어닐링 온도 변화가 Al/연강 클래드재의 계면 특성에 미치는 영향

정은욱 · 김희봉 · 김동용 · 김민중* · 조영래[†]

부산대학교 재료공학부, *(주)한국클래드텍

Effects of Annealing Temperature on Interface Properties for Al/Mild Steel Clad Materials

Eun-Wook Jeong, Hoi-Bong Kim, Dong-Yong Kim, Min-Jung Kim* and Young-Rae Cho[†]

Dept. of Materials Science and Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Korea Clad Tech. Co., Ltd., Daegu 711-890, Korea

(2012년 9월 16일 접수 : 2012년 10월 15일 최종수정 : 2012년 10월 15일 채택)

Abstract For heat exchanger applications, 2-ply clad materials were fabricated by rolling of aluminum (Al) and mild steel sheets. Effects of annealing temperature on interface properties, especially on inter-layer formation and softening of strain hardened mild-steel, for Al/mild steel clad materials, were investigated. To obtain optimum annealing conditions for the Al/mild steel clad materials, annealing temperature was varied from room temperature to 600°C. At the annealing temperature about 450°C, an inter-layer was formed in an island-shape at the interface of the Al/mild steel clad materials; this island expanded along the interface at higher temperature. By analyzing the X-ray diffraction (XRD) peaks and the energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) results, it was determined that the exact chemical stoichiometry for the inter-layer was that of Fe₂Al₅. In some samples, an X-layer was formed between the Al and the inter-layer of Fe₂Al₅ at high annealing temperature of around 550°C. The existence of an X-layer enhanced the growth of the inter-layer, which resulted in the delamination of the Al/mild-steel clad materials. Hardness tests were also performed to examine the influence of the annealing temperature on the cold deformability, which is a very important property for the deep drawing process of clad materials. The hardness value of mild steel gradually decreased with increasing annealing temperature. Especially, the value of hardness sharply decreased in the temperature range between 525°C and 550°C. From these results, we can conclude that the optimum annealing temperature is around 550°C under condition of there being no X-layer creation.

Key words Al/mild steel clad, annealing temperature, inter-layer, hardness test, delamination.

1. 서 론

클래드재(clad material)는 서로 다른 2가지 이상의 금속을 접합 혹은 특성 결합시켜 단일 금속에서 얻을 수 없는 새로운 특성을 갖도록 제조한 층상 복합재료의 일종이다.¹⁻³⁾ 클래드재의 원재료로 사용되는 대표적인 모재(matrix)로는 알루미늄(Al), 티타늄(Ti), 스테인리스강(STS: stainless steel), 탄소강(carbon steel), 구리(Cu) 등이 있다.^{1,4-7)} 알루미늄과 탄소강으로 이루어진 2중 클래드재는 알루미늄의 높은 열전도도와 함께 낮은 밀도가 탄소강의 높은 강도와 결합해서 우수한 특성을 나타낸다.^{2,8)} 특히, 알루미늄은 성형성과 열전도도가 우수하기 때문에 열교환기용 클래드재의 원재료로 사용하기 위해 많은 연구

가 진행되고 있다.^{5,9)} 클래드재를 제작하는 방법에는 압연(rolling)법, 압출(extrusion)법, 폭발용접(explosive welding), 전기저항 용접 등이 있으며, 다양한 방법으로 열과 압력을 이용하여 별도의 본딩재를 사용하지 않고 접합이 가능하다.^{5-7,10-11)}

압연법은 다른 방법에 비해 제조공정이 간단하고 경제적이기 때문에 판상의 클래드재를 제조할 때 널리 사용되고 있다. 클래드재의 접합강도(bonding strength)는 압연시 압하율에 대부분 의존하기 때문에, 높은 접합강도를 갖는 클래드재를 제조하기 위해 30% 이상의 높은 압하율을 인가시킨다.⁵⁻⁶⁾ 이렇게 높은 압하율의 적용으로 제조된 클래드재는 높은 가공경화가 수반되어 후속의 소성변형에 의한 제품의 성형을 어렵게 한다. 즉, 클래드재를 사용해서 최종 제품을 생산하기 위해서는 대부분 상온에서 소성가공을 하는데, 압연공정시 심하게 가공경화된 클래드재를 그대로 사용하면 클래드재에 크랙(crack)

