

와이어 공급에 의한 Inconel의 Nd:YAG 레이저 클래딩

김재도* · 배민중** · 팽윤**

*인하대학교 공과대학 기계공학과

**인하대학교 공과대학 기계공학과 대학원

Nd:YAG Laser Cladding of Inconel with Wire Feeding

Jae-Do Kim*, Min-Jong Bae** and Yun Peng**

*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

**Graduate School of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract

Laser cladding processing allows rapid transfer of heat to the material being processed with minimum conduction into base metal, resulting in low total heat input. The effects of Nd:YAG laser cladding with wire feeding on the mechanical properties of Inconel alloy were investigated. Inconel alloy is used as the material of nuclear steam generator tubing because of its mechanical properties and corrosion resistance properties. The device for Nd:YAG laser cladding with wire feeding was designed. It consists of the wire feeding system, the wire cladding system and the shielding gas system which prevents the clad layer from being oxidized. Experimental results indicated that the wire feeding direction and position were important for laser cladding with wire feeding. The wire feeding speed should be adapted according to cladding speed for good shaping of clad layer. The effect of heat on the HAZ size can be limited and the growth of grain size of HAZ size was not serious. The hardness of clad layer and heat affected zone increased with increasing of cladding speed.

(Received January 21, 2000)

Key Words : Nd:YAG laser cladding, Wire feeding system, Shielding gas

1. 서 론

레이저 가공 기술은 고밀도의 열원을 이용한 가공법으로 표면 가공시 입열량이 적어 금속 가공시에 열영향부가 작고 열변형이 작다는 장점을 가지고 있다¹⁻³⁾.

고출력 레이저를 활용한 가공 기술은 크게 용접, 절단, 표면 처리 분야로 구별된다. 특히, 표면 처리 분야인 레이저 클래딩, 레이저 표면 경화는 표면에 우수한 기계적 특성을 부여하기 위한 가공법으로 연구·개발되어 왔다^{4,5)}. 레이저 클래딩은 국부적으로 금속 표면에 각종 재료를 합금화 또는 육성시켜 부품의 내식성, 내마모성, 내산화성을 향상시킨다. 레이저 클래딩 가

공은 제품의 기능 및 수명을 연장시킬 수 있으며 열영향부가 작고 모재와 금속 표면의 결합력이 우수하다는 특성을 가지고 있다^{6,7)}.

본 연구에서는 터빈 블레이드, 전열관 등의 주재료인 Inconel 합금에 대한 와이어 공급식 레이저 클래딩을 연구하는 데 목적이 있다. 원자력 발전소의 핵심 부품들은 장시간 사용하므로 마모, 부식 등에 의해서 수명이 단축된다. 터빈 블레이드, 전열관 슬리브, 증기 발생 튜브, 고압수 이송 파이프 등은 크랙, 편홀, 피로 등에 의해서 장시간 가동 중에 핵심 부품 내부가 손상되는 데 손상된 부위를 레이저 클래딩으로 금속층을 입혀서 수명을 연장시킬 수 있다^{8,9)}.

와이어 공급식 레이저 클래딩 기술은 금속 모재에 레

이저 열원으로 금속 와이어를 녹여 새로운 금속층을 입히는 기술이다. 모재는 가능한 적게 녹아야 하고, 모재의 열적 변형이 없어야 하며, 기공이 없는 금속 결합이 이루어져야 한다¹⁰⁾.

원전 핵심 부품 보수를 위한 와이어 공급식 클래딩 연구를 위하여 레이저 빔 전달 장치 제작, 와이어 자동 이송 장치 제작, 레이저 클래딩 장치를 제작하였다. 원전핵심 부품으로 주로 쓰이는 Inconel 600 모재에 Inconel 600 와이어, STS 와이어를 자동 공급시켜 Nd:YAG 레이저 빔의 열원으로 클래딩 실험을 하였다^{11~13)}.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험재료

