

# 레이저 클래딩

이제훈·서무홍·한유희

## Laser Cladding

Jae-Hoon Lee, Moo-Hong Suh and Yu-Hie Han

### 1. 서론

레이저 클래딩은 기지금속 표면에 내마모성, 내식성 및 내열성 등 필요한 성질을 부여하기 위하여 이종금속을 표면에 부가하면서 레이저 빔을 이용하여 두 재질을 용융시켜 접합하는 공정기술이다<sup>1-3)</sup>. 이러한 표면개질의 목적은 기지금속 자체의 기본적인 강인성을 유지하면서 외부의 격렬한 환경에 견딜 수 있는 표면층을 형성하는 것이다. 이 경우에 두 금속의 접촉계면에서는 용융 접합이 이루어지므로 첨가금속의 회석을 가능한 극소량으로 제한하는 것이 바람직한 것으로 알려져 있다.

레이저 클래딩은 재료개발 견지에서 볼 때 복합적인 특성을 지닌 재료를 얻을 수 없고, 또한 구입이 어려운 전략금속의 부족에 대처하고, 고가금속을 절약한다는 의미에서 바람직하다. 또한 레이저를 이용한 클래딩은 플라즈마 용사나 아크용접등 기존의 방법보다 전체적인 입열량이 적고 국부적으로 가열처리 되기 때문에 가공물의 변형발생을 최소화 할 수 있다. 또한 무접촉식 공정으로 전극의 소모에 의한 불순물의 유입이 없고, 비교적 양호한 표면을 얻을 수 있으며 자동화가 용이하다는 장점이 있다. 레이저 클래딩기술의 적용분야로는 자동차 산업, 발전 설비 분야 그리고 기계부품 등에 일부 실용화되고 있으며 방산, 항공 우주 산업 등에 실용화가 크게 기대되고 있다<sup>4-6)</sup>. 특히, 부품의 경량화 추세와 더불어 산업 전반에 걸쳐 알루미늄 합금의 사용이 확대되고 있는 상황에서 이들 부품의 표면 특성을 변화시키기 위하여 선별적 처리가 가능한 레이저 클래딩기술의 필요성이 점차 증가하고 있다. 최근에는 클래딩 기술을 이용하여 단 기간 내에 복잡한 형태를 갖는 3차원 형상의 부품을 제작하는 Laser Direct

Casting Process 기술이 개발, 응용단계에 있다.

현재 국내 레이저를 이용한 클래딩 기술 수준은 초기 단계이며, 향후 국내 기술수요에 적극 대처하고 향후 첨단 산업 분야의 신기술 개발에 대비하기 위한 레이저 가공기술의 첨단화가 불가피할 것으로 사료된다. 따라서 본 해설에서는 레이저 클래딩 기술의 기본 개념과 주요 공정변수의 영향, 가공시스템 그리고 응용 분야에 대한 연구결과들을 소개하고 신 기술에 대한 이해를 높이는데 주안점을 두었다.

### 2. 클래딩 공정 및 기술 현황

#### 2.1 공정 개요

Fig. 1은 분말 동시 공급법에 의한 레이저 클래딩 공정 및 변수를 보여주고 있다<sup>7)</sup>. 레이저 빔이 조사되면 빔 에너지는 공급되는 분말에 흡수되어 분말을 용융시키며 일부는 모재에 흡수되어 표면용융이 이루어져 클래드 재질과 얇은 합금층을 형성하여 접합층을 형성하게 된다. 이러한 방법으로 모재가 이송되면서 연속적인 클래드층이 형성된다. 이때 분말 이송에 사용된 가스는 이송 역할과 동시에 산화 방지 역할도 하게된다. 레이저 특성상 빔의 폭이 좁으므로 넓은 면적을 도포하기 위해서는 광학계를 사용하여 빔 모드를 사각 혹은 선형으로 변환하거나 클래드층을 중첩하는 과정이 필수적이다. 이때 중첩도에 따라 생산속도, 표면특성, 표면거칠기, HAZ의 특성 등이 변화하게 되므로 적절한 중첩도 선택은 중요한 요인이 된다.

레이저 클래딩의 주요 독립변수로는 재료의 종류, 표면상태, 레이저 출력, 집속된 빔의 크기, 빔의 모양 및 파장, 빔의 주사 속도, 빔의 흡수율, 분말공급량등이 있으며, 종속변수로는 회석율, 재료와 빔의 반응시간,

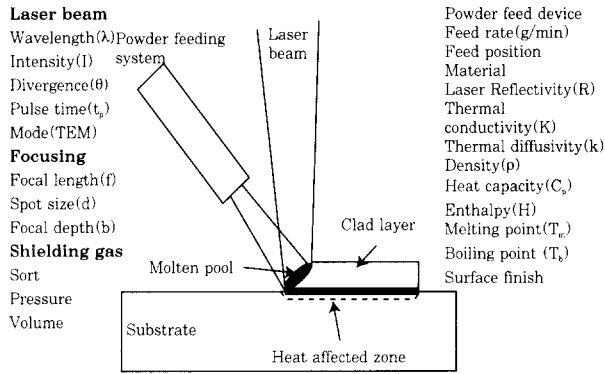


Fig. 1 Schematic diagram and processing parameter of laser cladding

냉각속도등이 있다. 이러한 공정변수들이 클래드층에 미치는 영향에 대해서는 다수의 논문이 발표되어 있다<sup>8,9)</sup>. 여기서 클래드층의 형상이나 희석율에 가장 큰 영향을 미치는 변수로써는 단위시간당 가공부위에 흡수되는 에너지와 분말 공급량을 들 수 있다. 따라서 공정의 안정성과 재현성 그리고 경제성을 확보하기 위해서는 무엇보다도 신뢰성있는 가공시스템을 구축하는 것이 우선적이다.

