

## 상용순수 Ti과 Ti-6Al-4V 합금의 전자빔용접성 Electron beam weldability of commercially pure titanium and Ti-6Al-4V alloy

이채훈\*, 윤종원\*\*, 박노광\*\*\*

\* 동의대학교 신소재공학과 대학원

\*\* 동의대학교 신소재공학과

\*\*\* 한국기계연구원 부설 재료기술연구소

### 1. 서 론

Ti는 중량비 강도가 높고, 내식성이 매우 좋아 우주항공산업, 화학공업 및 식품공업에 유용하다. 타이타늄의 사용영역이 광범위해짐에 따라 접합기술이 점점 더 중요해 지고 있다. 하지만 산소, 질소 및 탄소와 같은 침입 원소와 높은 반응성 때문에 용융접합시 대기와의 반응으로 인해 용접부 품질이 매우 저하되며, 열전도율이 0.041(cal/cm·sec·°C)로 알루미늄의 약 1/10, 동의 약 1/20 정도로 작아 용접시 발생하는 열방출이 어렵기 때문에 박판의 용접시 열영향에 의한 변형이 생길 우려가 있다<sup>1)</sup>. 본 연구에서는 타이타늄 및 타이타늄합금의 전자빔 용접을 수행하여 접합부에서의 조직과 물성변화, 그리고 용접부를 포함한 판재의 성형을 고려하여 액압성형성을 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 화학조성을 표 1에 나타내었다

Materials	C	Fe	N	O	H	Al	V	Y	Ti	Residuals each	Residuals total
C-P Ti	00.8	0.25	0.03	0.18	0.015	-	-	-	Bal	-	-
Ti-6Al-4V	0.02	0.18	0.01	0.18	0.0085	6.33	4.20	<0.001	Bal	<0.1	<0.4

Table 1. Chemical composition of C-P Ti & Ti-6Al-4V  
C-P Ti 과 Ti-6Al-4V 합금을 126mm x 50mm x 1mm의 판재로 가공한 후 시편의 개선 정도를 높이기 위해 용접할 면을 기계가공 한 후, 솔벤트를 이용하여 표면의 오염물질을 제거하고 탈자처리 후 Bead on plate 용접으로 적정 조건을 선정하여 재료의 압연방향과 수직방향으로 맞

대기 용접을 실시하였다. 이 때 용접속도는 800mm/min, 가속전압은 40kV, 빔전류는 6mA, 진공도는 1.5 x 10<sup>-3</sup>Torr로 하였고 초점은 시편 표면에 위치하도록 하여 용접을 수행하였다.

#### 2.2 미세조직 관찰 및 기계적 특성 평가

전자빔 용접이 끝난 C-P Ti 과 Ti-6Al-4V 합금에서 접합부의 기계적 특성과 미세조직과의 관계를 알아보기위해 접합방향과 수직한 방향으로 인장시편을 제작하고 미세조직 및 경도 시험편을 제작하였다. 연마 후에 C-P Ti 는 증류수 85ml, 불산 5ml, 질산 5ml, Ti-6Al-4V 합금은 증류수 90ml, 염산 3ml, 불산 2ml, 질산 5ml의 혼합 용액을 사용하여 에칭을 실시하였다. 광학현미경(OM, Optical Microscopy)을 사용하여 미세조직을 관찰하였고, 상의 성분 분석을 위하여 EDS(Energy Dispersive Spectrometer)가 사용되었다. 기계적 특성 평가에서는 경도 측정시 마이크로 비커스 경도기를 사용하였으며, 이때 하중은 100gf, 시간은 5sec로 정하였다. 또한 접합부의 인장시험은 시편은 ASTM E8의 sub-size로 준비 되었고, Cross head speed는 1.5mm/min으로 하여 측정하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 미세조직 및 성분분석 결과

그림에서 보이는 바와 같이 C-P Ti의 동종 재질 용접과 C-P Ti과 Ti-6Al-4V합금의 이종재질 용접부는 지그에 시편을 고정할 때 높이 차가 발견되었지만 용접금속과 열영향부의 경계는 구분이 가능하며, 절단 전 접합부 표면에서와 마찬가지로 결함은 존재하지 않았다.

