

# 롤 본딩된 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속 판재의 접합강도 향상을 위한 최적 후열처리 조건 도출

김민호<sup>1</sup> · 봉혁종<sup>2</sup> · 김지훈<sup>3</sup> · 이광석<sup>4,#</sup>

## Optimal Post Heat-treatment Conditions for Improving Bonding Strength of Roll-bonded 3-ply Ti/Al/Ti Sheets

M. H. Kim, H. J. Bong, J. H. Kim, K. S. Lee

(Received June 1, 2022 / Revised June 12, 2022 / Accepted June 17, 2022)

### Abstract

The influence of post-roll bonding heat treatment conditions such as temperature and time on the variation in the diffusion layer, generated at the bonding interface and the subsequent mechanical properties of the roll-bonded Ti grade 1/Al1050/Ti grade 1 sheets, was systematically investigated. The intermetallic compound (IMC) phase generated by post heat treatment conditions adopted in this study was obviously indexed as monolithic  $TiAl_3$ . Whereas the thickness of IMC layer generated by annealing at 500 °C was approximately 100 nm scale, it drastically increased above 1.5  $\mu m$  when annealed at 600 °C. Uniaxial tensile and peel tests were then performed to compare mechanical properties. As a result, the bonding strength drastically increased above 7.9 N/mm by annealing at 600 °C, which implies that proper annealing condition was a prerequisite, to improving interface bonding strength as well as global elongation properties for Ti/Al/Ti 3-ply sheet.

**Keywords:** Roll bonding, Heat treatment, Intermetallic compound, Bonding strength

### 1. 서론

두 가지 이상의 이종(異種) 금속소재를 적층하여 대면적 접합한 다층금속 판재는 단일 금속만으로 구현이 어려운 배타적 기능 동시 구현 측면에서 그 활용처가 자동차, 항공, 플랜트, 전기/전자 등 다양한 분야로 꾸준히 증가하고 있다[1]. 다층금속 판재는 제조 공정의 특성에 따라 크게 용융 기반, 고상 접합 두 가지로 구분할 수 있고, 이 중 고상 접합 방식이 상대적으로 공정 변수의 조절이 용이한 것으로 알려져 있다[2]. 고상 접합 기반 다층금속 판재 제조 공정으로는 롤 본딩(roll bonding)[3,4], 폭발 압접(explosive welding)[5-7], 확산 접합(diffusion bonding)[8,9], 마찰 교반 접

합(friction stir welding) 등이 대표적으로, 이 중 롤 본딩 공정이 대면적 접합 양산이 가능하고, 편의성, 경제성이 우수한 측면에서 널리 적용되고 있다[3,10-12].

롤 본딩 구성 소재로 티타늄을 활용하는 경우 높은 비강도, 우수한 내부식성 등의 장점에도 불구하고 높은 가격 및 가공의 어려움으로 응용 분야에 제한이 되고 있으며, 반면 알루미늄은 티타늄 대비 부식 특성은 나쁘지만 경량으로 상대적으로 성형하기 쉽고 저가이며 여러 금속소재들과 접합 특성이 좋다는 장점이 있다. 따라서 각자의 단점을 보완하기 위해, 알루미늄의 경제성, 성형성과 티타늄의 높은 내부식성, 비강도의 특성을 조합하여 이종 금속소재로 대체하려는 시도가 가능하다[12-14]. 이종 금속 판재의 물성은 롤 본딩 공정에 사용되는 구성 소재의 물성뿐만 아니라, 열 변형 유기 롤본딩 도중, 혹은 롤 본딩 이후의 후열처리에 의해 금속학적으로 생성되는 확산층 및 계면 결합에도 상당히 의존한다.

1. 한국재료연구원 재료공정연구실 연구생, 부산대학교 기계공학부 대학원생

2. 한국재료연구원 재료공정연구실, 선임연구원

3. 부산대학교 기계공학부, 교수

4. 한국재료연구원 재료공정연구실, 책임연구원

# Corresponding Author: Kwang Seok Lee, Korea Institute of Materials Science. E-mail: ksl1784@kims.re.kr, ORCID: 0000-0002-4378-7902

이종 금속 소재의 경우 롤 본딩 이후 금속학적 접합층 생성을 위한 열처리 조건에 따라 접합강도를 향상 및 저하시킬 수 있는 것으로 알려져 있으며, Ti/Al 계면의 경우  $TiAl_3$ ,  $TiAl$ ,  $TiAl_2$  등 금속간화합물 형성에 대한 연구가 다수 진행된 반면 금속학적 접합을 최대화 하면서 취성 금속간화합물상의 형성과 성장을 최소화하는 최적 열처리 조건은 아직 완벽히 보고되지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 폭 80 mm급 Ti/Al/Ti 3-ply 이종금속 판재의 롤 본딩 공정 적용 제조 가능 조건 및 접합 강도 향상을 위한 최적 후열처리 조건을 도출하고자 하였다.