클래딩에 사용되는 대표적인 분말은 Stellite 및 인코넬과 같은 코발트기 및 니켈기 합금<sup>10~12)</sup>, 텅스텐 및 티타늄 탄화물<sup>13)</sup>, Fe-Cr-Ni-B 합금, Fe-Cr-C-X 합금, 구리합금, 세라믹등의 다양한 재료가 사용된다. 클래딩을 위한 모재로는 저탄소강<sup>14)</sup>, 저합금강, 스테인리스, 알루미늄<sup>15)</sup>, 주철, 공구강, 초합금등이 많이 사용되고 있다.

분말 공급 방식<sup>16)</sup>은 현재 Plasma Spray 장치에 널리 사용되고 있는 방식으로 일정량의 분말을 이송가스와 함께 이송하는 방식이다. 따라서 분말을 이송하기 위해서는 일정량 이상의 가스 Flow와 가스압이 주어져야 한다. 이러한 조건들은 레이저 클래딩 공정에서는 단점으로 나타나고 있다. 즉, 높은 가스압으로 인하여 노즐을 통과한 분말이 분산되어 사용효율이 저하되기 때문에 가스압을 제거해야 하는 어려움이 있다. 원판 회전방식은 Screw 방식과 유사하나 공급량을 원판의 회전수로써 조절한다. Fig. 2에서는 원판회전식 분말공급장치를 보여주고 있다.

공급장치에서 정량화된 분말이 호스를 통하여 노즐로 이송되어지며, 노즐은 분말을 가공부위에 국부적으로 공급하는 역할을 한다. 따라서 노즐의 설계에 따라 분말의 사용효율을 향상시킬 수 있다. 현재까지 보고된 클래딩 관련 논문에서는 일반적으로 직경 2mm에서 5mm 사이의 구리관을 사용하여 측면에서 분말을 공급하였다. 이러한 보고서에는 대부분 고가인 분말의

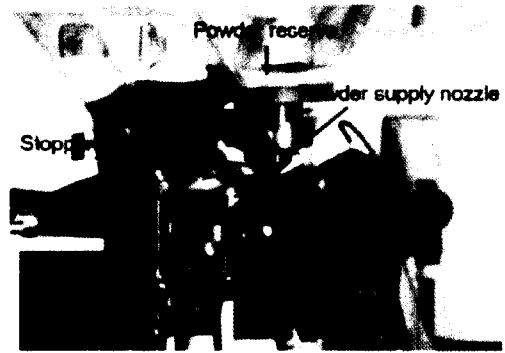


Fig. 2 Photo of powder feeding system

사용효율에 관한 언급이 되어 있지 않지만 최근 클래딩 기술이 일부 실용화 단계에 접어들면서 경제성에 대한 문제가 제기되고 있다.

영국의 Steen교수 팀<sup>17)</sup>은 분말 공급의 유연성을 향상시키기 위하여 분말을 레이저빔과 coaxial하게 공급하는 클래딩용 가공 Head 개발에 관한 연구보고를 하였다. R. Volz 그룹<sup>18)</sup>에서는 이중으로 제작된 관을 사용하여 external 노즐을 개발하였다. 이 노즐은 내부관을 통하여 분말을 공급하면서 외부관으로 보호 가스를 공급하여 분말의 분산을 억제시키면서 동시에 산화방지를 위한 보호 가스를 공급하고 있다. 분말이 집중적으로 가공부위에 공급되기 때문에 고가의 분말 손실을 최소화하고 분말의 분산이 적어 노즐을 가공 부위로부터 멀리 고정시킴으로써 열에 의한 손상을 방지할 수 있는 이점이 있다.

## 2.2 레이저빔의 흡수

레이저빔과 재료의 상호반응중 가장 주요한 것은 분말에 대한 레이저빔의 흡수과정이다. 그러나 클래딩 공정에서의 이러한 상호 반응에 관한 보고는 극히 적다. 이러한 이유는 분말에 의한 레이저빔의 흡수, 분말의 용융 및 모재와의 합금 형성등 많은 공정을 내포하고 있는 공정의 복잡성에 기인한 것으로 판단된다.

여기서는 1993년 일본 도요타 중앙 연구소에서 발표한 논문을 바탕으로 분말에 의한 레이저빔의 흡수에 대하여 간략히 설명하겠다. Fig. 3은 레이저 빔 조사 시간에 따른 분말의 용융과정을 나타내고 있다<sup>19)</sup>. (a) 단계에서는 레이저빔 조사직후 빔이 다중반사에 의하여 분말에 흡수되고 있으며, 분말 형상을 그대로 유지하고 있다. (b)에서는 Boundary Layer 형성이 시작되며, 분말의 크기가 증가하고 온도가 증가함에 따라 흡수율이 증가하게 되는 단계다. (c)에서는 분말들의 집합체가 형성되기 시작하고 분말 원래 형태를 잃어버리게 된다. (d)에서는 윗 부분에 있는 분말들의 용융

이 시작되고 Cluster와 같은 형태를 갖게된다. 여기에서 분말의 형상은 레이저빔 조사시간 증가에 따라 계속해서 변하게 되는 것을 알 수 있다. 단계 (a)에서 (b)로 변화 과정에서 레이저빔 흡수율은 급격히 변하게 되나 (b)단계 이후에는 분말의 형상 변화에 관계없이 흡수율은 거의 일정하다고 보고하고 있다.

