

Al-Fe 레이저 오버레이층 경계면에서의 금속간화합물 거동

강남현* · 유연곤** · 이창우*** · 김정환***

*부산대학교 재료공학부

**신한다이아몬드 R&BD 신소재연구팀

***한국생산기술연구원 정밀접합팀

Intermetallic Compounds Behavior at Laser Overlay Interface of Aluminum and Fe-based Powder

Namhyun Kang*, Yeon-Gon Yoo**, Chang-Woo Lee*** and Jeong-Han Kim***

*Department of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**R&BD Center, Shinhan Diamond Inc., Incheon 406-850, Korea

***Advanced Joining Technology Team, KITECH, Incheon 406-880, Korea

Abstract

A CO₂ laser overlay was conducted by using a Fe-based powder on the AC2B aluminum substrate. Cracks and intermetallic compounds (IMC) were observed inconsistently along the interface between the overlay and post-molten layer. A scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive spectroscopy (EDS) detected some Fe-rich IMC (Fe₃Al, FeAl) as well as the brittle Al-rich IMC (Fe₂Al₅, FeAl₃). Micro vickers hardness proved the formation of Al-rich IMC (FeAl₃) along the interface by showing HV0.1 800~900. Furthermore, nano indentation was successfully applied to investigate the behavior of IMC more precisely than the micro vickers hardness.

*Corresponding author : nhkang@pusan.ac.kr

(Received April 6, 2007)

Key Words : CO₂ laser, Overlay, Fe-Al intermetallic compound, Interface, Micro vickers hardness, Nano indentation

1. 서 론

이종재료의 접합기술에 대한 필요성은 현대의 모든 산업에서 공통적으로 요구되고 있으며, 특히 자동차 경량화에 따라 알루미늄 등 초경량 재료가 각광을 받으면서 초경량 재료의 기본적인 특성에서 만족하지 못하는 기능적 특성을 이종재료 접합기술을 통해서 실현하고 있다. 본 저자는 알루미늄의 내마모성 특성을 향상시키고자 철계합금 분말을 사용하여 레이저 오버레이 공정을 수행하여 알루미늄 모재와 Ni-base Deloro 50 합금보다 우수한 마모특성을 가지는 오버레이층을 만드는데 성공하였다¹⁾. 그러나 주로 오버레이층과 post-molten

층의 경계면에 발생하는 균열을 완전히 제거할 수 없었으며, 이 균열은 Fe-Al의 조성에 따라 발생하는 취약한 금속간화합물(IMC) 때문이라 판단된다. Fe-Al의 조성에 따라 생성되는 IMC의 종류, 조성 및 비커스 경도는 표 1에 나타내었다. Al-rich IMC (FeAl₃, Fe₂Al₅)의 경우 경도값이 매우 높아 취약한 특성을 가지므로 이종재료 접합 시 피해야 할 대상 중 하나이다.

Fe-Al 이종재료의 접합에 대한 실험은 국내외 많은 논문에서 소개되었다¹⁻⁷⁾. 거의 모든 실험에서 공정변수 또는 접합부 디자인을 최적화하여 건전한 Fe-Al 접합부를 제작하는 것에 초점을 맞추었다. 접합 공정은 대부분 집적도가 높아 모재에 열변형을 최소화 할 수 있는 레이저를 많이 사용하였다. 그러나 본 저자의 판단

Table 1 Composition and Vickers hardness of intermetallic compounds of Fe-Al⁽²⁾

Type of intermetallic compound	Wt.% of Aluminum	Vickers hardness (9.8 N)
FeAl ₃	58.5 ~ 61.3	892
Fe ₂ Al ₅	53.0 ~ 57.0	1013
FeAl	12.8 ~ 37.0	470
Fe ₃ Al	13.0 ~ 20.0	330

으로 기존 실험에서는 Fe-Al 접합부 경계면에서 발생하는 IMC의 판별 그리고 이에 따른 균열 및 기계적 특성 거동에 대한 체계적인 연구가 진행되지 않았다고 생각한다. 따라서 본 실험은 알루미늄모재에 철합금 분말을 레이저 오버레이 한 시편에 대해서 IMC 거동을 연구하였다. IMC의 성분분석 및 경도 측정을 통하여 IMC의 종류를 판별하고 또한 나노압입시험의 적용 가능성을 확인하고자 한다.

