

연구논문

타이타늄합금의 전자빔용접성

Electron beam weldability of titanium alloy

이채훈*, 윤종원*, 박노광**

*동의대학교 신소재공학과, **한국기계연구원 부설 재료연구소

ABSTRACT

Electron beam weldability was investigated for 1mm thick cold rolled sheets of commercially pure grade titanium and Ti-6Al-4V alloy.

Accelerating voltage of 40kV, beam current of 6mA, and weld speed of 0.8m/min was used and focal position of focused electron beam was just on the surface of workpiece.

Microstructure of weld metal, the heat affected zone and base metal was observed using optical microscope. Vickers hardness was measured across the welds and the transverse tensile test was carried out. Hydroformability test was also carried out for the butt welded coupons of commercially pure grade titanium.

For the electron beam welded C · P Ti, the average grain size was equiaxed α (15~25 μm) for base metal, coarse equiaxed α (80~200 μm) for weld metal and annealed and enlarged grain(40~120 μm) for the HAZ. The vickers hardness of C · P Ti was 180~200Hv for base metal, and 160~180Hv for the weld metal and the HAZ.

For the electron beam welded Ti-6Al-4V alloy, the vickers hardness was 360Hv for the base metal, and 400~425Hv for the weld metal and the HAZ.

All the failure occurred at the base metal, when the transverse weld tensile test was carried out for both electron beam welded C · P Ti and Ti-6Al-4V alloy.

The formability of electron beam welded C · P Ti was decreased compared with that of C · P Ti base alloy.

1. 서론

산업의 발전과 더불어 산업구조물의 환경도 점점 열악해지고 있으며, 이러한 구조물에 대한 안정성을 고려하여 경량/고강도의 재질 선정 개념도 다변화 되고 있다. 최근에 이러한 요구에 부응하는 재료로서 Ti 및 Ti 합금에 대한 이용이 증가하고 있다.

그러나 Ti은 용점이 약 1,670℃로 매우 높아서 완전한 잉곳의 제작이 곤란하고, 특히 고온에서는

급격히 산화되어 본래 요구되는 성질이 열화되기 때문에 열간가공과 용접이 곤란하며, 높은 항복응력 때문에 냉간가공 또한 어렵다는 단점이있다. 구조물의 재료 생산성의 향상과 함께 가공 공정수 감소에 의한 원가 절감에는 용접구조의 채용이 매우 유효하며, 또 복잡한 형상의 부품 조립과 제조, 가공과 사용 중에 생기는 약간의 결함과 손상의 완전 보수에도 용접은 중요한 역할을 한다. Ti 용접과 종래 일반 금속재료의 차이점은 Ti은 상온에서 안정한 산화피막이 생성되어 부식을 방지하지

만, 600°C이상의 고온에서는 반응성이 매우 양호하여 O, N, H 등의 원소로 오염되어 내식성을 저하시키거나, 용착금속 내부에 기공등의 결함을 발생시키게 되어 내식성 뿐만 아니라 기계적인 성질까지 저하시키는 것이다. 이 때문에 Ti 합금의 용접에 있어서 대기와 차단된 분위기에서 접합이 이루어지는 전자빔용접이 각광받고 있다. 따라서 본 연구에서는 타이타늄 및 타이타늄합금의 전자빔 용접을 수행하여 접합부에서의 조직과 물성변화를 검토 하였다.

