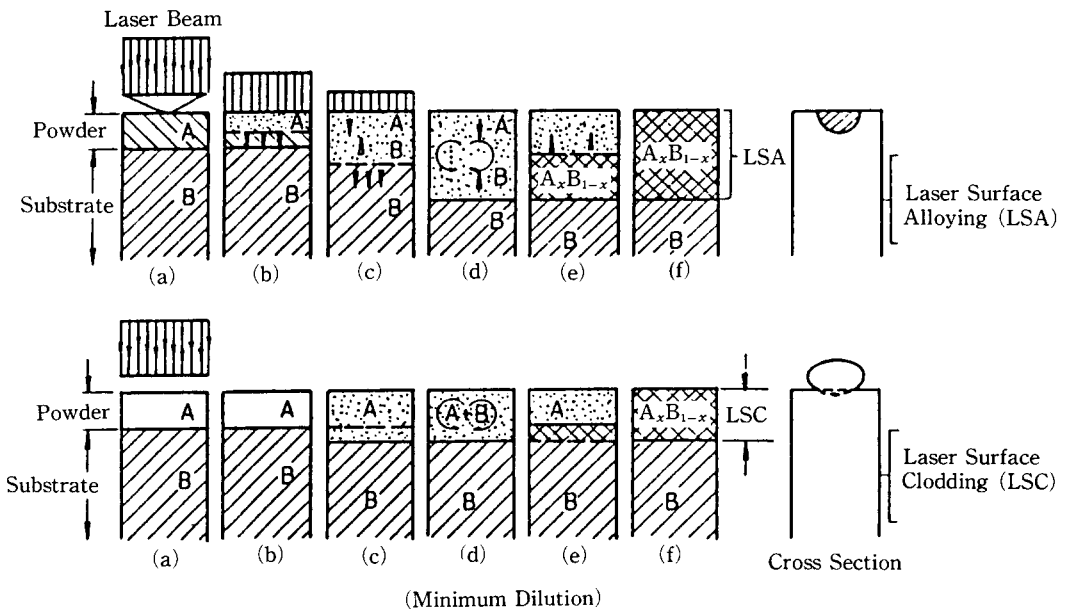


그림 4. 레이저 표면합금의 절차.

스압력 f) 반응로 온도 g) 공작물 열 특성이다.

해당되는 종속변수로는 a) 접착률 b) 구성성분과 미세조직 c) 접착형상 즉 두께와 직경 등이다. 접착운동학은 다음과 같다.

① 접착은 반응가스흐름의 Reynold's number 에 직접적으로 관련이 있다.

② 반응물의 집중은 큰 역할을 한다.

③ 이 공정은 저온에서 반응물에 의해 조절되며 고온에서는 질량전달에 의해 조절된다.

· 레이저 표면 합금

마모, 부식, 침식이나 고온 산화를 포함하는 Mechanism 에 의한 표면과 관련된 손상은 레이저 표면합금이나 레이저 클래딩같은 표면개질 기술에 의해 최소화할 수 있다.

이 공정은 LCVD와 열처리보다 100배 정도의 출력밀도를 요구한다.

급속냉각과 가열률은 meta stable 하고 불균형 상(phase)을 갖는 좋은 특성을 가진 새로운 재료를 만들 수 있다.

레이저 표면합금(LSA)은 레이저 빔에 의해 금속의 표면과 얇은 막근방에서 동시에 요구되는 합금을 첨가시켜 금속의 화학성분을 바꾸는 것이다. 그림 4에 개념도가 도시된다.

그림 5(a)는 레이저 빔에 의해 공작물 B에 합금 A가 코팅되는 것을 보여준다. 대부분의 재료와 레이저 파장이 이용 가능한데 에너지의 일부는 확산반사에 의해 손실되고 일부는 역 Bremsstrahlung 법칙에 따라 공작물 자유전자와 레이저 빔 광자의 상호작용에 의해 흡수된다. 흡수된 에너지는 표면온도를 순간적으로(1 Picosecond)용융점위로 상승시키며 그림 5(b)에서 보는 바와 같이 모재쪽으로 합금층을 통하여 유체/고체 경계면이 움직인다. 짧은 시간안에 고체/유체 경계면은 모재에 도달하고 합금원소와 공작물 사이의 상호 확산이 시작된다(그림 5(c)).