2. 실험방법

CO₂ 레이저를 사용하여 AC2B 알루미늄합금 위에 Fe계 합금 분말을 오버레이 하였다. 합금 분말 및 알루미늄합금의 조성은 표 2에 나타내었다. 레이저 오버레이 공정에 대한 자세한 설명은 이미 기술되어 생략한다¹⁾. 시편은 2kW, 180mm/min, 3.6g/min의 조건에서 제작된 것을 사용하였으며, 이 조건은 가장 적은 양의 크랙으로 가장 우수한 마모특성을 보였던 시편이다. 오버레이층 경계면에서 발생하는 IMC 거동은 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 시각적으로 판별하였으며, 마이크로비커스 경도시험 및 나노압입시험을 통하여 기계적 특성을 측정하였다. 특히 나노압입시험은 일정한 기하학적 형상을 가지는 압입자를 이용하여 대상소재 표면에 연속적으로 하중을 인가, 제거하고 이때의 하중과 압입 깊이 관계에서 얻어지는 압입 하중 변위곡선의 해석을 통하여 소재의 기계적 물성을 측정하는 기법으로 본 실험에서는 하중 9.75 mN(1 g), 측정간격 20 μ m의 조건으로 측정하였다.

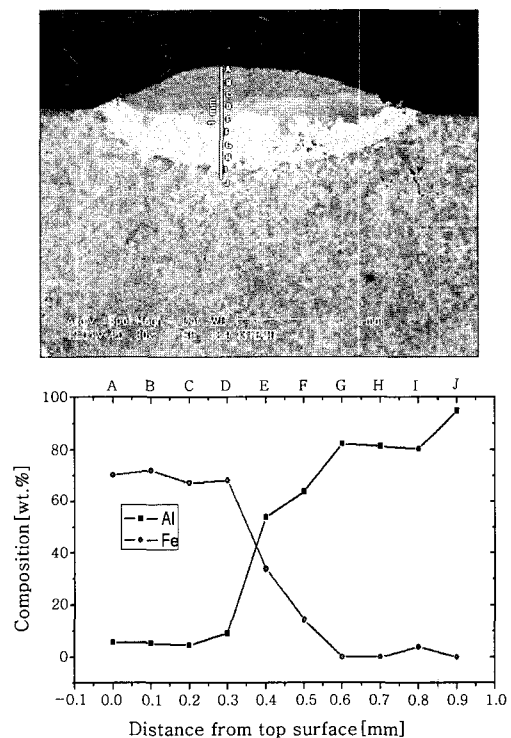
Table 2 Composition of the powder and the substrate (wt.%)

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 오버레이층 경계면에서의 금속간화합물(IMC) 거동

Fig. 1은 2kW, 180mm/min, 3.6g/min의 조건에서 수행된 레이저 오버레이층의 단면 이미지와 EDS 분석 결과이다. 오버레이층의 비드 상부에서부터 모재까지 100 μ m 간격으로 EDS분석을 수행하였으며, 분석된 지점을 SEM 이미지 상에 A~J로 나타내었다. E와 F 구간에서 Fe에 고용된 Al의 wt.%는 각각 53.9, 61.1로 나타났다. 이 조성에서는 Fe-Al 2원계 합금의 금속간화합물 중 각각 Fe₂Al₅, FeAl₃의 형성 가능성이 높을 것으로 판단된다. Fig. 2는 오버레이층의 단면에서 계면 영역을 기준으로 오버레이층과 모재 사이의 마이크로 비커스 경도를 측정한 값이다. 2.9N(300g)의 하중으로 10초 동안 측정한 결과 모재보다 H_v 20~30 높은 경도값을 post-molten영역에서 나타내었다. Post-molten영역은 레이저 오버레이층의 영향으로 모재가 녹았다가 급냉된 영역이므로 모재와 성분은 같으나 모재보다 미세한 columnar-dendritic 구조를 가지기 때문에 높은 경도값을 보이는 것으로 판단된다. 또한 경계면 영역에서 H_v 800 정도의 높은 경도값을 보였다가 오버레이층 내부로 가면서 H_v 450 정도로 감소하였다. 계면 영역에서 높은 경도값은 Fig. 1의 EDS 분석 및

