

特輯 : 재료의 표면 개질 기술

Laser beam 표면개질(II) : 용융에 의한 표면개질

김 정 수 · 서 정 훈

Laaser beam Surface Modification(Ⅱ) : melting Processes

J. S. Kim and J. H. Suh



김정수/한국원자
력 연구소/1951년
생/laser 표면개질
원자력 발전소 S/
G재료 부식 방식

서정훈/한국원자
력 연구소/1963년
생/laser 표면개질
원자력 발전소 S/
G재료 부식 방식

1. 개 요

최근에 레이저는 고품질의 표면개질을 위한 독특한 도구로 인식되고 있으며, 고출력 연속파 CO₂ 레이저의 개발과 함께 레이저 표면개질기술이 새롭고 진보된 표면 공정방법 (processing method)로 급속히 부상하고 있다. 특히 산업이 더욱 발달함에 따라 더욱 혹독해지는 환경과 더욱 정밀성을 요하고 소형화되는 제품에 사용되는 재료의 내구성을 향상시키기 위한 표면개질에 부합되는 기술로 인식되어 가고 있기 때문에 새로운 기술개발을 위하여 많은 연구가 활발하게 수행되고 있다. 이러한 표면개질 기술로는 레이저 표면제거 (surface removal 또는 ablation), 표면합금화, 레이저 크래딩 등이 많이 연구되고 있는데, 이러한 표면개질 기술을 재료표면에 적용함으로써 모재의 특성에 영향을 주지 않고 내마모, 내부식 및 응력부식, 내침식, 내피로 또는 내고온산화성 등의 표면특성을 크게 향상시킬 수 있다. 레이저를 이용한 표면개질 기술로는 다양한 것이 있으나 앞의 laser beam 표면개질 (I) 에서 분류한 것처럼 본 조사

(review)에서는 표면용융에 의한 표면개질기술, 즉 표면제거, 표면용융, 표면합금화 및 표면육성 (cladding)에 대하여 언급하도록 한다.

2. 표면제거(Surface Removal 또는 Ablation)

레이저 빔을 이용한 재료표면 제거기술은 재료 표면에 레이저 빔을 조사하여 재료의 최외각 표면을 제거하는 것으로, 현재 새로운 표면제거 기술로 개발되고 있다. 지금까지 주로 사용되어 온 표면제거 기술¹⁾로는 사포를 사용한 마찰, sand 또는 ice blasting, water jetting, grinding 등과 같은 기계적 제거기술과 화학적 또는 전기화학적 용해 제거 기술등이 있으나, 이러한 방법들은 많은 폐기물을 생산하거나 환경공해 문제를 유발시키는 문제가 있으며, 특히 방사능이나 맹독성 물질로 오염된 표면을 제거하는 데는 많은 제한을 받는다. 그러나 레이저 빔을 이용하면 환경오염을 감소(레이저 빔으로 유기물 결합을 파괴함으로 유독성 상실시킬 수 있을 뿐만 아니라,²⁾ 레이저 빔 이용기술의

장점 중 하나인 공정 자동화방가 쉬우므로 복잡하고 정밀한 반도체 직접회로기판의 표면 오염물질 제거, 방사능 오염이나 맹독성 물질로 오염된 표면 제거 또는 복잡한 형상을 한 제품 및 시설표면에 대한 제거 등이 다른 기술에 비하여 용이하다. 이외에도 레이저 빔 표면제거기술의 장점을 요약하면 다음과 같다.¹⁾

- 제거하는 깊이를 쉽게 조절할 수 있다.
- 여러가지 방법(용융, 증발, 승화 등)으로 표면을 제거할 수 있기 때문에 제거 후의 표면상태를 마음대로 조절할 수 있다.
- 제거된 물질이 액체가 아니기 때문에 포집이 용이하고 포집된 제거물만의 재가 공이 가능하다.
- 열충격으로 제거할 수 있기 때문에 성질이 다른 두 재료 경계면(예, 금속과 세라믹 등)을 분리하여 분리제거가 가능하다.
- 기지표면의 손상 없이 피복된 물질만의 제거가 가능하며,
- 원래의 기지표면으로 재생이 가능하다.

또한 이 기술의 중요한 장점 중에 하나는 금속표면에 생긴 부식생성물(scale 등)을 제거함과 동시에 모재표면을 약간 용융시킴으로서 표면특성의 향상을 가져올 수 있다는 것이다. 예를들면, 열간 압연이나 용접 후 오스테나이트 스테인레스 강 표면에 형성된 스케일을 레이저 빔으로 제거할 경우, 표면을 약간 용융시킴으로 표면부위의 Cr이 균질하게 재분포되고 표면이 재 부동태화되어 내 부식성을 향상시키는 효과를 가져올 수 있고,³⁾ 최외각 표면부위를 용융한 후 급냉시키면 용융부분이 비정질화되어 내부식성이나 내마모성을 향상시킬 수 있다. 이러한 경우, 표면용융에 의한 합금원소의 재분포나 균질화를 원할 경우는 가열시간이나 냉각시간이 상대적으로 길어야 되기 때문에 펄스 레이저 빔보다는 CW 레이저 빔이 좋으나 용융된 부위가 비정질화될 만큼 급격한 냉각이 요구될 때는 짧은 유지시간의 펄스를 사용하여야 한다.

