

저탄소강에 대한 Ni기 초합금의 레이저 클래딩

Laser cladding of Ni-base superalloy on low carbon steel

이제훈, 서무홍, 김정오, 한유희
J.H. Lee, M.H. Suh, J.O. Kim, Y.H. Han
한국기계연구원 산업기술연구부

Abstract

A RS840 CO₂ laser and a powder auto-feeding apparatus have been used to deposit single tracks of Ni-base superalloy on low carbon steel. In this paper, the effects of laser cladding parameters on clad geometry, dilution and microhardness are studied. As a results, the w/h ratio of the clad layer increases with decreasing powder feed rate and increasing laser scan speed. Increase of powder density and decrease of specific energy have little effect on dilution. It was found that the clad layer of the highest hardness has a structure in which fine and leaf like phases are dispersed in γ Ni matrix.

Keywords : CO₂ laser, cladding, power density, powder feed rate, specific energy,
Ni-base superalloy, low carbon steel, dilution, microhardness.

1. 서론

레이저 재료가공분야(laser material processing)는 레이저 응용의 일부에 불과하지만 레이저의 잠재적 능력과 현재까지 개발된 열원들 가운데 가장 큰 에너지 밀도를 갖고 있어 산업기술에서의 중요성이 증대되고 있으며 특히, 레이저 용접기술과 표면개질기술(surface modification technology)의 적용영역은 매년 증가추세를 보이고 있다^{1),2)}. 레이저 클래딩(laser cladding)은 레이저빔을 이용하여 기지금속 표면에 내부식성, 내마모성 또는 내열성을 지닌 금속을 용융접합시키는 방법이다. 이러한 금속의 표면구역만을 개선하는 레이저 클래딩법은 다른 표면개질방법과 비교하여 재료의 기계적 성

질을 저하시키는 열영향부(heat affected zone)가 좁게 나타난다. 또한 요구조건에 적합한 재료를 선택하여 기지금속에 용융접합시키므로 금속의 선택 범위가 넓고, 비용절감에도 우수한 효과가 있으며, 그밖에도 고속가공에 의한 고생산성 및 자동화 용이등의 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있다³⁾. 이중 금속을 기지금속에 첨가시키는 방법으로는 금속표면에 금속페이스트나 판재 형태를 부착시킨 후 레이저빔을 조사하는 방법과 이중금속을 분말⁴⁾ 혹은 wire 형태로 레이저빔 조사면에 동시에 공급하는 방법이 있다. 이중 판재형태를 부착하는 방법은 재현성의 문제가 있으며, wire로서는 레이저빔의 흡수율이 분말에 비하여 현저히 저하된다. 한편, 분말동시공급법은 이중 금속분말의 공급

사용효율을 높일 수 있는 장점이 있어 널리 연구되고 있다⁵⁾.

재료의 선택은 내마모성 또는 내식성향상 목적에 따라 Ni기, Co기, Fe기 그리고 탄화물 합금등이 사용되어진다. 이중 엔진, 터빈 블레이드 등의 분야에서 사용되는 내열, 내마모성 재료인 Ni기 초합금(Ni-base superalloy)을 이용한 연구에서 Qian은 공정 변수가 희석율 및 경도변화에 미치는 영향을 분석하였다⁶⁾. Pelletier는 레이저 공정변수(laser power, beam radius, interaction time, powder feed rate)가 클래드 층의 clad geometry에 미치는 영향을 연구하였으며⁷⁾, Li와 Mazumder는 연속적인 클래드 층을 형성하는 최소 에너지 밀도에 관한 연구를 수행하였다⁸⁾. 지금까지 Ni기 합금에 대한 클래딩 공정에서 공정변수의 변화에 따른 클래드 형상과 클래드층의 성분분포가 결합발생과 경도등에 미치는 영향에 대해서는 충분한 연구가 수행되지 않았다고 판단된다. 본 연구에서는 공정변수가 클래딩 층의 clad geometry에 미치는 영향뿐만 아니라 기공 및 균열등의 결합발생 공정범위를 분석하여 레이저 클래딩의 현장적용에 중점을 두었다.

2. 실험방법

2.1 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 Table 1과 같으며 용융 접합성을 향상시키기 위하여 B, Si이 첨가되어 있고, 입도크기 분포는 Table 2와 같다. 레이저 클래딩 실험을 위하여 4kW RS840 CO2 레이저를 사용하였고, 산화방지와 플라즈마 제거를 목적으로 Ar 가스를 1.5 l/min로 공급하였다. 빔직경은 2.6mm이며, 분말은 레이저 빔 2mm 후방에 분사되도록 하여 레이저 클래딩 하였다.

