

# 레이저 클래딩 가공 결함 연구

## Study on the defects in the laser cladding process

한국기계연구원 레이저기술연구그룹 서무훈, 이제훈, 김정오, 한유희

### I. 서론

산업분야에서 레이저 클래딩 최초 응용은 1982년 롤스 로이스사에서 분말공급법을 이용한 터빈블레이드 제작이었다. 그 이후로 많은 산업에서 레이저 클래딩법이 이용되기 시작하였다. 클래딩 재료로는 스텔라이트(Stellite) 및 인코넬(Inconel)과 같은 코발트(Co)기 및 니켈(Ni)기 합금, 텅스텐(W) 및 티타늄(Ti) 탄화물, Fe-Cr-Ni-B 합금, Fe-Cr-C-X 합금, 구리(Cu)합금, 세라믹등의 다양한 재료가 사용된다. 클래딩을 위한 모재로는 저탄소강, 저합금강, 스테인리스, 알루미늄, 주철, 공구강, 초합금등이 사용되고 있다. 표1은 레이저 클래딩된 전형적인 부품들에 대한 레이저 변수를 나타내고 있다.

본 연구에서는 레이저 공정 변수에 따라 가공 및 균열등의 결함이 발생하게 되는 원인과 이의 대응책을 알아보고, 건전한 육성층이 형성되는 영역을 살펴보았다.

### II. 클래딩 재료 및 실험

본 실험에서는 50mm (W) x 200mm (L) x 8mm (T) 치수의 저탄소강(SS41)을 모재로 경화 재료인 Ni기 초합금 분말(FONTARGEN MP1)을 클래딩 재료로 사용하였다. 분말의 화학 조성은 표 2와 같으며 용융 접합성을 향상시키기 위하여 B, Si이 첨가되어 있고, 입도크기 분포는 표 3과 같다. 레이저 클래딩 실험을 위하여 4kW RS840 CO<sub>2</sub>레이저를 사용하였고, 산화방지와 플라즈마 제거를 목적으로 Ar 가스를 1.5 l/min로 공급하였다. 빔직경은 2.6mm이며, 분말은 레이저 빔 2mm 후방에 분사되도록 하여 레이저 클래딩하였다.

실험 후 클래딩층 시작점에서 50~100mm 의 위치로 단면을 절단하여 0.05 $\mu$ m까지 연마하였다. 에칭용액(HNO<sub>3</sub> : HCl = 2 : 1)에서 에칭한 후 광학 현미경을 통해 미세조직관찰과 클래딩층의 높이, 폭 및 모재와의 접촉각(Contact angle), 희석율(Dilution)을 측정하였다.

### III. 실험결과 및 고찰

#### 1. Single clad track 실험결과

##### 1.1. 레이저 공정변수의 영향

그림 1은 레이저 공정변수에 따른 영향을 나타내고 있다. 레이저 빔 이동속도의 감소는 재료와 레이저 빔과의 반응시간이 증가하는 현상을 유도하므로 단위 면적 당 입열되는 에너지 밀도와 분말밀도가 동시에 증가하게 된다. 위의 현상에서 에너지밀도 보다 분말밀도의 증가 폭이 큰 영향으로 분말용융량이 급격히 증가하여 모재에 흡수되는 에너지밀도는 감소하게 된다. 분말공급량의 증가는 단위면적당 공급되는 분말밀도가 증가하게되어 모재에 흡수되는 에너지 밀도는 감소하게된다. 분말용융량 증가와 모재의 용융 면적 감소는 희석율 및 Width/Height 비를 감소시키게된다. 이에 따라 클래딩층에 희석된 모재의 농도가 감소하여 Ni 및 Cr 농도가 증가하고 Fe 농도가 감소하게된다. 희석율감소가  $\gamma$ Ni를 증가시키며 상대적으로 Fe보다 고용 강화효과가 큰 Cr 농도를 증가시킴으로써 경도값이 증가하게 되는 것으로 사료된다.

