

레이저 클래딩 기술



서무홍

(KIMM 산업기술연구부)

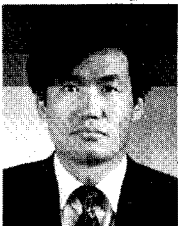
- '96 충남대학교 금속공학과 (학사)
- '98 충남대학교 금속공학과 (석사)
- '96 - '98 한국원자력연구소 신소재개발부 위촉연구원
- '99 - 현재 한국기계연구원 산업기술연구부 위촉연구원



이제훈

(KIMM 산업기술연구부)

- '78 경북대학교 농공학과(학사)
- '90 독일 슈투트가르트대학 기계공학과(석사)
- '96 독일 슈투트가르트대학 기계공학과(박사)
- '90 - '96 독일 항공우주연구소 연구원
- '96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



한유희

(KIMM 산업기술연구부)

- '78 연세대학교 기계공학과(학사)
- '84 독일 브라운슈바이크공대 기계공학과(석사)
- '87 독일 브라운슈바이크공대 기계공학과(박사)
- '87 - '89 독일 항공우주연구소 연구원
- '89 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

레이저는 지난 1962년 발명된 이래 다양한 산업분야에서 재료가공에 사용되어져왔다. 재료의 레이저 가공기술은 여러 관점에 따라 분류할 수 있다. 레이저빔과 물질과의 상호작용에 의해 발생하는 열을 이용하는 열가공기술(Thermal processing)과 레이저 자체의 물리적 특성을 이용하는 양자(Quantum) 혹은 비열가공기술(Non-thermal processing)로 분류할 수 있다. 레이저를 이용한 재료가공의 종류는 그림 1에서 보는 바와 같이 레이저와 재료와의 상호 작용에^[1] 의한 효율에 의해 결정되는데 그 효율을 결정하는 주요 인자는 빔과 재료의 반응시간, 빔의 출력, 재료의 특성이다.

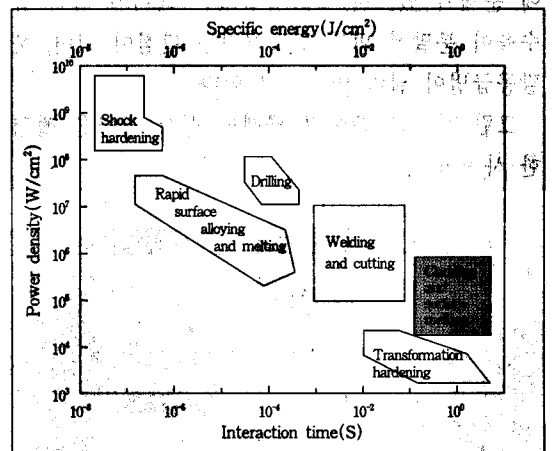


그림 1. 레이저와 재료의 상호작용

재료의 내마모성 및 내식성을 향상시킬 목적으로 재료표면에 이종금속을 도포하는 기존의 클래딩방법으로 arc welding, oxy-fuel gas

welding, thermal spray coating, detonation gun spray, jet spray coating, and plating등을 들 수 있다. 재료의 선택은 내마모성 및 내식성 향상 목적에 따라 니켈기, 코발트기, 철기 그리고 탄화물 합금등이 사용되어진다.

