연구논문

공정 변수에 따른 Al 모재와 Fe계 합금 분말의 레이저 오버레이층 거동

유연곤* · 강남현** · 김철희* · 김정한* · 김목순***

*한국생산기술연구원 정밀접합팀
**부산대학교 재료공학부
***인하대학교 금속공학과

Effect of Process Parameters on Laser Overlay Behavior of Fe-based Alloy Powder on Aluminum Substrate

Yeon-Gon Yoo*, Namhyun Kang**, Cheol-Hee Kim*, Jeong-Han Kim* and Mok-Soon Kim***

*Advanced Joining Technology Team, KITECH, Incheon 406-880, Korea
**School of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea
***School of Materials Science and Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

Abstract

A joining of dissimilar metal combination faces significant problems such as poor strength and cracking associated with brittle intermetallic compounds (IMC) formed. An application of laser allows low heat input; leading to less dilution and smaller heat affected zone. The CO_2 laser overlay was conducted on an AC2B alloy with feeding Fe-based powders. The overlay area was significantly influenced from the travel velocity rather than the powder feeding rate. The interface between the overlay and substrate consisted of the hard and brittle IMC ($FeAl_3$, Fe_3Al, Fe_2Al_5), which initiating and propagating the crack. The reciprocating test for the slide wear was conducted on a multi-pass overlay experiment. Comparing with the multi-pass overlay with no overlap, the overlay with 50% overlap showed better wear resistance.

* Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr
(Received October 25, 2006)

Key Words : CO_2 laser, Cladding, Fe-based powder, Al substrate, Crack, Overlay, Wear resistance

1. 서 론

에너지 부족과 환경문제에 직면하여 연료전지, 배터리-가솔린 엔진의 하이브리드카, 그리고 초경량 자동차 등 차세대 자동차를 연구·개발하고 있다. 경량화 자동차를 위한 연구 결과 차체나 엔진 부분에서 알루미늄의 적용이 증가 하고 있다[1]. 엔진 부분에서도 내열성을 가진 고강도 내마모 알루미늄 소재 기술에 대해서 관심이 증가하고 있다. 알루미늄은 높은 열전도율과 가볍다는 장점이 있지만 마모 특성의 개선이 필요하다. 알루미늄에 내마모성을 부여하기 위한 방법 중 엔진 밸브시트 제작을 위해서는 레이저 클래딩 기술이 적합하다[2,3]. 일반적으로 레이저 클래딩 공정은 내마모성, 내식성, 내열성 등의 특성을 모재 표면에 부여하는 기술이다. 레이저 클래딩은 낮은 입열로 인한 모재의 변형을 최소화 하고 미세한 부분에 국부적으로 클래딩 할 수 있기 때문에 협소한 부위의 3차원 형상에 대한 육성용접에 적합한 기술이다[4].

하드페이싱용 내마모 재료로는 텅스텐탄화물(WC)[5]과 Co계 스텔라이트 합금 분말이 주로 사용되고 있으나, 텅스텐탄화물(WC)은 고가이고 Co계 스텔라이트

합금은 환경문제로 인하여 사용을 꺼리고 있기 때문에, Fe계(Fe-Cr-C) 분말을 선정하였다. Fe계 분말은 기계적 성질이 우수하고 가격이 저렴하다는 장점이 있다[6]. 이와 같이 필요에 의해 알루미늄 경량화 소재와 내마모 Fe계 재료를 접합하기 위해서는 클래드층과 모재 사이의 계면 부근에서 발생하는 취약한 금속간화합물(Intermetallic Compounds)로 인한 균열을 조심하여야 한다[7].

본 연구에서는 레이저 클래딩의 공정 변수에 따른 클래드층의 형상, 계면 영역에서의 균열과 금속간화합물(IMC)거동 및 기계적 특성 평가를 수행 하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

모재는 자동차 실린더헤드에 사용되고 있는 AC2B로 하였으며, 빔의 흡수율을 증가시키기 위하여 샌드블라스팅 후 초음파 세척을 하였다. Fe계 분말은 4종류(Fe, Fe-Cr-C, Fe-Cr, Fe-Si)의 분말을 혼합기를 이용하여 Fe-20Cr-1.7C-1.1Si의 비율로 혼합하여 사용하였다. Fe계 오버레이 분말은 대기 상에 존재하는 수분 제거를 위하여 40~45℃로 가열하면서 실험하였다. 모재와 분말의 합금 조성은 Table 1에 나타내었다.