레이저 빔에 의한 표면제거는 열충격, 표면용융, 증발 또는 기화 등과 같은 방법이 있다.^{2,3)} 열충격 방법은 충격경화와 같이 fig. 1에서 보는 것처럼 레이저 빔 에너지를 흡수한 재료표면이 순간적으로 증발하여 표면 위에 플라즈마를 형성하며 재료표면에 충격파^{4,5)}를 주거나, 또는 펄스가 끝나면 승화가 중지됨과 동시에 미세한 표면팽창이 일어나면서 표면이 깨어져 제거되고,^{6,7)} 용융방법은

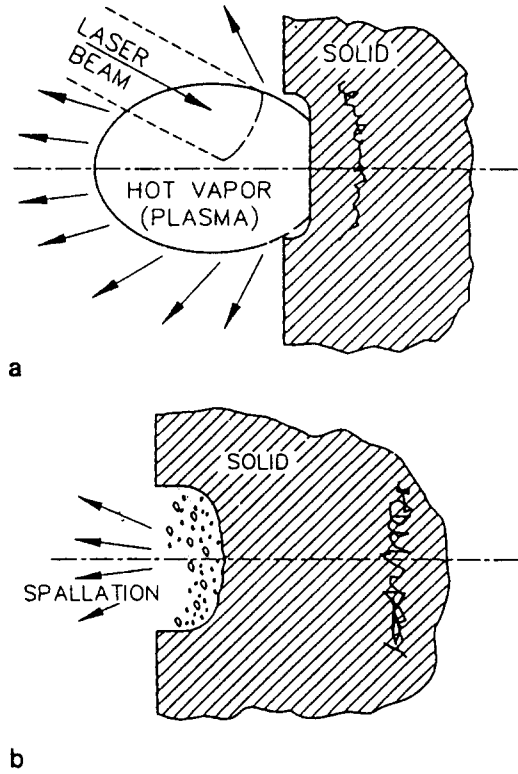


Fig 1. The (a) initial and (b) subsequent interaction of laser pulse radiation with a solid surface.⁵²⁾

레이저 빔에 의한 최외각 표면의 용융과 동시에 가스를 불어줌으로서 용융된 부분을 제거한다.⁸⁾ 증발과 기화는 비슷한 방법이나 증발은 표면용융이 수반되나,³⁾ 기화는 모재의 표면용융 없이 표면물질이 바로 기체로 제거하는 방법^{9,10)}이다. 이러한 방법들 중 모재 및 표면이 제거되는 재료의 종류, 요구되는 표면상태, 레이저의 종류 등에 따라 다른 방법이 적용될 수 있다.

이러한 레이저 빔 제거기술은 전자부품,^{11,12)} 박물관에 보관되어 있는 조각품⁹⁾이나 골동품^{6,13)}, 자동차나 건물 또는 비행기에 칠해진 페인트,^{14,17)} 재료표면에 증착된 견고한 박막,¹⁸⁾ 또는 방사능으로 오염된 콘크리트 벽^{19,20)}이나 재료표면^{1,21,22)} 제거나 재료표면에 각인을 위한 재료제거²¹⁾ 등에 이용될 수 있으며, 많은 부분이 현재 이용되고 있다.

레이저 표면제거 공정에서 가장 중요한 변수는 레이저 빔 출력, 빔 파장, 펄스의 지속시간, 제거

표면의 종류나 상태, 사용가스 등이다. 이러한 변수들의 영향에 대하여 몇가지 다른 표면을 제거할 경우에 대하여 알아본다.

먼저 엑시머 레이저로 공구강 표면에 코팅된 TiN 피막을 제거할 경우,¹⁸⁾ 제거속도에 대한 레이저 빔 출력 및 총펄스수의 영향은 Fig. 2, 3에서 보는 것처럼 출력이 증가하거나 펄스수가 증가하면 제거속도가 증가하지만 표면의 손상도 증가한다. 이 결과에서 보면 사용하는 가스에 따라 제거속도가 크게 영향을 받지만 레이저 펄스에는 거의 영향이 없는 것을 알 수 있다. 표면피막 제거시 모재의 표면에 전혀 영향을 주지 않고 표면피막을 제거할 수 있는 조건을 Fig. 4에서 보는 것처럼 최적화할 수 있다.

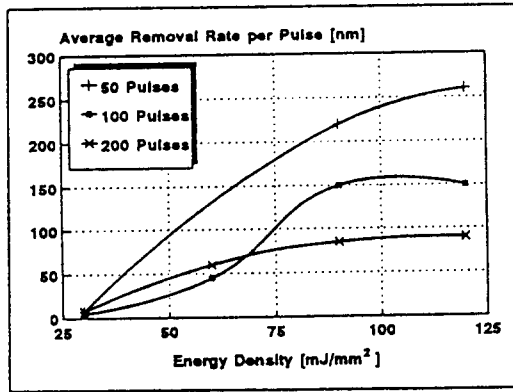


Fig 2. Average ablation depth per pulse in air as function of the energy density.⁶⁶⁾

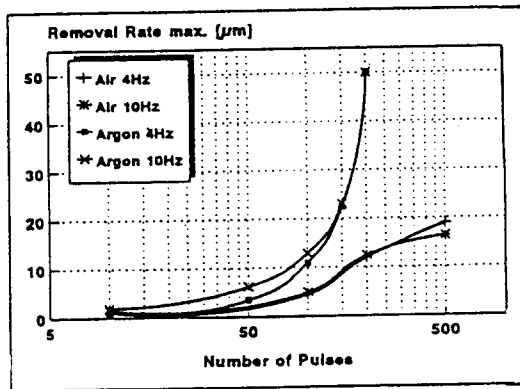


Fig 3. Influence of processing gas and repetition rate on the maximum ablation depth ; energy density 60 mJ/mm².⁶⁶⁾

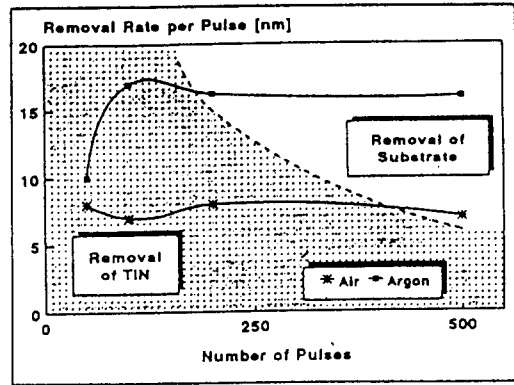


Fig 4. removal rate as function of number of pulses; Laser parameters : energy density 30 mJ/mm², repetition rate 4 Hz.⁶⁶⁾