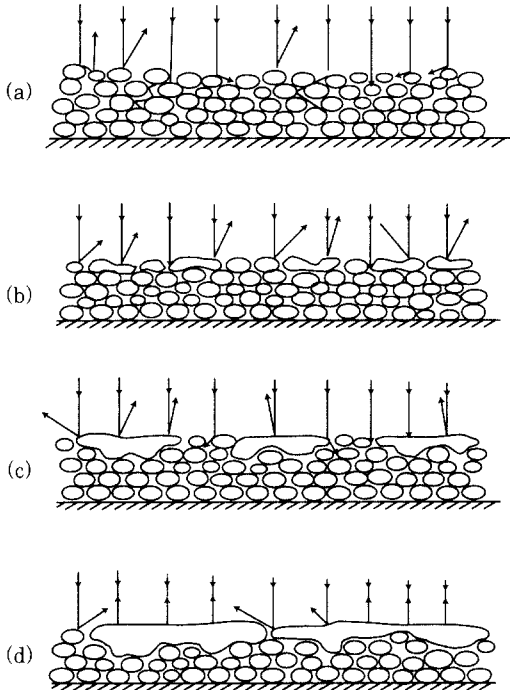


Fig. 3 Illustrations of the melting process of the laser cladding powder which was being irradiated by the laser beam

레이저빔 흡수율에 미치는 중요한 또다른 인자는 편광이다. Duley는 클래드층이 형성되면서 용융풀과 레이저빔 사이에 입사각( $\theta$ )이 변하게 된다고 보고하고 있다<sup>20)</sup>. 여기서는 선형 편광된 레이저빔이 조사되면  $\theta$ 가 감소함에 따라 반사율이 감소하며, 결과적으로 클래드층의 높이가 증가할수록 용융 풀에 흡수되는 에너지는 약 10%에서 레이저빔과 용융 풀이 이루는 입사각이  $60^\circ$ 일 때 20%정도까지 증가한다. 결국 클래드층 높이가 증가함에 따라 흡수되는 에너지 양도 증가하게 된다고 보고되고 있다.

### 2.3 클래딩 재료 공급방법

분말공급법에 의한 클래딩법은 앞에서 언급하였으며, 그 외의 분말정치법, wire 공급법, chip 정치법에 대하여 알아보면 다음과 같다.

분말정치법(Pre-placed powder) : 모재 위에 내마

모성 및 내식성을 갖춘 합금분말 또는 혼합분말을 접합재를 이용하여 도포한 후, 일반적으로 스캐닝 방식으로 빔을 조사한다. 클래드층 형성 과정은 Powell에 의해 제안된 모델<sup>21)</sup>을 기초로 이해되어질 수 있다. 레이저빔이 도포된 분말에 조사되면 분말사이의 낮은 열전도도로 인하여 모재표면까지 열전달 속도는 느리나 일단 모재에 열이 전달되면 모재의 열전도도가 급격히 증가하여 입열량을 적정하게 조절함으로써 낮은 회석율과 건전한 클래드층을 얻을 수 있다. 그러나 복잡한 형상의 부품에 균일하며 재현성있는 분말 도포가 어렵고, 접합재 분해에 의한 증기 발생으로 기공형성과 클래드층 표면이 거칠은 양상을 갖게 된다.

Wire 공급법(Wire feed) : 클래딩재료가 Wire 형태로 용융 풀에 공급되어진다. 이 방법은 1단계 공정이고, 재료의 효율성이 100%에 가깝지만, 에너지 흡수율이 극히 적은 것이 문제점으로 대두된다. Hinse Stern은 이러한 문제점을 해결하기 위해 Wire를 예열함으로써 레이저빔 흡수율을 높일 수 있다고 제안하였다<sup>22)</sup>. Hensel은 모재 표면에 사선방향으로 레이저빔 조사와 Wire를 공급하며, 플라즈마 형성 임계 에너지 ( $1.2 \times 10^6 \text{W/cm}^2$ )보다 높은 에너지를 사용하는 방법을 제안하였다<sup>23)</sup>. 그리고 이러한 방법에 의한 Wire 공급법이 분말공급법에 비교하여 에너지 효율이 높다고 주장하였다. 그러나 Wire 공급법은 분말공급법에 비하여 회석율이 현저히 높고, 레이저빔을 Wire에 정확히 조정하는 것이 어렵기 때문에 자동화에 난점으로 제기된다.

Chip 정치법(Pre-place chip) : 분말정치법과 유사하나 분말대신 금속 칩을 미리 모재표면에 정착시킨 후 레이저 빔을 조사하여 용융 접합시킨다<sup>24)</sup>. 사용된 접착재가 짧은 시간에 완전히 사라지지 않기 때문에 기공을 유발하는 원인이 된다.

## 2.4 가공 시스템

레이저 클래딩 가공시스템은 일반적으로 레이저 발전장치, 분말 공급장치, 빔 이송 광학계 그리고 구동부로 구성되어 있다. 레이저는 고출력  $\text{CO}_2$  레이저가 현재까지 가장 많이 사용되고 있으며 최근 고출력 Nd:YAG 레이저의 적용이 급격히 증가하는 경향을 나타내고 있다.  $\text{CO}_2$  레이저의 경우 적어도 2kW 그리고 Nd:YAG 레이저의 경우 1kW 이상의 출력이 요구되고 있다. Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 두 레이저빔의 금속재질에 대한 흡수율의 차이로 인하여 동일한 폭의 클래드층을 형성하기 위해서는  $\text{CO}_2$  레이저의 경

우 더 많은 출력이 요구되고 있다. 또한 CO<sub>2</sub> 레이저의 경우, 다수의 반사경을 이용하여 빔을 가공부위까지 이송하지만, Nd:YAG 레이저 빔은 광케이블을 이용하여 빔 이송이 가능하기 때문에 로봇등을 이용한 자동화가 매우 용이하다. 최근에는 10-500W 급의 Diode 레이저가 출현하고 있어 이를 이용한 실용화 연구가 시작되고 있다.