[†]Corresponding author

E-Mail : yescho@pusan.ac.kr (Y. -R. Cho)

이 생기거나 파손이 발생한다.⁶⁾ 따라서, 최종 제품의 제작을 위한 성형공정 이전에 클래드재에 가공경화 상태를 풀어주기 위한 어닐링(annealing) 공정은 반드시 필요하다. 하지만 고온에서 어닐링을 할 경우, 클래드재를 이루는 이종 재료들의 특성 차이 때문에 계면박리(interface delamination)가 발생하는 문제가 생긴다. 어닐링시 계면박리 현상은 반드시 억제되어야 하지만, 아직까지 계면박리의 원인에 대한 연구는 미흡한 상태이다. 특히, 화력발전소의 열교환기용 소재로 사용될 AI/연강(mild steel) 클래드재의 어닐링시 AI과 연강의 계면에 생성되는 중간층인 금속간 화합물의 정확한 화학식과 역할에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 압연법으로 제조한 AI/연강 클래드재 소재를 사용해서 어닐링 온도 변화에 따른 계면의 특성변화를 체계적으로 연구하기 위해 어닐링 온도를 400°C에서 600°C까지 변화시켰다. 어닐링을 실시한 클래드재에서 소성가공시 문제가 되는 연강의 미소경도를 측정하여 어닐링 온도에 따른 가공경화의 풀림 정도를 평가하였고, 어닐링 처리시 AI/연강의 계면에 생성되는 중간층의 성장 모델 및 화학식에 대해 연구하여, 중간층이 클래드재의 계면특성에 미치는 영향에 대해서도 연구하였다.

2. 실험 방법

1000계열 알루미늄(A1050)과 어닐링한 연강을 모재로 사용해 (주)한국클래드텍에서 압연법(rolling)으로 2중 클래드재를 제조하였다. 상온에서 50%의 압하율로 압연하였으며, 제조된 AI/연강의 클래드재에서 AI과 연강의 두께는 각각 100 μ m와 2 mm 정도였다. 연강의 성분은 glow-discharge optical emission spectrometry(GD-OES)로, AI의 성분은 inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS)로 분석하였다. Table 1은 AI과 연강의 성분분석 결과를 나타낸다. 실험용 시편 제작을 위한 클래드재의 절단은 전단기(shearing machine)를 사용하였으며, 방전가공법으로 최종 형상으로 가공하였다. 어닐링은 튜브형 가열로를 사용해서 질소 분위기에서 수행하였다. 어닐링 온도는 400~600°C의 범위에서 50°C 간격으로 실시하였으며, 525°C와 575°C의 온도에서 추가로 실험을 하였다. 모든 시편에 대해 어닐링 시간은 16시간으로 유지하였으며, 승온 시간은 1시간으로 고정시켰다.

온도변화에 따른 클래드재의 계면특성 변화를 연구하기 위해 어닐링 처리가 끝난 클래드재의 단면을 광학현미경(optical microscope, OM)과 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 관찰하였으며, energy dispersive x-ray spectroscopy(EDX)를 이용하여 계면에 생성된 중간층에 대해 정성 및 정량분석을 하였다. 어닐링 온도가 클래드재를 이루는 연강의 가공경화 회복에 미치는 영향을 알아보기 위해 연강에 대해서 비커스 미소경도(Vickers hardness)를 측정하였다. 미소경도는 미쯔도요사의 HM-100를 사용해, 10 g의 하중을 인가해서 10회 측정 후 최대값과 최소값을 제외한 8번의 측정값을 평균해서 구했다.