한편 철강표면의 페인트를 제거하기 위하여 여러가지 다른 펄스 레이저 빔을 사용한 경우,¹⁷⁾ 모재표면에 영향을 주지 않고 페인트 제거속도는 Fig. 5에 나타난 것처럼 평균 에너지 밀도 및 빔의 반복회수의 증가에 따라 증가한다. 또한 TEA-CO₂ 및 CW CO₂ 레이저를 사용하여 오스테나이트 스텐레스 강 표면에 열간압연시 생긴 스케일을 제거할 경우³⁾의 제거속도와 표면거칠기에 대한 레이저 출력의 영향을 Fig. 6, 7에 나타내었다. 이들 그림을 보면 표면 제거속도는 같은 에너지에서 펄스 레이저가 더 효과적임을 알 수 있으며, 펄스 레이저의 경우 표면 거칠기와 제거속도와는 뚜렷한 관계가 나타나지 않으나 CW 레이저의 경우는 제거속도의 증가에 따라 표면 거칠기도 증가한다. 이상에서 보는 바와 같이 표면제거 공정에 대한 최적조건은 원하는 표면상태에 따라 변하기 때문에 실험에 의하여 결정할 수 밖에 없다.

일반적으로 재료표면을 심하게 가공하고자 할 경우나 표면 거칠기에 큰 영향이 없는 경우에는 TEA 또는 엑시머 레이저 등과 같은 지속시간이 짧고 처리시 생성된 플라즈마로 빔이 차단되기 때문에 부적당하고, 제거속도가 빠른 CO₂나 Nd:YAG의 펄스 레이저 빔이 적당하다.²³⁾ 반면에 아주 정밀한 표면이 요구되거나 모재표면에는 전혀 영향을 주지 않고 아주 얇은 표면부분 제거, 예를들면, 페인트^{15,17,19)}나 금속표면의 얇은 산화물²²⁾ 제거 또는 반도체 회로기판의 불순물 제거¹¹⁾ 등을 할 때는

TEA나 엑시머 레이저 빔이 유리하다. 한편 표면의 거칠기는 제거속도가 빠르면 거칠어 지고 낮으면

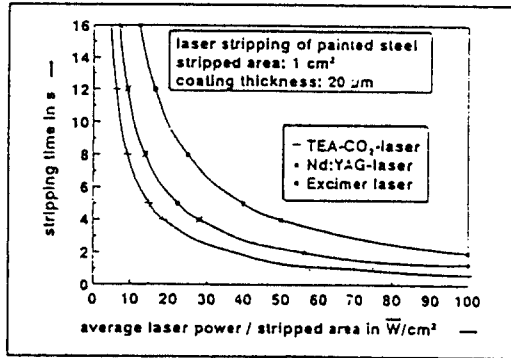


Fig 5. Stripping times for different short pulse lasers.⁽⁵⁾

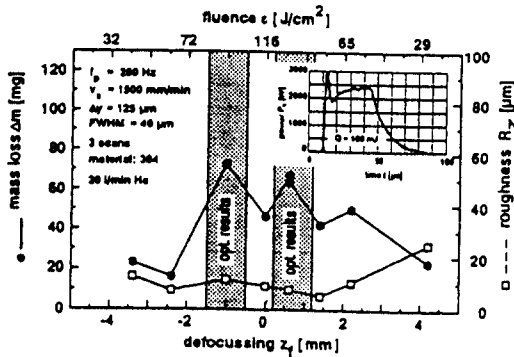


Fig 6. Mass loss and roughness versus defocussing-pulse mode operation with TEA-CO₂ laser beam.⁽⁵⁾

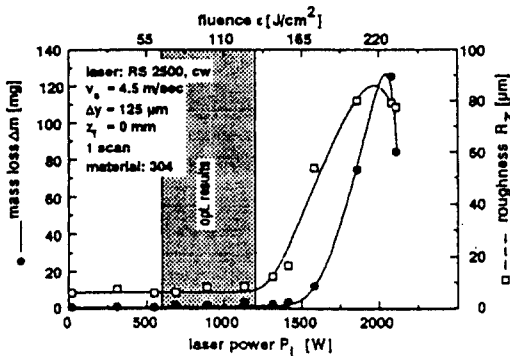


Fig 7. Mass loss and roughness versus CW CO₂ laser power.⁽⁵⁾

깨끗해짐으로 요구되는 표면의 거칠기에 따라 레이저 종류 및 제거속도가 결정되어야 한다.

레이저 빔 표면제거를 위하여 재료표면에 대한 사전 준비는 필요 없으나, 표면제거 목적에 따라 재료표면과 빔 사이의 반응(coupling)을 향상시키는 재료로 표면을 피복(표면열처리 경우와 같이) 시킬 경우도 있다.⁽¹⁾

재료표면을 제거할 때 고려하여야 할 중요한 것⁽¹⁾은 제거된 물질의 온도가 높기(제거되는 순간) 때문에 제거되는 물질의 포집에 문제가 될 가능성과 제거되는 물질과 빔 또는 모재와의 반응에 의한 제3의 물질 생성 가능성 및 생성된 물질의 열역학적 안정성 등에 대한 세심한 검토가 필요하다. 특히 방사능이나 맹독성으로 오염된 부분을 제거할 때 더욱 그렇다. 만약 제거되는 물질속에 유독한 물질이 포함되어 있을 경우, 이 물질과 고온에서 반응하여 안전한 화합물로 될 수 있는 물질을 레이저 빔 표면제거시 분사하는 방법, 예를들면 제거되는 물질속에 유독한 금속원소들이 포함되어 있을 경우 탄소를 레이저 빔과 함께 분사하여 이러한 원소들과 탄소가 반응하여 탄화물을 형성시켜 제거⁽²⁴⁾하는 것 등을 고려해 볼 수 있다.