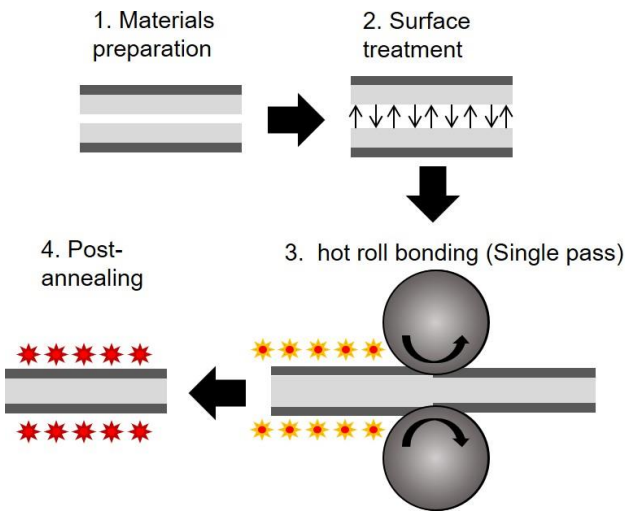


Fig. 1 Schematic diagram for manufacturing process of Ti/Al/Ti multi-layered sheet.

## 2. 실험 방법

### 2.1 소재 확보, 열처리 및 계면 분석

본 연구에서 사용된 모재는 Ti/Al 2-ply 판재로 길이 200 mm, 폭 80 mm, 두께 0.8 mm이며, 구성 소재는 순티타늄(Grade 1)과 알루미늄(Al1050)으로 화학 성분은 표 1과 같다. 이를 활용한 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속 판재 제조를 위한 롤 본딩 공정은 Fig. 1과 같다. Al 표면을 400메쉬의 사포로 그라인딩하여 표면에 생성된 알루미늄 산화층을 제거하였으며, 원활한 접합을 위해 400 °C의 온도에서 가열한 후 접합하였다. 이 때 압하율은 대략적으로 25% 내외로 설정하였으며, 롤 본딩 공정을 거친 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속 판재는 길이 약 240 mm, 폭 80 mm, 두께는 1.2 mm

수준이었다. Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속 판재 물성에 영향을 미치는 최적의 후열처리 조건을 도출하기 위한 모든 열처리 환경은 관상로에서 진행하였고, 후열처리 시간 및 온도에 따른 시편 번호는 표 2와 같이 정리하였다.

Table 1 Chemical compositions of the constituent alloys adopted in this study.

Ti (Grade 1)	H	N	O	Fe	Ti
	0.001	0.011	0.127	0.05	Bal.
Al (Al1050)	Fe	Si	Ti	Mg	Al
	0.26	0.09	0.01	0.01	Bal.

Table 2 Annealing conditions of Ti/Al/Ti 3-ply sheets adopted in this study.

Post-annealing	Time (h)				
	2	3	4	5	
Temperature (°C)	400	A1	A2	A3	A4
	500	A5	A6	A7	A8
	600	A9	A10	A11	A12

롤 본딩 및 열처리한 시편들의 구성 모재 및 Ti/Al 계면 미세 조직은 에너지 분산형 X-선 분석기(Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, 이하 EDS)가 부착된 전계방사형 주사전자현미경(Field-Emission Scanning Electron Microscope, 이하 FE-SEM), 후방산란 전자 회절패턴분석기(Electron Back-Scatter Diffraction, EBSD) 및 투과전자현미경(Transmission Electron Microscope, 이하 TEM, model Hitachi HF5000)을 이용해 확인하였다.

### 2.2 기계적 물성 평가

Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재의 후열처리 전후 Ti/Al 계면에 생성된 나노 혹은 수 마이크로미터 스케일 금속간 화합물층(Intermetallic compounds, 이하 IMCs) 경도 측정을 위해 나노인텐터(모델명 Nanotest Xtreme, Micro Materials)를 활용하였다. Berkovich Diamond팁을 사용했으며, 계면 근방의 범위를 100  $\mu\text{m}$  X 100  $\mu\text{m}$ 로 3D mapping한 후 측정 포인트를 지정하여 진행함에 있어, depth-load type으로 최대 하중을 5mN으로 설정하여 Ti grade1, 금속간 화합물층, Al1050 위치별 경도 데이터를 비교하였다.