2. 실험 방법

2. 1 시편 제작 및 실험 조건

본 연구에 사용된 두께 1mm 의 냉간 압연된 C·P Ti 판재 및 Ti-6Al-4V합금 판재의 화학 조성을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of C·P Ti & Ti-6Al-4V alloy

Materials	C	Fe	N	O	H	Al
C·P Ti	0.08	0.25	0.03	0.18	0.015	-
Ti-6Al-4V	0.02	0.18	0.01	0.18	0.0085	6.33

Materials	V	Y	Ti	Residuals each	Residuals total
C·P Ti	-	-	Bal.	-	-
Ti-6Al-4V	4.20	0.001	Bal.	0.1	0.4

C·P Ti 과 Ti-6Al-4V 합금을 126mm ×50mm ×1mm 의 판재로 가공한 후 시편의 개선정도를 높이기 위해 용접 이음부면을 기계가공 한 후, 솔벤트를 이용하여 표면의 오염물질을 제거하고 탈자 처리 후 Bead on plate 용접으로 적정 조건을 선정하여 재료의 압연방향과 수직인 방향으로 맞대기 용접을 실시하였다. 이 때 용접조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Electron beam welding condition

Accelerating voltage (kV)	Beam current (mA)	Weld speed (mm/min)	Focal position	Vacuum (Torr)
40	6	800	0	1.5x10 ⁻³

그리고 총 3종의 용접 쿠폰을 제작 하였는데, C·P Ti, Ti-6Al-4V 합금간 동종 재질의 용접 쿠폰과 C·P Ti와 Ti-6Al-4V 합금의 이종 재질의 용접 쿠폰을 제작 하였다. 또 액압성형 시험을 위해서는 100mm ×200mm ×1mm 판재를 같은 방법으로 준비하고 동일 용접조건에서 용접하였다.

2.2 미세조직 관찰 및 기계적 특성

전자빔 용접이 끝난 C·P Ti과 Ti-6Al-4V 합금에서 접합부의 기계적 특성과 미세조직과의 관계를 알아보기 위해 접합방향과 수직인 방향으로 인장시편을 제작하고 미세조직 및 경도 시험편을 제작하였다. 연마 후에 C·P Ti는 증류수 85ml, 불산 5ml, 질산 5ml, Ti-6Al-4V합금은 증류수 90ml, 염산 3ml, 불산 2ml, 질산 5ml의 혼합용액을 사용하여 에칭을 실시하였다. 광학현미경(OM, Optical Microscopy)을 사용하여 미세조직을 관찰하였고, 상의 성분 변화를 알아보기 위해 EPMA(Electron probe micro analysis)가 사용되었다. 기계적 특성 평가를 위해 비커스 경도기를 사용하여 경도를 측정하였으며, 이 때 압입하중은 100gf, 압입시간은 5sec로 선정하였다. 또한 접합부의 인장시험을 실시 하였다. 시편은 KS B 0801의 13A호 규격으로 준비 되었고, Cross head speed는 1.5mm/min으로 하여 측정하였다.

3. 실험 결과

3. 1 미세조직 및 성분분석 결과

Fig. 1은 각 용접부의 용접금속, 열영향부, 모재의 거시조직이다. C·P Ti의 용접금속에서는 80200 μm 정도의 비교적 큰 등축 α 결정립이 관찰 되었고, 열영향부에서는 모재에서 15~25μm 정도였던 미세한 α 결정립이 열영향으로 인해 40±20 μm 로 성장한 결정립을 관찰할 수 있었다. Ti-6Al-4V합금의 용접금속에서는 용융 후 급냉으로 인해 압연상태인 모재의 연신된 결정립들이 침상의 α' 마르텐사이트로 변태 된 것을 확인할 수 있었다.