3. 표면용융(Surface Melting)

레이저 표면용융은 표면열처리와 비슷하지만 레이저 빔을 이용하여 재료표면을 용융점 이상의 온도로 가열한 후 재 응고시킨다는 것, 즉 미세조직상으로 표면부위가 응고조직을 갖는다는 것이 다르다. 이 기술은 레이저 표면합금화나 표면 클래딩보다 레이저의 열 입력량이 낮고(낮은 빔출력 또는 빠른 빔주사 속도), 그러나 표면 열처리 경우보다는 높은(높은 빔출력 또는 느린 빔주사 속도) 조건에서 발생한 열이 기지금속 내부로 전파하기 전에 표면만 국부적으로 급속 용융시키는 것이다. 이 경우 표면부위에서는 최대 10⁹ K/cm 정도의 매우 큰 온도구배를 얻을 수 있으며, 냉각속도는 대개 10⁴-10⁸ °C/sec. 가 얻어지는데, 실험조건에 따라서는 10¹⁴ K/sec. 까지 얻을 수 있다.⁽²⁵⁾ 따라서 표면용융기술에서는 매우 큰 응고속도(최대 20 m/sec.)를 얻을 수 있고, 이로 인해 급냉응고조직, 초미세결정립, 준안정상, 높은 용해도, 비정질 등

을 얻을 수 있으며, 레이저 처리된 표면의 내마모성, 내부식성, 내침식성 및 내피로성 등을 향상시킬 수 있다. 보통 용융된 표면에서의 미세조직은 columnar 또는 dendrite 조직을 하고 있는데, 이 columnar 또는 dendrite 열전도 방향(열 제거되는 방향)으로 기우려져 있으며, 모재 경계면에서 epitaxial하게 응고된다.

급냉응고조직의 미세조직은 여러 가지 변수에 따라 달라지는데, 변수로는 레이저 빔의 출력, 빔의 종류(펄스 또는 연속), 빔 크기, 빔의 주사속도 또는 펄스지속시간 등의 공정변수와 기지재료의 성분, 열전도, 열용량, 표면상태, 존재 상의 종류(단상 또는 다상) 등이 있다. 이러한 공정변수와 재료변수의 조합에 의하여 결정되는 용융풀과 기지 사이의 온도구배, 냉각속도에 따른 응고속도 등에 따라 재 응고된 미세조직이 결정된다. 예를 들면, 단상을 가진 합금의 표면을 용융했을 경우, 용융부위와 기지 사이의 경계면에서 응고가 시작되는 순간에는 응고속도가 0이 되고 온도구배가 최대가 되기 때문에 기지와 epitaxial한 면전방(plane-front) 응고가 일어나 면(planar) 응고조직으로 되고, 응고가 계속되면서 온도구배가 감소하고 응고속도가 증가하면서 셀(cellular) 응고가 일어나 셀조직을 가진 응고조직이 된다.^{26,27)} 또한 기지는 단상이나 응고조건(레이저 처리조건 및 합금원소 등)에 따라 여러 상이 혼합된 dendrite 응고조직으로 될 수도 있다.²⁸⁾

응고시 상변태를 일으키는 재료의 경우 레이저 표면 열처리에서와 같이 표면조직이 기지조직과는 다른 상(예를 들면, 철강재료의 마르텐사이트 상)을 가진 조직으로 된다. 특히, 재료내부에 기계적 특성이나 침.부식특성 등을 손상시키는 개재물 또는 석출물을 가진 재료의 경우 레이저 표면용융처리하여 개재물이나 불순물들이 용해된 균질하고 아주 미세한 응고조직으로 변화시킴으로써 해서 우수한 표면특성을 얻을 수도 있다.²⁹⁾

한편 표면용융기술을 레이저 글레이징(glazing)이라고도 부르며, 표면에 존재하는 균열과 기공들을 제거하기 위하여 적용하는 표면용융기술을 레이저 실링(sealing) 또는 레이저 표면실링(surface sealing)이라 한다. 이 기술은 주로 플라즈마 용사층에 존재하는 기공이나 균열을 제거하기 위하여 이용된다.³⁰⁾

레이저 표면용융은 앞에서 언급한 것처럼 급속응고조직상의 여러가지 장점으로 인하여 내부식성, 내마모성, 내피로성 등의 특성향상을 가져올 수 있다. 스테인레스 강의 표면을 레이저로 용융하면 응력부식균열 특성이 향상되고³¹⁾ 예민화된 오스테나이트 스테인레스 강을 표면용융한 경우 탈예민화가 일어나 내부식성^{32,33)}이 증가하였다.

2024-T351 Al 합금을 레이저로 표면용융시킨 경우,³⁴⁾ 용융처리전에 발생하던 입계부식이 용융처리 후에는 발생하지 않았으며 핏팅도 균일하게 발생하여 표면 미세조직이 균질화되었음을 알 수 있었다. 또한 Zr-합금³⁵⁾이나 Ti-합금³⁶⁾의 경우에서도 부식특성 및 마모특성이 향상되었다는 보고가 있다. 하지만 표면용융기술은 아직까지 완전한 실용화는 되지 않았지만 현재 활발하게 연구가 수행되고 있기 때문에 머지않아 실용화가 될 것으로 기대된다.

4. 표면 합금화 (Laser surface alloying, LSA)

레이저 표면 합금화는 레이저 빔을 재료 표면에 조사시켜 표면을 국부적으로 용융시키고 동시에 원하는 합금 원소를 첨가하여 재료 표면의 화학조성을 변화시키는 기술이다. 레이저 빔 표면용융기술과 마찬가지로 레이저 합금화 과정에서 수반되는 급속응고(rapid solidification)을 이용하여 표면 합금층에 준안정상을 형성시킬 수 있고, 또한 어떤 경우(특정한 공정변수에서)에는 비정질상(metallic glasses)를 얻을 수 있다.