2.2 실험방법

본 실험에서는 12kW CO_2 레이저와 분말 송급 장치를 사용하여 레이저 오버레이 실험을 실시하였다. 레이저 오버레이 공정은 Fig. 1과 같이 모재를 고정하고 레이저 헤드가 이동하면서 분말을 공급하였으며, 레이저가 분말공급 노즐을 후행하는 방식으로 실시하였다. 레이저 오버레이의 주요 공정 변수는 Table 2에 나타내었다. CO_2 레이저의 초점 직경은 400㎛로 넓은 면적을 오버레이 하고자 할 때는 부적합하다. 따라서 원하는 초점 직경을 얻기 위해 CO_2 레이저의 특성상 defocusing 하여 실험 하였고, 아노다이징 알루미늄 시편을 이용하여 초점 직경을 측정하였다.

보호가스의 경우 유량이 작을 때에는 보호가스로서의 역할과 파우더 이송에 어려움이 있었고, 유량이 많은 경우는 안정된 비드 형성에 악영향을 끼치므로 적절한 유량을 선택하였다. 최적의 초점 직경과 보호가스 유량을 결정한 후 다른 공정변수인 출력, 레이저 열원 이송속도 및 분말공급량에 따른 오버레이층의 형상 거동을 관찰하였다. 그리고 최적의 레이저 오버레이 조건을 사용하여 다층 오버레이 시편을 제작하였으며, 금속간화합물의 거동 및 내마모성에 대한 기초연구를 수행하였다.

One-pass 공정으로 마친 시편의 경우 단순히 "오버레이", multi-pass 공정을 수행한 시편의 경우에는 "다층 오버레이"로 용어를 통일하였다. 모재 희석을 최소한으로 하고 안정된 오버레이를 얻기 위하여 최적의 조건에서 다층 오버레이를 Fig. 2와 같은 방법으로 실행하였다. 다층 오버레이의 내마모성을 시험하기 위하여 50% overlap 시편과 no overlap 시편을 준비 하였다. 오버레이층은 박리되는 경향이 있으므로 두 층으로 두께를 제한하였다[8].

Table 1 Composition of the powder and the substrate (Wt%)

	Al	Fe	Cr	Cu	C	Si
AC2B	Bal.	-	-	3	-	6
Powder	-	Bal.	20	-	1.7	1.1

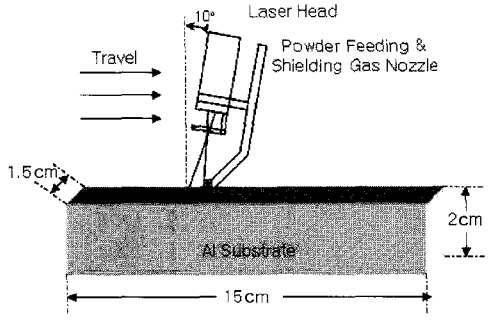

Fig. 1 Diagram of the laser overlay process

Table 2 Parameter of laser overlay process

Parameter	Values
Power(kW)	3, 2.5, 2, 1.5
Travel Speed(㎜/min)	180, 150, 120, 90
Powder Feeding(g/min)	3.6, 4.2, 4.8, 5.4
Spot Size(㎜)	3.5
Shielding Gas(ℓ/min)	4(Ar 99.9%이상)