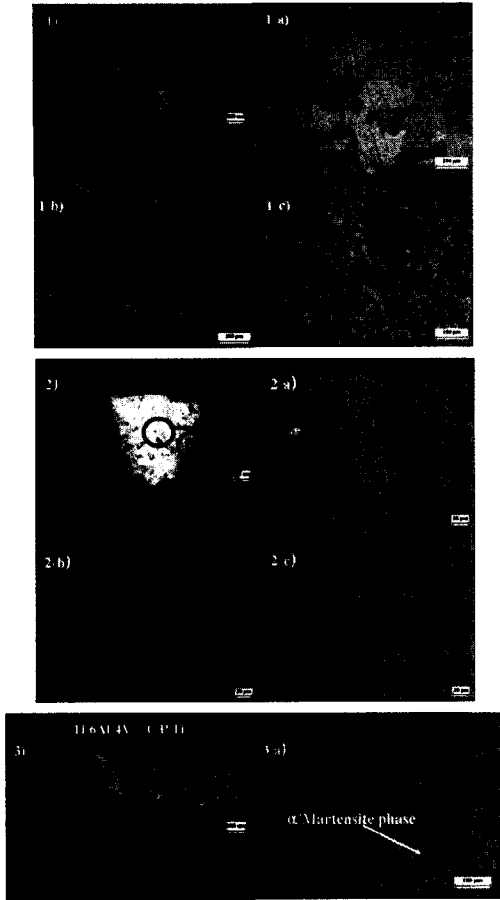


Fig. 1 Microstructure of EB welded joint.

- 1) C·P Ti welded a) C·P Ti weld metal b) C·P Ti HAZ c) C·P Ti base metal
- 2) Ti-6Al-4V welded a) Ti-6Al-4V weld metal b) Ti-6Al-4V HAZ c) Ti-6Al-4V base metal
- 3) C·P Ti & Ti-6Al-4V dissimilar welded a) weld metal

C·P Ti과 Ti-6Al-4V 합금의 이종 재질 용접부에서는 열영향부에서 모재까지는 각 소재의 동종 재질 용접부에서와 비슷한 양상을 나타내며, 용접금속에서는 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 EPMA 결과 용융되었을 당시 Ti-6Al-4V합금의 합금원소인 Al과 V이 용접금속으로 확산되어 응고하여 침상의 초석 α 상과 α' 마르텐사이트가 혼재하는 것을 관찰 할 수 있었다. 상에 대한 분석은 차후 TEM을 통해 좀더 자세히 검토하기로 하였다.

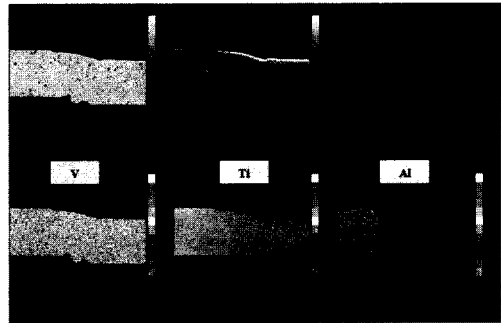


Fig. 2 Electron probe micro analysis for C·P Ti & Ti-6Al-4V dissimilar welded.

3.2 비커스 경도 시험 및 인장 시험 결과

접합부의 기계적 특성을 평가하기 위해 비커스 경도 시험과 인장 시험을 실시하였다. 접합부의 비커스 경도 분포도를 Fig. 3에 나타내었다. 실험 결과 Ti-6Al-4V합금 판재의 전자빔용접부는 모재에서 360Hv, 용접금속에서는 용융 후 급냉으로 인한 α' 마르텐사이트의 형성으로 인해 400425Hv 의 높은 경도값을 나타내었다.

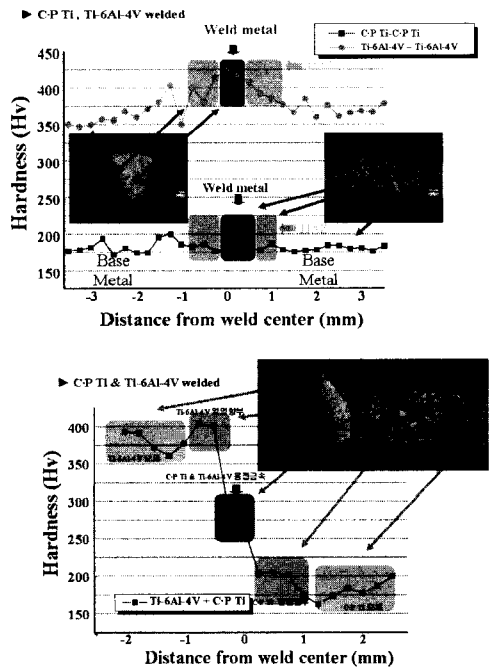


Fig. 3 Distribution of vickers hardness for C·P Ti, Ti-6Al-4V alloy, dissimilar welded.