Table 1. 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 2. Size distribution of powder.

Size(μm)	<125	<106	<76	<63	<53	<45	<36	<20
%	1.3	20.4	6.6	16.0	12.1	12.3	26.9	4.4

레이저 빔 이동속도 변화에 따른 특성을 알아보기 위하여 레이저 빔 이동속도를 0.1~1.8m/min로 변화시켰으며, 분말공급 변화에 따른 영향을 알아보기 위하여 분말공급량을 8~56g/min로 변화시켰다.

실험 후 클래딩층 시작점에서 50~100mm의 위치로 단면을 절단하여 입도 0.05μm의 Al 연마제로 표면을 연마하였다. 에칭용액(HNO₃ : HCl = 2 : 1)에서 에칭한 후 광학 현미경을 통해 미세조직 관찰과 클래드 층의 높이, 폭 및 모재와의 접촉각(contact angle) 그리고 희석율(dilution)을 측정하였다(Fig. 1). 또한 Micro-Vickers 경도기를 사용하여 실험변수에 따른 경도변화를 관찰하였으며, CAMECA SX-50 EPMA 측정장비를 이용하여 희석율에 따른 성분 변화를 측정하였다.

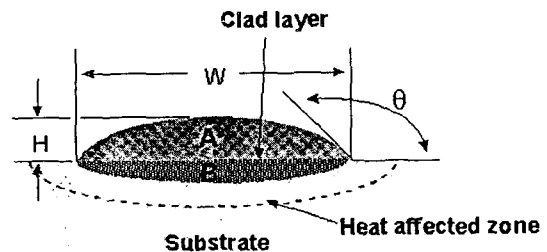


Fig. 1. Size parameter definition of clad coating.

2.2 분말 공급 장치 개발

분말 동시공급법을 이용한 레이저 클래딩 실험을 하고자 분말공급장치를 개발하였다⁹⁾. 분말 공급장치의 역할은 코팅층을 형성할 분말을 가공부 위에 송급하는 것으로 최적의 코팅층을 형성하기 위해서는 일정한 송급량 조절이 가능하고 공급의 안정성을 유지하여야 한다. 또한 고가인 분말의 사용효율을 최대화하기 위하여 공급노즐에 대한 연구가 동시에 수반되어야 한다. 분말공급장치는 Fig. 2와 같고 분말저장기(powder reserve), 차단기(stopper), 분말공급노즐(powder supply nozzle)로 구성되어 있다. 분말저장기는 단순히 분말을 저장하는 역할을 하고 분말공급노즐은 일정하게 분말을 회전판에 공급하여 주는 역할을 하며, 차단기는 회전판에 의해 공급되는 분말을 분말배출노즐(powder exit nozzle)로 공급해 주는 역할을 하도록 설계하였다. 본 장치의 특징은 첫째, 회전판과 분말공급노즐이 서로 맞닿아 분말을 공급하는 시스템으로 노즐과 회전판사이의 틈이 있는 장치에 비해 회전판에 공급되는 분말 공급량을 일정하게 유지할 수 있다. 둘째, 노즐 하단부에 폭 1mm, 깊이 2mm의 홈을 만들어 분말이 홈을 통해서만 공급이 이루어 지도록 설계하였다. 이는 적은 양 혹은 많은 양의 분말 공급이 필요할 경우 홈의 크기를 조절함으로써 노즐을 통해서 회전판에 공급되는 분말의 양을 조절하여 전체시스템의 공급량을 변화시킬 수 있으며, 또한 분말공급장치 내의 분말량에 무관하게 항상 일정한 량의 공급이 이루어지는 장점이 있다. 셋째, 분말공급노즐과 맞닿는 부분에 노즐의 외경과 같은 크기의 홈을 만들어 회전판의 홈을 분말로 채워 회전시킴으로써 분말공급노즐과의 마찰을 최소화하여 노즐의 마모에 따른 송급량의 변화를 배제하였다. 본 시스템을 사용할 때의 분말공급량은 1g/min에서 50g/min사이에서 매우 안정된 공급을 나타내고 있으며 이때의 공급량 오차는 평균공급량의 $\pm 3\%$ 이내에 있다.