##### 2.2. 결함과 가공공정 범위

그림. 2는 에너지밀도와 분말밀도에 따른 결함 발생 영역을 나타내고 있다. 임계값 이상

의 분말 밀도에서 기공(Porosity)과 균열(Crack)등의 결함이 발생하였고. 그 이상영역에서는 불연속(Discontinuous)적인 클래드 층이 형성되었다. 이와 같이 각 에너지 밀도에 대한 분말 밀도는 건전한 클래드 층을 형성하는 한정된 값을 가지고 있음을 알 수 있다. 결함 중 기공은 기포가 용융부 밖으로 빠져나가기 전에 급속한 응고속도에 의하여 응고된 결과이다. 응고가 진행됨에 따라 기공이 표면 밖으로 빠져 나오는 한계 높이 이상으로 분말 공급이 이루어지면 기공이 용융에 남은 채로 응고되어 결함이 발생하게 되는 것으로 분석된다. 또한, 균열은 모재와 클래딩 재료와의 열팽창계수차로 인한 급격한 열응력변화에 기인하는 것으로 알려져 있다<sup>1)</sup>. 그 이상의 공정 범위를 지나면 불연속적인 클래드 층이 형성되어지는데 그 원인은 분말공급량 변화에 대한 영향에서 설명한 바와 같다. 이상과 같은 결과에서 에너지 밀도가 증가함에 따라 결함 발생에 변화가 거의 없으나 분말밀도가 증가함에 따라 기공에서 불연속인 클래드 층에 이르기까지 모든 결함이 발생하게됨을 알 수 있다. 그림. 3은 결함 예를 보여주고 있다.

이상과 같은 결과에서 공정변수에 따른 건전한 클래드 층 형성 영역과 불건전한 클래드 층 영역을 확인할 수 있어 현장에서 공정범위를 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

그림. 4는 클래드 층과 모재와의 접촉각( $\theta$ )과 Width/Height ratio와의 관계를 건전영역과 불건전영역으로 구분하여 나타내었다. 여기에서 불건전영역은 기공, 균열 등의 결함을 포함하는 클래드 층을 나타낸다. 클래드 층과 모재와의 접촉각이 130°C 이상, w/h ratio가 4이하일 때 불건전한 클래드 층이 형성되어지는 것으로 나타났다. 이는 Steen, Courtney의 연구결과와 유사하며<sup>2)</sup> 접촉각의 증가와 w/h ratio의 감소는 모두 클래드 층 높이의 증가를 나타내며, 클래드 층 높이의 증가는 분말공급량의 증가에 기인하므로 결함을 감소시키기 위해서는 분말 밀도를 증가시켜야한다.

## 2. 중첩실험결과

Single clad track 실험결과 기공 및 균열등의 결함이 발생하지 않는 영역에서 중첩실험을 행하였다. 표면거칠기는 sigle clad track의 높이와 중첩비에 의존하며 폭과는 무관하다. 그림. 5는 중첩비에 따른 표면거칠기의 관계를 나타내고 있다. 표면거칠기(Turbulence)는 중첩비 증가에 따라 계속해서 감소하는 것이 아니라 진동하는 방법으로 감소하는 흥미로운 결과를 보여 주고 있다. Yanxiang의 연구결과에서도 위와 같은 현상을 보고하고 있다<sup>3)</sup>.

표면 거칠기는 중첩비를 증가시킴으로써 쉽게 해결될 수 있다고 생각하기 쉬우나 중첩비는 실험속도와 깊은 관련이 있어 클래딩 공정에서 중첩비를 증가시키면 모재위에 표면도포속도가 감소하여 생산속도가 감소하게된다. 또한 임계 중첩비 이상에서는 내부 기공(Interrun porosity)이 발생할 확율이 증가하게 된다. 중첩비가 증가할수록 모재에 흡수되는 에너지 량은 감소하고 분말용융량은 증가한다. 모재와 클래드 층의 접촉각과 희석율이 감소하여 용융접합력이 감소한다.

## IV. 결론

1. 레이저 빔 이동속도 감소와 분말공급량의 증가는 희석율을 감소시켜 클래드 층에서의  $\gamma$  Ni 및 Cr 농도가 증가하여 경도값이 증가하게된다.
2. Single clad track 실험결과 분말밀도가 증가함에 따라 기공, 균열, 불연속적인 클래드 층 형성되는 임계 분말밀도값이 존재하며, 클래드 층과 모재와의 접촉각이 130°C 이상, w/h ratio가 4이하일 때 불건전한 클래드 층이 형성되어지는 것으로 나타났다.
3. 표면거칠기(Turbulence)는 중첩비 증가에 따라 계속해서 감소하는 것이 아니라 진동하는 방법으로 감소한다.
4. 중첩실험시 임계중첩비 이상에서 내부기공과 균열등 결함이 발생한다.

## V. 참고문헌

1. A. B. Vannes : Laser surface treatment of metals, Martinus Nijhoff Publ., p435-450, (1986)
2. W. M. Steen and C. G. H. Courtney : Hardfacing of Nimonic 75 using 2kW continuous wave CO<sub>2</sub> laser, Metals Technology, p232-237, (1980)
3. L. Yanxiang, Study on overlapping in the laser cladding process, Surface and coatings technology, 90, 1997, pp1-5

Table 1 Laser cladding parameters 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
Tract	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

Table 2 Chemical composition(wt%) of Ni-base superalloy and substrate(SS41).