최근에 고출력 CO₂ 레이저가 상용화됨에 따라 표면 클래딩 분야에 획기적인 발전이 이루어져 적용 분야가 점차 확대되고 있는 추세이다. 레이저 클래딩은 클래딩 재료를 기재상에 자동공급하면서, 레이저 빔을 조사하여 milli order의 후막을 형성하는 공정이다. 클래딩 층은 희석율 제어, 우수한 접합성, 결정립의 미세화, 국부적인 가열, 비틀림 및 열영향부 감소, 깨끗한 표면마감, 그리고 자동화가 용이한 장점은 레이저가 기존의 열원에 비해 우수한 특성을 갖고 있기 때문이다. 위에서 상술한 특징을 살리기 위해서는 실용화에 알맞은 클래딩 재료의 공급방법을 선정하지 않으면 안된다. 클래딩 재료의 공급방법에는 분말정치법(Pre-placed powder bed), chip 정치법(Pre-placed chip), wire공급법(Wire feed), 분말공급법(Powder feed)의 4가지 방법이 있다^[2]. 이들중 정치법에서는 도포방법의 재현성에 문제가 있으며, wire공급법은 레이저 빔의 흡수율이 분말에 비해 뒤떨어지는 단점이 있어, 분말공급법이 널리 연구되고 있다.

그림 2는 본 레이저 클래딩 실험 장면을 촬영한 사진이다.

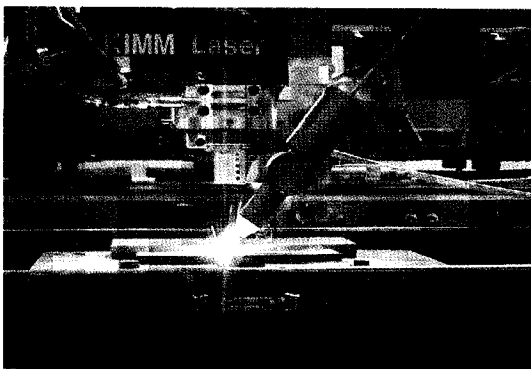


그림 2. 레이저 클래딩 실험 장면

2. 산업분야에서의 응용

산업분야에서 레이저 클래딩의 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 사용되었다. 클래딩을 위한 모재로는 저탄소강, 저합금강, 스테인리스, 알루미늄, 주철, 공구강, 초합금등이 사용되었다. 표 1은 레이저 클래딩된 전형적인 부품들에 대한 레이저 변수를 나타내고 있다.

표 1. 레이저 클래딩된 부품들에 대한 공정변수

Part	Base Metal	Alloy	Cladding Thickness	Laser Power kw	Speed m/min
Valve gate	Martensitic stainless	Co-Cr-W-C	0.040	5.0	50
Tracl	Low-alloy steel	Co-Cr-W-C	0.030	5.0	20
Pump bushing	Austenitic stainless	Ni-Cr-Fe-B	0.030	4.0	50
Engine valve	Austenitic stainless	Co-Cr-Ni-W	0.030	5.0	20
Piping valve	Ductile iron	Nickel	0.035	3.0	35
Turbine blade	Nickel alloy	Co-Cr-W-Ni	0.050	3.0	40
Coal chute	Steel casting	50% WC in alloy	0.035	7.0	70

2.1 항공분야에서의 응용

항공산업은 제품의 목적에 맞는 레이저 클래딩의 장점을 이용하는 개척분야다. 항공산업에서의 레이저 클래딩은 OEM 부품과 그부품의 수리에 사용되어져 왔다. 가장 잘 알려진 레이저 클래딩 부품은 롤스로이스사의 RB 211 엔진 부품중 Ni기 초합금으로 주조된 터빈블레이드에

2kW CO₂ 레이저와 분말공급법을 이용하여 코발트기 합금을 코팅한 부품이다^[3]. Pratt & Whitney사에서는 6kW CO₂ 레이저와 chip정치법을 이용하여 터빈블레이드의 Z-notch를 클래딩하였다. 터빈블레이드의 shroud tip과 Z-notch 부분의 레이저 클래딩에 대한 주문은 계속해서 증가하는 실정에 있다. 이러한 부품들의 TIG 용접은 넓은 열영향부로 인한 결함발생과 정확한 공정제어의 어려움으로 많은 후가공과 불량 발생한다. 레이저 클래딩은 이상과 같은 형태의 성형에서 TIG 용접등에서 발생하는 문제들을 제거할 수 있다.