**Fig. 1** SEM image of laser overlay cross-section for EDS analysis

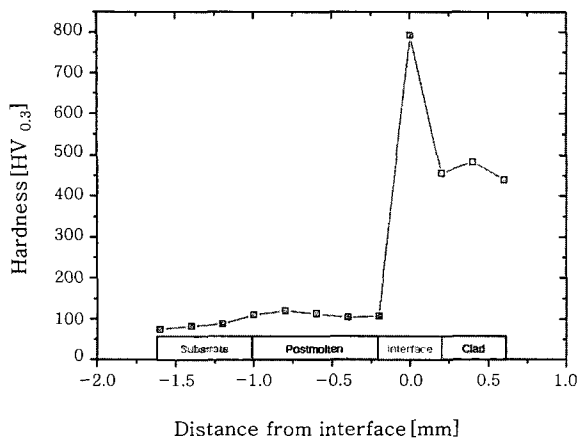


Fig. 2 Micro vickers hardness to the direction of depth in laser overlay cross-section

표 1에 의하면 금속간화합물(IMC) 중 FeAl_3 생성 가능성을 뒷받침해 주는 것이며, Fe-Al계 금속간화합물의 형성이 경계면 영역에 집중 되어 있음을 보여주고 있다.

Fig. 3은 오버레이층 경계면에서 발생한 균열의 모습을 SEM으로 관찰한 이미지이다. Fig. 3-b는 Fig. 3-a의 고배율 이미지로써 검은 부분(①)과 회색 부분(②)의 상(phase)을 규명하기 위하여 EDS 성분분석을 수행하였다. Fig. 4-a는 다른 경계면 영역에 있는

균열의 SEM 이미지이다. Fig. 4-b는 Fig. 4-a의 고배율 이미지로써, 클래드층(③)과 post-molten층(④) 그리고 계면(⑤)에 대한 성분분석을 EDS를 통하여 수행하였다. 표 3에서 ①~⑤번의 EDS분석 결과를 정리하였다. 표 1의 Fe-Al 금속간화합물 조성에서 볼 수 있듯이 Fe에 고용된 Al의 wt.%에 따라 ①은 Al 61.2wt.%인 $(\text{FeAl}_3)_{1-x}\text{C}_x$ 상, ②는 Al 30.7wt.%인 $(\text{FeAl})_{1-x}\text{Cr}_x$ 상, ③은 Al 15.2wt.%인 Fe_3Al 상, ④는 Al 82.6wt.%인 Al상, ⑤는 Al 53.2wt.%인 Fe_2Al_5 상으로 추정된다. 경계면 영역은 Fig. 4-a에서와 같이 균일하지 않으며, Al-rich IMC 뿐만 아니라 Fe-rich IMC로 판단되는 상들로 구성되어 있었다. 균열의 시작 지점을 정확히 규명할 수는 없었으나 균열의 전파는 취약한 Al-rich IMC를 따라서 반드시 전파되는 것은 아니고 Fe-rich IMC 내부를 관통하여 전파되는 경우도 관찰되었다.

3.2 오버레이층 경계면에서의 경도 특성

오버레이층의 단면에서 경계면 영역을 기준으로 오버레이층과 모재 사이의 경도를 마이크로 비커스 경도계를 이용하여 측정하였다. Fig. 2의 경도값은 하중이 2.9 N(300 g)으로 측정한 결과를 나타내는 그림으로 압흔의 크기가 조대하여 주위 영역을 측정하는 경우 측