어닐링이 진행되는 동안 AI층과 연강층 사이에 생성된 중간층의 구조와 화학식을 알아보기 위하여 X-ray diffraction(XRD)법을 사용하였다. XRD를 사용해서 중간층만의 구조를 분석하기 위해 어닐링 처리한 시편에서 AI층을 NaOH용액(NaOH 2 g + DI water 100 ml)를 이용하여 제거하였다. XRD 분석시 Cu 타겟을 사용하였으며, 피크의 분석은 international centre for diffraction data(ICDD)를 사용해서 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 어닐링 온도에 따른 연강의 경도변화와 계면 특성

Fig. 1은 AI/연강 2중 클래드재를 서로 다른 온도에서 16시간 동안 어닐링한 시편에서 연강의 미소경도 변화를 나타낸 것이다. 어닐링을 하지 않은 연강의 경도는 299 Hv였으며, 어닐링 온도의 증가시 연강의 미소경도는 감소하였다. 경도의 감소 경향은 크게 두 가지로 구분되는데, 경도의 감소가 완만한 구간인 상온에서 500°C까지를 구간 1로, 경도의 감소가 급격하게 일어난 500~600°C까지를 구간 2로 나타냈다. 구간 1에서 보면, 어닐링 온도가 400°C, 450°C, 500°C일 때 경도는 각각 268 Hv, 255 Hv, 246 Hv로 나타나서 어닐링 온도가 50°C 증가할 때 경도는 약 10 Hv 정도 감소해 어닐링 온도변화에 따른 경도의 감소는 크지 않았다. 반면, 구간 2에서는 550°C와 600°C의 온도에서 경도는 각각 189 Hv와 150 Hv로 크게 감소했다. 어닐링 효과가 크게 나타난 구간 2 부분에서 525°C와 575°C에서 추가로 어닐링시 경도를 측정하였는데, 연강에서 각각의 경도는 232 Hv와

Table 1. Chemical composition of Aluminum (A1050) and mild steel. (wt. %)

	Al	Si	Fe	Cu	Mg	Zn	Ti	Mn
Al 1050	Bal.	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.002
	Fe	Mn	C	Si	P	S	Others	
Mild steel	Bal.	0.23	0.03	0.02	0.01	0.01	0.77

Fig. 1. Change of Vickers hardness for mild steel dependence on annealing temperature. Inset is optical micrograph of cross-sectional view for Al/mild steel clad material.

157 Hv로 나타났다. 500°C에서 525°C 구간에서의 경도 차이는 불과 14 Hv로 어닐링의 효과가 작았지만, 525°C에서 550°C 구간에서 43 Hv로 큰 경도차이를 보였다. 이는 Al/연강의 2중 클래드재에서 연강의 가공경화를 풀어주기 위한 어닐링 온도는 최소 525°C 이상에서 이루어져야 한다는 것을 의미한다.

Fig. 2는 본 연구에서 사용한 Al/연강 2중 클래드재의 어닐링 온도 증가시 계면에서 중간층(inter-layer)의 형성을 관찰한 광학현미경 사진을 나타낸다. Fig. 2(a)는 어닐링을 하지 않은 시편이고, (b)에서 (h)는 각각 400°C부터 600°C까지 어닐링 온도를 변화시켰을 때 나타난 계면부분의 단면 사진이다. 어닐링을 하지 않은 시편의 경우, Fig. 2(a)에서 보듯이 Al/연강의 계면에는 예측한 대로 중간층이 존재하지 않으며 사진의 위쪽은 Al이고, 아래쪽은 연강이다. 400°C에서 어닐링한 시편에서도 Al/연강의 계면에 중간층은 관찰되지 않는다. 그런데, 450°C에서 어닐링한 시편에서는 Fig. 2(c)에서 보듯이 중간층 1(inter-layer 1, IL1)이 국부적으로 생성됨을 볼 수 있으며 두께는 대략 10 µm 정도로 측정되었다. Fig. 2(d)는 어닐링 온도가 500°C인 경우 계면에 생성된 중간층 1이 보이는데, 중간층 1의 두께는 10 µm 정도로 계면을 따라 길게 연속적으로 분포하고 있다. Fig. 2(b)에서 (d)까지를 종합하면, 어닐링 공정시 Al/연강 2중 클래드재의 계면에서 생성되는 중간층 1은 450°C에서 불연속적으로 우선적으로 생성되며, 어닐링 온도가 500°C로 증가시 두께의 증가 없이 Al/연강 클래드재의 계면을 따라 퍼져나가 연속적인 층으로 존재함을 확인할 수 있다. 더 높은 온도인 550°C부터 600°C까지 어닐링을 실시해도 중간층 1