이 때 최대 용융깊이(그림 5(d))가 얻어지고 레이저 빔은 그 위치를 횡단하게 되고 응고가 시작된다(그림 5(e)). 응고(solidification)는 매우 빨리 이루어지고 $A_x B_{1-x}$ 의 표면합금이 형성된다(그림 5(f)).

응고가 대단히 빨리 진행되어 고체상태에서 확산이 무시된다. 이런 빠른 응고는 훌륭한 Metastable 한 상태와 때때로 금속같은 유리를 만들 수 있게 한다. 합금층의 두께는 합금성분의 확산깊이와 일치하며 레이저 출력과 레이저 빔의 조사시간에 따라 조절된다.

· 공정변수

주요 독립변수로는 (1) 레이저 빔 (2) 빔 직경 (3) 속도 (4) 흡수율 (5) 첨가되는 합금 양 (6) 공작물과 합금의 열특성 (7) 표면합금의 증복 정도이다. 주요 종속변수로는 (1) 깊이, (2) 폭 (3) 용질성분 (4) 합금층의 미세조직 등이다.

표 2에 변수에 따른 변화를 보여준다.

표 2. 공정변수에 따른 표면합금층 변화.

독립변수	종속변수	비고
LAZ 폭	$P \uparrow$ 하면 \uparrow $S \uparrow$ 하면 \downarrow	변수사이 관계 없음
LAZ 깊이	$P \uparrow$ 하면 \uparrow $S \uparrow$ 하면 \downarrow $D \uparrow$ 하면 \downarrow	D 와 S 작용 흡수역학 변화
N ; LAZ 성분	$D \uparrow$ 하면 \uparrow $S \uparrow$ 하면 \uparrow $P \uparrow$ 하면 \downarrow	P 와 D 작용 용융체적 관련
평균성분의 변화	$D \uparrow$ 하면 \uparrow $S \uparrow$ 하면 \uparrow	

P : 출력, S : 속도, D : 빔 직경, \uparrow : 상승, \downarrow : 감소

V. 맺음말

레이저를 이용한 재료가공은 외국에서는 1960년대 말부터 연구를 하여 실용화 단계에 도달하였으나 국내에서는 Resistor trimming 과 같은 전자산업분야 이외에는 실용화가 많이 되어 있지 못하다. 그러나 항공산업, 자동차 산업 등에서 레이저를 이용한 재료가공의 필요성이 증가하고 있으며 레이저 가공이 갖고 있는 장점들을 이용하고 단점을 극복하기 위한 연구도 연구소와 학교를 중심으로 시작되었다. 레이저 가공의 최종 목표인 유연 생산시스템(flexible manufacturing system)을 완성하고 제품의 경쟁력을 확보하기 위하여 레이저를 이용한 재료가공분야의 연구와 투자가 지속적으로 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

[1] Laser and Applications, 1987-1988 3.
[2] Laser & Optronics, 1988. 4-1989. 12.

- [3] The Industrial Laser Annual Hand book, 1988.
- [4] Laser 가공기술 세미나 교재, Korea Techno Bank, 1988.
- [5] Source Book on Application of the Laser in Metal-working, ASE Engineering Book shelf, American Society for Metals, 1981.
- [6] Laser Advanced Materials Processing, Japan Laser Processing Society, 1987.
- [7] Chan, C. L., J. Mazumder, and M. M. Chen, Materials Science and Engineering, 1987.

Material Processing by Laser

Kyung Hyun Whang and Seong Kook Lee
KIMM, Chang Won 641-010

(Received: February 8, 1990)

Lasers are used increasingly for specialized engineering applications such as drilling, profile cutting, welding and surface heat-treatment (hardening, alloying, annealing) of metals and non-metals. The most important characteristics of lasers used for these materials-processing applications are reviewed, with special emphasis on the importance of the controlled heating process. In addition to these processes, some optical devices and supplementary equipment used in laser processing are introduced. Finally, some examples shows the wide variety of laser capability for substitution of traditional materials processing.