레이저 표면 합금화의 주요 독립 공정변수로는 레이저 출력(laser power), 빔 크기, 시편의 이송속도(traverse speed), 흡수율(absorptivity), 첨가되는 합금원소의 양, 모재와 합금원소의 열.물리적 특성, 그리고 표면 합금화층의 중첩도(degree of overlapping) 등이 있으며, 종속변수로는 레이저 합금층의 깊이, 너비, 화학조성, 그리고 미세조직 등이 있다. 여러 가지 합금의 레이저 표면 합금화에 대한 자료는 여러 문헌³⁷⁻³⁹⁾에 정리되어 있으므로, 여기서는 공정변수가 종속변수에 미치는 영향에 대해 간략하게 기술하도록 한다.

합금층의 깊이는 레이저 출력, 빔의 크기, 이송

속도, 그리고 빔 크기와 이송속도의 상호반응에 의해 영향을 받는다. Chande와 Mazumder의 연구⁴⁰⁾에 의하면 레이저 출력은 빔 크기나 혹은 이송속도와 상호 반응/영향이 없어 이들 변수와 무관하게 레이저 출력의 영향을 설명할 수 있다. 하지만, 빔 크기나 혹은 이송속도의 영향을 설명하기 위해서는 서로 다른 변수가 반드시 포함되어야 한다.

일반적으로 레이저 출력이 증가되면 시편의 이송속도와 빔 크기에 무관하게 합금층의 깊이가 증가한다. 이것은 전체 출력의 증가로 인해 시편 표면에 더 많은 에너지가 공급되고(결국 표면의 온도가 증가되고), 이로 인해 시편 표면에서 내부로의 열 전달(heat flow)이 증진되어 합금층의 깊이가 커진다. 반면에 이송속도를 증가시키면 레이저 빔과 재료 표면과의 상호 반응시간이 감소하게 되어 결국 시편 표면에 흡수되는 에너지 양이 감소하게 되며, 이로 인해 합금층의 깊이가 감소한다. 어떤 임의의 레이저 출력과 이송속도에서, 빔 크기의 증가는 시편 표면에서의 출력 밀도(power density)를 감소시켜 재료 표면의 온도 구배를 완만하게 만들고, 따라서 시편 내부로의 열 전달이 둔화되어 합금층의 깊이가 감소하게 된다. 그러나 빔의 크기가 어떤 임계치보다 작아지면 키홀(keyhole)이 형성되고 이때 키홀 내부에서 레이저 빔의 다중 반사 및 흡수로 인해 레이저 빔의 흡수(coupling)가 크게 증가되어 합금층의 깊이가 급격히 증가하게 된다. 레이저 표면합금화는 키홀이 형성되지 않은 레이저 출력밀도에서 수행하는 것이 바람직하다.

시편의 이송속도와 레이저 출력이 합금층의 너비에 영향을 주는 가장 중요한 변수이며, 이 두 변수들은 서로 영향을 주지 않는 것으로 보인다.⁴¹⁾ 레이저 빔과 재료 표면과의 임의 반응시간(보통의 경우 빔의 크기/시편의 이송속도)에서 레이저 출력의 증가는 재료 표면에 더 많은 에너지를 공급하여 표면에 발생하는 온도 구배가 커지게 되며, 이로 인해 용융풀의 표면 장력에 의해 구동되는 대류에 의한 열 전달⁴²⁾이 왕성하게 되어 합금층의 너비가 증가하게 된다. 반면에 주어진 레이저 출력에서 시편의 이송속도의 증가는 레이저 빔과 재료 표면의 상호 반응시간을 감소시켜 모재로 흡수되는 에너지가 감소되며 이로 인해 합금층의 너비가 감소한다.

레이저 표면 합금화시 합금원소를 공급하기 위하여 다양한 방법이 이용되고 있으며,³⁶⁾ 주로 1. Electroplating, 2. Vacuum evaporation, 3. Preplaced powder coating, 4. Thin foil application, 5. Ion implantation, 6. Diffusion, e.g. boronizing, 7. Thermal spraying, 8. Powder feeding, 9. Wire feed 및 10. Reactive gas shroud, e.g. C_2H_2 in Ar or N_2 방법들이 사용되고 있다. 앞의 7개 방법은 레이저 처리 전에 별도의 공정을 이용하여 합금원소를 시편 표면에 미리 분말이나 혹은 코팅층 형태로 주입하는 것으로 "predeposition" 방법으로 분류하며, 나머지 3개의 방법은 레이저 처리하는 과정에 합금원소를 공급하는 방법으로 "codeposition" 방법으로 분류된다.³⁷⁾ 그리고 합금원소의 공급방법이 합금층의 조성에도 영향을 미치지만, 이들 방법을 비교 연구한 결과는 아직 보고되고 있지 않다.

공정변수가 합금층의 조성에 미치는 영향은 레이저 처리시 발생하는 용융풀의 체적(특히 깊이)과 밀접한 관계가 있다. 즉 용융풀의 체적이 증가하면 합금층에서의 합금원소 농도가 감소하고, 용융풀의 체적이 감소하면 합금원소의 농도가 증가하게 된다. 따라서 레이저 출력의 증가는 합금원소의 농도를 감소시키는 반면에 시편의 이송속도 및 레이저 빔 크기의 증가는 합금원소의 농도를 증가시킨다.