클래딩 실험에 사용된 모재는 STS 304(100×50×2mm)과 Inconel 600(100×50×2mm)이다. 모재에 대한 화학조성은 Table 1에 나타내었다. 와이어는 직경이 0.3mm인 STS 304와 직경이 0.2mm인 Inconel 600을 사용하였다. Inconel 600은 Ni가 합금으로 고온부식환경에 사용하기에 적합하도록 설계되었다^{14,15)}. 이 합금은 높은 열전도도, 높은 기계적 강도를 가지고 있어서 고온부식환경에 강하기 때문에 발전소의 열교환기, 화학공업에서의 파이프 재료로도 사용되고 있다^{16,17)}. 특히, Inconel 600 합금은 주 합금 원소가 Ni-Cr-Fe인 오스테나이트계 고용체 합금으로 고온에서 안정하고, 성형성, 내부식성 및 고온기계적 특성이 우수하기 때문에 화학용기, 열처리 장치, 항공기의 엔진 및 구조재료에 사용되며, 특히 우수한 내식성으로 원자력발전소의 증기발생기 전열관 재료로 사용되고 있다^{18,19)}.

2.2 와이어 자동 공급장치

와이어 자동 공급장치는 자체 개발하여 설계·제작하였다. Fig. 1은 실험시 사용한 와이어 자동 공급장치이다. 공급장치 설계시 주안점은 가는 와이어(0.2mm-0.3mm)를 일정한 공급속도로 지속적으로 이송시키는 것과 와이어의 공급위치 제어의 용이성에

Table 1 Chemical compositions of Inconel 600 and STS 304

	C	Si	Mn	S	Cr	Ni	Cu
Inconel 600	0.01	0.1	0.3	0.01	15.4	75.1	0.2
STS 304	0.06	1.0	2.0	0.03	18	9.5	

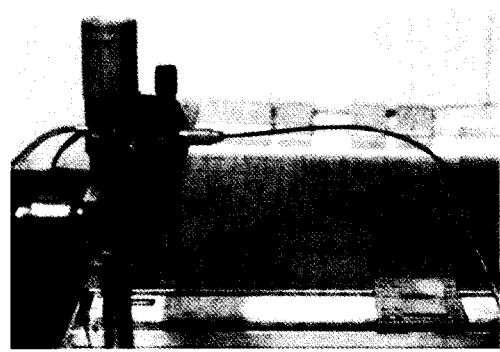


Fig. 1 Device for wire feeding

두었다. 와이어 공급위치 제어를 위해서 마그네트 척을 사용하였다. 와이어의 공급속도는 전원 조절기로 제어하였으며 공급장치는 간단한 부품으로 제작하여 실험시 공급이 중단되거나 문제가 발생하더라도 즉시 복구할 수 있도록 하였다. 와이어의 교체도 용이하도록 단순성을 가지도록 하였다.

2.3 레이저 클래딩 장치

레이저 클래딩 장치는 펄스형 Nd:YAG 레이저, 와이어 자동 공급장치, X축 이송 테이블로 크게 세가지로 나눌 수 있다. 펄스형 Nd:YAG 레이저는 광화이버(지름:1mm, 길이:20m)를 연결하여 실험위치에서 조사할 수 있도록 하였다.

실험장치 제작시 광화이버를 고정시키고 높이가 조절이 가능하도록 제작하였고 실험시 시편과 광화이버의 거리는16mm이었으며빔직경은 2.0 -2.5mm이었다. 실험에사용된 Nd:YAG 레이저는 빔모드 TEM00, 침투출력 5.5kW, 평균출력 220W, 반복율 20Hz이다. X축 이송 테이블은 광화이버의 초점이 중앙에 오도록 고정시켰고 테이블 위에 집계를 만들어 시편이 고정될 수 있도록 하여 양방향 이송이 가능하도록 설치하였다. 시편 위에 광화이버 초점위치에 보호가스관과 와이어 자동공급관이 가까이 위치할 수 있도록 공간을 확보해 두었다.

2.4 보호가스

보호가스는 펄스형 Nd:YAG 레이저의 광화이버 렌즈를 보호하고, 클래딩 가공시 산화현상을 막기 위해서 두 곳에서 분사하도록 설계하였다. 보호가스는 기본적으로 용융 금속의 산화를 방지하고, 주위의 기체와 증발된 입자에 의한 레이저 빔의 산란과 빔 확대를 최소화하여 레이저의 광학기구를 손상시키는 것을 방지할 목적으로 사용된다. 보통 헬륨가스, 질소가스, 이

산화탄소가스, 아르곤가스 등을 사용한다.