Fig. 2. Optical micrographs of interface for Al/mild steel clad materials: (a) before annealing, (b) annealed for 16 h at 400°C, (c) 450°C, (d) 500°C, (e) 525°C, (f) 550°C, (g) 575°C and (h) 600°C.

의 두께는 15 µm 정도로 약간 증가하였지만 큰 변화는 없었다.

Fig. 3은 550°C 이상의 온도에서 어닐링시 Al/연강 클래드재의 계면에서 특이한 현상이 발견된 시편에 대한 광학현미경 사진을 보여준다. 즉, Fig. 2에서는 550°C 이상에서 어닐링시 Al/연강의 계면에서 IL1층만 관찰되었는데, Fig. 3에서는 X-layer가 추가로 생성되어 있음을 보여준다. Fig. 3(a)에서 점선(SL₀)은 Al/연강 클래드재의 표면을 나타내며, 점선(SL₁₀₀)은 표면에서 내부로 100 µm 지점의 위치를 표시한 것이다. SL₁₀₀의 물리적 의미는 어닐링하기 직전의 Al/연강 클래드재의 계면이 위치했던 부분이다. Fig. 3(a)에서 보듯이, Al/연강 클래드재의 단면은 표면에서부터 Al/X-layer/중간층 2/연강의 순서로 단면 구조를 가진다. 여기서, 중간층 2(inter-layer 2, IL2)는 X-layer가 존재할 때 Al/연강 클래드재의 계면에 존재하는 중간층을 나타내기로 한다.

Fig. 3(a)와 (b)는 어닐링 온도가 각각 550°C와 600°C인 경우 X-layer와 중간층 2가 존재하는 부분의 단면사진

Fig. 3. Optical micrographs of inter-layer and X-layer for Al/mild steel clad materials: (a) annealed at 550°C, (b) inner part and (c) edge of samples annealed at 600°C. Inset in (c) represent optical micrographs of Al(S₁) and surface of mild steel(S₂).

이다. 중간층2의 두께는 대략 100 μm 로 나타났고, 반면 Al의 두께는 어닐링 온도가 550°C와 600°C의 경우 각각 15 μm 와 5 μm 로 크게 감소하였다. Fig. 3(c)는 X-layer가 생성된 시편의 한쪽 끝부분을 나타낸 것인데, X-layer가 존재하지 않는 부분(E)이 관찰된다. Fig. 3(c)의 왼쪽 아래 삽입된 사진은 저배율로 나타낸 시편의 실제 모양을 보이는데, 시편의 실제 단면적은 10 × 5 mm²였다. 삽입된 사진에서 S₁은 시편의 테두리(E)를 따라 박리가 발

Fig. 4. Change of thickness for Al, inter-layer and X-layer dependence on annealing temperature. Where IL1 and IL2 represent inter-layer 1 and inter-layer 2.

생한 Al을 나타내고, S₂는 Al 부분이 분리된 후 연강의 실제 모양을 보인다. Fig. 3(c)에서 보듯이, X-layer는 시편의 테두리 부분(E)에서는 생성되지 않으며, X-layer가 생성되지 않는 부분(E)은 중간층2 매우 얇게 존재했다.