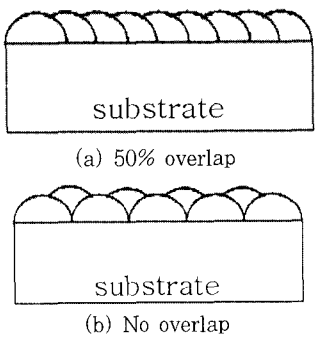

Fig. 2 Multi-pass overlay procedures

3. 실험결과 및 고찰

오버레이층의 단면은 클래드층, post-molten층 그리고 모재로 크게 3부분으로 나누어진다. 레이저 오버레이 공정변수에 따른 오버레이층의 형상 거동에 대한 연구를 위하여 단면을 Fig. 3과 같이 정의하였다. Post-molten영역은 레이저 빔의 영향에 의해서 녹은 영역이 아닌 용융된 Fe-Al 합금층의 열에 의해서 녹은 후 응고된 영역으로 모재와 같은 조성을 가지지만 더욱 미세한 조직을 가지는 응고부이다. Post-molten영역의 미세조직은 모재보다 미세하였으며 클래드층과 같이 columnar-dendritic 미세조직을 보였다.

3.1 공정변수에 따른 오버레이층의 거동

Fig. 4에서는 출력이 증가하고 속도가 느려짐에 따라 post-molten영역의 폭(W_p)이 증가하는 현상을 보여주고 있다. 이는 출력과 함께 모재에 대한 열영향이 증가한다는 것을 나타낸다. 1.5kW의 낮은 출력과 180mm/min의 빠른 속도에서는 모재의 용융이 전혀 이루어지지 않고 오버레이층도 형성되지 않았다. 속도가 150, 120, 90mm/min으로 낮추었을 때 공정 시작 부분에서부터 모재가 녹지 않고 각각의 속도에 따라 모재의 용융위치가 다르게 나타났다. 반면, 3kW의 출력에서는 비드 외관의 형성은 잘 이루어졌으나 단면 관찰시 많은 양의 균열이 발견되었다. 그러므로 적정 출력은 2kW로 정하였다.