헬륨가스는 높은 이온화 에너지와 양호한 열전도도 때문에 가장 좋은 보호가스이나 공기보다 가볍기 때문에 가공 시편에 오래 머물지 못하고 값이 비싼 단점이 있다. 주 용도는 Ti, Zr같은 산화가 잘 되는 금속에 사용하면 좋다. 질소가스는 가격이 저렴하면서 헬륨가스와 거의 비슷한 성능을 보이므로 많이 사용되지만 취화를 유발할 수 있는 단점이 있다. 이산화탄소가스는 연속과 CO₂ 레이저의 경우는 사용하지 않는 것이 좋고, 펄스형 CO₂ 레이저인 경우만 사용해야하는 제약이 따른다. 아르곤가스는 공기보다 무겁고, 가격이 저렴해서 좋은 산화방지용 보호가스로 사용된다. 본 실험에서는 아르곤 가스를 보호가스로 선정하였다. 보호가스관은 위치 제어가쉽도록구리관을사용하였고유량은평균 15 l/min으로 분사하였다.

2.5 실험방법

예비실험은 STS 모재에 STS 304 와이어(직경 0.3mm)을 사용하여 클래딩 실험을 하였다. 먼저 레이저 출력을 변환시키면서 양호한 출력범위를 찾았으며, 광화이버의 초점의 이동, 와이어 공급속도 등을 변환시키면서 적절한 범위를 찾아 보았다. 본 실험에서는 일정한 레이저 출력(평균출력:220W)을 사용하였고 가공변수로는 테이블 이송 속도, 와이어의 공급 속도, 와이어의 공급 방향, 와이어의 직경 등이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 와이어 이송 방향과 공급 속도

와이어 이송 방향과 모재의 이송방향이 일치하지 않을 경우에는 와이어 공급이 지장을 받고 빠른 와이어 이송속도에서는 클래딩층이 제대로 형성되지 않았다. Fig. 2와 같이 와이어 이송방향과 모재의 이송방향이 일치할 때, 클래딩층이 가장 잘 형성되었다. 빠른 와이어 이송 속도로 인해서 완전히 녹지 않은 와이어도 이미 녹아 있는 모재의 용융부 옆에 의해서 녹기 때문에 가장 양호한 이송 방향으로 확인되었다.

레이저 빔 이송 속도가 일정할 때 와이어 공급 속도가 증가할수록 클래딩층 높이는 증가하는 반면 폭은 거의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 클래딩층 높이의 증가는 와이어 공급량이 증가함에 따라 빔 에너지가 와이어에 흡수되는 양이 증가하기 때문인 것으로 분석되었고, 폭이 변화하지 않는 것은 테이블 이송속도가 일정하기 때문에 모재의 단위면적당 입열되는 에너지

가 일정하기 때문이다.

와이어 공급 속도가 일정할 때 와이어 직경이 클수록 클래딩층의 높이는 증가하고 회석율은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 와이어 공급량이 증가함에 따라 빔 에너지가 와이어에 흡수되는 양이 증가하기 때문에 클래딩층 높이는 증가하지만 모재의 용융 면적은 감소한 것으로 분석되었다.

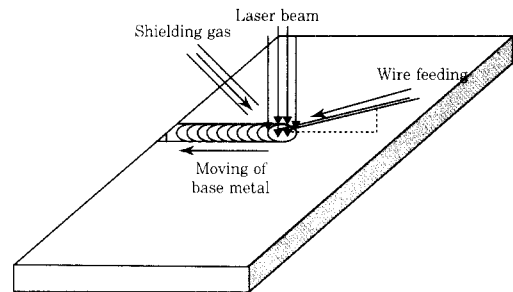


Fig. 2 Wire feeding direction

3.2 와이어 이송각도 및 클래딩 속도

모재로부터의 와이어의 이송각도는 약 15~30°가 양호하였다. 15°이하의 이송 각도는 레이저 빔 초점에 정확하게 이송시키기가 어려워 불연속적인 클래딩층이 형성되었다. 큰 이송 각도는 레이저 빔 초점에서 녹지 않고 그 전에 빔과 만나서 녹을 수 있기 때문에 기공 및 균열 등의 결함이 발생하였다. Fig. 3에서 이송각도와 클래딩층의 W/H비율 (W=Width, H=Height)관계와 클래딩층 상태에 대해서 나타내었다. 이송각도 약 30°이상일 경우 W/H 비율은 높으나 결함이 있는 클래딩층이 형성되었다.