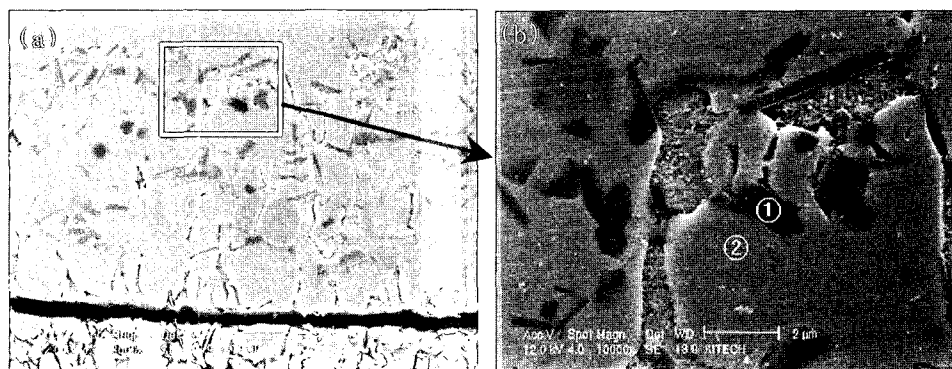


Fig. 3 IMC formation above the crack

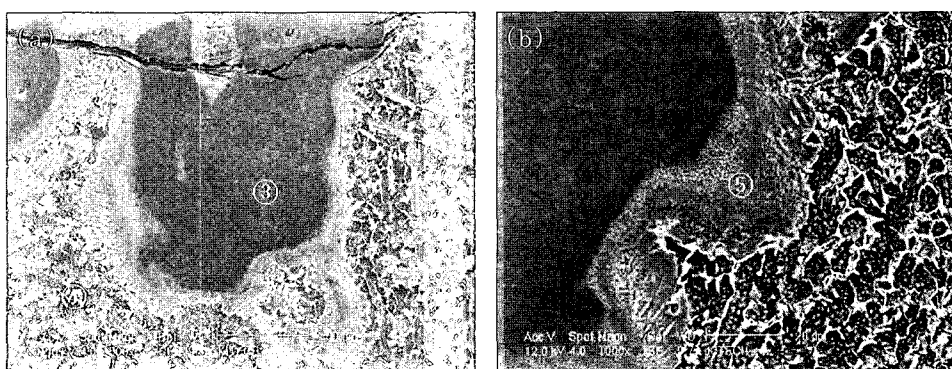
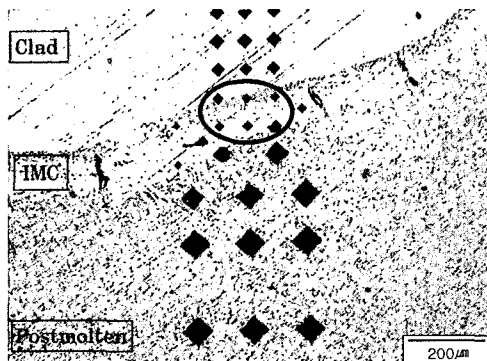
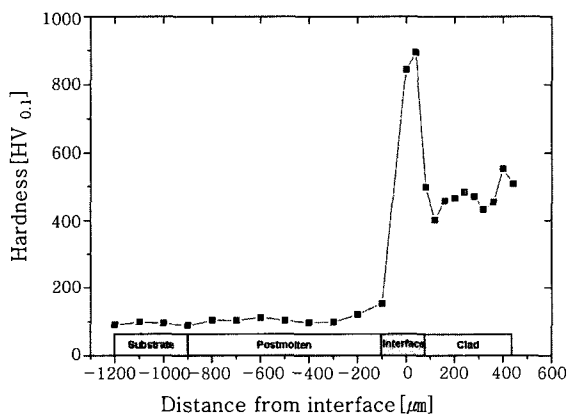


Fig. 4 IMC formation at the Al-Fe interface

Table 3 Chemical composition of EDS analysis (wt.%)

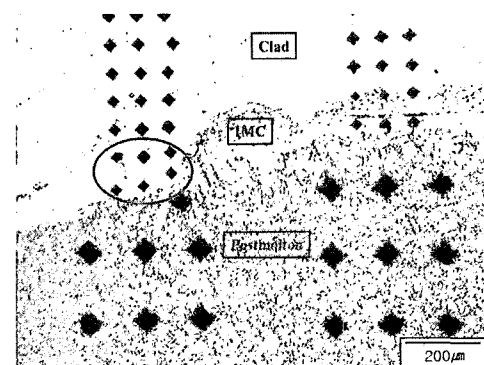
	C	Al	Si	Cr	Fe	Cu	Possible phase
①	16.8	61.2	2.4	5.2	14.4	-	(FeAl ₃) _{1-x} C _x
②	2.3	30.7	4.9	10.3	51.8	-	(FeAl) _{1-x} Cr _x
③	2.2	15.2	2.1	12	68.5	-	Fe ₃ Al
④	-	82.6	15.2	-	-	2.2	Al-rich primary solid solution
⑤	2.6	53.2	4.2	6.5	31.5	2	Fe ₂ Al ₅