Al/연강 클래드재의 계면에 생성된 중간층의 두께는 계면의 박리 특성에 영향을 미치는 중요한 요소이며, 중간층의 두께가 5 μm 이상일 경우 접합강도가 심하게 감소된다고 한다.^{6,12)} 본 연구의 경우, Fig. 2에서 보듯이 중간층1의 두께가 비록 13 μm 정도로 두꺼웠지만 X-layer가 생성되지 않은 경우 박리가 발생하지 않았으며, 반면 Fig. 3에서 보듯이 X-layer가 생성된 경우는 중간층2의 두께가 크게 증가해서 박리가 발생했다. 즉, 550°C 이상의 온도에서 Al/연강 클래드재의 계면에서 박리가 발생하는 이유는 X-layer가 생성되면서 중간층2의 두께가 100 μm 정도로 급격히 성장하였기 때문으로 판단된다. X-layer의 생성은 Al과 중간층2의 계면에서 시작한다는 것이 특이 사항이다. 즉, Al/연강 클래드재에서 박리가 발생하는 계면은 연강과 중간층2가 아니고 Al과 중간층2의 계면임을 확인할 수 있다. 하지만 다른 연구자의 연구 결과에서는 X-layer의 생성에 관한 보고는 아직 없으며, Al/연강 클래드재의 박리는 Al층과 중간층1의 계면을 따라 발생하는 것으로 보고되고 있다.⁶⁾

Fig. 4는 Fig. 2와 Fig. 3에서 나타난 어닐링 온도 변화에 따른 Al층, 중간층 그리고 X-layer의 두께 변화를 종합해서 도식적으로 표시한 것이다. X-layer가 왜 생성되는지는 확실하지 않지만, 어닐링 온도가 550°C, 575°C, 600°C에서 X-layer의 두께는 각각 26 μm , 34 μm , 21 μm 로 나타났다. 어닐링 처리 전후의 Al층과 중간층의 두께 변화를 X-layer의 존재 유무와 관련해 관찰하는 것은 의

미가 있다고 본다. 먼저, 어닐링을 하지 않은 Al/연강 클래드재에서 Al층의 두께는 Fig. 1에서 보듯이 약 100 μm 였다. X-layer가 생성되지 않는 조건에서 클래드재의 Al층 두께(Al-W/O-X)는 Fig. 2에서 보듯이 중간층1의 생성과 더불어 100 μm 에서 90 μm 로 대략 10 μm 감소했다. 반면, X-layer가 생성되었을 경우는 Fig. 3에서 보듯이 Al의 두께(Al-W-X)는 두께는 초기에 100 μm 에서 575°C와 600°C로 어닐링 온도의 상승시 각각 8 μm 과 5 μm 로 급격하게 줄어들었다.

Al/연강 클래드재의 계면에서 생기는 중간층의 경우는, X-layer가 존재하지 않는 부분에서 생성되는 중간층1(IL1)의 두께는 500°C와 600°C에서 어닐링 했을 때 각각 10 μm 과 16 μm 으로 큰 변화를 보이지 않았다. 반면, X-layer가 생성된 경우 중간층2(IL2)의 두께는 어닐링 온도가 550°C와 600°C일 때 각각 93 μm 과 110 μm 로 매우 크게 나타났다. 이 결과는 Al/연강 클래드재의 어닐링시 X-layer의 생성은 중간층2의 성장을 크게 가속시킨다는 것을 의미한다. 이상의 결과를 요약하며, Al/연강 클래드재를 어닐링을 400°C 이하의 온도에서 실시하면 중간층의 생성이 없었다. 어닐링 온도의 증가시 450°C의 온도에서 섬(island) 형태의 불연속적인 중간상이 Al/연강 클

래드재의 계면에서 생성되고, 500°C에서는 중간층이 계면의 따라 성장해서 퍼져나갔다. 어닐링 온도가 550°C가 되면 계면의 특정한 지역에서 X-layer가 생성되기도 하는데, X-layer가 생성되면 Al층의 급격한 감소와 더불어 중간층2의 성장이 급격하게 발생했다.