레이저 출력과 와이어 공급속도를 일정하게 유지시킬 때 클래딩 속도가 증가할수록 클래딩층의 폭이 높이는 감소하였다. 이는 단위 시간당 입열되는 레이저 빔 에너지와 와이어의 양이 감소하기 때문이다. 클래

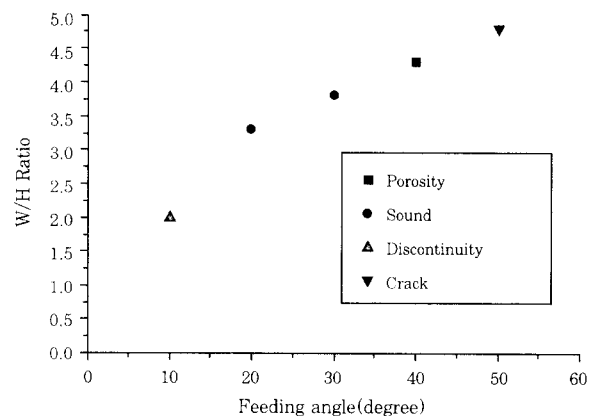


Fig. 3 Relationship between W/H ratio and feeding angle

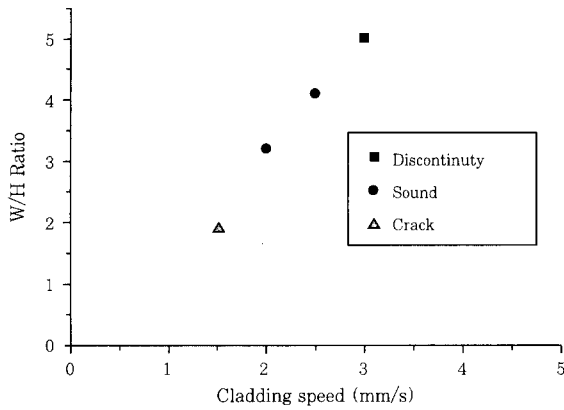


Fig. 4 Relationship between W/H ratio and cladding speed

딩 속도가 너무 빠르면 와이어가 완전히 용융되지 않고, 너무 느리면 입열되는 에너지가 과도하여 와이어가 증발되어 양호한 클래드층을 형성할 수 없었다. Inconel600 모재에 STS 304 와이어, Inconel 600 와이어로 클래딩한 경우 최적의 클래딩 속도는 두 경우 모두 2~2.5mm/s임을 알 수 있었다.

Fig.4에서 클래드층의 W/H비율로 양호한 상태와 불량한 상태를 구분하였다. 불량한 영역에서는 불연속 클래드층, 결함 등이 나타났으며 W/H 가 3 이상일 때 양호한 클래드 층이 형성되는 것으로 나타났다.

3.3 클래드층 표면

Fig. 4와 5는 모재와 와이어에 대한 클래딩 표면을 나타내고 있다. Inconel 600 모재에 STS 304와이어와 Inconel 600 와이어에 대한 클래딩층 표면에 모두 일정한 물결 모양이 나타나 있는데 이는 레이저 빔이 펄스파이기 때문이다. 상대적으로 STS 와이어로 클래딩할 때가 Inconel 와이어로 클래딩할 때보다 더욱 좋은 표면 거칠기가 형성되는데 이것은 STS와 Inconel의 화학조성 성분의 차이에서 기인한 것으로 분석된다.

그 외의 클래드 폭, 깊이 등은 비슷한 결과로 나타났는데 이는 STS 304와 Inconel 600의 용융점이 각각 약 1400℃와 1395℃로 비슷하며 열전도도(W/mK) 역시 약 14.9와 11.7로 비슷한 물리적 성질을 가지고 있기 때문인 것으로 예측된다. 또한 금속조직 측면에서 STS 304와 Inconel 600이 모두 오스테나이트 조직이므로 기계적 성질이 유사한 점도 영향을 끼치는 것으로 분석된다.