후 열처리 조건이 전체 3-ply 다층금속판재의 기계적 물성에 미치는 영향을 확인해보기 위해 또한 일축 인장 시험을 진행하였다. 일축 인장 시험에 사용한 인장시편은 Fig. 2(a)의 실사와 같이 표점 거리 (gage length)가 25 mm인 ASTM E8 sub-size로 제작하였고, 1,000 kN의 로드셀(Load Cell)이 장착된 인장 시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하였다. 모든 시험은 상온에서 준정적 변형률 속도(0.001/s)로 진행하였다.

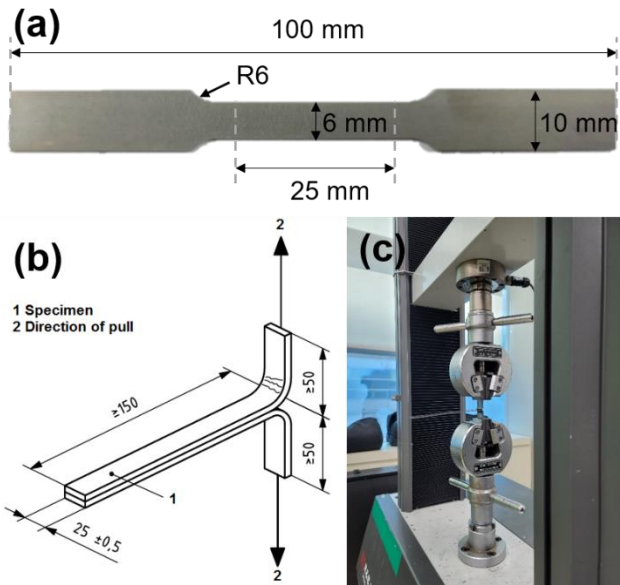


Fig. 2 (a) Picture of the ASTM E8 sub-size specimen used for uniaxial tensile test. (b) Schematic diagram of the ISO 11339 specimen used for the peel test adopted in this study. (c) The appearance of the peel test specimen installed in the universal tensile tester.

또한 열처리 온도에 따른 Ti/Al/Ti 다층금속판재의 계면 접합 강도 변화를 보기 위해 박리 실험을 진행하였다. 시편 사이즈는 ISO 11339 규격으로 Fig. 2(b)와 같다. 열처리를 진행한 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재의 계면을 방전가공한 후, 시편 그림부를 벌려 T자 모양으로 만들어 Fig. 2(c)와 같이 만능 인장 시험기 홀더에 박리 시편 그림부를 물려 분당 6 mm의 속도로 계면 박리 실험(T-peel test)을 진행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 계면 미세조직 분석

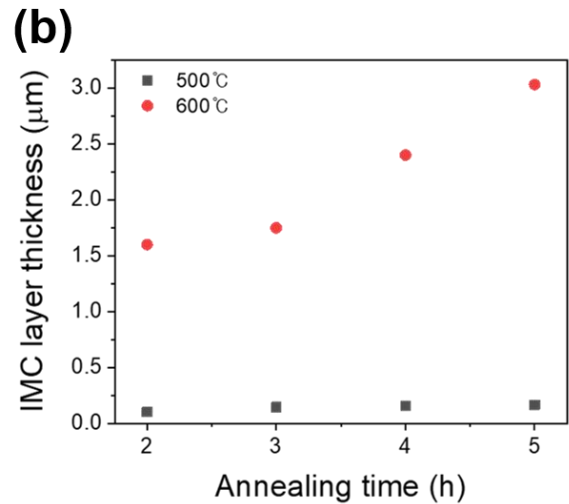
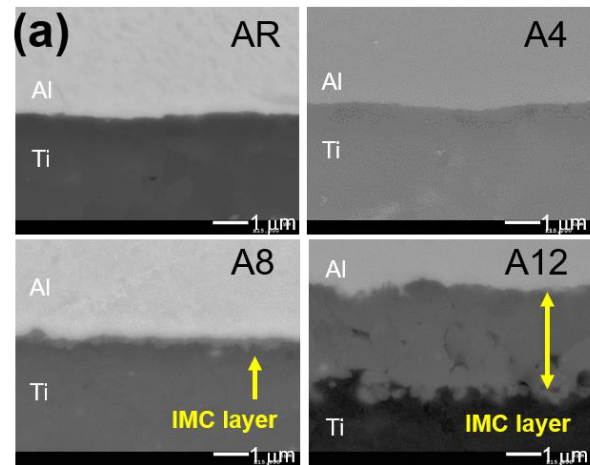


Fig. 3 (a) Representative SEM image of the Ti/Al interface subjected to heat treatment at a temperature of 400 °C to 600 °C for 5 hours. (b) Thickness comparison graph of the IMC layers at the Ti/Al interface obtained by SEM images.