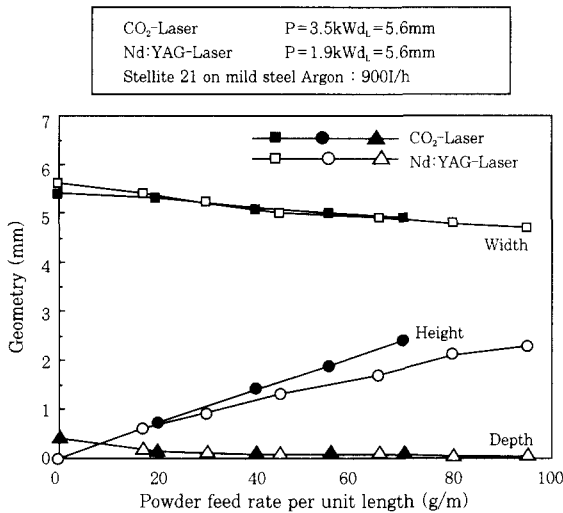


Fig. 4 Difference of geometry of single clad layer between CO<sub>2</sub> laser and Nd:YAG laser

빔 조사방법으로는 크게 빔 집속방식과 스캐너를 이용한 방식이 적용되고 있으며, 빔 집속방식에는 segmented mirror를 사용하여 빔의 형상을 사각형태로 변환시켜 빔 조사부위에 균일한 출력밀도분포를 형성하는 방법이 널리 사용되고 있다. 구동부는 x-y 테이블이나 하이브리드 타입을 널리 사용하고 있으며 초점위치를 변화시킬 수 있는 구동축을 설치하는 것이 일반적이다. 클래드 재료의 공급방식은 분말을 빔 조사부위에 직접 공급하는 분말동시공급법이 시스템 및 공정의 유연성을 높일 수 있어 가장 많이 사용되고 있다. 또한 레이저, 분말공급장치 그리고 구동부의 통합적인 제어시스템이 수반되어야 한다.

### 3. 공정변수의 영향 및 미세조직

#### 3.1 공정변수의 영향

공정변수가 클래드층의 형상에 미치는 영향은 앞에서 언급한 연구결과에서도 보고되고 있지만 여기서는 Ni 기 초합금분말을 저탄소강의 모재에 클래딩한 결과를 중심으로 요약하고자 한다. Fig. 5에서는 전형적

인 클래드층의 단면을 나타내고 있다. 여기에서 공정 변수에 따라 클래드 형상의 높이(H), 넓이(W), 접촉각(θ), 희석율(Dilution)등을 측정함으로써 주요 공정 변수가 클래드층 형상에 미치는 영향을 분석하였다. 희석율은 모재의 용융정도를 나타내며, 클래드에 기여한 용융, 응고된 모재의 부피분율로 정의된다.

$$Dilution(\%) = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad (1)$$

여기서, A = area of deposit, B = area of melted substrate를 나타낸다.

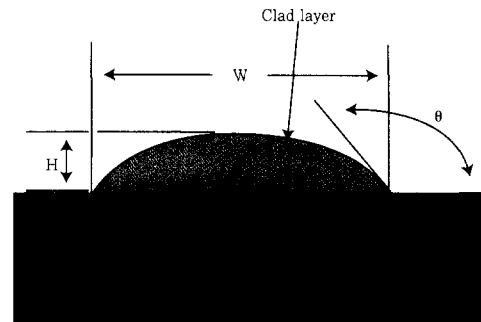


Fig. 5 The definition of clad geometry

#### 3.1.1 분말 공급량

분말 공급량은 모재와의 희석율과 높이를 제어하는 주요한 변수이다. 공급량이 증가할수록 클래드 층 높이는 증가하며 폭은 거의 변화하지 않는다(Fig. 6). 이는 단위 시간 및 면적당 공급되는 분말밀도가 높아짐에 따라 분말에 흡수되는 에너지가 증가하여 모재에 흡수되는 에너지의 양이 작아지기 때문이다. 따라서 클래드층의 단면적은 증가하고 모재의 용융면적은 감소한다. 결과적으로 분말 공급량이 증가함에 따라 희석율은 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 일정한 레이저 출력내에서 분말이 과다 공급되면 대부분의 에너지가 분말에 흡수되어 분말과 모재의 접합이 불연속적인 클래드층이 형성된다.

#### 3.1.2 레이저빔 조사속도

Fig. 6에서 보는 바와 같이 레이저 빔 조사속도가 증가할수록 클래드층 높이는 감소한다. 분말 공급량 변화와 달리 레이저 빔 조사속도 변화는 단위 길이 당 빔 에너지의 변화와 분말 공급량의 변화가 동시에 일어나며, 조사속도가 증가하면 재료와 레이저빔과의 반응시간이 감소하는 것을 의미한다. 따라서 레이저빔 조사속도가 증가할수록 분말공급량이 감소하여 클래드층의 높이와 폭이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 실험에 사용된 레이저빔이 가우시안 프로필을 나타내

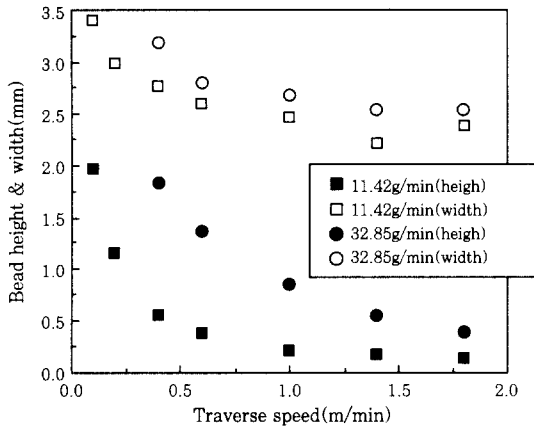


Fig. 6 Variables of bead height and width as a function of laser scan speed for two different powder feed rate (Power = 3kW)

므로 레이저 빔 조사 속도가 증가할수록 빔의 가장자리는 에너지 밀도가 감소하여 분말을 충분히 용융 증착시킬 수 있는 임계값 이상의 빔 출력밀도가 주어지지 않기 때문이다. 레이저 빔 조사속도가 증가할수록 희석율은 증가하게 된다. 이는 단위 길이당 에너지밀도와 분말밀도가 동시에 감소하는데 상대적으로 분말 감소폭이 커서 클래드층에 대한 모재의 용융비가 증가하기 때문이다.