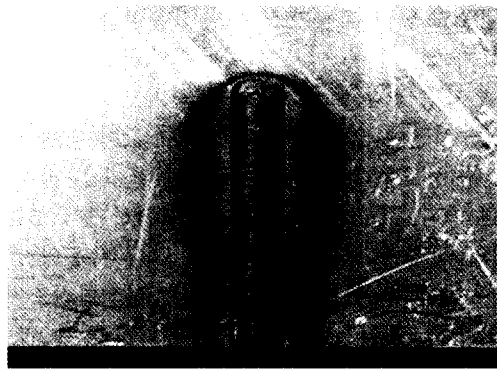
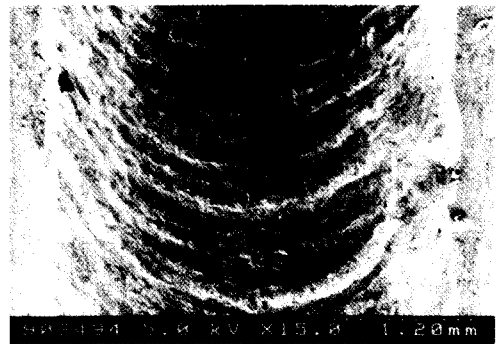
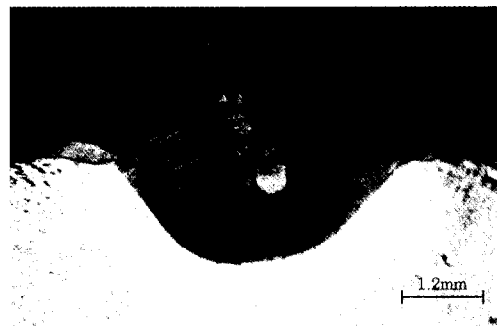


Fig. 5 The surface of clad layer when wire is completely melted



(a) Top view of clad layer



(b) Cross section of clad layer

Fig. 6 Cladding Inconel 600 on Inconel 600, cladding speed=1.5mm/s

3.4 비드의 형상 비교

클래딩 가공시작 위치에서 5mm 와 25mm 떨어진 곳의 클래드층 단면을 살펴보면 가공 초기에는 충분히 용융부가 녹는 시간이 부족하기 때문에 5mm 위치에서의 회석율이 25mm 위치에서의 회석율보다 작게 나타난다. 즉 클래딩 시간이 증가할수록 회석율도 증가하게 된다. Fig. 7과 Fig. 8에서 클래딩 속도가 증가할수록 클래드 층의 폭과 깊이가 감소하고 회석율 역시 감소하는 것을 알 수 있다.

3.5 미세 조직 및 열영향부

모재와 클래드층의 결합 조직에서 크랙은 발견되지 않았으며 매우 견고하게 결합된 것을 알 수 있었다. Fig. 9는 열영향부와 결합 구조를 나타내고 있는데 모재와 클래드층이 만나는 용융선 주위에 모재와 클래드