수리영역에서 클래딩의 응용은 마모된 터빈팬의 H-dimension 부분의 재형성이다. 균열에 민감한 니켈기 합금의 팬 재료는 열 유도 균열을 피하기 위하여 레이저 클래딩과 같은 낮은 열입열 과정을 통해서 클래딩되어야 한다. 또한 시간당 30개 정도의 부품 생산 속도 이상이 되어야 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

2.2 자동차 산업분야에서의 응용

반면 자동차 산업은 레이저 열처리, 용접, 절단등의 응용분야이며 레이저 클래딩은 단지 제한된 사용으로 보고되어 왔다. 초기에 자동차 산업에서 레이저 클래딩의 응용중의 하나는 정치법을 이용한 디젤 엔진 밸브의 클래딩이었다. 이러한 엔진 밸브의 클래딩은 현재 분말공급방법으로 실용화되어 있다. 또한 스테인리스강의 엔진 밸브에 코발트기 초합금을 클래딩하여 내마모성을 향상시킨 경우도 있다. 레이저 클래딩은 클래딩 재료를 절감하며, 클래딩 전후의 가공단계를 줄여 가공 속도를 향상시킨다. 자동화의 경량화 추세에 따라 알루미늄 합금 재료가 엔진 및 부품에 점차 적용이 확대되어 내마모성 및 내열성 향상을 위한 레이저 클래딩 기술을 이분야에 적극 활용된 기술로 기대되고 있다.

2.3 석유화학산업에서의 응용

최근에 석유 및 공정산업의 몇가지 부품에 레이저 클래딩이 응용되기 시작하였다. 석유가공분야에서 레이저 클래딩 시스템을 설치하여 오일밸브 AISI 4130, 410의 seat 와 gate를 클래딩하였다^[4]. 원형의 gate 와 seat를 코발트기 합금 및 텅스텐 탄화물로 레이저 클래딩하기 위한 실험이 진행되고 있다. 쇄기형상의 코발트기 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 클래딩에 의하여 만들어 지고 있다. AISI 4130 stab subassembly는 코발트기 합금과 Ni-B 합금으로 레이저 클래딩되며, dog collars 는 AISI 4815강을 모재로 비정질의 크롬(Cr) 탄화물을 포함하는 합금으로 클래딩된다.

공정산업에서 화학공정보일러에 사용되어지는 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 제조된다. AISI 420 블레이드는 침식성 및 마모성을 억제하기 위해 코발트기 합금으로 클래딩된다.

2.4 장비분야에서 응용

트랙터의 트랙이 가혹한 부식 및 핏팅으로 상하게되자 그 해결방법으로 트랙 부식에 레이저 클래딩하여 사용하였다. 원통형모양의 튜브 저함

금강 부상의 양쪽면에 코발트기 합금으로 레이저 클래딩 하였다. 주철의 밸브에 니켈기 합금이 이용한 레이저 클래딩이 실험 중에 있다.

그 외 많은 흥미 있는 레이저 클래딩 부품들이 있다. 절단 블레이드 팁 및 산업용 칼에 탄화물합금의 클래딩, 소성압출 스크류에 Fe-Ni-B 합금의 클래딩 등 다양한 부품에 레이저 클래딩이 이용되고 있다.