정값에 영향을 끼칠 가능성이 높아 IMC층에서 1회 이상의 경도 측정이 어려웠다. 그리고 높은 하중으로 인하여 취약한 IMC층에서 경도 측정 후 균열이 발생하였다. 그러나 Fig. 5는 하중을 줄여 0.98 N(100 g) 10 초의 시간으로 균열 발생 없이 IMC층을 1회 이상 측정한 결과이다. 일반적으로 마이크로 비커스 경도계로 저 하중에서 경도를 측정하는 경우 발생하는 소재의 탄성회복영향을 피하고자 하중을 0.98 N(100 g)으로 측정하였다. 경도 측정 및 SEM의 관찰로부터 오버레이 층과 post-molten 영역 사이의 경계면 영역에서 Al-Fe 확산층이 나타났으며, Fig. 6에서 볼 수 있듯이

**Fig. 5** Photograph of micro vickers hardness for IMC**Fig. 6** Micro vickers hardness to the direction of depth in laser overlay cross-section (IMC's in the interface)

IMC 영역에서의 압흔크기가 가장 적게 관찰되어 미소 경도측정의 관찰이미지 만으로도 IMC영역에서 가장 높은 경도를 지니는 것을 알 수 있다. 경도값의 분포는 IMC > Clad > Post-molten > Substrate 순으로, 모재보다는 post-molten영역에서 H_v 값이 20~30 이상 높게 나타났다. 또한 경계면 영역에서 H_v 값은 800~900의 가장 높은 경도값을 나타내었다. 거의 모든 레이저 오버레이 조건의 시편에서 이와 비슷한 경도값 분포를 나타냈으며, 경계면 영역의 높은 경도값은 Fe-Al 금속간화합물의 형성 때문으로 보여 진다. 표 1에서의 Fe-Al 금속간화합물의 경도값 분포와 비교해보면 경계면 영역은 주로 FeAl₃가 형성된 것으로 판단된다.

경계면 영역이 Fig. 4-a에서와 같이 균일하지 않듯이 Fig. 7에서도 IMC층이 형성되는 부분과 형성되지 않는 부분이 동일한 시편에서 공존하고 있음을 볼 수 있었다. Fig. 8은 IMC층이 형성되지 않은 부분의 경도값으로 post-molten층의 경도값과 오버레이층의 경도값 사이의 경계면 영역에서 최고의 경도값을 나타내지 않고 일정하게 나타났다. 거의 모든 공정 조건에서 IMC에 의한 경도 증가 현상을 확인하였으나, Fig. 4에서와 같이 오버레이층 경계면 전 구간에서 균일하게 균열이 발생하지 않았으며 동시에 Fig. 7에서와 같이 IMC 역시 경계면 전 구간에서 균일하게 발생하지 않았다. 이 현상에 대한 이유는 다음과 같이 거시적 또는 미세조직학적인 측면에서 설명이 가능하다. 거시적인

**Fig. 7** Photograph of micro vickers hardness with no IMC layer

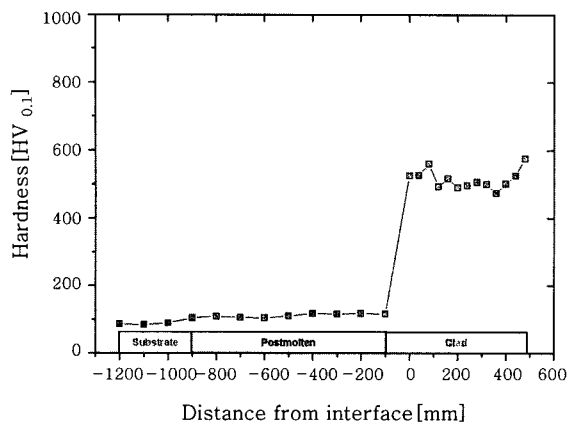


Fig. 8 Micro vickers hardness to the direction of depth in laser overlay cross-section (No IMC's in the interface)