Chande와 Mazumder^{40,41)}는 합금층에서 평균 농도에 대한 합금원소의 농도 변화(composition fluctuation)를 연구하였으며, 그 결과에 따르면 빔 크기와 시편의 이송속도가 증가함에 따라 평균 농도에 대한 합금원소 농도의 변화가 증가되고, 반대로 빔 크기와 시편의 이송속도가 감소함에 따라 합금원소의 조성이 균일해진다. 이송속도의 감소는 레이저 빔과 재료 표면과의 상호 반응시간을 증가시키고, 이로 인해 용융풀이 더 오랜 시간 용융 상태를 유지하게 되고 이때 일어나는 용융풀의 대류와 국부적인 확산(local-scale diffusion)이 농도구배를 어느 정도 균일하게 만들게 된다. 빔 크기의 감소는 용융풀 표면에 발생하는 온도구배를 증가시켜며, 이로 인해 용융풀에서 일어나는 대류현상이 더욱 왕성해지고, 또한 solute-rich pockets가 용융풀 내에 미세하게 분산되고 국부적인 확산에 의해 합금층의 조성이 균일해진다.⁴²⁾

레이저 표면 합금화의 목적은 다른 코팅기술과 마찬가지로, 모재의 특성에 영향을 주지 않고 재료 표면의 특성을 실제 용융에 적합하도록 만드는 것으로, 가격이 비싸거나 혹은 매장량이 적은 합금원소를 절약할 수 있다. 일반적으로 레이저 표면합금화는 대기 중에서 $1 \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 속도로 $1 - 2000 \mu\text{m}$ 두께의 합금층을 만들 수 있다는 장점이 있고, 표면 합금층이 표면용융에 의해 만들어지기 때문에 모재와의 접합이 매우 우수하다. 그리고 표면 합금화는 급속냉각으로 인해 준안정상^{43,44)}이나 비평형상을 형성시킬 수 있어 새로운 재료의 개발에도 이용할 수 있다.

또한 합금화 공정의 열원으로 고출력 레이저를 이용함으로써 부가적인 가격이익(cost benefit)을 얻을 수 있다. Beforte⁴⁵⁾은 레이저 합금화와 일반 경면기술(conventional hardfacing techniques)의 가격분석을 통하여 레이저 합금화가 공정가격을 최대 80% 가량 향상시킬 수 있음을 보고하였다.

레이저 표면 합금화의 타당성에 대한 최초의 시도는 1964년도에 펄스 루비 레이저를 이용하여 수행되었으나,⁴⁶⁾ 본격적인 연구는 1970년대에 수 kW급 CO₂ 레이저가 상용화된 이후부터 시작되었다. 그리고 최근에 레이저 표면화에 대한 연구들은 주로 AISI 1018 강에 크롬을 첨가하여 합금층을 만드는 것이 주류인 것으로 보인다.⁴⁷⁻⁵⁰⁾ 레이저 표면 합금화된 Fe-Cr과 Fe-Cr-Ni 합금에 대한 전기화학연구에 의하면 이들의 부식특성이 304 스테인레스 강과 필적함을 보였다.^{47,51-53)}

대부분의 연구들은 Al, Cu, Ni 과 Ti 합금에 대하여 수행되고 있다. 특히, Al과 Cu는 높은 열전도성과 반사율로 인해 레이저 처리를 하기 어려운 재료에 속한다. Draper와 Ewing⁵⁴⁾은 현재까지 보고된 연구문헌을 정리 발표를 하였고, 이를 통해 관심있는 레이저 합금화에 대한 자료를 쉽게 접할 수 있다.

5. 표면 클래딩(Laser Surface Cladding, LSC)

레이저 표면 클래딩 기술은 표면 합금화와 여러 가지 면에서 유사하다. 다만 합금화의 경우, 레이저 빔을 이용하여 모재의 얇은 표면층을 용융시키

고 동시에 합금원소를 첨가한 후 응고시켜 모재의 얇은 표면층의 조성과 미세조직을 변화시키는 기술인데 반하여, 레이저 클래딩기술은 모재의 용융을 최소화하고 외부에서 공급된 클래딩 재료를 모재 표면에 용융, 응고시켜 모재 표면에 전혀 새로운 조성과 미세조직을 갖는 표면 클래딩층을 만드는 것이다.

모재의 용융 정도는 흔히 "dilution"으로 나타내며, dilution은 클래딩층(혹은 합금층)에 기여한 용융, 응고된 모재의 부피 분율로 정의된다. Dilution은 Fig. 8에서 보여주는 바와 같이 클래딩층의 단면 조직에서 측정된 면적을 식(1)과 함께 이용하여 구하거나 혹은 표면층의 조성을 측정하고 식(2)를 이용하여 구하기도 한다.

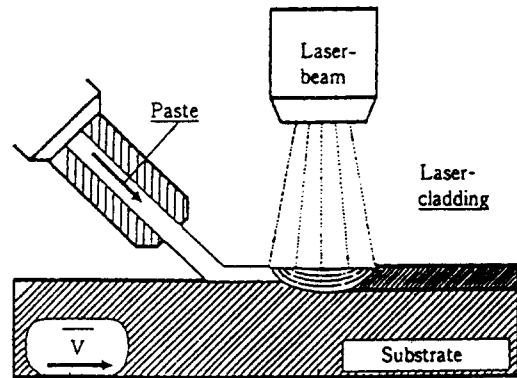


Fig 8. A schematic diagram of the one-stage laser cladding process with paste bound cladding material

$$\text{Dilution} = \frac{(\text{Area of melted substrate})}{(\text{Area of deposit}) + (\text{Area of melted substrate})} \quad (1)$$

또는

$$\text{Dilution} = \frac{\rho_p (\%X_{p+s} - \%X_p)}{\rho_s (\%X_s - \%X_{p+s}) + \rho_p (\%X_{p+s} - \%X_p)} \quad (2)$$

여기서 ρ_p = density of melted powder alloy

ρ_s = density of substrate

$\%X_p$ = weight percent of element X in the powder alloy

$\%X_s$ = weight percent of element X in the substrate alloy

$\%X_{p+s}$ = weight percent of element X in the total surface layer

레이저 클래딩 기술은 기존의 플라즈마 용사, 아크 용접 등의 기존 기술에 비해 여러 가지 우수한 장점들을 많이 가지고 있다. 몇가지 예를 들면 다음과 같다. 우선 모재의 용융을 최소화 할 수 있고 (reduction in dilution), 플라즈마 용사와 아크 용접과 비교할 때 모재에 적은 에너지가 흡수되므로 열 뒤틀림 (thermal distortion)에 의한 손실이 적으며, 클래딩 층의 기공률을 낮추거나 없앨 수 있고, 클래딩 층을 정밀하게 입힐 수 있어 후가공 비용을 줄일 수 있다. 그리고 대기 중에서 한 번의 공정으로 0.3에서 3 mm 두께의 클래딩 층을 얻을 수 있으며, 급냉 응고 조직이 형성되고, 레이저 클래딩 기술은 비접촉식 공정으로 전극의 소모에 의한 불순물 유입이 없다. 또한 비교적 매끈한 표면(대략 25 μ m RMS)을 얻을 수 있고, 자동화가 용이하다는 장점이 있다.