Fig. 5에서는 출력을 2kW로 고정하고 분말 공급량

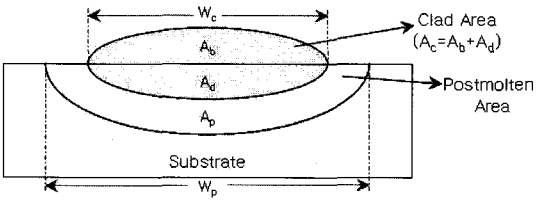

Fig. 3 Classification of laser overlay cross-section

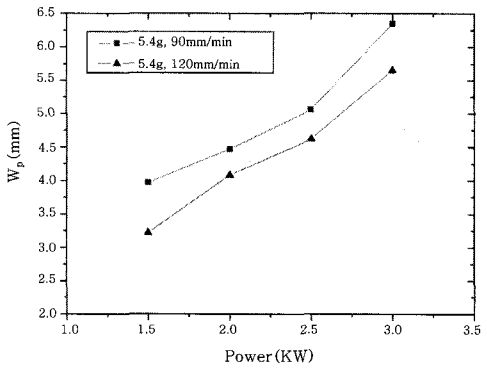

Fig. 4 W_p as a function of laser power

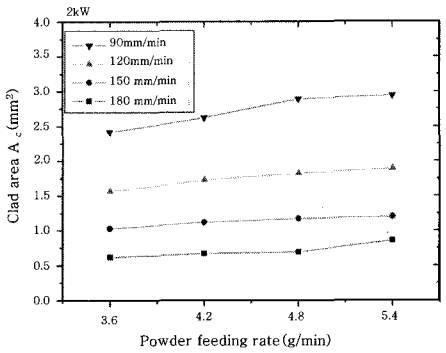

Fig. 5 A_c as a function of powder feeding rate

과 속도에 따른 클래드층의 단면적(A_c)에 대한 거동을 설명하고 있다. 분말 공급량이 증가하고 속도가 감소하면서 A_c는 증가하는 것을 알 수 있다. 레이저 이송속도를 90mm/min으로 고정하고 분말공급량을 5.4g/min에서 3.6g/min으로 감소하였을 경우, 분말공급량을 33% 감소하였더라도 A_c는 2.9mm^{2}에서 2.4mm^{2}로 17% 감소하는데 그쳤다. 그러나 분말공급량을 5.4g/min으로 고정하고 레이저 이송속도를 90mm/min에서 120mm/min으로 증가하였을 경우, 레이저 이송속도를 33% 증가하면 A_c는 2.9mm^{2}에서 1.9mm^{2}으로 34% 감소하는 것을 볼 수 있다. 즉, 분말 공급량의 감소보다 레이저 이송속도가 감소함에 따라 A_c의 감소에 미치는 영향이 더 우세하였다. 그리고 분말 공급량이 급격히 증가하는 경우(9g/min 이상)에는 서로 다른 열팽창계수로 인하여 오버레이층이 박리되는 현상을 나타내었다.

3.2 One-pass 오버레이층에서의 Interface Crack Ratio (ICR)

Fig. 6에서 Interface Crack Ratio(ICR)를 정의하였고, 이를 Eq. 1과 같이 수식으로 나타내었다. Fig. 7은 각각 클래드층의 계면 영역에서 발생하는 균열, 계면 영역과 post-molten영역의 사이에서 발생하는 균열, postmolten영역에서 발생하는 균열의 유형에 대해서 보여주며 이 모든 균열을 주사전자현미경(SEM, ×1,000)으로 관찰하였을 때, 확인된 균열을 ICR 계산

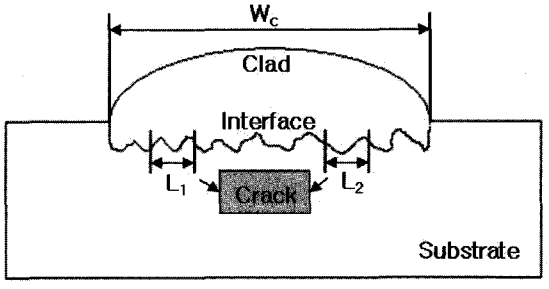

Fig. 6 Diagram of the quantitative analysis for ICR

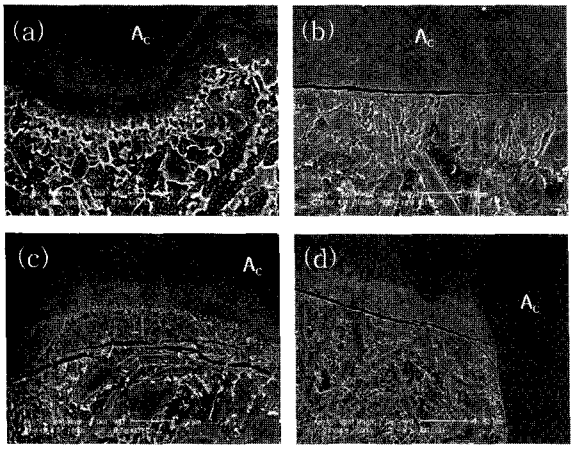

Fig. 7 Laser overlay cross-sections showing various crack patterns (a) crack above interface, (b) crack at the interface, and (c) (d) cracks below the interface

에 적용하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이 오버레이층 끝단에서 반대쪽 끝단까지 균열 또는 IMC가 연속적으로 발생하지는 않았다. 이러한 이유로 정량적으로 균열 현상을 분석하고자 ICR 개념을 활용하였다.

$$ICR = \frac{\sum_{i=1}^{N} L_i}{W_c} \times 100 \quad (1)$$

클래드층과 post-molten영역 사이의 계면에서 발생하는 균열을 정량적으로 평가하기 위하여 시편을 일관성 있게 모든 공정 조건에서 시작 지점의 2/3지점을 절단하여 채취하였다. ICR은 공정조건에 따라 대표시편 1개를 측정하였고, 분말공급량 및 이송속도에 따라 Fig. 8에 나타내었다. 이송속도에 따른 뚜렷한 경향을 찾을 수는 없었지만 분말공급량이 가장 작은 3.6g/min일 때 ICR이 가장 작게 나타났다. 특히 2kW, 3.6g/min, 180mm/min일 때 ICR 0%인 건전한 오버레이층을 형성하였다. 균열의 양이 가장 낮은 분말공급량을 사용한 조건에서 최저 값을 보인 것은 Fe계 합금분말이 Al 모재와 희석되는 정도에 따라 계면에서 Fe-Al계 IMC가 형성되며, 계면 부근에서의 희석 정도는 오버레이층의 전체 희석율로는 추정이 어려우므로 보다 자세한 연구가 필요할 것으로 생각한다.