이러한 상변태의 구동력은 냉각속도인데 전자빔 용접의 빔 폭이 좁고, 깊이 녹아 섞여 열영향부의 폭이 작아 냉각속도가 빨라진 것으로 판단된다. C·P Ti의 경도 분포는 모재에서 180~200Hv, 용접부와 열영향부에서 160~180Hv 정도로 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 C·P Ti의 기계적 성질이 결정립 크기 보다는 재료 내부에 존재하는 미세 석출물등의 다른 메커니즘에 의해 강도가 부여되었기 때문으로 판단된다. C·P Ti와 Ti-6Al-4V합금의 이종 재질 용접부에서는 용접금속의 경도가 270Hv로 C·P Ti와 Ti-6Al-4V합금의 동종 재질 용접금속의 경도값의 중간정도를 나타내었는데 이는 합금 원소의 확산으로 인해 고용강화 효과의 감소가 원인으로 사료된다.

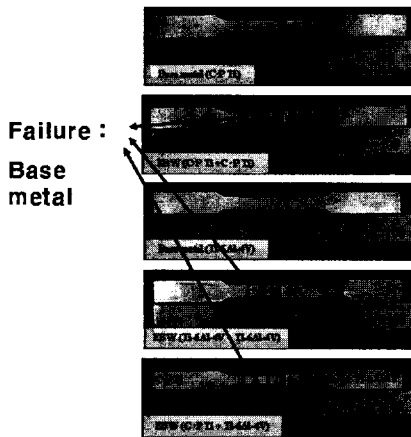


Fig. 4 Appearance after tensile test samples.

인장시험 후 파단된 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 모두 용접금속이나 열영향부가 아닌 모재에서 파단이 일어난 것을 확인할 수 있다.

인장 시험 후 측정된 모재와 접합부를 포함한 인장시편의 항복강도(YS)와 최대인장강도(UTS)를 Fig. 5에 나타내었다. C·P Ti의 경우 모재에서 356MPa, 484MPa였던 항복강도, 인장강도값이 용접부가 포함된 시편에서 각각 363MPa, 489MPa으로, Ti-6Al-4V합금의 경우 모재에서 1001MPa, 1050MPa였던 항복강도, 인장강도값이 용접부가 포함된 시편에서 각각 995MPa, 1042MPa으로 두

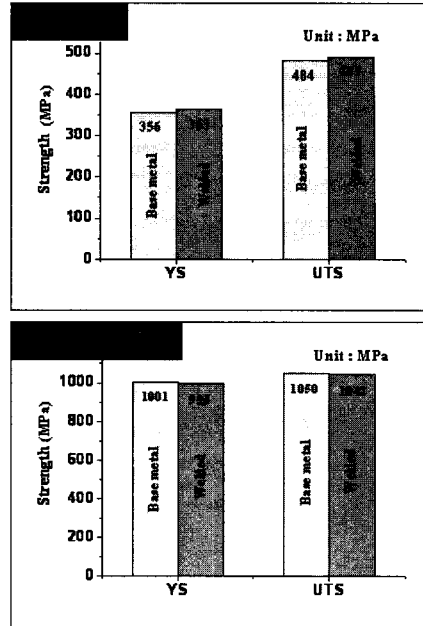


Fig. 5 Comparison of tensile results of C·P Ti & Ti-6Al-4V alloy.