3.2 중간층의 성장모델과 계면 박리의 분석

Al/연강의 클래드재 계면에 생성된 중간층을 보다 체계적으로 연구하기 위해 단면을 SEM으로 관찰하고, EDX를 사용해서 원소 분석을 하였다. Fig. 5는 어닐링 온도가 550°C인 시편에 대한 것으로, Fig. 5(a)는 X-layer가 생성되지 않은 시편의 단면을, (b)와 (c)는 X-layer가 생성된 시편의 단면을 보여준다. Fig. 5(a)와 (b)를 비교해 보면, X-layer가 생성되지 않은 시편에서는 13 μm 정도로 얇은 중간층1이 생성되었지만, (b)시편에서는 계면에 90 μm 이상으로 두꺼운 중간층2가 나타났다. 중간층의 조성은 X-layer의 존재 유무에 무관하게 Fe와 Al의 비율(at.%)이 27 대 73 정도로 나타났는데, 이것은 Fe_xAl_y 형 금속간 화합물 중 FeAl_3 와 Fe_2Al_5 중 어느 하나로 보인다.¹³⁾ Fig. 5(c)는 Al과 중간층2 사이에 생성된 X-layer에 대한 EDX 분석결과로, X-layer를 구성하는 주요 원

Fig. 5. EDX analysis results of samples annealed at 550°C: (a) focused on IL1, (b) focused on IL2 and (c) focused on X-layer.

소는 N, O, Al으로 나타났다. Al의 융점이 660°C 인 것을 고려하면, 어닐링 온도가 550°C 이상인 경우는 고온에 해당된다. EDX 결과에서 N과 O가 검출된 것으로 볼 때, X-layer는 Al_xN_y 또는 Al_xO_y 의 화학식을 가질 것으로 생각된다. 특히, X-layer가 생성되면 중간층의 두께가 왜 급격하게 성장하는지 등에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

Al/연강 클래드재 계면에 생성된 중간층을 해석하기 위해 Fe-Al의 2성분계 상태도를 보면, $550\sim 640^{\circ}\text{C}$ 의 온도 범위에서 생성 가능한 금속간 화합물은 FeAl , FeAl_3 , FeAl_2 혹은 Fe_2Al_5 이다.^{14,15)} 그런데 FeAl , FeAl_2 , FeAl_3 의 핵생성 및 성장 속도는 Fe_2Al_5 에 비해 훨씬 느리다고 한다.¹⁵⁾ 따라서, Al/연강 클래드재 계면에서 생성된 중간층은 Fe_2Al_5 일 것으로 판단되지만, 정확한 결과를 확인하기 위해서 WDS(wavelength dispersive X-ray spectroscopy) 분석을 실시한 연구도 있으나,¹⁶⁾ FeAl_3 와 Fe_2Al_5 의 경우 Al원자와 Fe원자의 비율이 WDS에서 얻어지는 오차 범위에 포함되기 때문에 정확한 화학식을 알기 어렵다.¹⁷⁾

Fig. 6은 Al/연강 클래드재 계면에서 생성된 중간층의 구조분석을 통한 화학식을 알아보기 위해 Al층을 식각한 후 중간층에 대해 XRD로 분석한 결과를 나타낸다. Fe_2Al_5 에 해당하는 회절각(2 theta)의 주 피크는 27, 43, 45, 47, 52° 부근에서 나타난다.¹⁸⁾ Fig. 6에서 가장 강한 회절 피크는 Fe_2Al_5 의 (0 0 2)면에 해당하는 피크로 약 43° 에서 나타났는데, 이 결과는 다른 연구자의 결과와 일치한다.¹⁹⁾ 회절각이 대략 45° 에서 나타난 피크는 Al의 (2 0 0)면의 회절 피크이며, 이는 클래드재인 Al층의 NaOH를 사용한 식각시 일부가 제거되지 않고 남아 있었기 때문인 것으로 사료된다. 중간층이 FeAl_3 인 경우, 회절각이 44° 부근에서 가장 강하게 회절 피크가 나타나야 한다.²⁰⁾ Fig. 6에서 보듯이, 회절각이 44° 부근에서 FeAl_3 의 회절

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the inter-layers after removing of Al for sample annealed at 550°C .