ICR 실험의 경우 각 공정조건마다 대표시편에 대한 결과를 해석하였고 반복성 검사를 수행하지는 못하였으나, 다음과 같은 이유로 데이터의 타당성을 인정하게 되었다. 첫째 Figs. 4, 5에서 오버레이층 형상의 경우 분명한 경향성 및 반복성을 확인하였다. 둘째 Fig. 8에서 분말공급량이 3.6g/min인 경우 4.2~5.8g/min 조건에 비하여 모두 낮은 ICR 값을 보였다. 그러나 보다 높은 신뢰성의 ICR 분석을 위해서는 반복성 검사를 통한 통계학적인 ICR 분석을 수행하는 것이 바람직하며, 이를 통하여 균열 발생의 정확한 메커니즘을 연구할 수 있을 것으로 판단한다.

3.3 One-pass 오버레이층에서의 경도

오버레이층의 단면에서 계면 영역을 기준으로 클래드층과 모재 사이의 경도를 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 측정하였다. 하중은 2.9427N(300g), 시간은 10초의 조건으로 측정한 결과, Fig. 9에서 나타나듯이 모재보다는 post-molten영역에서 H_v 20~30 이상의 값을 나타내었다. 또한 계면 영역에서 H_v 700~800의 높은 경도값을 보였다가 오버레이층 내부로 갈수록 H_v 450 정도로 감소하였다. 계면 영역에서 높은 경도값을 보이는 것은 Fe-Al계 금속간화합물(IMC)의 형성이 계면 영역에 집중 되어 있음을 보여주는 단적인 증거이다. 거의 모든 공정 조건에서 IMC에 의한 경도 증가 현상을 확인하였으나, Fig. 8에서 알 수 있듯이 오버레

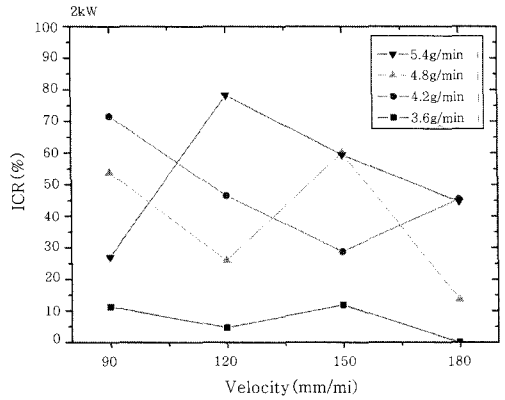

Fig. 8 ICR as a function of travel velocity and powder feeding rate

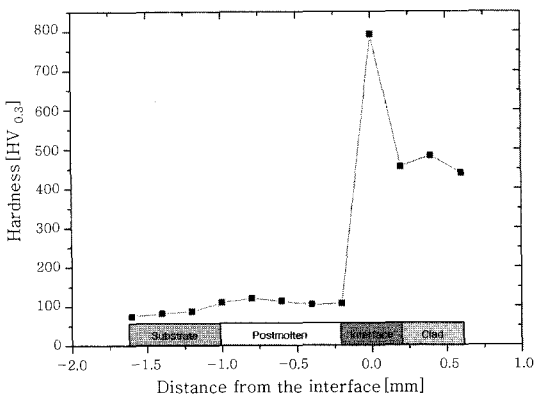

Fig. 9 Micro hardness along the depth of laser overlay

이층 계면 전 구간에서 모두 균열이 발생하지 않았으며 IMC 역시 계면 전 구간에서 균일하게 발생하지 않았다. 계면을 사이로 IMC가 형성된 부분과 형성되지 않은 부분에 대한 결정학적인 실험이 보충되고 있으며, 이를 통해서 균열의 발생원인을 금속재료학적으로 규명할 수 있을 것으로 생각한다.