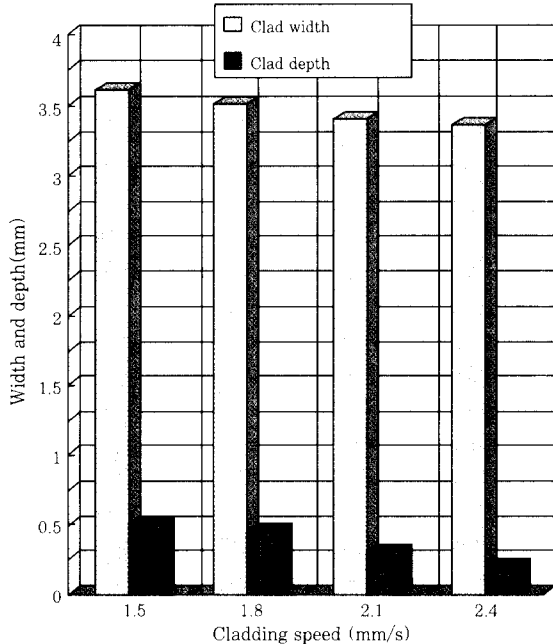


Fig. 7 Width and depth of melt pool at different cladding speed

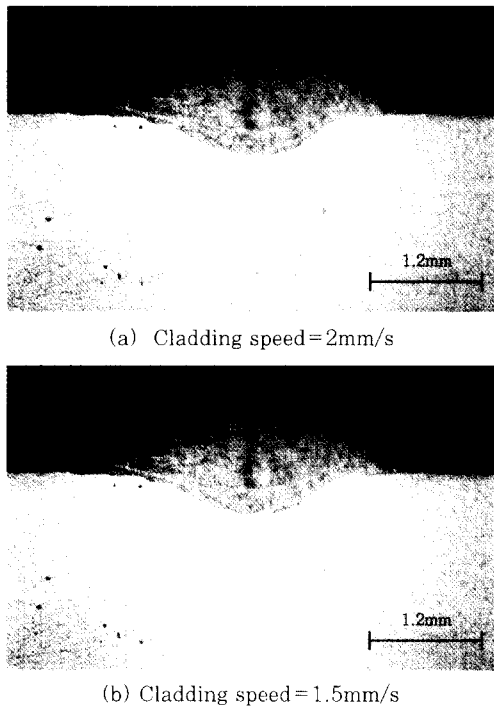


Fig. 8 Cross section of clad layer, 25mm from the beginning

층이 희석되어 결합된 부분과 모재의 열영향부를 보여주고 있다.

모재에서 클래드층이 가까운 위치일수록 열영향에 의해서 조직이 커진 것을 알 수 있었다.

열영향부 조직의 크기는 클래딩 시간과 클래딩 속도와 큰 관계가 있었다. 클래딩 속도가 증가하거나 클래딩 시간이 짧을수록 열영향을 받는 시간이 감소하기 때문에 조직의 크기는 작아지게 된다. 결국 냉각속도가 감소할수록 열영향부의 조직은 조대화된다는 것을 알 수 있었다.

3.6 경도 측정

Fig.10은 Inconel 600 모재에 Inconel 600 와이어로 클래딩했을 때 클래딩 속도에 따른 클래드층과 열영향부의 경도 측정의 결과를 나타낸 이다. 경도는 열영향부보다 클래드층에서 더 높게 나타났다. 또한 클래딩 속도가 증가할수록 모든 범위의 경도가 높게 측정되었다. 이는 모재보다 클래드층의 냉각속도가 더 크기 때문이다. 열영향을 많이 받을수록 조직이 커지며 경도가 낮아지는데 열영향부에서 클래드층의 용융

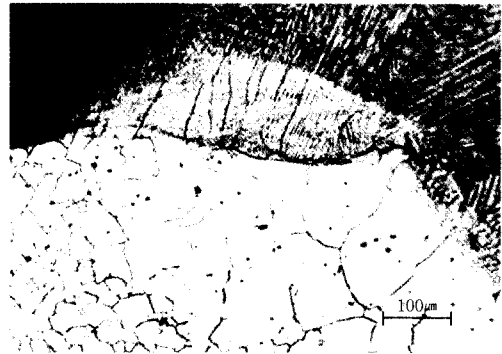


Fig. 9 Boundary between base metal and clad layer

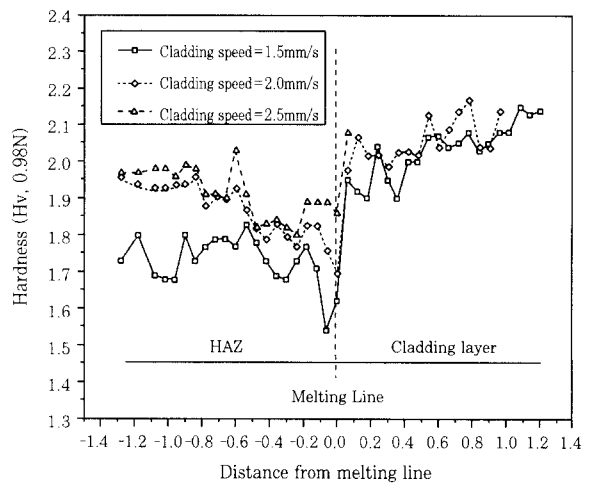


Fig.10 Hardness distribution of clad layer and HAZ

선에 가까운곳이 열영향을 더 많이 받으므로 조직이 가장 크고 경도가 가장 낮다. 결국 냉각속도가 경도와 열영향부 조직 크기에 큰 영향을 끼치는데 클래딩 속도가 증가할수록 냉각속도는 커진다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