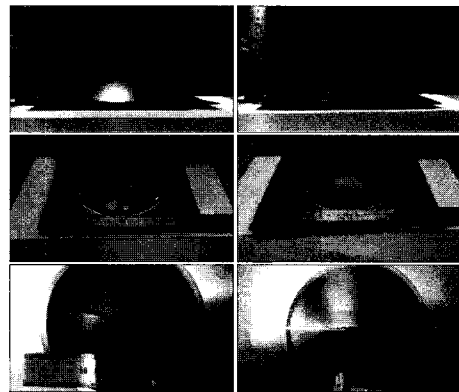


Fig. 6 Failure modes in formability test of electron beam welded C·P Ti coupon.

소재 모두 모재에 비해 용접부가 포함된 시편의 인장성질이 크게 저하되지 않은 것으로 나타났다. C·P Ti와 Ti-6Al-4V합금의 맞대기 용접 시편의 연신률은 각각 36.5%에서 25.5%로 13.85%에서 12.5%로 조금씩 저하하였다.

3.3 액압성형성 시험

Fig. 6에서 보듯이 C·P Ti의 액압 성형성

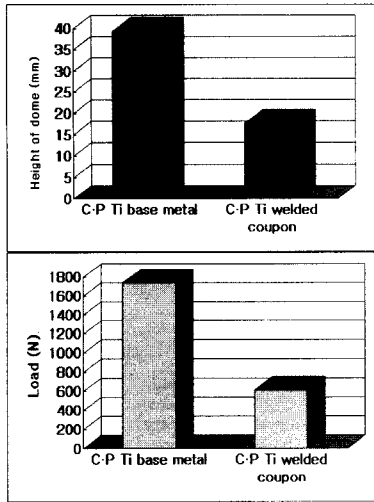


Fig. 7 Formability test result.

시험시 용접금속을 따라 파단된 것을 관찰할 수 있다. 성형성의 지표로 삼은 돔의 높이는 Fig. 7에서 보듯이 모재와 용접부에서 각각 32.4mm와 17.7mm, 파단시 하중은 각각 1739N, 613N으로 용접쿠폰의 성형성이 모재에 비해 현저히 저하하였으며 이것은 용접비드의 형상, reinforcement의 불균일, 마르텐사이트등의 경화조직에 의해 낮아진 연신률이 원인으로 판단된다.

4. 결 론

C·P Ti과 Ti-6Al-4V합금의 전자빔용접 수행 후 접합부의 미세조직과 기계적 특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) C·P Ti의 접합부는 용접금속과 열영향부에서 조대한 등축 α 결정립이 관찰되었으나 인장강도의 변화가 크지 않은 것으로 보아 기계적 성질이 결정립 크기외에 다른 원인이 우세한 것으로 판단된다. 연신률은 결정립 조대화에 의해 10%정도 낮아졌다.
- 2) Ti-6Al-4V합금의 접합부는 빠른 냉각속도에 의한 α' 마르텐사이트 상의 형성으로 강도가 약간 증가, 연신률은 크게 변하지 않은 것으로 나타났다.

- 3) C·P Ti과 Ti-6Al-4V합금의 이종 재질의 접합부의 용접금속이 α' 마르텐사이트 상과 침상의 초석 α 상이 혼재된 것은 용융된 용접금속에 합금원소인 Al과 V의 양이 감소하여 Ms가 높아졌기 때문이라고 판단된다.

참고문헌

- 1) 타이타늄 협회, [타이타늄의 세계]
- 2) Wiliam F. Smith : 金屬材料
- 3) T. Mogandas, D. Banerje, and V. V Kutumba Rao, MMTA, vol.30A March 1999-789, Fusion zone microstructure and porosity in electron beam welds of $\alpha + \beta$ titanium alloy.
- 4) Matthew J. Donachie, Jr. Titanium A technical Guide 2nd Edition, ASM.
- 5) Joining, Titanium Alloys Handbook, MCIC-HB-OZ Battele, 1972, Dec., 4 ; 72-1.
- 6) D. W. Becker, R. W. Messler, Jr. and W. A. Baeslach III : Titanium welding-Critical Review-, Titanium '80, Vol. 1, 255, 1980.