### 3.1.3 보호가스의 영향

고 밀도 에너지를 사용하는 레이저 가공에서는 취입 가스의 분해가 유발될 수 있다. 이 분해 정도는 증발된 원자밀도와 전자밀도에 의존한다. 예를 들어 Ar 가스에서는 초기의 전자밀도가  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  이상이면  $10^6 \text{W/cm}^2$ 에서 레이저빔에 의하여 Ar 플라즈마가 형성될 수 있다. 그러므로 취입가스의 이온화 에너지와 안정도가 중요하며, 가공재료의 이온화 에너지보다 높아야 한다. 이들 가스들 중에서 He이 이온화 에너지가 가장 크고 또한 열전도도가 높다. 따라서 여러 가지 취입 가스들을 비교할 때 플라즈마 불꽃의 투명도를 유지하며 안정하여 가장 양호한 효과를 나타내나 고가인 점이 단점이다.

### 3.1.4 결함

레이저 클래딩시 발생하는 대표적인 결함은 주로 용융구역에서 기공발생, 급속한 가열과 냉각에 의한 잔류응력과 급속한 용융 및 응고에 의한 용리균열등이다. 기공은<sup>25)</sup>이 있다. 이중 Interrun Porosity는 중첩 과정에서 중첩된 클래드 층 사이에서 발생하며, Gas evolution은 용융과정에서 발생한 급속증기가 급속한 응고속도에 의하여 용융부 밖으로 빠져나가지 못하고 클래드층에 잔류하여 발생한다. 또한 Solidification Cavity는 클래드 층이 고융점재료이고 모재가 저융점인 재료에서 나타나는데 예를 들면 Stainless/Al 인 경우 클래드 층이 모재보다 빨리 응고되므로 응고계면에 많은 기공이 빠져나가지 못한 채로 응고되어 발생하게 된다. Interrun Porosity는 중첩각을 조절하여, Solidification Cavity는 적절한 재료선택으로 방지할 수 있다. 균열은 모재와 클래딩 재료와의 열팽창계수 차로 인한 급격한 열응력변화에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>26)</sup>. Fig. 7은 클래드 층에서 열응력에 대한 영향을 나타내고 있다<sup>27)</sup>. (b)는 클래드 층 형성방향에 대한 응력변화를, (c)는 클래드 층 단면에 대한 응력변화를 나타내고 있다.

### 3.2 미세조직 및 성분변화

클래드층의 표면특성은 화학적 조성과 미세조직에 따라 달라지게 된다. 용융 풀에서 높은 온도구배(G)는 Maragoni 효과<sup>28)</sup>의 결과로 응집된 대류를 유도한다. 레이저 합금화 및 클래딩에서 보여지는 미세조직의 균질화현상은 원자확산기구이론 하나로는 설명이 불충분하다. Mazumder와 그의 공동 연구자들은 이러한 이론적 배경에 기초를 두고 미세조직 균질화에 영향을 미치는 대류는 표면장력수(Surface Tension Number, S)에 의해 영향을 받게된다는 결론에 도달하였다<sup>29,30)</sup>.

$$S = (\frac{d\sigma}{dT})qd / \mu_0 k \quad (2)$$

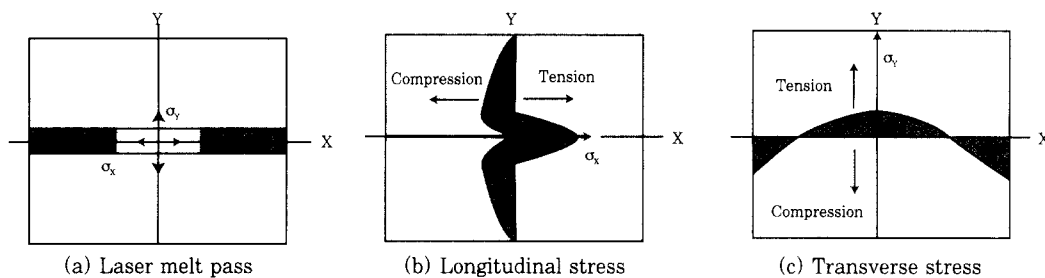


Fig. 7 Schematic representation of the stress distributions in laser melted surface

여기서 ( $d\sigma/dT$ )= temperature of the surface tension  
 $q$  = net energy flow from the laser beam  
 $d$  = laser beam diameter  
 $\mu$  = viscosity  
 $u_0$  = traverse speed

S가 작으면 대류는 무시할 정도이고, 용융 풀에서의 부피 전달은 주로 확산기구에 의해 지배된다. 따라서 클래드층의 균질화는 불충분하게 된다. 반면, S가 크면 용융 풀에서의 열 및 부피 전달은 대류에 의해 지배되고 미세조직은 빠르게 균질화된다.