레이저 클래딩의 원리는 표면 합금화 기술과 거의 동일하다. 단지 앞에서 언급한 바와 같이 클래딩에서는 모재의 용융을 최소화하여야 한다. 보통의 경우 공정변수를 적절히 선택함으로써 dilution을 대략 2% 내외로 낮게 조절할 수 있다.

공정 변수의 영향은 표면 합금화 기술에서와 동일하고 영국의 Steen 교수⁵⁶⁻⁵⁷⁾가 이미 여러 편의 훌륭한 연구자료를 발표한 바있으므로 여기서는 굳이 언급하지 않는다. 다만 클래딩 공정 중에 외부에서 이송가스(carrier gas)를 이용하여 클래딩 분말을 공급할 경우 "predeposition" 방법이나 혹은 선재 형태로 클래딩 재료를 공급할 때보다 냉각속도가 크게 증가하게 된다.⁵⁸⁾ 그리고 표면 합금화에 비해 표면 클래딩 층을 얻기 위한 공정변수의 범위가 매우 좁으며, 모재의 용융을 최소화하여야 하기 때문에 레이저 출력 밀도와, 레이저 빔과 재료 표면과의 반응시간을 적절히 조합하여 최적의 공정변수 영역을 얻는 것이 중요하다.

표면 합금화 기술에서와 같이, 부품이나 구조체의 모재 특성에는 영향을 주지 않고 실제 응용에서 요구되는 표면 특성을 갖는 클래딩을 입히는데 주로 이용된다. 레이저 클래딩 기술이 최초로 산업에 응용된 것은 1981년 영국의 Rolls Royce사⁵⁹⁾가 RG 211 엔진의 "turbine blade shroud interlocks"을 레이저 클래딩한 것이며, 그 후 자동차, 항공, 발전, 기계 산업을 중심으로 부품 표면에 내마모성, 내부식성, 내열성, 내침식성 등의 특성을 부여하

기 위해 활발히 응용되고 있다. 최근에는 레이저 클래딩 기술을 이용하여 단 시일(수일) 내에 복잡한 형태를 갖는 몰드(molds)나 혹은 다이(dies) 등의 3차원 형태의 부품을 제작하는 "Direct Metal Deposition (DMD)"가 개발되어 응용 단계에 있다.⁶⁰⁾ 미국 NCMS(National Center for Manufacturing Science)의 분석에 따르면, 기존의 기술을 이용하여 다이를 제작하는 데 통상 3주에서 40주 가량이 소모되는데 비해 DMD 기술을 이용할 경우 다이 제작기간을 40%가량 단축시킬 수 있고, 이로 인해 얻어지는 경제적 이득이 미국 다이 제작산업에서만 108억불 정도로 추산되고 있다. 이 기술은 많은 부품을 필요로 하고, 모델 교체가 많은 자동차 산업을 중심으로 활발히 응용되리라 기대된다.

참 고 문 헌

1. W. Reitz and J. Rawers, Surfaec Modification Technologies VI, ed. by T.S. Sudarshan and J.F. Braza, TMS 1993 pp. 521-538
2. W.E. Reitz, JOM, July (1994) 55
3. H. Schluter, A. Zwick, M. Aden, G. Uhlig, K. Wissenbach, and E. Beyer, ICALEO 94(1994) pp. 95-104
4. J. Grun, S.P. Obenschain, B.H. Ripin, R. R. Whitlock, E.A. McLean, J. Gardner, M. J. Herbst, and J.A. Stamper, Phys. Fluids 26(2) (1983) 588
5. S.J. Lee, K. Imen, and S.D. Allen, Proc. Inter. Conf. on Beam Processing of Advanced Materials, ed. by J. Singh and S.M. Copley, TMS, 1993 pp. 167-183
6. J.K. Asmus, W.H. Munk, and C.G. Murphy, Proc. of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineering (SPIE), 41 (1973) 19.
7. J.F. Asmus, Technology and Conservation, 13 (1978) 14
8. E. Beyer, D. Petring, and H. Zefferer, Proc. of LANE 94, Erlangen, Germany
9. K.G. Watkins, J.H. Larson, M.E. Dalton, A. Green, D.C. Emmony, and W.M. Steen, ICALEO 94 1994 pp. 116-124