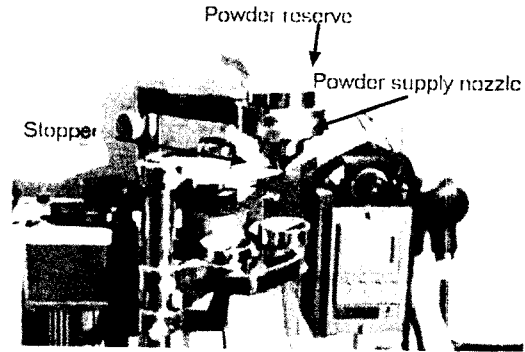


Fig. 2. A picture of powder feeding system

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공정변수가 클래드 층에 미치는 영향

3.1.1 분말 공급량(powder feed rate)의 영향 Fig. 3은 레이저 빔 이동 속도가 일정할 때 분말 공급량의 변화가 클래드(clad) 층에 미치는 영향을 나타내고 있다. 분말공급량이 증가할수록 클래드 층 높이는 증가하는 반면 폭은 변화가 없는 것을 알 수 있다. 클래드 층 높이의 증가는 분말 공급량이 증가함에 따라 빔 에너지가 분말에 흡수되는 양이 증가하기 때문인 것으로 분석되었다¹⁰⁾. 분말공급량이 많을 경우, 빔 에너지의 대부분이 분말에 흡수되고 모재에는 충분한 에너지가 공급되지 않는다. 분말공급속도 8.04g/min과 11.42g/min의 클래드 층 단면 형상에서 클래드 층 중앙부분의 용융 깊이가 분말공급속도 증가에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 분말공급속도 45.16g/min의 클래드 층 표면 형상에서 불연속적이고 구형상을 이루는 경향이 나타남을 알 수 있다. 위와 같은 두 현상은 에너지 밀도(specific energy = $P / D \cdot v$)가 높은 중심 부위에서만 모재와 용융 접합이 이루어지고 에너지 밀도가 낮은 가장자리 부분은 모재를 용융시키기에 충분한 에너지가 공급되지 않기 때문에 클래드 층과 모재의 용융접합력이 작아지고, 용융된 분말의 표면장력으로 구형을 이루려는 경향 때문인 것으로 분석된다.

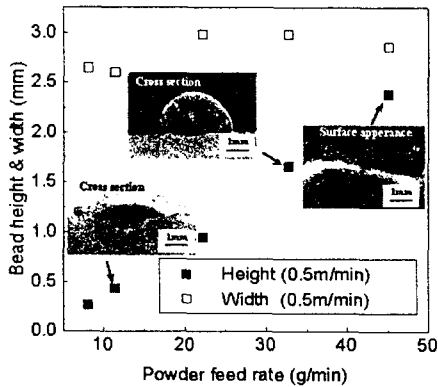


Fig. 3. Variables of bead height and width as a function of powder feed rate at 3.0kW, 0.5m/min.

Fig. 4는 레이저 빔 이동속도가 일정할 때 분말 공급량이 증가함에 따라 희석율에 미치는 영향을 나타내고 있다. 분말공급량이 증가함에 따라 클래드 층의 높이는 선형적으로 증가하여 희석율(%dilution)¹¹⁾은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 입사에너지는 동일하지만 분말공급량의 증가로 용융된 분말의 높이가 증가하여 이에 따라 모재의 용융 면적은 감소한 것에 기인한다.

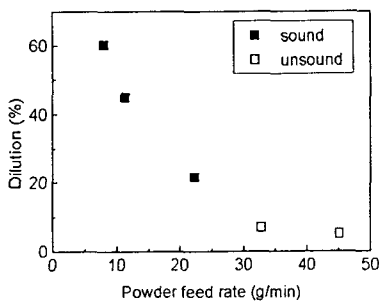


Fig. 4. Variables of dilution as a function of powder feed rate at 3kW, 0.5m/min.