Ti/Al/Ti 다층금속판재의 400 ~ 600 °C 온도 조건에서 5시간 열처리를 진행한 시편(A4-400 °C, A8-500 °C, A12-600 °C) 및 열처리를 하지 않은 시편(AR)의 계면을 SEM을 활용하여 15,000배로 확대하여 측정된 이미지는 Fig. 3(a)와 같고, 후열처리 온도가 올라감에 따라 계면에 생성된 금속간화합물층이 두꺼워지는 것을 명확히 확인할 수 있다. Fig. 3(b)는 Ti/Al 계면 금속간화합물층 두께를 각 열처리 조건 별로 SEM 관찰 후 측정된 변화 그래프로, 400 °C에서는 SEM 분해능 범위에서는 금속간화합물층의 형성이 명확히 관찰되지 않아 측정이 불가능했으나, 500 °C에서의 접합층 두께는 후열처리 시간과 무관하게 평균 약

0.15  $\mu\text{m}$  정도로 측정되었다. 반면 열처리 온도가 600  $^{\circ}\text{C}$ 로 상승할 경우, 금속간화합물층의 두께가 1.6  $\mu\text{m}$  이상으로 급격하게 증가하였으며, 5시간 열처리 진행한 시편의 경우 금속간화합물층의 두께가 3  $\mu\text{m}$  이상까지 성장하는 것을 확인할 수 있다.

Ti/Al 금속간화합물층의 정확한 두께 및 상 확인을 위해 TEM을 이용하여 Ti/Al 계면을 측정하였다. Fig. 4(a)는 500  $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 열처리를 진행한 A5 시편의 계면 이미지로, 계면에 두께 약 100 nm인 금속간화합물층이 생성된 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 600  $^{\circ}\text{C}$ 에서 5시간 열처리를 진행한 A12 시편의 계면 이미지로, Al 및 Ti 모재 사이에 두께 약 3  $\mu\text{m}$  전후의 금속간화합물층이 형성되었음을 확인할 수 있다.

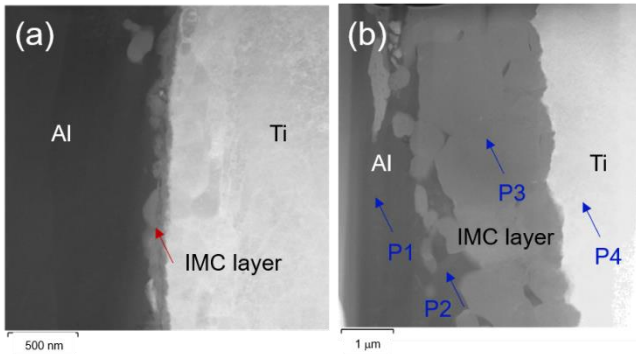


Fig. 4 Ti/Al interface images from the representative specimen heat-treated (a) at 500  $^{\circ}\text{C}$  for 2 hours, and (b) at 600  $^{\circ}\text{C}$  for 5 hours.

이에 대한 EDS mapping 결과는 Fig. 5와 같다. A5 시편의 경우 계면에 금속 결합(metallurgical bonding) 층이 생성되고 Ti 성분이 Al 모재쪽으로 침투했음을 확인할 수 있고, 열처리 온도/시간이 증가함에 따라 그 두께가 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

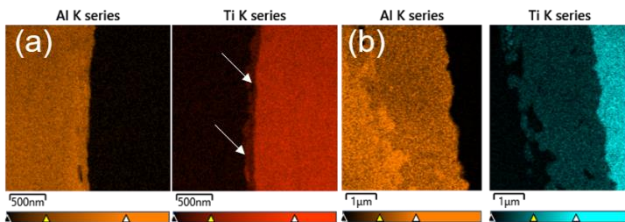


Fig. 5 EDS mapping images obtained from the representative specimens heat-treated (a) at 500  $^{\circ}\text{C}$  for 2 hours, and (b) at 600  $^{\circ}\text{C}$  for 5 hours.