Elements	Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	C	S	P	B
Superalloy	3.5	15	Bal	-	-	4.3	0.075	-	-	3.1
SS41	Bal.	0.075	<0.032	0.665	0.055	0.045	0.055	<0.011	<0.006	-

Table 3 Size distribution of powder.

Size ( $\mu\text{m}$ )	<125	<106	<76	<63	<53	<45	<36	<20
%	1.3	20.4	6.6	16.0	12.1	12.3	26.9	4.4

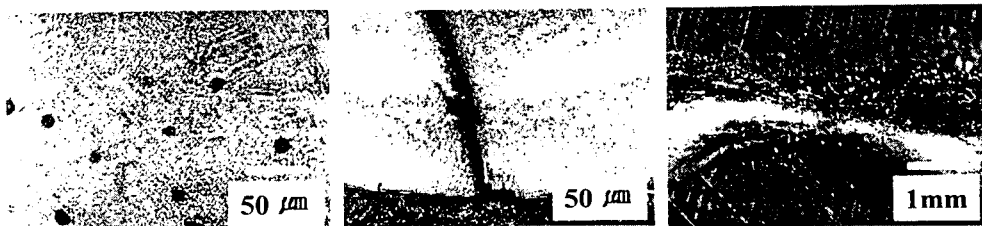
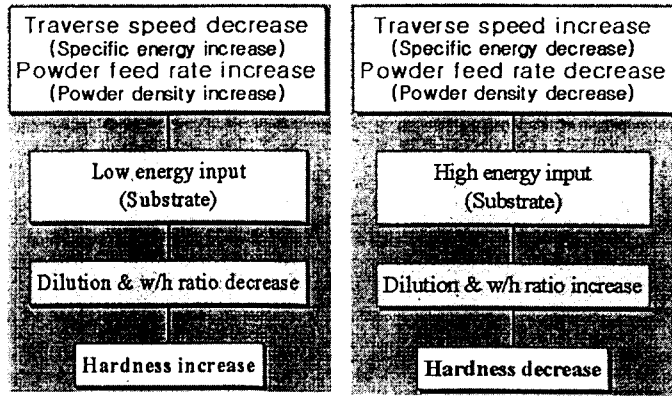


Fig. 3 The defects in the laser cladding (a) porosity (b) crack (c) discontinuous.



(a) (b)  
Fig 1. The effects of laser process parameters.

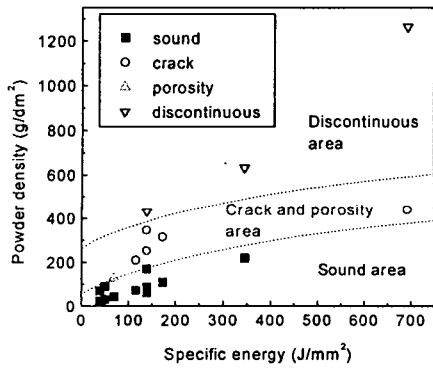


Fig. 2 The operating window of laser cladding of Ni-base superalloy on low carbon steel.

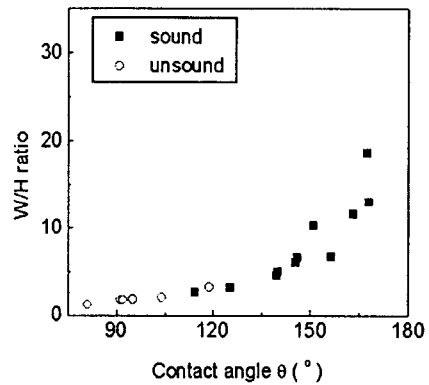


Fig. 4 Relationship between w/h ratio and contact angle.

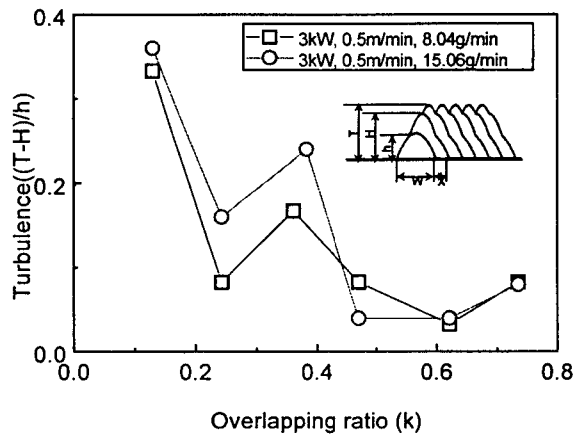


Fig.5 Surface roughness as a function of overlapping ratio.