3.1.2 레이저 빔 이동속도(laser beam speed)의 영향

Fig. 5는 분말공급량이 일정할 때 레이저 빔 이동속도가 클래드 층에 미치는 영향을 보여주고 있다. 레이저 빔 이동속도가 증가할수록 클래드 층 높이는 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 레이저의 빔 이동속도 증가로 인한 입사에너지가 감소한 결과이다. 분말 공급량 변화와 달리 레이저 빔 이동

속도 변화는 단위 길이당 빔 에너지의 변화와 분말 공급량의 변화가 동시에 일어나는 것을 의미한다. 레이저 빔 이동속도가 증가할수록 레이저빔과의 반응시간(interaction time)이 감소하므로 단위 면적당 재료에 입열되는 에너지는 감소하게 된다. 또한, 레이저 조사속도가 증가할수록 클래드 층 높이와 폭이 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 레이저 빔 이동속도 0.6m/min 이하 ($115.38\text{J}/\text{mm}^2$ 이상)에서 레이저 빔 이동속도가 감소할수록 클래드 층 높이 및 폭 증가현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 본 연구에 사용된 레이저의 빔 프로필이 multi mode를 나타내므로 레이저 빔 이동 속도가 증가할수록 반응시간 감소와 에너지 밀도가 감소하여 빔의 가장자리는 주어진 분말을 충분히 용융, 증착시킬 수 있는 임계값 이상의 빔 출력밀도가 주어지지 않았기 때문인 것으로 분석된다.

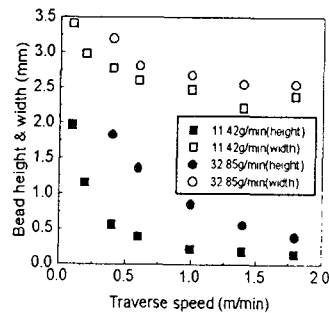


Fig. 5. Variables of bead height and width as a function of laser scan speed.

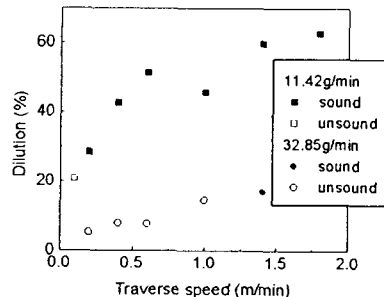


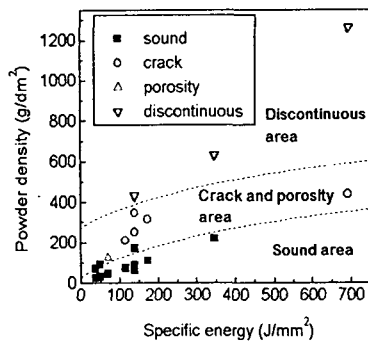
Fig. 6. Variables of dilution as a function of laser scan speed.

Fig. 6에서는 분말공급량이 일정할 때 레이저 빔 이동속도에 따른 희석율의 변화를 나타내고 있다.

레이저 빔 이동속도가 증가할수록 희석율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 단위 길이당 입열되는 에너지밀도가 감소함과 동시에 공급되는 분말의 양도 감소하나 상대적으로 분말 감소량이 희석율에 미치는 영향이 증가하는 것으로 분석된다.

3.1.3 결함과 가공공정범위

Fig. 7은 에너지밀도와 분말밀도에 따른 결함 발생 영역을 나타내고 있다. 임계값 이상의 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 발생하는 것으로 분석된다. 또한, 균열은 모재와 클래딩 재료와의 열팽창계수차로 인한 급격한 열응력변화에 기인하는 것으로 알려져 있다¹²⁾. 그 이상의 공정 범위를 지나면 불연속적인 클래드 층이 형성되어지는데 그 원인은 분말공급량 변화에 대한 영향에서 설명한 바와 같다. 이상과 같은 결과에서 에너지 밀도의 증가는 결함 발생에 크게 영향을 미치지 않고 있는 반면, 분말밀도가 증가함에 따라 클래드 층은 기공에서 불연속 층에 이르기까지 모든 결함이 발생하게 됨을 알 수 있다.



$$\text{Specific energy} = \text{Power}(P) / \text{Beam dia.}(D) \times \text{Speed}(v)$$

$$\text{Powder density} = \text{Powder}(D) / \text{Beam dia.}(D) \times \text{Speed}(v)$$

Fig. 7 The operating window of laser cladding of Ni-base superalloy on low carbon steel.