3. 레이저 클래딩의 실제

3.1 분말공급장치개발

분말 동시공급법을 이용한 레이저 클래딩 실험을 하고자 분말공급장치를 개발하였다^[5]. 분말공급장치의 역할은 코팅 층을 형성할 분말을 가

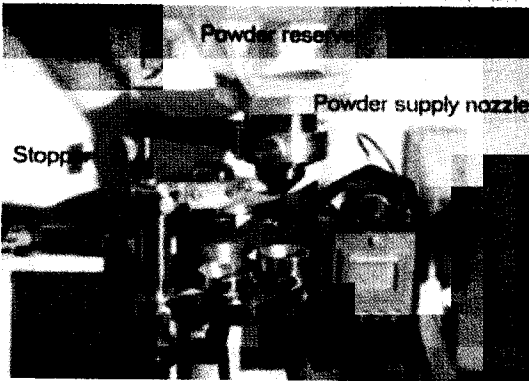


그림 3. 분말공급시스템

공부위에 송급하는 것으로 최적의 코팅 층을 형성하기 위해서는 일정한 송급량 조절이 가능하고 공급의 안정성을 유지하여야 한다. 또한 고가인 분말의 사용효율을 최대화하기 위하여 공급노즐에 대한 연구가 동시에 수반되어야한다. 분말공급장치는 그림 3과 같고 분말저장기(powder reserve), 차단기(stopper), 분말공급노즐(powder supply nozzle)로 구성되어있다. 분말저장기는 단순히 분말을 저장하는 역할을 하고 분말공급노즐은 일정하게 분말을 회전판에 공급하여주는 역할을 하며, 차단기는 회전판에 의해 공급되는 분말을 분말배출노즐(powder exit nozzle)로 공급해주는 역할을 하도록 설계하였다.

3.2 레이저 클래딩 층의 평가

그림 4는 레이저 클래딩 과정을 나타내고 있다^[1]. 그림 4의 (a)는 도포된 분말에 레이저 빔이 조사되는 과정을 나타낸다. 조사된 레이저 빔에 의하여 표면에 있는 분말이 용융 온도에 도달하여 고액계면이 형성되고 그 열이 모재로 전달된다.(그림 4. b~c) 분말과 모재의 일부가 용융된 액상영역이 와류에 의하여 내부확산, 혼합되어지며 재응고가 급속히 이루어진다.(그림 4. d~f)

공정변수를 제어할 목적으로 행해진 single clad track 기초실험을 통해서 얻어진 클래드 층의 형

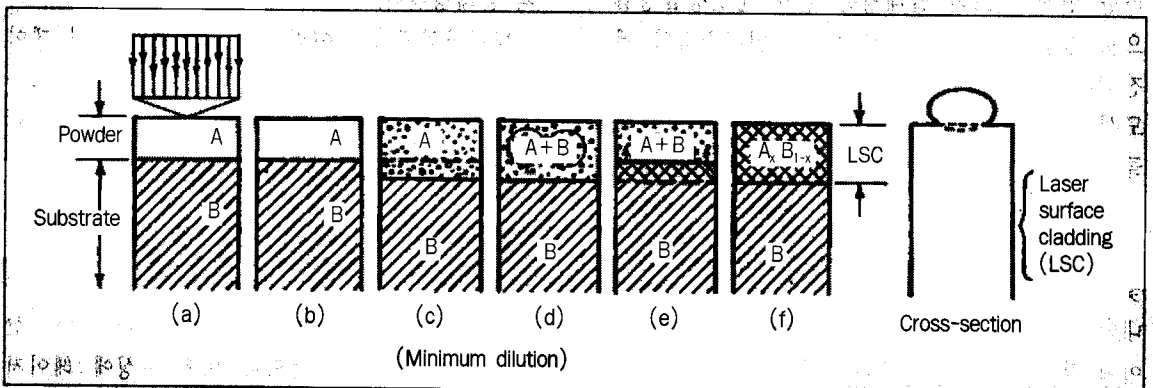
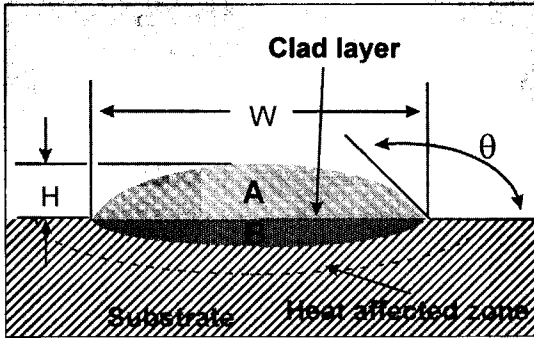