레이저 클래딩에서 재료의 응고속도는  $5 \times 10^3 \sim 10^5$  K/s정도로 매우 빠르다. 급속응고이론을 통해서 응고 조건이 최종 미세조직에 미치는 영향을 파악할 수 있다<sup>31,32</sup>. 용융 풀에서의 온도구배(G)는 용융 풀이 응고되기 시작하는 순간에 최대이며, 이 때 핵생성 없이 면선단 응고를 하게된다. 냉각속도( $T=G \times R$ , R=핵생성 속도)는 에너지 유입 방향으로 응고가 진행되면 유입된 에너지 밀도에 의존하는 일정한 음의 값을 가지며 면선단 응고후 셀룰러 응고(Cellular Solidification), 수지상 응고(Dendritic Solidification)를 하게된다. Fig. 8은 Mild Steel에 Ni기 초합금을 레이저 클래딩 하였

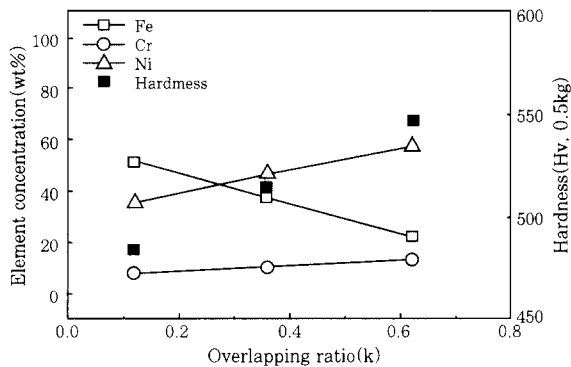


Fig. 8 Element concentration, hardness, overlapping ratio in laser cladding of Ni-base superalloy on mild steel



Fig. 9 Microstructure showing interface in laser cladding of Ni-base superalloy on mild steel

을 때 클래드층에서 Ni 농도, 미세경도, 중첩도와와의 관계를 나타내고 있다. Fig. 9는 모재와 클래드층 경계면의 조직사진으로 수지상의 대부분이 용융 풀의 대류에 의해 떨어져 나가 이를 핵으로 하여 셀룰러 성장이 야기된 것으로 보인다.

#### 4. 응용분야

최근, 고출력 CO<sub>2</sub> 및 Nd:YAG 레이저를 사용한 클래딩 기술의 응용영역이 다양하게 확산되고 있는 추세이다. 분말공급장치와 노즐에 대한 개발은 분말의 사용효율을 높이고, 접근하기 곤란한 부분에 대한 클래딩 작업 환경을 용이하게 만들어 주고 있다. 또한 새로운 클래딩 재료의 개발은 레이저 클래딩의 응용영역을 확대시키고 있다. 기존의 내식성 및 내마모성을 향상하기 위해 사용된 Ni기, Co기 합금보다 우수한 내마모성을 갖고 있는 Fe-Cr-C-X 합금이 개발되어 표면 특성 향상에 기여하였다<sup>33</sup>. 레이저 클래딩에서 표면온도, 노즐과 모재와의 거리, 용금에 대한 레이저빔 흡수율 등의 측정이 가능해져 클래드층의 품질에 영향을 주는 공정변수들에 대한 제어능력이 향상되었다<sup>34, 35</sup>. Table 1은 실용화되고 있는 대표적인 부품들과 공정변수들의 예를 보여주고 있다.

Table 1 Laser cladding parameter for typical parts

Part	Base Metal	Alloy	Cladding Thickness (mm)	Laser Power (kW)	Speed (m/min)
Valve gate	Martensitic stainless	Co-Cr-W-C	1.02	5.0	1.27
Track bushing	Low-alloy steel	Co-Cr-W-C	0.762	5.0	0.51
Pump bushing	Austenitic stainless	Ni-Cr-Fe-B	0.762	4.0	1.27
Engine valve	Austenitic stainless	Co-Cr-Ni-W	0.762	5.0	0.51
Piping valve	Ductile iron	Nickel	0.89	3.0	0.89
Turbine blade	Nickel alloy	Co-Cr-W-Ni	1.27	3.0	1.02
Coal chute	Steel casting	50% WC in alloy	0.89	7.0	1.78

항공산업에서 레이저 클래딩은 OEM 부품과 그 부품의 리페어 공정에 사용되어져 왔다. 가장 잘 알려진 레이저 클래딩 부품은 롤스로이스사의 RB 211 엔진

부품 중 Ni기 초합금으로 주조된 터빈 블레이드에 Co기 초합금을 클래딩한 부품이다<sup>36)</sup>. Pratt & Whitney 사에서는 6kW CO<sub>2</sub> 레이저와 Chip정치법을 이용하여 Ni기 초합금으로 주조된 터빈 블레이드 Z-notch를 클래딩하였다. 터빈 블레이드의 Shroud Tip과 Z-notch 부분의 레이저 클래딩에 의한 생산은 계속해서 증가하는 실정에 있다. 이러한 부품들에 대한 TIG 용접은 높은 입열량과 큰 열영향부로 인한 결함발생과 변형 그리고 정확한 공정제어의 어려움으로 많은 후가공과 불량률 초래하기 때문에 레이저 가공으로의 대체가 필수적이다. 리페어 영역에서 클래딩의 응용은 마모된 터빈 밴의 H-dimension 부분의 재형성이다. 균열에 민감한 Ni기 초합금의 밴 재료는 열 유도 균열을 피하기 위하여 레이저 클래딩과 같은 낮은 열 입열 공정을 통해서 처리되어야 한다.

자동차 산업분야에서의 레이저 클래딩 기술 적용분야는 아직 개척단계에 있는 실정이다. 처음 이 분야에서 적용된 것은 정치법을 이용한 디젤 엔진 밸브 및 밸브시트의 클래딩이었으나 현재는 분말공급방법으로 실용화되고 있다(Fig. 10). 또한 스테인리스강의 엔진 밸브에 Co기 초합금을 클래딩하여 내마모성을 향상시킨 경우도 있다. 자동차의 경량화 추세에 따라 알루미늄 합금 재료가 엔진 및 부품에 점차 적용이 확대되어 향후 내마모 및 내열성을 향상시키기 위한 레이저 클래딩 기술이 이 분야에 적극 활용될 것으로 기대되고 있다.