3.4 One-pass 및 다층 오버레이층에서의 금속간화합물(IMC)

Fig. 10은 오버레이층의 단면 이미지와 EDS 분석 결과이다. 오버레이층의 비드 상부에서부터 모재까지 100㎛ 간격으로 EDS분석을 하였으며, 분석된 지점을 SEM 이미지 상에 A~J로 나타내었다. D, E, F 구간에서 Fe에 고용된 Al의 Wt%는 9.13, 53.93, 69.04로 각각 나타났다. 이는 상태도로 확인 하였을 때 Fe_3Al, Fe_2Al_5, $FeAl_3$가 형성된 것으로 예측된다. 이로부터 Al-Fe 이종재료의 접합시 오버레이층과 모재 사이의 계면 영역에서 금속간화합물이 형성됨을 확인할 수 있었다.

SEM과 EDS 분석으로 오버레이층과 모재 사이의 계면 영역에서 형성된 금속간화합물의 상분석을 위해 다층 오버레이 시편을 사용하여 XRD 분석을 하였다. 다층 오버레이 시편은 ICR이 0%인 2kW, 3.6g/min, 180mm/min의 조건에서 수행하였다. 50% overlap 시편과 no overlap 시편은 계면 영역의 두께에 따른 상분석을 위해 Fig. 11과 같이 200㎛ 간격으로 연마하여 각각 4개씩 준비하였다.

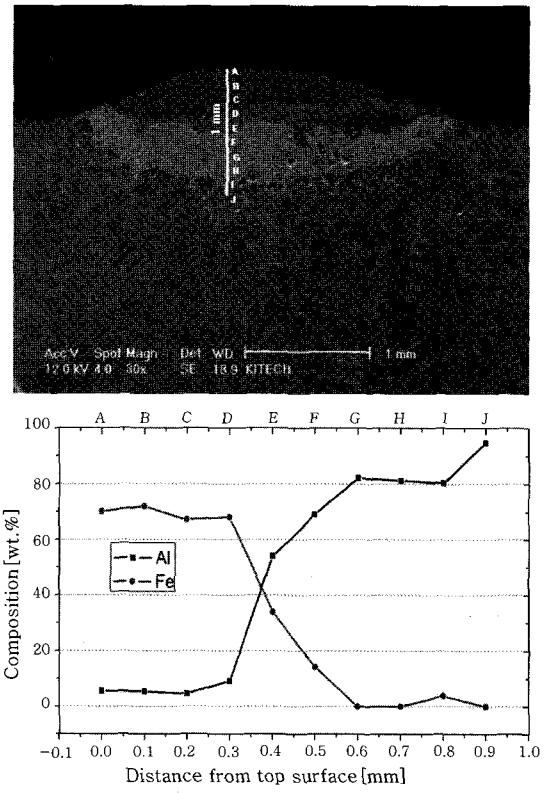

Fig. 10 SEM image of laser overlay cross-section for EDS analysis

Figs. 12, 13에서 overlap 유무에 따라 다층 오버레이 계면 영역에서 발생하는 Fe_3Al, $FeAl_3$, Fe_2Al_5와 같은 취약한 Al-Fe 금속간화합물층이 형성되었음을 알 수 있다. 50% overlap 시편의 경우 no overlap 시편과는 다르게 계면 영역의 하단부분에서 Fe_2Al_5상이 나타났다. 통상적으로 Fe-rich 금속간화합물보다는 Al-rich 금속간화합물의 경우 매우 취약한 기계적 특성을 가진