10. G. Eberl, P. Hildebrand, M. Kuhl, U. Sutor, and P. Wrba, *ICALEO 94* 1994 pp. 1-14
11. S. J. Lee, K. Imen, and S. D. Allen, *Lasers in Micro-electronic Manufacturing*, 1598 (1991) 2
12. A. C. Engelsberg, European Patent #0350021A2, Jan. 10 (1990)
13. J. F. Asmus, *Conservation in Archeology and the Applied Arts*, June 1975, pp. 139-142
14. M. G. White and W. M. Money, Phase 1 Final Report, TR-91-010, Albuquerque, NM; Tetra Corporation, 1990
15. G. Bishop, Proc. of 1992 DOD/Industry Advanced Coatings Removal Conference, 1992 pp. 431-464
16. P. A. Barone, Proc. of Society of Manufacturing Engineers Conference, Dearborn, MI; SME, 1992 p. 17
17. H. W. Bergmann, R. Jaschek, and G. Herrmann, *Laser Treatment of Materials*, ed. by B. L. Mordike, DGM, 1992 pp. 533-544
18. R. Queitsch, H. Kukla, H. W. Bergmann, J. Naser, and K. Schutte, in Ref. 65, pp. 527-538
19. D. J. Flesher, *Elevate Temperature Coatings: Science and Technology I*, ed by N. B. Dahotre, J. M. Hampikian, and J. J. Stiglich, TMS 1995, pp. 379-383
20. N. S. Cannon and D. J. Flesher, in Ref. 6, pp. 385-391
21. M. C. Edelson, Office of Technology Development, Monthly Report, July, 1992
22. R. Demmer, R. L. Ferguson, H. Pang, and M. C. Edelson, in Ref. 6, pp. 407-417
23. M. Sturmer, in Ref. 17, pp. 571-576
24. K. Upadhyay, J. J. Moore, and K. J. Reid, *Met. Trans.* 17B(3) (1986) 197
25. J. Singh, *JOM*, September, 1992 pp. 8-14
26. W. A. Tiller, J. W. Rutter, K. A. Jackson, and B. Chalmers, *Acta Metall.* 1 (1953) 428
27. Y. S. Lim, J. H. Suh, I. H. Kuk, and J. S. Kim, *Metall. & Mater. Trans.* 28A (1997) 1223
28. Q. song and L. Shen, *Scripta Materialia*, 36(5) (1997) 531
29. R. Colaco and R. Vilar, *Scripta Materialia*, 36(2) (1997) 199
30. J. Singh, B. N. Bhat, R. Poorman, A. Kar, and J. Mazumder, *Surf. Coat. Technol.* 79 (1996) 35
31. W. Kono, S. Kimura, T. Okada, H. Sakamoto, Y. Tongu, and S. Sugiyama, *Proc. LAMP 92*, Nagoya, Japan, 1992 pp. 767-772
32. O. V. Akgun and O. T. Inal, *J. Mater. Sci.* 27 (1992) 2147
33. J. Stewart, D. B. Wells, P. M. Scott, and A. S. Bransden, *Corrosion* 46(8) (1990) 618
34. R. Li, M. G. S. Ferreira, A. Almeida, R. Vilar, K. G. Watkins, M. A. McMahon, *Surf. Coat. Tech.* 81 (1996) 290
35. N. Reitz and J. Rawers, *J. Mater. Sci.* 27 (1992) 2437
36. T. R. Jervis, T. G. Zocco, K. M. Hubbard, and M. Nastasi, *Metal. Trans.* 24A(1) (1993) 215.
37. C. W. Draper and J. M. Poate, *Int. Met. Rev.*, 30(2), 85 (1985).
38. W. M. Steen, *Surface engineering with a laser*, *Metals and Materials*, 1 (1985) 730
39. C. W. Draper, *Appl. Opt.*, 20 (1981) 3083.
40. T. Chande and J. Mazumder, *Metall. Trans.* B14 (1983) 181.
41. T. Chande and J. Mazumder, *Opt. Eng.*, 22 (1983) 362.
42. T. Chande and J. Mazumder, *Appl. Phys. Lett.*, 41 (1982) 42.
43. L. I. Mirkin, *Laser Beam Promoted Saturation of Iron by Tungsten*, *Br. Iron and Steel Inst. Trans.*, No. 9382 (translated from *Izvestiya Vysskikh Uchebnykh Azvendnii Chernaya Metallurgiya*, 14(2), (1971) 98.
44. I. V. Gasuko, L. L. Krapivin, and L. I. Mirkin, *Sov. Powd. Metall. Met. Ceram.*, 113(1) (1974) 27.
45. D. A. Belforte, *Laser Surface Treatment*, Presented at the Colloquium on Lasers and Electro-Optical Equipment, Tokyo, Japan (1978).
46. F. E. Cunningham, *The use of lasers for the*

- production of surface alloys, MSc thesis, MIT, Cambridge, MA (1964).
47. P.G. Moore and L.S. Weinman, Laser Applications in materials processing, in SPIE Proc., (ed. J.F. Ready), Vol.198 (1979) p. 120.
 48. D.S. Gnanamuthu, Opt. Eng., 19 (1980) 783.
 49. F.D. Seaman and D.S. Gnanamuthu, Met. Prog., 108(3) (1978).
 50. R.A. Hella, Opt. Eng., 17(3) (1978) 198.
 51. T. Chande, A. Ghosh, and J. Mazumder, Surf. Eng., Jan, 1987.
 52. P.G. Moore and E. McCaffery, J. Electrochem. Soc., 128 (1981) 1391.
 53. J.B. Lumsden, D.S. Gnanamuthu, and R.J. Moore, Corrosion of Metals Processed by Directed Energy Beams (eds. C.R. Clayton and C.M. Preece), The Metallurgical Society of AIME, Warrendale PA, 1982 pp. 129-34
 54. C.W. Draper and C.A. Ewing, J. Mater. Sci., 19 (1984) 3815.
 55. V.M. Weerasinghe and W.M. Steen, Lasers in Materials Processing (ed. E. Metzbower), ASM, Metals Park, OH, 1983 p. 166.
 56. W.M. Steen, V.M. Weerasinghe, and P. Monson, High Power Lasers and their Industrial Applications, SPIE Proc. 650 (1986) p. 226.
 57. W.M. Steen, Laser Materials Processing, Springer-Verlag, London (1991).
 58. L.J. Li and J. Mazumder, Laser Processing of Materials (eds. K. Mukherjee and J. Mazumder), The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA (1985) p. 35.
 59. M. MacIntyre, "Laser Hardfacing of RB 211 Turbine Blade Shroud Interlocks, Proc. 2nd Int. Conf. on Applications of Lasers in Material Processing, Jan. 1983, Los Angeles, USA.
 60. J. Mazumder, J. Choi, K. Nagarathnam, J. Koch, and D. Hetzner, JOM, May 1997, p. 55.