측면에서는 레이저 오버레이 표면검사를 통해서 안정한 오버레이를 형성한 것으로 판단되었으나, 단면 검사를 수행한 결과 레이저 오버레이 공정조건이 Al-Fe 이종 재료에서 최적화 되지 못하여 불안정상태(unsteady state)에서 경계면이 형성되었을 가능성을 말해준다¹⁾. 미세조직학적인 측면에서는 오버레이층의 조성이 달라짐에 따라 결정학적인 정합 또는 부정합 계면을 post-molten층과 형성하게 되어 불균일한 경계면이 형성되었을 것으로 판단된다. 보다 정확한 결론을 도출하기 위해서는 경계면에서 IMC가 형성된 부분과 형성되지 않은 부분에 대한 결정학적인 실험이 보충되어야 하지만 이번 실험의 범위를 넘는 것이라 포함시키지 않았다. 그러나 이종재료 오버레이층에서 발생하는 균열의 메커니즘을 금속재료학적으로 규명하기 위해서는 반드시 필요한 내용이라 판단된다.

3.3 나노압입시험

나노압입시험은 오버레이층에서 post-molten영역까지 수직방향으로 20 μ m 간격으로 측정하였다. Fig. 9는 나노압입시험을 마친 시편의 사진이다. Post-molten영역의 압흔과 오버레이층의 압흔과는 크기 차이를 확인할 수 있었다. Fig. 10은 오버레이층, 금속간화합물층 그리고 post-molten층에서 동일한 하중을 주었을 경우 압흔의 깊이를 나타낸 그래프이다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 경계면 영역의 압흔 크기가 제일 작았으며, 오버레이층 그리고 post-molten층의 순서로 압흔 깊이가 증가하였다. 앞흔의 깊이와 비례하여 경도값이 계산되었으며 Fig. 10은 각각의 위치에 대한 경도값을 나타낸 도표이다. 나노압입시험장비는 비커스 경도에 비해 좁은 영역을 여러 번 측정할 수 있는 장점이 있어 압흔

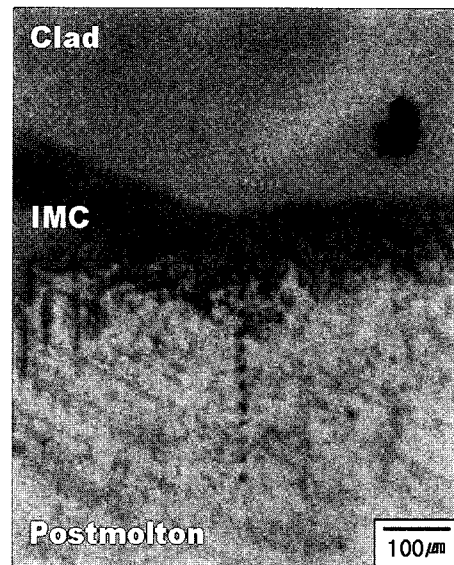


Fig. 9 Photograph of nano indentation for IMC

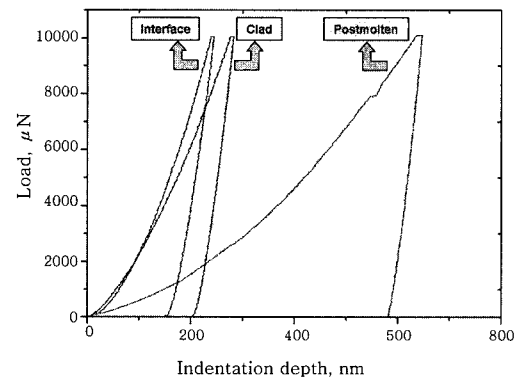


Fig. 10 Nano indentation load-depth curve

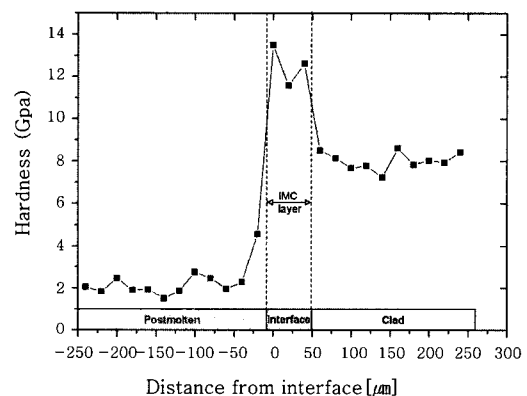


Fig. 11 Nano indentation results

에 의해서 주위 금속에 미치는 정도 변화를 줄일 수 있으므로 정밀 부품에서의 레이저 오버레이층 경도시험에는 매우 적합할 것으로 판단된다. 나노압입시험으로 post-molten층과 오버레이층 사이에는 확연히 다른 물성의 금속간 화합물층을 확인할 수 있었고, 비커스 경도 시험결과와 매우 유사한 경향의 나노압입시험 결과를 얻