- (1) 가장 양호한 와이어 이송 방향은 와이어가 이송되는 방향과 시편이 이동하는 방향이 같을 때이며 모재로부터의 와이어 이송 각도는 15~30°가 가장 적합하게 나타났다.
- (2) 시편의 이송 속도가 증가할수록 적은 열영향 때문에 열영향부의 조직 크기는 감소하였으며 경도는 증가하였다. 결국 시편의 이송 속도 증가는 냉각속도의 증가를 가져온다.
- (3) 클래드층의 경도보다 열영향부의 경도가 낮았으며 이는 냉각속도의 차이에서 기인한다. 또한 열영향부에서 클래드층에 가까울수록 열영향에 의해서 경도는 낮아지고 조직은 조대화 된다.
- (4) 적절한 가공 변수들의 조건하에서 클래딩이 이루어진 경우 금속의 클래드층이나 열영향부에서 크랙은 발생되지 않았으며, 모재와 클래드층은 견고하게 결합되었다.

참 고 문 헌

1. P. J. Oakley : Laser Heat Treatment and Surfacing Techniques, The Welding Institute Research Bulletin, (1981), pp. 1~11
2. S. Kimura, N. Sano, and S. Sugiyama : Laser Heat Treatment with Beam Focussing Optical Systems, Toshiba Co.
3. M. Takemoto, Masanobu Shinya : Coating of Aluminide Intermetallic Compounds by Laser Fusion Reaction, Proc. of LAMP' 92, pp. 773~778
4. R. O. Lund, David E. Stoltzman: Optimization of FocussedSpot Characteristics for Laser Beam Material Processing, Proc. of ICALEO' 92, pp. 1~9
5. E. S. Cho, Young Ju Kang, Jae Do Kim : CO₂ Laser Cladding of Engine Valve Seat, Proc of APLS' 98.
6. W. F. Smith : Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-hill, U.S.A., pp. 446
7. R. Walker : Applying Multikilowatt CO₂ Laser in Industry, Laser and Application, Apr. (1984), pp. 62~69
8. J. M. Darchuk and L. R. Migliore : The Basic of Laser Welding, Laser and Application, (1995), pp. 59~66
9. E. A. Metzbowler, P. E. Denny, F. W. Fraser and D. W. Moon : Mechanical Properties of Laser Beam Welds, (1984), pp. 39~43
10. J. Suh et al : CW CO₂ Laser Beam Welding and Formability of Zn-coated Steel Plates, J. of KWS, Vol. 14, No. 3, (1996), pp. 140~146
11. 장용, 전병철, 김재도, 정진만, 김철중, 1997, "펄스형 Nd:YAG 레이저에 의한 Inconel 용접의 기계적 특성 연구," 대한용접학회 춘계학술대회, pp. 99-101.
12. Donald C. O'Shea : Elements Modern Optical Design, John Wiley & Sons, (1985), p. 261, pp. 282~278
13. J. Wilson, J. F. B. Hawkes : Laser Principles and Applications, Prentice Hall, (1987), p. 99, p. 167
14. Corrosion of Nickel Base Alloys, Metals Handbook, 9th Ed., ASM International, U.S.A., pp. 641
15. Y. T. Lee and Y. T. Hyun : Application and Prospect of Titanium Alloy for Automobile Parts, Korea Institute of Metals and Materials, Vol. 8, No. 3, (1997) pp. 286-296
16. Y. Arata, I. Miyamoto : Some Fundamental Properties of High Power Laser Beam as a Heat Source(Report 1), Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 3, No. 1 (April, 1972)
17. W. F. Smith : Structure and Properties of Engineering Alloys, McGraw-Hill, U.S.A., (1981), pp. 466
18. Corrosion of Nickel Base Alloys, Metals Handbook, 9th Ed., ASM International, U.S.A., (1987), pp. 641
19. R. Douecke, S. Odar and B. Stellway : Operating Experience with Steam Generators, Service Report Power Plants, (1989), pp. 4