최근에 석유 및 화학공정 산업분야에서 레이저 클래딩 시스템을 설치하여 오일밸브 AISI 4130, 410 의 Seat 와 Gate<sup>37)</sup>를 클래딩하고 있으며, 원형의 Gate

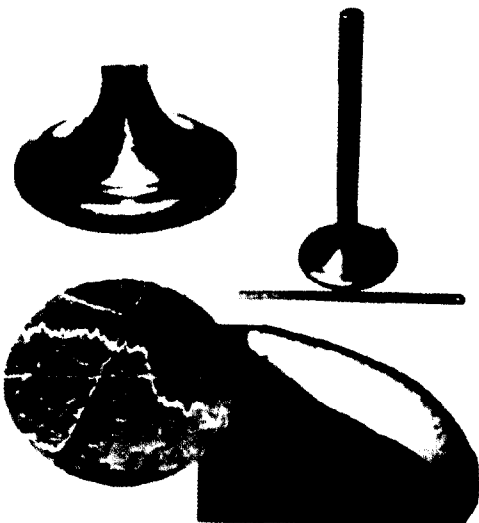


Fig. 10 Laser cladded valve and iron concentration in the transition zone

와 Seat를 Co기 합금 및 텅스텐 탄화물로 레이저 클래딩하기 위한 실험이 진행되고 있다. 또한, 썩기형상의 Co기 합금에 의한 클래딩된 부품, 텅스텐 탄화물로 클래딩된 오일밸브의 Slab Gate등 많은 부품이 레이저 클래딩 기술로 생산되고 있다. 이러한 레이저 클래딩된 재료는 작은 비틀림현상, 최소 희석율, 우수한 접합성, 기공 및 결함이 없는 재료로 평가되고 있으며, 텅스텐 탄화물과 같은 고용점 재료는 다른 방법으로는 우수한 접합성을 기대하기 어렵다. 석유 화학 산업에서 기타 원형 부품 초크, Kill Stab Subassembly, 천공장비에 사용되는 Dog Collars등이 레이저 클래딩 기술로 표면개질이 이루어지고 있다. AISI 4130 Stab Subassembly는 코발트기 합금과 Ni-B 합금으로 레이저 클래딩되며, Dog Collars는 AISI 4815강을 모재로 비정질의 크롬 탄화물을 포함하는 합금으로 클래딩된다. 공정산업에서 화학공정보일러에 사용되는 AISI 347과 2-1/4 Cr 1 Mo 강 튜브는 고온 내식성 향상을 목적으로 50%Ni50%Cr합금으로 레이저 클래딩된다. 발전산업에서는 여러 종류의 스팀터빈이 레이저 클래딩으로 제조되며, AISI 420 블레이드는 침식성 및 마모성을 억제하기 위해 Co기 합금으로 클래딩되어 지고 있다.

트랙터의 트랙이 가혹한 부식 및 펠팅으로 손상되자 그 해결방법으로 원통형 모양의 저합금강 튜브부식의 양쪽면에 Co기 합금으로 레이저 클래딩하여 문제점을 해결하였다. 주철 밸브에 Ni기 합금을 이용한 레이저 클래딩은 향후 수요가 크게 확산될 것으로 본다. 그 외 절단 블레이드 텀 및 산업용 칼에 탄화물합금의 클래딩, 소성압출 스쿠류에 Fe-Ni-B 합금의 클래딩 등 다양한 부품에 레이저 클래딩기술이 이용되고 있다. Fig. 11은 클래드층의 중첩에 의한 평면가공의 일례와 클래드층을 적층하여 제작한 실린더 형상을 보여주고 있다.

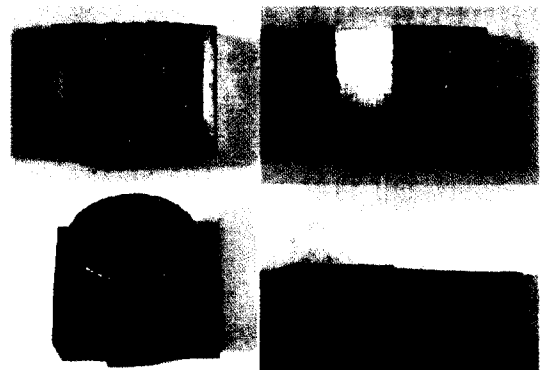


Fig. 11 Laser cladding and rapid prototyping of 316L stainless steel on mild steel.

패속조형기술은 최근 레이저 클래딩의 적층공정을 이용한 응용분야의 하나로 주목받고 있다<sup>38,39)</sup>. 레이저 클래딩을 이용한 금속 패속조형기술은 기존의 수지 혹은 종이등을 사용한 디자인 검증용 시제품 제작방법과는 달리 제작된 부품의 기계적 특성을 직접 테스트할 수 있는 기능성 시제품 제작이나 소량생산을 위한 몰드나 금형제작을 가능하게 하였다. 그러나 아직까지 제작치수의 정밀도 향상과 기계가공과 결합한 경우에 공정시간 단축을 위한 연구가 시급히 수행되어야 할 과제라고 할 수 있다.