Fig. 7. Schematic diagram of inter-layer growth for Al/mild steel clad material dependence on annealing temperature: (a) 400°C , (b) 450°C , (c) 500°C , (d) 550°C and (e) 600°C .

피크가 나타나지 않았고, 43° 부근에서 Fe_2Al_5 의 (0 0 2)면에 해당하는 강한 피크가 나타났기 때문에 Fig. 2와 Fig. 3 및 Fig. 5에서 나타난 중간층은 Fe_2Al_5 라고 판단된다.

Fig. 7은 어닐링 온도 변화에 따라 X-layer가 생성되지 않은 시편의 경우, Al/연강 2중 클래드재의 계면에서 중간층이 생성되고 성장하는 단계를 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 7(a)는 Fig. 2(b)를 근거로 어닐링 온도가 400°C 일 때, Al과 연강의 계면을 묘사한 것이다. 예측한 대로 대략 $100\mu\text{m}$ 두께의 Al층이 연강(주성분 Fe)과 적층된 구조를 갖는다. Fig. 7(b)는 중간층이 생성되기 시작하는 임계 온도인 450°C 에서의 계면을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 2(c)에서 보듯이, 특정한 부분에서 섬(island) 형태로 초기의 중간층이 생성되기 시작한다. Fig. 7(c)는 500°C 에서 어닐링 처리한 시편에서 중간층의 형상을 보이며, Al/연강 클래드재 계면의 전체에 걸쳐 균일한 두께로 중간층이 성장하였음을 나타낸 것이다. Fig. 7(d)와 (e)는 550°C 와 600°C 의 경우 시편에서 중간층 형상을 나타냈다. Fig. 2에서 나타난 결과와 같이 중간층의 두께는 어닐링 온도의 증가시 약간 증가하는 경향을 보이지만 최종 두께는 $16\mu\text{m}$ 이하로 큰 변화는 보이지는 않는다.

Fig. 8은 Fig. 3을 근거로 어닐링 처리시 Al/연강 클래드재 시편의 계면에 X-layer가 생성될 때, 계면에서 생성되는 X-layer와 온도의 증가시 성장하는 중간층2 및 Al층의 변화를 도식화한 것이다. Fig. 3에서 보듯이, 계면에 생성된 X-layer는 Fig. 8(d)에 도시한 것처럼 550°C 부터 Al과 중간층 사이에서 생성되어 성장한다. Fig. 5에서 EDX 분석한 결과, X-layer의 주성분은 Al, N, O로 이루어져 있었다. X-layer가 생성되면 Fig. 4에서 보듯이

Fig. 8. Schematic diagram of inter-layer and X-layer growth for Al/mild steel clad material dependence on annealing temperature: (a) 400°C, (b) 450°C, (c) 500°C, (d) 550°C and (e) 600°C.

중간층은 10 μm 정도의 두께에서 90 μm 이상의 두께로 급격하게 성장한다. 또한, 중간층의 성장 방향은 Fig. 3에서 보는 것처럼 계면에서 Al층으로 진행되며, Al층의 두께는 중간층이 두께 성장과 더불어 급격하게 감소했다. 즉, X-layer가 생성되면, Al/연강 클래드재의 계면에서 Fe_2Al_5 의 구조식을 갖는 취성이 강한 중간층이 Al방향으로 급격하게 90 μm 까지 성장하여 Al/연강 클래드재의 접합강도를 크게 감소시킨다고 판단된다.

4. 결 론

Al/연강 2중 클래드재의 가공경화 현상을 풀어주기 위한 어닐링 공정을 다른 온도에서 실시하여 최적화된 어닐링 온도와 계면에 생성되는 중간층의 성장거동에 대해 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 어닐링 온도가 증가함에 따라 연강의 경도는 전체적으로 감소하는 경향을 보였다. 500°C 이하의 온도에서는 경도가 완만하게 감소하였지만, 525~575°C 범위에서 가장 급격하게 감소하였다. 따라서, 압연법으로 제조한 Al/연강 클래드재에서 연강의 가공경화 현상을 풀어주기 위한 어닐링 온도는 550°C 이상으로 해야 한다.