계면 금속 결합층의 정확한 성분 분석을 위해, Fig. 4(b)의 P1~P4 4개 위치에서 성분 분석을 실시한 결과는 Table 3과 같다. P1 및 P2 위치에서의 성분은 일부 Ti가 Al에 확산되었지만 금속간화합물층은 아니므로 판단되며, P3의 경우 Al:Ti의 원자비가 3:1인 금속간화합물인 것으로 예상 가능하다. 보다 정밀한 확인을 위해 고배율 TEM을 이용한 회절 패턴을 확인한 결과는 Fig. 6과 같다. Figs. 6(a), 6(b)는 각각 500  $^{\circ}\text{C}$ 에서 2시간 열처리를 진행한 A5 시편 및 600  $^{\circ}\text{C}$ 에서 5시간 열처리를 진행한 A12 시편의 TEM 이미지들 이고, 각 그림의 붉은 색 영역에서의 회절 패턴 분석 결과는 Figs. 6(c), 6(d)와 같다. 두 영역 공회 indexing 결과  $\text{TiAl}_3$  금속간화합물층만이 형성되었음을 확인하였으며, A12 시편이 본 연구에서 선택한 가장 고온-장시간 열처리 조건임을 감안하면, 본 연구에서 선택한 열처리 조건에서 형성된 금속간화합물 상은  $\text{TiAl}_3$  단상으로 결론지을 수 있다.

Table 3 Chemical compositions measured at four points (P1~P4) from Fig. 4(b).

At. %	P1	P2	P3	P4
Al	96.2	96.1	73.9	0.5
Ti	3.8	3.9	26.1	99.5

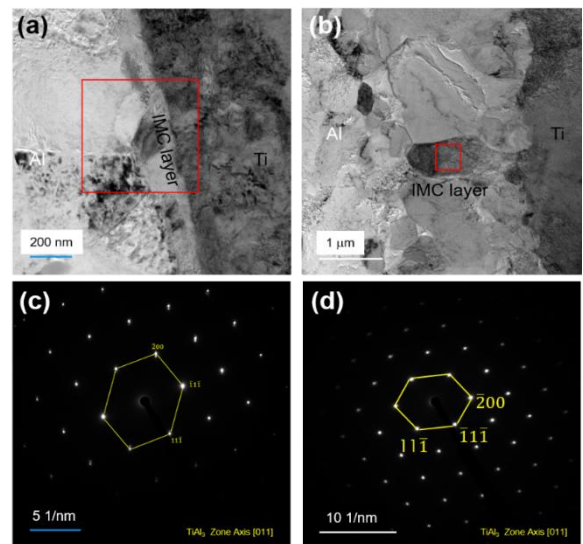


Fig. 6 Bright-field TEM images obtained from the representative specimens heat-treated (a) at 500  $^{\circ}\text{C}$  for 2 hours and (b) at 600  $^{\circ}\text{C}$  for 5 hours. Selected area diffraction patterns obtained from the red-rectangular boxes in (c) Fig. 6(a) and (d) Fig. 6(b), respectively.

### 3.2 기계적 특성

롤 분당 제조된 Ti/Al/Ti 다층금속 판재의 후열처리 조건에 따라 계면에 생성되는 금속간화합물층의 물성 확인을 위해 우선 저온(400 °C, A3) 및 고온(600 °C, A9)에서 열처리한 두 개의 시편에 대해 나노 압입시험기를 활용하여 구성 모재군 및 계면 경도를 측정하였다.