을 수 있었다. 본 실험에서는 Fig. 8에서 보여지듯이 나노압입시험을 통하여 비커스 경도시험보다 미세한 영역에서 경도 측정이 가능하였고, 이를 통해 계면사이에 존재하는 제 2상의 경도를 정밀 측정하는 것이 가능하였다. 추가적인 나노압입시험을 통하여 탄성계수 및 가공경화지수까지 측정하여 보다 정확한 IMC 종류 판별이 가능하므로 나노압입시험이 미세영역의 용접·접합 기술 전반에 미치는 적용 가능성은 방대할 것으로 판단된다.

4. 결 론

CO₂ 레이저를 사용하여 알루미늄합금 모재 위에 철계합금 분말을 오버레이 시킨 결과 오버레이층과 post-molten층 사이의 경계면 영역에서 크랙이 불균일하게 발견되었다. 크랙의 전파경로를 따라 주사전자현미경(SEM)에서 EDS 분석을 한 결과 크랙은 반드시 취약한 Al-rich 금속간화합물(IMC)만을 따르지 않았다. 크랙 주변의 미세조직은 Fe-rich IMC (FeAl, Fe₃Al)와 Al-rich IMC (FeAl₃, Fe₂Al₅)들로 구성되어 있었다. 오버레이층에서 post-molten층까지 마이크로 비커스 경도시험을 한 결과 post-molten층의 경도는 알루미늄 모재보다 H_V 값이 20~30 높게 나타났으며, 경계면 영역에서는 H_V 값이 800~900 정도로 측정되어 계면의 제 2상은 FeAl₃로 판단된다. 비커스 경도계의 인덴터 크기 및 하중에 제한점이 있어 EDS시험에서 측정된 Fe₂Al₅층들은 발견할 수 없었다. 모든 경계면에서 크랙이 균일하게 발생하지 않았고 IMC층의 형성 또한 경계면을 따라 균일하게 발생하지 않았으며, 비커스 경도 시험을 통하여 IMC층의 유무를 확인할 수 있었다. 보다 정밀한 IMC층을 분별을 위해서 나노압입시험

을 수행하였으며, 미세 용접 및 접합부의 계면 연구에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 계면에서의 IMC층 유무에 대한 원인은 오버레이층과 post-molten 층 사이의 결정학적인 관계 연구를 통해서 확인될 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Y-G. Yoo, N. Kang, C-H. Kim, J-H. Kim and M-S. Kim : Effect of process parameters on laser overlay behavior of Fe-based alloy powder on aluminum substrate, *Journal of KWJS* **25-1** (2007) 30-36
2. M. J. Rathod and M. Kutsuna : Joining of aluminum alloy 5052 and low-carbon steel by laser roll welding, *Welding Journal* January (2004) 16s-26s
3. P. Peyre, G. Sierra, F. Deschaux-Beaume, D. Stuart and G. Fras : Generation of aluminium-steel joints with laser-induced reactive wetting, *Materials Science and Engineering A444* (2007) 327-338
4. R. S. C. Paredes, S. A. Correa, D. De Lima and A. R. Capra : The weldability of aluminium coated carbon steel, *Welding international* **20-10** (2006) 794-801
5. A. Mathieu, S. Mattei, L. Rodriguez, A. Deschamps, M. Suery, J-C. Viala, B. Martin and D. Grevey : Laser brazing of steel-aluminum assembly, *Proceedings of the 23rd international congress on applications of lasers and electro-optics* (2004)
6. M. Kreimeyer, F. Wagner and G. Sepold : Development of a combined joining-forming process for aluminu-steel joints, *Proceedings of the 23rd international congress on applications of lasers and electro-optics* (2004)
7. T-W. Park, J-H. Cho and S-J. Na : A study on laser joining of low carbon steel and aluminum alloy-part I: process parameters, *Journal of KWS* **23-5** (2005) 25-29