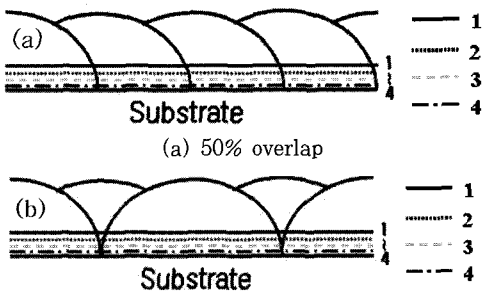

Fig. 11 Schematic cross-section of XRD specimen number

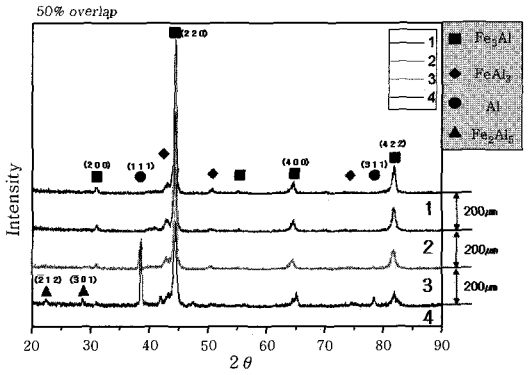

Fig. 12 Phase analysis for 50% overlap multi-pass overlay

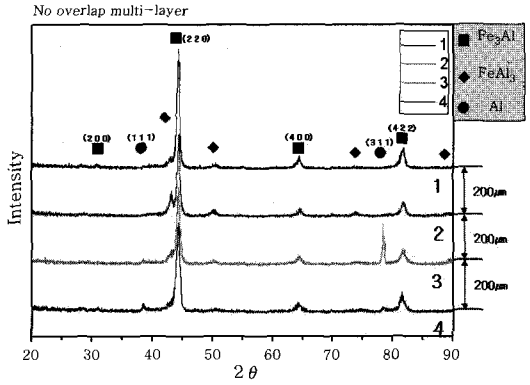

Fig. 13 Phase analysis for no overlap multi-pass overlay

다. Fe_2Al_5상과 $FeAl_3$상을 동시에 가지고 있는 50% overlap 시편과 $FeAl_3$상을 단독으로 가지고 있는 no overlap 시편에 대한 비교 분석은 매우 중요한 연구가 될 것으로 판단되나, 이번 연구의 범위에는 포함되지 않았다. 금속간화합물의 유형과 양이 계면 균열 및 마모성과도 관련이 있을 것으로 판단된다.

3.5 다층 오버레이층에서의 내마모 실험

다층 오버레이 공정을 마친 시편은 표면이 불규칙하므로 표면을 연마한 후 면접촉 왕복 미끄럼 마모시험을 수행하였다. 내마모 실험은 Table 3의 조건으로 실험한 후 시편의 무게 손실과 내마모 재료로 사용되고 있는 Ni-based Deloro50과 비교하였다. Fig. 14는 50% overlap 시편과 no overlap 시편의 단면 이미지이다.

Table 4의 결과에서 나타나듯이 no overlap 다층 오버레이 조건보다 50% overlap의 조건에서 내마모성이 좋다는 것을 알 수 있었다. 이는 Fig. 14에서 볼 수 있듯이 오버레이층의 건전성과도 연관성이 있을 것으로 판단되며, Figs. 12-13의 XRD 결과에서 Al-rich 금속간화합물의 유형과 연관시켜 보면 $FeAl_3$ 및 Fe_2Al_5를 동시에 가지고 있는 50% overlap 조건이 $FeAl_3$를 단독으로 가지고 있는 no overlap 다층 오버레이 조건보다 내마모성이 좋게 나타난 것으로 판단된다. No overlap의 경우 패스간의 불균일한 오버레이층 성분으로 인하여 내마모 특성이 저하된 것으로 판단된다. 금속간화합물과 내마모성에 대한 연구는 마모표면 분석에서 마모기구 해석을 체계적으로 수행할 계획이다. 결론적으로 50% overlap 시편과 no overlap multi-layer 시편 모두 Ni-base Deloro 50보다 우수한 내마모성을 나타내었다.