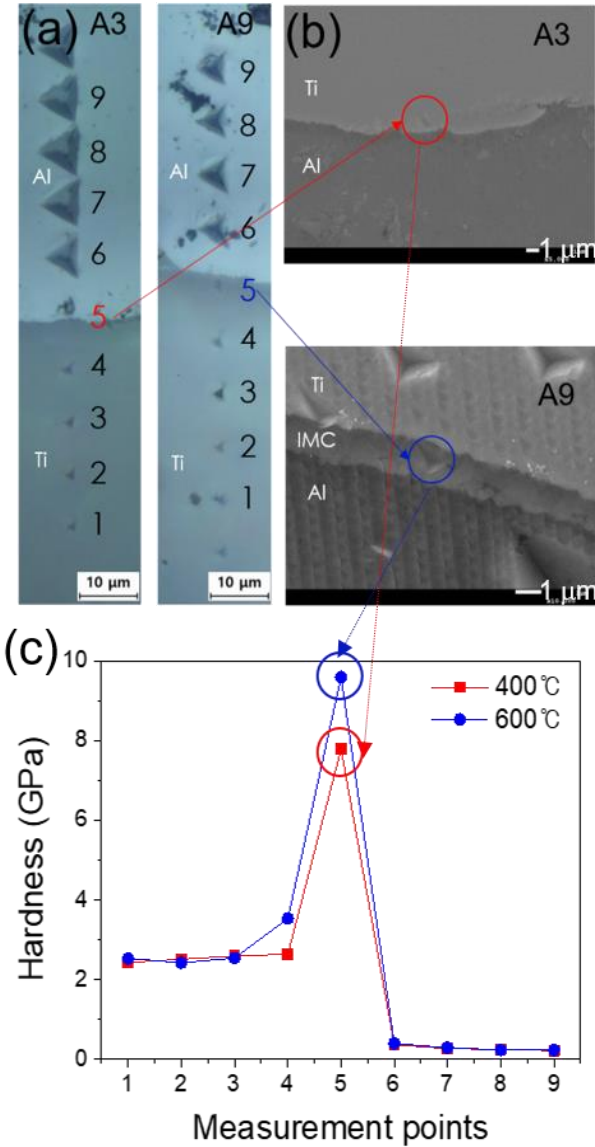


Fig. 7 (a) OM images of A3 and A9 with nano indenter press-fitting marks. (b) SEM image of point number 5 of press-fitting marks of A3 and A9. (c) Hardness measurement graph of A3 and A9 specimens.

구성 모재 및 계면 반응상층의 경도 추출을 위해, Fig. 7(a)와 같이 측정 포인트 사이 간격을 8 μm로 설정하여 9개 포인트에 대해 연속 압입 시험을 수행하였으며, 가운데 포인트에 해당하는 5번 위치에서의 계면 반응상층의 나노압입자 이미지는 Fig. 7(b)와 같다. Fig. 7(c)는 Fig. 7(a) 경도 측정 데이터를 그래프로 도시한 결과로, Al 및 Ti 모재의 경우 열처리 온도 및 시간 조건에 무관하게 거의 유사한 경도값을 확인할 수 있으며, Al 모재의 경우 평균 0.27 GPa, Ti 모재의 경우 평균 2.51 GPa 수준이었다. 반면 금속간화합물층의 경도는 A3의 경우 7.79 GPa, A9의 경우 9.59 GPa 수준으로 상당히 높아지는 현상을 확인하였다. 다만 계면 금속간화합물이 TiAl<sub>3</sub> 단상임을 고려하면 A3 시편에서의 금속간화합물층 두께가 약 100 nm 수준으로 매우 작은 관계로 압입자의 크기와 거의 유사하여, 측정된 경도 값이 주변 연성 모재의 영향을 다소 받았음을 유추할 수 있다.

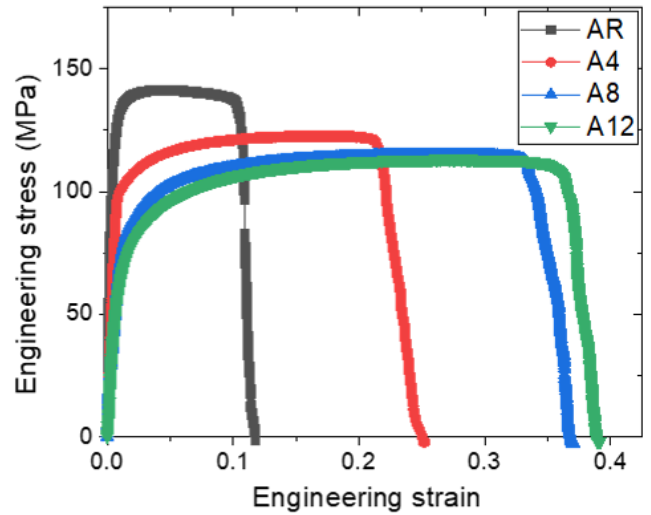


Fig. 8 Engineering stress-strain curves for heat treatment conditions of Ti/Al/Ti 3-ply specimens which were heat-treated at different temperatures for 5 hours.

롤 분당 후 후열처리 조건이 전체 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재 물성에 미치는 영향을 확인하기 위해 상온에서 일축 인장 실험을 진행하였고, 대표적으로 5 시간 동안의 열처리 온도에 따른 응력-변형률 선도는 Fig. 8과 같다. 열처리를 하지 않은 시편(AR)의 항복강도는 141.4 MPa로 가장 높게 측정되었고, 400 °C 열처리(A4) 시편은 124.3 MPa, 500 °C 열처리(A8) 시편은 124.9 MPa로 거의 유사한 수준으로 감소한 반면, 600 °C 열처리(A12) 시편은 122.7 MPa로 추가적인

항복강도 감소 현상을 확인할 수 있다. 이와 같이 열처리 온도가 증가할수록 항복강도 값은 감소하였지만, 500 °C 및 600 °C 열처리 시편의 네킹 이전까지의 연신율은 최소한 30% 이상까지 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 이로부터 Ti 표면 터짐 혹은 계면 박리 효과만 지연될 수 있다면, 고온에서의 후열처리가 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재의 저에너지투입 성형성 향상 효과에 도움이 될 것으로 예측 가능하다.

Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재의 열처리 온도에 따른 계면 접합 강도를 측정하기 위해 Ti/Al 계면 박리 실험을 진행하였고, 초기에 소재에 일어나는 변형 구간을 제외한 20 mm 이후의 데이터를 활용해 정리한 결과를 금속간화합물층의 두께와 겹쳐 도시한 그림은 Fig. 9와 같다. 열처리를 하지 않은 AR 시편은 접합 강도가 0.27 N/mm로 매우 낮았고, 400 °C로 열처리한 시편의 접합 강도는 4 N/mm 이하로 측정되었다. 500 °C에서 열처리를 진행한 시편의 접합 강도 또한 일부 과측정된 조건을 제외하고 약 5 N/mm 내외로 전반적으로 400 °C에서 열처리한 시편들의 접합 강도와 큰 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 반면 600 °C에서 열처리를 진행한 시편의 접합 강도 데이터는 400 °C, 500 °C에서 열처리한 시편들의 접합 강도와 다르게 7.9 ~ 17.9 N/mm로 측정되어 두 온도 조건에 비해 큰 폭으로 상승한 것을 볼 수 있다. 이로부터 Ti/Al 계면에 생성된 금속간화합물층의 두께가 0.2  $\mu\text{m}$  이하일 경우와 비교하여, 최소한 1.5  $\mu\text{m}$  이상 수준까지 확산시켜야 롤 본딩된 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재의 접합 강도를 유의미한 수준까지 증가시킬 수 있음을 결론지을 수 있다.

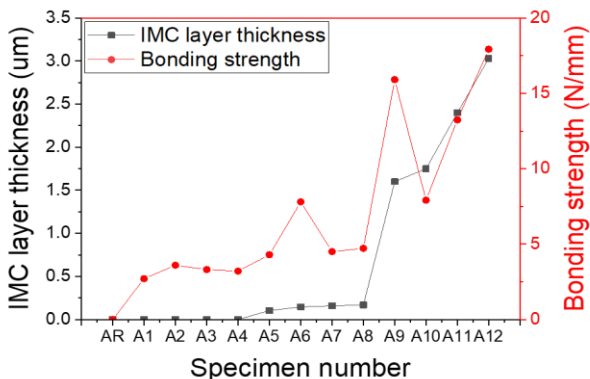


Fig. 9 Comparison between the thickness of the IMC layer created at the Ti/Al interface bonding strength.

## 4. 결론

본 연구에서는 롤 본딩 공법으로 제작된 Ti/Al/Ti 3-ply 다층금속판재의 계면 접합 강도 향상을 위한 최적 열처리 조건을 도출하기 위한 다양한 실험 및 분석을 진행하였으며, 그 결과는 하기와 같이 정리할 수 있다.

(1) 본 연구에서 진행한 롤 본딩 후열처리 조건 범위(400~600 °C, 2~5 시간)에서 Ti/Al 계면에 생성된 IMC layer는 TEM을 활용한 EDS 및 회절 패턴 분석 결과  $\text{TiAl}_3$  단일 상으로 확인할 수 있었다.

(2) 나노압입시험기를 사용하여 열처리 조건에 따른 모재 및 계면 금속간화합물층 경도의 차이를 확인하였다. Al 및 Ti 층은 본 연구에서의 열처리 조건과 상관없이 각각 0.27 GPa, 2.51 GPa 내외로 거의 유사한 경도 값을 보였고,  $\text{TiAl}_3$  금속간화합물층의 경도 값은 7.79 GPa 이상으로 상당히 높은 값을 보였다.

(3) 열처리 조건에 따른 응력-변형률 선도를 보았을 때 열처리를 하지 않은 AR 시편의 항복강도 값이 141.4 MPa로 가장 높게 측정되었다. 반면에 연신율은 열처리 온도가 올라갈수록 증가하는 경향을 확인하였다.