이상과 같은 결과에서 공정변수에 따른 건전한 클래드 층 형성 영역과 불건전한 클래드 층 영역을 확인할 수 있기 때문에 실제 적용시에 공정범위를 조절하여 최적의 조건에 쉽게 접근할 수 있는 것으로 판단된다. Fig. 8은 클래드 층과 모재와의 접촉각(θ)과 w/h ratio(w=width, h=height)와의 관계를 건전영역과 불건전영역으로 구분하여 나타내었다. 여기에서 불건전영역은 기공, 균열 등의 결함을 포함하는 클래드 층을 나타낸다. 클래드 층과 모재와의 접촉각이 130° 이상 그리고 w/h ratio가 4이하일 때 불건전한 클래드 층이 형성되어지는 것으로 나타났다. 이는 Steen, Courtney의 연구결과와 유사하게 나타나고 있다¹¹⁾. 여기서 접촉각과 w/h ratio는 분말공급량의 영향을 직접적으로 받고 있으나 서로 상반되는 공정변수의 조건을 요구함으로써 다른 변수의 조건에 적합한 분말공급량을 선정하여 단위 길이당 공급되는 분말 공급량을 최적화하여 결함을 감소할 수 있는 조건을 선택하여야 할 것으로 판단된다.

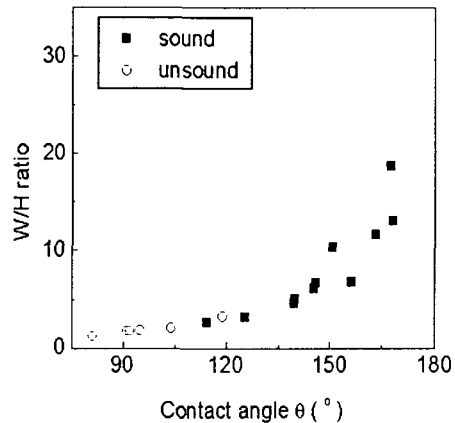


Fig. 8. Relationship between w/h ratio and contact angle.

3.2 공정변수(process parameter)의 변화가 경도변화에 미치는 영향

3.2.1 공정변수에 따른 성분변화가 경도에 미치는 영향

Fig. 9, 10 그리고 11은 빔 에너지와 조사속도를 3kW와 0.5m/min으로 일정하게 유지한 상태에서 분말공급량을 각각 32.85, 22.31, 11.24g/min으로 변화시켰을 때의 결과이다. 분말공급속도에 따른 희석율은 각각 6.96, 21.53, 44.88%를 나타내고 있으며 희석율 증가에 따라 미세경도는 감소하는 것으로 나타났다. 에너지 밀도가 일정할 때 분말공급속도 증가에 의한 희석율 감소가 클래드 층에서의 농도변화를 가져온다. 희석율 증가에 따라 모재의 성분함량이 클래드 층에 희석되므로 클래드 층의 Fe 농도가 증가하고 Ni 및 Cr 농도는 감소하였다¹³⁾.

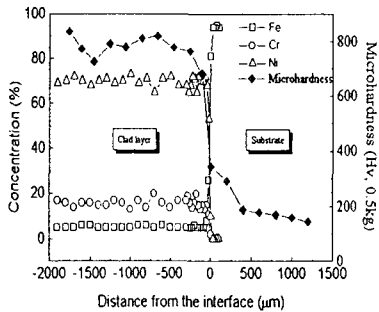


Fig. 9. Relationship between concentration(wt%) and microhardness for the clad layer 3kW, 0.5m/min, 32.85g/min and 6.96% diluted.

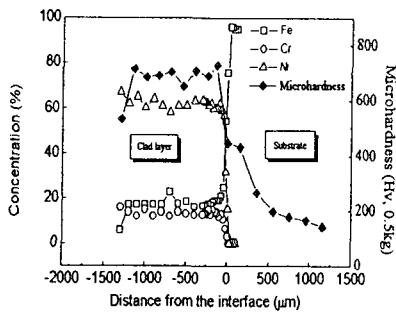


Fig. 10. Relationship between concentration(wt%) and microhardness for the clad layer 3kW, 0.5m/min, 22.31g/min and 21.53% diluted.

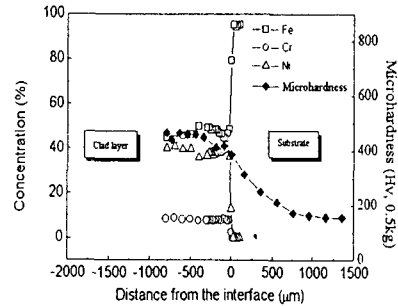


Fig. 11. Relationship between concentration(wt%) and microhardness for the clad layer 3kW, 0.5m/min, 11.24g/min and 44.88% diluted.