그림 4. 레이저 클래딩 과정에서 발생하는 단계적 현상

상의 높이(H), 넓이(W), 접촉각(θ), 회석율등을 측정함으로써 변수의 영향을 평가하게 된다.[6](그림 5)



접촉각 = θ 회석율(%) = $B/(A+B)$

그림 5. 클래드층의 변수 정의

3.2.1 공정변수의 영향

그림 6, 7은 저합금강을 모재로 니켈기 초합금 분말을 레이저 클래딩한 실험결과를 나타낸다. 그림 6은 레이저 빔 조사속도가 일정할 때 분말 공급속도가 증가할수록 클래드 층 높이는 증가하는 반면 폭은 변화가 없는 것으로 나타났다. 클래드 층 높이의 증가는 분말공급량이 증가함에 따라 분말에 흡수되는 양이 증가하기 때문인 것으로 분석된다. 그림 7에서 분말공급속도가 일

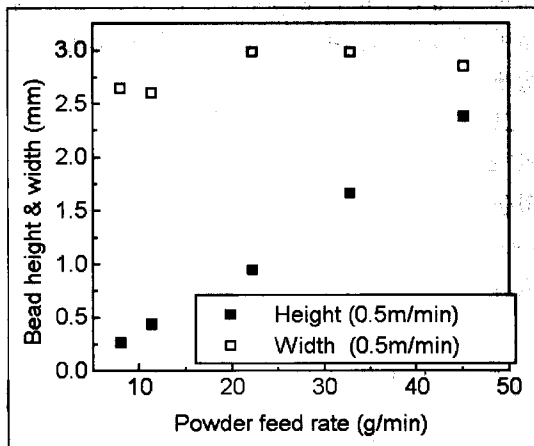


그림 6. 출력 3kW, 레이저 빔 조사속도 0.6m/min의 조건에서 분말공급 속도가 클래드 층 형태에 미치는 영향

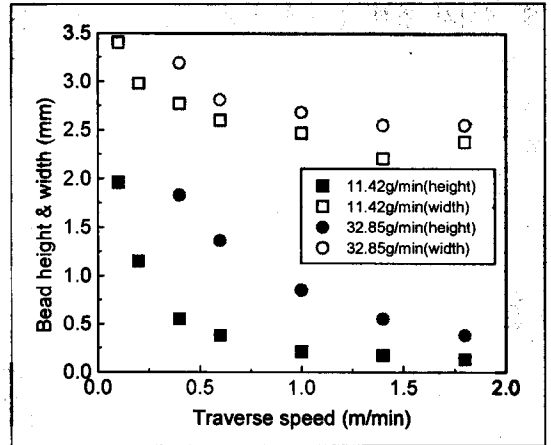


그림 7. 출력 3kW, 분말공급속도 11.42 및 32.85g/min의 조건에서 레이저 빔 조사속도가 클래드 층 형태에 미치는 영향

정할 때 레이저 빔 조사속도가 증가할수록 클래드 층 높이와 폭이 감소하는 것을 알 수 있다. 분말 공급량 변화와 달리 레이저 빔 조사속도의 변화는 단위 길이당 빔 에너지의 변화와 분말 공급량의 변화가 동시에 일어나는 것을 의미한다. 클래드 층의 높이와 폭의 감소 현상은 레이저 빔 이동속도 증가로 인한 입사에너지의 감소로 분말용융량이 감소한 결과이다.

3.2.2 결함과 공정변수

레이저 클래딩 시 발생하는 결함은 기공과 균열이 대표적이다. 기공은 기포가 용융부 밖으로 빠져나가기 전에 급속한 응고속도에 의하여 응고된 결과이며, 각각 에너지 밀도에서 응고가 진행됨에 따라 기공이 표면 밖으로 빠져나오는 한계 높이 이상으로 분말 공급이 이루어지면 기공이 용융에 남은 채로 응고되어 결함이 발생하게 되는 것으로 사료된다. 균열은 모재와 클래딩 재료와의 열팽창계수차로 인한 급격한 열응력변화에 기인하는 것으로 알려져 있다[7]. 그림 8에서 보는 바와 같이 그 이상의 공정 범위를 지나면 불연속적인 클래드 층이 형성되어지는데 그 원인은 분말 공급량 변화의 영향에서 설명한 바와 같다. 이상과 같은 결과에서 에너지 밀도의 증가

에 따라서 결함 발생에 변화가 거의 없으나 분말밀도가 증가함에 따라 기공에서 불연속인 클래딩 층에 이르기까지 모든 결함이 발생하게 됨을 알 수 있다.