## 5. 결 론

레이저 클래딩은 열악한 환경에 적응할 수 있는 클래드 재료를 분말, 와이어 혹은 칩 형태로 기지 금속의 레이저 조사부위에 공급하여 이중재질을 용융접합하여 새로운 특성을 갖는 표면 코팅층을 형성하는 기술이다. 내마모 및 내식성 클래드 재료의 특성을 저하시키지 않기 위해서는 모재와의 회석율을 가능한 최소화하는 것이 바람직하며, 이러한 회석율을 제어하기 위해서는 주요공정변수인 레이저 출력밀도, 클래드 재료 공급량 그리고 이송속도등이 클래딩 공정에 미치는 영향을 분석하여 최적의 조건을 도출하여야 한다. 본 고에서는 레이저 클래딩 기술에 대한 개념과 기술현황 소개 그리고 공정변수들의 영향에 대하여 고찰하였으며 또한, 레이저 클래딩기술의 적용사례를 분석하였다. 레이저 클래딩은 국부적으로 표면의 특성을 변화시킬 수 있으며 적은 입열량으로 인한 변형유발을 최소화할 수 있다. 다양한 클래드 재료의 개발은 기술의 응용영역을 확대시키고 있으며 고가의 재료절감과 공정의 유연성은 부품설계 분야에도 많은 새로운 가능성을 부여할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- Weerasinghe, W. M. Steen, Laser in material processing, Edit, E. Metzbower, ASM, Metal Park, OH, (1983) p.166
- W. M. Steen, Laser material processing, Springer Verlag, London, (1991)
- Z. Chen, L. C. Lim, M. Qian, J. Mater. Proc. Tech., 62 (1996) p321
- J. Faildr, Laser cladding and inspection for life extension of turbine blades, Materials Evaluation, March (1995) p.369
- J. Faildr, Laser cladding and inspection for life extension of turbine blades, Materials Evaluation, March (1995) p.369
- P. D. Denney, R. W. Dowry, Laser cladding refurbishment of catapult trough covers. Naval Engineers Journal, Nov. (1993) p.69
- G. Backes, E. W. Kreutz, A. Gasser, E. Hoffmann, S. Keutgen, Section E-ICALEO, (1998) p48-56
- J. M. Yellup, Surf. Coat. Tech., 71 (1995) p121-128
- M. Qian, L. C. Lim, Z. D. Chen and W. L. Chen, J. Mater. Proc. Tech., 63 (1997) p590-593
- S. Atamert and H. K. D. H. Bhadeshia, Metall. Trans. A, 20 (1989) p1037-1054
- J. L. Demol Van Otterloo and J. Th. M. De Hosson, Acta Mater., 45 (1997) p.1225-1236
- Qian Ming, L. C. Lim, Z. D. Chen, Surf. Coat. Tech., 106 (1998) p.174-182
- R. C. Gassmann, Mater. Sci. Tech., 12 (1991) p.691-696
- M. A. Anjos, R. Vilar and Y. Y. Qiu, Surf. Coat. Tech., 92(1-2) (1997) p.142-149
- Y. P. Hu, C. W. Chen, K. Mukherjee, The third pacific rim internation conference on advanced materials and processing(PRICM3), (1998) p.2169-2176
- Plasma Techink AG. Handbook of powder feeder TWIN 10C. (1991)
- J. Lin, W. M. Steen, Design characteristics and development of a nozzle for coaxial laser cladding. ICALEO (1996) p.A/27
- R. Volz, Stautsbericht, (1995) p.93
- Yoshimi Kizarki, Hirozumi Azuma, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32 (1993) pp. 205-212
- W. W. Duley, Laser processing and analysis of materials, Plenum, New York, (1983)
- J. Powell, P. S. Henry, and W. M. Steen, Surf. Eng. 4, (1988) p141-149
- A. Hinse-Stern, D. Burchards, and B. L. Mordike, "Laser cladding with preheated wires" Presented in laser treatment of material, 1992 DGM metallurgy information, p223-228
- F. Hensel, C. Binroth, and G. Sepold, "A comparison of powder-fed and wire-fed laser beam cladding", Presented in laser treatment of materials, 1992 DGM metallurgy information, p39-44
- E. Lugscheider, H. Bolender, and H. Krappitz, Surf. Eng., 7 (1991) p341-344
- V. M. Weerasinghe, W. M. Steen, ASM, 1983. pp 166-174
- K. P. Cooper, ICALEO' 87, pp 179-187
- Masubuchi, K, Analysis of welded structures, Pergamon Press, New York, N. Y. 192
- T. R. Anthony, H. E. Cline, J. Appl. Phys., 48 (1997) p.3888-3894
- C. Chen, J. Mazumder, ASM, (1983) p.150-157



30. T. Chande, J. Mazumder, Metall. Trans., B 14 (1983), p.181-190
31. P. Gilgien, W. Kurz, Mater. Sci. Eng., A 178 (1994) p.199-201
32. P. Gilgien, W. Kurz, Surface Treatment and Film Deposition, edited by J. Mazumder et al. (1996) p.77-92
33. J. Singh, J. Mazumder, Metallurgical Transaction A, 18A (1987)
34. A. G. Blake, A. A. Mangaly, Proc. 4th Int. Conf. on Laser in Manufacturing, Birmingham, U.K (1987)
35. L. Lin, Knowledge based learning system for adaptive control of laser cladding, Ph.D. thesis, Imperial College, London (1986)
36. R. M. Macintyre, Lasers in Materials Processing, ASM, E.A Metzbowder ed., (1983)
37. P. Koshy, Applications of High Power Lasers, SPIE vol. 527, R. R. Jacob ed., (1985)
38. M. Murphy, C. Lee, W. M. Steen, ICALEO' 93, p.882-892
39. L. Koch, J. Mazumder, ICALEO' 93, p.556-565



- 이제훈(李濟薰)
- 1956년생
- 한국기계연구원 레이저기술연구그룹
- 레이저 표면처리, 정밀가공
- e-mail : jaholee@mailgw.kimm.re.kr



- 서무홍(徐茂洪)
- 1970년생
- 한국기계연구원 레이저기술연구그룹
- 레이저 표면처리
- e-mail : mhseo@mailgw.kimm.re.kr



- 한유희(韓裕熙)
- 1952년생
- 한국기계연구원 레이저기술연구그룹
- 레이저 용접
- e-mail : yhhan@mailgw.kimm.re.kr