Table 3 Reciprocating wear test conditions

Load	15ksi
Friction velocity	3 mm/sec
Friction stroke	9mm
Reciprocating frequency	100 cycles
Test Temperature	25℃, 100℃

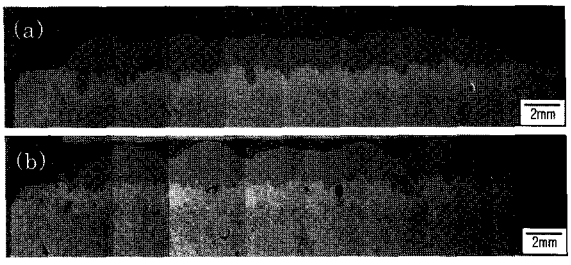

Fig. 14 SEM images of the multi-pass overlay cross-section (a) 50% overlap and (b) no overlap

Table 4 Reciprocating slide wear test

Specimen	Temp(℃)	Weight loss(mg)
50% overlap	25	0.8
No overlap		2.1
Ni-base Deloro 50		116.1
50% overlap	100	0.4
No overlap		5.6
Ni-base Deloro 50		164.5

※ Ni-based Deloro 50 (Wt%) ⇒ Ni-12.31Cr-12.31Fe-3.62Si-2.04B-0.6C

4. 결 론

본 연구를 통하여 Al 모재 위에 Fe계 합금 분말을 사용한 레이저 오버레이의 가능성을 보여주며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 분말 공급량이 증가하고, 이송속도가 낮아짐에 따라 클래드층의 영역(A_c)도 증가하였다.

2) 분말 공급량보다는 이송속도가 클래드층의 영역(A_c)에 미치는 영향이 더 우세하였다.

3) 분말공급량이 4.2~5.6g/min일 때 보다 3.6g/min일 때 계면에 발생한 균열(ICR)은 감소하였다.

4) 계면 영역에서의 Fe_3Al, $FeAl_3$, Fe_2Al_5와 같은 취약한 Al-Fe 금속간화합물(IMC)의 형성으로 인하여 높은 경도값을 나타내었으며, 이는 균열이 발생하고 전파된 원인으로 보인다.

5) Fe계(Fe-20Cr-1.7C-1.1Si)합금 분말은 50% overlap 시편의 내마모성이 no overlap 다층 오버레이 보다 뛰어난 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. W.S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A.J. Wittebrood, P. De Smet, A. Haszler, A. Vieregge. : Recent develpment in aluminium alloys for the automotive industry, Materials Science and Engineering **A280** (2000) 37-49
2. Kawasaki, M. ; Takase, K. ; Kato, S. ; Nakagawa, M. : Development of Engine Valve Seats Directly Deposited Onto Aluminum Cylinder Head by Laser Cladding Process, SAE transactions, **101-3** (in Japanese)
3. J. Arnold and R. Volz, : Laser Powder Technology for Cladding and Welding, Journal of Thermal Spray Technology **Vol. 8(2)** June 1999 243~248
4. Jea-Do Kim, Byung-Cheol Jeon, Young-Gon Lee and Dong-Soo Oh, : Characteristics of CO_2 Laser Cladding with High Viscosity Mixed Powder, : Journal of KWS, **19-5** (2001) (in Korean)
5. Nam-Hyun Kang, Hyun-Byung Chae, Jun-Ki Kim,

Jeong-Ha Choi and Jeong-Han Kim, : Abrasion Wear Behavior of Recycled Tungsten Carbide Reinforced Metal Matrix Composite, Korean Journal of Materials Research **13-12** (2003) (in Korean)
6. Kown-yeong Lee, Sung-hoon Lee, Yangdo Kim, Hyun Seon Hong, Young-min Oh and Seon-jin Kim : The effects of additive elements on the sliding wear behavior of Fe-base hardfacing alloy, Wear. **255** (2003), 481-488 (in Korean)
7. A. Wang, C. Fan, C. Xie, W. Huang, and K. Cui, : Laser Cladding of Iron-Base Alloy on Al-Si Alloy and Its Relation to Cracking at the Interface, JMEPEG (1996) **vol.5**, 775-783
8. The Korean Welding Society, "welding & Joining Handbook", 736 (in Korean)