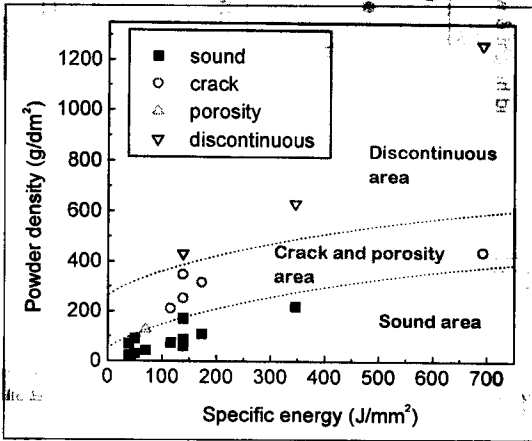


그림 8. 저탄소강을 모재로 한 니켈기 초합금의 레이저 클래딩에서 공정변수에 따른 결함 발생 영역

3.3 클래드층의 미세조직

그림 9는 저합금강을 모재로 니켈기 초합금 분말을 출력 3kW, 주사속도 0.5m/min, 분말공급속도 8.04g/min의 조건으로 레이저 클래딩하여 HNO₃:HCl = 2:1 용액에서 에칭한 후의 미세조직 사진이다. 응고 초기에 응고 속도는 거의 영에 가까우므로 면선단응고모드(Plane-front-mode)로 성장하며 응고 속도가 증가함에 따라 조성적 과냉으로 인하여 계면이 불안정해진다. 이러한 계면 불안정성은 온도구배와 결정 성장 속도에 따라 셀룰러 성장(cellular growth)을 야기한다. 또한 관찰되는 에피택시 성장은 레이저 용융에서 급냉응고의과정의 동역학적인 측면에서 볼 때, 고상과 액상의 계면에서 고상의 핵이 생성되어 응고할 필요가 없게되어 기존의 기지에 존재하는 입자의 결정 방위에 따라 응고가 이루어지므로 각 입자들의 방위에 따라 열방출 방향으로 셀이 성장하는 에피택시 성장이 이루어진다^[8].

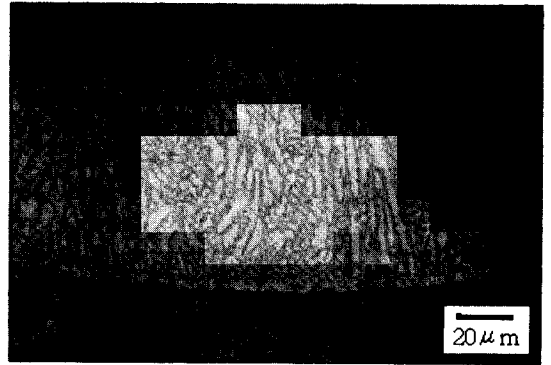


그림 9. 레이저 클래딩 층 단면 광학사진

3.4 레이저 클래딩 중첩실험

Single clad track 실험결과 기공 및 균열등의 결함이 발생하지 않는 영역에서 중첩실험이 행해진다. 표면거칠기는 single clad track의 높이와 중첩비에 의존하며 폭과는 무관하다. 표면거칠기(Turbulence)는 중첩비 증가에 따라 계속해서 감소하는 것이 아니라 진동하는 방법으로 감소한다고 보고되고 있다^[9].

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.