(4) 400 °C에서 열처리한 시편의 접합강도는 4 N/mm 이하이며, 500 °C에서 열처리한 시편의 접합강도는 5 N/mm 내외로 400 °C의 접합강도 결과에 비해 유의미한 차이는 없었다. 반면에 600 °C에서 열처리한 시편의 접합강도는 최소 7.9 N/mm, 최대 17.9 N/mm로 다른 열처리 조건에 비해 큰 차이를 보였으며, 이로부터 계면에  $\text{TiAl}_3$  단일 상을 유지하면서 그 두께를 1.5  $\mu\text{m}$  이상 수준까지 증가시킴으로써 유의미한 접합강도 증가 효과를 도출하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 산업 핵심기술개발사업(No. 20006974) 및 한국재료연구원 주요사업(No. PNK5380)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 Ti/Al 2-ply 모재를 제조, 공급해 주신 ㈜한국클래드텍에도 감사의 말씀을 드립니다.

## REFERENCES

- [1] J. Lacaze, S. Tierce, M. C. Lafont, Y. Thebault, N. Pébère, G. Mankowski, C. Blanc, H. Robidou, D. Vaumousse and D. Daloz, 2005, Study of the microstructure resulting from brazed aluminum materials used in heat exchangers, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 413, pp. 317-321. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.187>
- [2] K.S. Lee, Y.S. Lee, Y.N. Kwon, 2014, Influence of Secondary Warm Rolling on the Interface Microstructure and Mechanical Properties of a Roll-Bonded Three-Ply Al/Mg/Al Sheet, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 606, pp. 205-213. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.082>
- [3] X. Li, G. Zu, M. Ding, Y. Mu, P. Wang, 2011, Interfacial microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding and annealing, *Mater. Sci. Eng. A*, vol 529, pp. 485-491. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.087>
- [4] P.P. Gudur, M.A. Salunkhe, U.S. Dixit, 2007, A theoretical study on the application of asymmetric rolling for the estimation of friction, *Int. J. Mech. Sci.*, vol 50, pp. 315-327. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.06.002>
- [5] K.X. Liu, W.D. Liu, J.T. Wang, H.H. Yan, X.J. Li, Y.J. Huang, X.S. Wei, J. Shen, 2008, Atomic scale bonding of bulk metallic glass to crystalline aluminum, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, 081918. <https://doi.org/10.1063/1.2976667>
- [6] M.H. Bina, F. Dehghani, M. Salimi, 2013, Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welding copper/stainless steel, *Mater. Des.*, vol. 45, pp. 504-509. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.037>
- [7] H. Zhao, Y. Zhou, P. Li, Z. Huang, 2012, An investigation of the microstructure and properties of the explosively welded Gr5-SS304 clad plates for golf heads, *Int. J. Mater. Res.*, vol. 103, pp. 571-574. <https://doi.org/10.3139/146.110722>
- [8] S. Dziallach, W. Bleck, M. Köhler, G. Nicolini, S. Richter, 2009, Roll-bonded titanium/stainless-steel couples, part 1: Diffusion and interface-layer investigations, *Adv. Eng. Mater.*, vol. 11, pp. 75-81. <https://doi.org/10.1002/adem.200800276>
- [9] W. Yao, A.P. Wu, G.S. Zou, J.L. Ren, 2008, Formation process of the bonding joint in Ti/Al diffusion bonding, *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 480, pp. 456-463. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.07.027>
- [10] P. Wang, Z. Chen, C. Hu, B. Li, J. Lin, Q. Liu, 2020, Effects of annealing on the interface microstructures and mechanical properties of hot roll bonded Ti6Al4V/AA6061 clad sheets, *J. Mater. Res. Tech.*, vol. 9, pp. 11823-11825. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.08.070>
- [11] Y. M. Jo, K.S. Lee, N.H. Kang, Y.S. Lee, 2014, Influence of annealing on the interface-correlated mechanical properties of a Ti/STS clad sheet, *Korean J. Met. Mater.*, vol. 52, pp. 881-891. 0.3365/KJMM.2014.52.11.881
- [12] K.S. Lee, S.J. Bea, H.W. Lee, S.H. Kang, 2017, Interface-correlated bonding properties for a roll-bonded Ti/Al 2-ply sheet, *Mater. Char.*, vol. 134, pp. 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.10.009>
- [13] H. Xiao, Z. Qi, C. Yu, C Xu, 2017, Preparation and properties for Ti/Al clad plates generated by differential temperature rolling, *J. Mater. Proc. Tech.*, vol. 249, pp. 285-290. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.013>
- [14] D.H. Lee, J.S. Kim, H.J. Song, S.H. Lee, 2017, Tensile property improvement in Ti/Al clad sheets fabricated by twin-roll casting and annealing, *Met. Mater. Int.*, vol. 23, pp. 805-812.