Ni가 초합금은 γ 상에 Co, Fe, Cr, Mo, W, Ti, Al등이 고용되어 격자비틀림에 의한 강화재료이다. 이중 W, Mo, Cr등은 강한 영향을 주며, Fe, Ti, Mo, V등은 적은 효과를 나타낸다. 위의 원소들은 원자크기에서 1~13% 정도 차이를 보이며 전자공에서는 1~7%정도의 차이를 나타내어 전자수/원자수비를 변화시킨다. 또한 합금원소의 첨가는 적층결함에너지(stacking fault energy)를 감소시킴으로써 γ 상에서의 교차슬립(cross slip)을 어렵게 하므로 재료강화효과가 있다고 알려져 있다¹⁴⁾. 따라서 클래드 층에서의 희석율증가가 γ Ni를 감소시키며 상대적으로 Fe보다 고용강화효과가 큰 Cr 농도를 감소시킴으로써 경도값 감소의 주 원인인 것으로 사료된다.

위의 분말공급속도변화에 따른 희석율과 경도관계의 결과와 마찬가지로 레이저 빔 이동속도에 따른 희석율과 경도와의 관계는 Fig. 12에서 보여주는 바와 같이 희석율이 감소할수록 경도는 증가하는 것으로 나타났다.

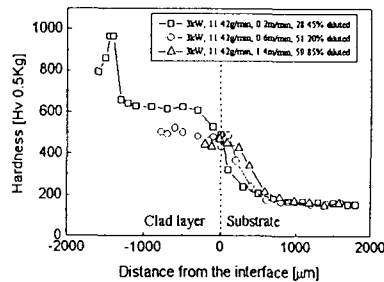


Fig. 12. Variables of micorhardness as a function of laser scan speed.

3.2.2 공정변수에 따른 미세구조변화가

경도에 미치는 영향

본 실험 공정변수영역에서 관찰된 미세조직은 계면에서의 면선단응고와 그 후 셀룰러 수지상으로 관찰되었다(Fig.13). 응고 초기에 응고 속도는 거의 영(zero)에 가까우므로 면선단응고모드(plane-front mode)로 성장하며 응고속도가 증가함에 따라 조성적 과냉(constitutional supercooling)으로 인하여 계면이 불안정해진다. 이러한 계면 불안정성은 온도구배와 응고속도에 따라 셀룰러 성장(cellular growth), 셀룰러 수지상성장(cellular dendritic growth), 수지상 성장(dendritic growth)을 야기하는 것으로 알려져 있으며, 본 실험결과에서는 면선단응고후 셀룰러 수지상으로 성장하였다(15). 이는 레이저 조사속도(1.4m/min)로 재료와의 상호반응 시간(0.11s)은 비교적 짧지만 응고속도가 셀룰러 성장을 야기할 만큼 충분하지 않았기 때문인 것으로 분석된다.

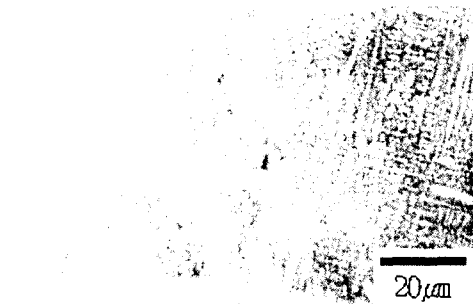
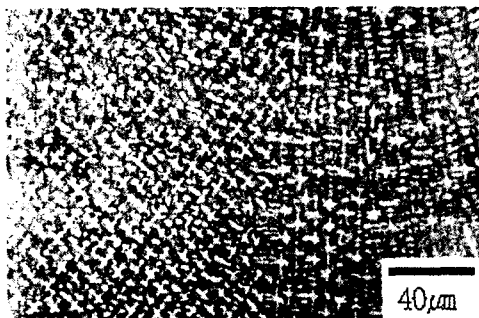
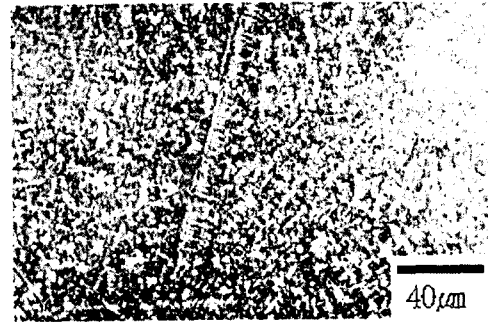


Fig. 13. Microstructure of cellular dendritic growth (3kW, 11.42g/min, 1.4m/min).