그림 10은 저합금강을 모재로하여 오스테나이트 스테인리스강(Type 316)을 레이저 클래딩하였을 경우의 표면형상과 열영향부(Heat affected zone) 그리고 실린더 형상의 조형물을 보여주고 있다.

4. 레이저 클래딩의 경향과 전망

항공 우주 산업 및 방산 분야의 신소재 개발과 함께 이의 가공에 필요한 레이저 응용 가공의 적용이 급격히 확대되어 가고 있는 실정이다.

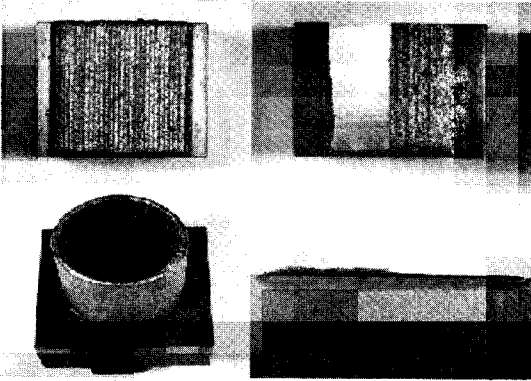


그림 10. 레이저 클래딩 증착실험결과 클래딩 표면과 열영향부

원형형태의 클래딩이 실험단계를 넘어 실용화를 추진하고 있는 실정이다.

레이저 클래딩은 독특한 잇점과 요구되는 금속학적 특성에 부합하는 장점등을 제공하고 있지만 사용자들에게는 그 인식이 부족편이다. 그 요인들은 다음과 같다.

- 1) 레이저 클래딩은 아직 새로운 공정이다(사용자들의 신공정에 대한 인식이 부족하다)
- 2) 초기의 설비투자가 요구된다(5~10kW CO₂ 레이저의 설치와 유지비는 전형적인 공정장비에 비해 몇배가 된다)
- 3) 레이저 관련 전문 인력이 부족하다.

그러나 미래를 보면 제조공정으로써 레이저 클래딩은 무한한 성장잠재력을 가지고 있다.

- 1) 클래딩 재료비 및 후가공비 절감, 낮은 비틀림, 최소의 회석율등의 장점을 가지고 있다.
- 2) 다른 공정으로는 코팅형성이 어렵다. 예를 들어 텅스텐 탄화물, 세라믹, 복합적인 탄화물을 코팅할 수 있는 방법은 레이저 클래딩뿐이다.
- 3) 독특한 모양과 형상 제조는 다른 기술로

대체가 어렵다.

4) 고출력 CO₂ 레이저의 단가가 감소하고 있어 레이저 효율이 증대되고 있다.

5) 레이저 클래딩을 이용한 실린더 형태의 급속 조형 제작기술이 진보되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] J. Singh, Review laser-beam and photon-assisted processed materials and their microstructures, Journal of materials science, 29 1994, pp. 5232-5258.
- [2] 牧野吉延, 日本鎔接學會紙, 1995, pp14-20.
- [3] R. M. Macintyre, Laser of turbine blade shroud interlocks, Laser in materials processing, ASM, E. A. Metzbowder ed., 1983.
- [4] P. Koshy, Laser cladding technique for applications of high power lasers, SPIE, vol. 527 R.R, Jacob ed., 1985.
- [5] 한유희 외 14, Microjoining 핵심기술개발, 한국기계연구원, 1998, 2.
- [6] Xinwei Wu, Critical state of laser cladding with powder auto-feeding, Surface and coating technology, 79, 1996, pp. 200-204.
- [7] A. B. Vannes : Laser surface treatment of metals, Martinus Nijhoff Publ., (1986), pp. 435-450.
- [8] K. J. Shin, "Microstructure and corrosion properites of surface-treated Inconel 600 by laser", KAIST, 1998.
- [9] L. Yanxiang, Study on overlapping in the laser cladding process, Surface and coatings technology, 90, 1997, pp. 1-5.