2) 클래드재의 계면 박리를 야기시키는 중간층은 450°C의 어닐링 온도에서 섬(island) 형태로 Al/연강 계면에서 부분적으로 생성되기 시작해서, 500°C의 온도에서 어닐링 시 계면을 따라 우선적으로 성장해서 전체 계면으로 퍼져나갔다. 어닐링 온도가 550°C 이상일 경우 계면에서 X-layer가 생성될 수 있으며, X-layer가 생성되면 Fe_2Al_5 중간층은 급격하게 성장하여 계면 박리가 발생하였다.

3) Al/연강 클래드재에서 고온 어닐링시 계면에서 생성되는 중간층은 Fe_2Al_5 의 구조식을 갖는 금속간 화합물

이며, 550~600°C의 범위에서 계면박리 발생을 방지하기 위해서는 계면에서 N, O, Al를 주성분으로 하는 X-layer의 발생을 저지시켜야 한다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. D. H. Bae, S. J. Jung, Y. R. Cho, W. S. Jung, H. S. Jung, C. Y. Kang and D. S. Bae, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **47**, 573 (2009).
2. S. H. Choi, K. H. Kim, K. H. Oh and D. N. Lee, *Mater. Sci. Eng.*, **222**, 158 (1997).
3. S. H. Chung, J. M. Doh and J. Y. Byun, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **42**, 197 (2004) (in Korean).
4. W. S. Miller, L. Zhuang, J. Bottema, A. J. Wittebrood, P. D. Smet, A. Haszler and A. Vieregge, *Mater. Sci. Eng.*, **280**, 37 (2000).
5. H. D. Manesh and A. K. Taheri, *Mater. Des.*, **24**, 617 (2003).
6. J. Y. Song, I. K. Kim, Y. S. Lee and S. I. Hong, *Kor. J. Met. Mater.*, **49**, 910 (2011).
7. D. H. Bae, Y. J. Choi, W. S. Chung, D. S. Bae and Y. R. Cho, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **47**, 811 (2009) (in Korean).
8. Y. M. Kim, S. K. Hong, S. W. Choi, Y. C. Kim and C. S. Kang, *Kor. J. Mater. Res.*, **22**, 169 (2012) (in Korean).
9. S. W. Han, B. I. Kim, H. W. Lee, W. Y. Chon and J. S. Gook, *Kor. J. Mater. Res.*, **14**, 851 (2004) (in Korean).
10. Y. M. Hwang, H. H. Hsu and H. J. Lee, *Int. J. Mech. Sci.*, **37**, 297 (1995).
11. K. Y. Rhee, W. Y. Han, H. J. Park and S. S. Kim, *Mater. Sci. Eng.*, **384**, 70 (2004).
12. H. D. Manesh and A. K. Taheri, *J. Alloys Compd.*, **361**, 138 (2003).
13. T. Maitra and S. P. Gupta, *Mater. Charact.*, **49**, 293 (2003).
14. L. Tricarico, R. Spina, D. Sorgente and M. Brandizzi, *Mater. Des.*, **30**, 2693 (2009).
15. D. Naoi and M. Kajihara, *Mater. Sci. Eng.*, **459**, 375 (2007).
16. J. Laigo, F. Christien, R. Le Gall, F. Tancret and J. Furtado, *Mater. Charact.*, **59**, 1580 (2008).
17. Z. Samardzija, P. McGuinness, M. Soderznik, S. Kobe and M. Sagawa, *Mater. Charact.*, **67**, 27 (2012).
18. E. Pochee, S. Jozwiak, K. Karczewski and Z. Bojar, *J. Alloys Compd.*, **509**, 1124 (2011).
19. M. Yousaf, J. Iqbal and M. Ajmal, *Mater. Charact.*, **62**, 517 (2011).
20. H. Peng, X. Su, Z. Li, J. Wang, C. Wu, H. Tu and X. Lai, *Surf. Coat. Technol.*, **206**, 4329 (2012).