(a)



(b)

Fig. 14. Microstructure of clad layer 44.88% diluted (a) and 6.96% diluted (b).

Fig. 14는 클래드 층의 중앙부분 조직사진으로 회석율이 각각 44.88과 6.96%이다. 회석율이 높은 (a)의 경우 400~500HV의 경도값을 나타내고, (b)의 경우 높은 700~800HV를 보이고 있는데 이는 조직의 미세화에 기인한 것으로 분석된다⁶⁾. (a)의 경우에는 수지상의 일부분이 용탕의 대류에 의하여 떨어져 나가 fragment를 이루고 이를 핵으로 하여 불균질하게 성장하여 등축정이 생성되었으며, (b)의 경우에는 가늘고 기다란 막대모양의 입자와 나뭇잎 모양의 입자들이 작고 넓게 분포되어 있다. 이러한 조직 변화의 원인으로서는 회석율, 응고속도, 용탕의 대류 등 복잡한 요인들이 많으므로 향후 지속적인 연구가 요구되고 있다.

4. 결론

1. 분말 공급량이 증가함에 따라 회석율은 감소하였다. 이는 분말의 밀도가 높아짐에 따라 빔 에너지가 분말에 흡수되는 양이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

2. 레이저 빔 이동속도가 증가함에 따라 회석율도 증가하였다. 이는 빔 이동속도의 증가에 따라 단위 길이당 입열되는 에너지 밀도와 분말 밀도가 동시에 감소하나 분말밀도 감소율에 비하여 상대적으로 모재에 흡수되는 에너지 감소율이 적으므로

로 회석율이 증가하고 동시에 클래드 층의 높이가 감소하는 결과를 나타내었다.

3. 각 에너지 밀도에서 건전영역의 한계 분말 밀도가 존재함을 알 수 있다.

4. 클래드 층의 접촉각이 130° 이상, w/h ratio가 4이하일 때 불건전한 클래드층이 형성되어지는 것으로 나타났다.

5. 회석율이 감소할수록 경도는 증가하였다. 이는 i) 모재의 성분 함량이 감소할수록 상대적으로 고용강화 기지인 γ Ni 함량이 증가한 것과 ii) 가늘고 기다란 막대모양의 입자와 나뭇잎모양의 입자들이 작고 넓게 분포한 것이 원인인 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 松郎 : 레이저프로세싱의現状と將來, ツルエンジニア, p23-29, 1997년 7월
2. 石原弘一 : '大出力レーザー' 應用の動き, ツルエンジニア, p30-33, 1997년 7월
3. J. R. Davis : Applications of high power laser, SPIE, 527, (1985)
4. J. M. Yellup : Laser cladding using the powder blowing technique, Surface and coating technology, 71, p121-128, (1995)
5. 牧野吉延 : 레이저클래드법의實際, 日本鎔接學會紙, p14-20, (1995)
6. M. Qian, et al : Parametric studies of laser cladding process, Journal of material processing technology, 63, p590-593, (1997)
7. J. M. Pelletier et al., : Journal of material science, 28, p5148-5188, (1993)
8. L. Lijun and J. Mazumder., Appl. laser, 1, p1-5, (1987)
9. J. H. Lee et al : Development of laser microstructuring & cladding technology. in Development of core technology for microjoining, UCN039-535 · M, (1998)
10. X. Wu, et al : Critical state of laser cladding with powder auto-feeding, Surface and coating technology, 79, p200-204, (1996)
11. W. M. Steen and C. G. H. Courtney : Hardfacing of Nimonic 75 using 2kW continuous-wave CO2 laser, Metals Technology, p232-237, (1980)
12. A. B. Vannes : Laser surface treatment of metals, Martinus Nijhoff Publ., p435-450, (1986)
13. T. H. Kim, J. H. Chung : Fabrication of functionally gradient materials in Inconel/Steel system by laser beam, J. of the korean inst. of met & mater., 35(4), p509-514, (1997)
14. Sims, Stoloff and Hagel : Superalloys II, A wiley-interscience Publ., p102-104, (1987)
15. J. K. Shin, "Microstructure and corrosion properties of surface-treated Inconel 600 by laser", KAIST, (1998)