Fig. 1는 소재의 용접금속, 열영향부, 모재의

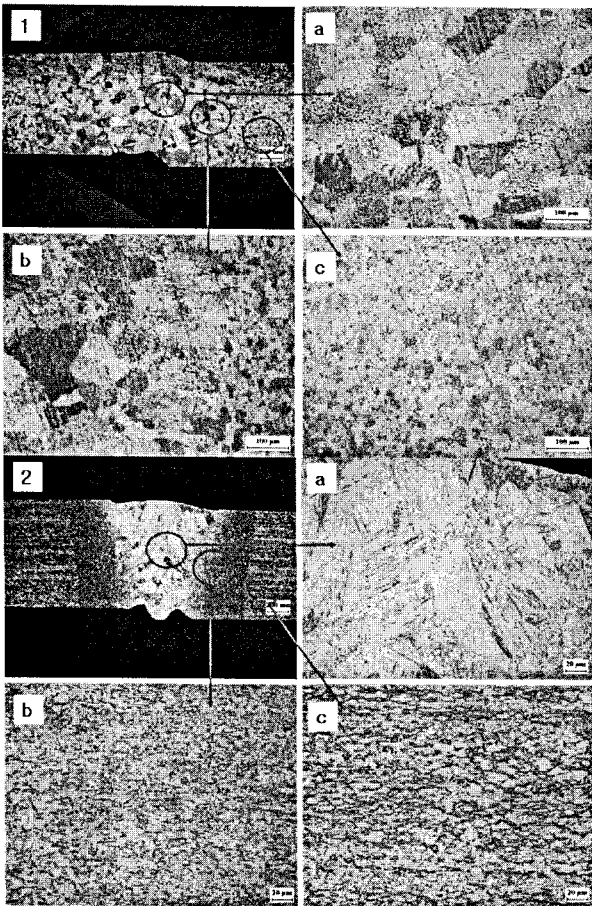


Fig. 1 Microstructure of EBWelded joint

1) C-P Ti welded (x50) a) C-P Ti weld metal (x100) b) C-P Ti HAZ (x100) c) C-P Ti base metal (x100)  
 2) Ti-6Al-4V welded (x50) a) Ti-6Al-4V weld metal (x200) b) Ti-6Al-4V HAZ (x200) c) Ti-6Al-4V base metal (x200)  
 Micro 조직이다. C-P Ti의 용접금속에서는 80~200 $\mu$ m 정도의 비교적 큰 등축  $\alpha$  결정립이 관찰되었고, 열영향부에서는 모재의 15~25 $\mu$ m 정도의 미세한  $\alpha$  결정립이 열영향으로 인해 40~120 $\mu$ m 로 성장한 결정립을 관찰할 수 있었다. Ti-6Al-4V합금의 용접금속과 열영향부는 용융 후 급랭으로 인해 모재의 압연으로 인해 연신된 결정립들이 침상의  $\alpha'$  마르텐사이트가 형성된 것을 알 수 있다.

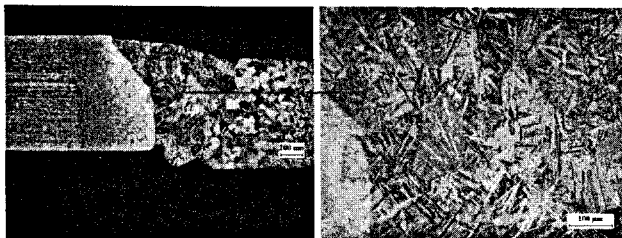


Fig. 2 Microstructure of EBWelded joint

a) Macrostructure of C-P Ti & Ti-6Al-4V dissimilar metal welded b) Microstructure of C-P Ti & Ti-6Al-4V dissimilar metal weld zone

Fig. 2는 C-P Ti와 Ti-6Al-4V의 이종재질의 용접부이다. 열영향부에서 모재까지는 각 소재의 동종재질 용접에서와 비슷한 양상을 나타내며, EPMA 분석 결과 용접금속에서는 용융되었을 당시 Ti-6Al-4V합금의 합금원소인 Al과 V이 용접금속으로 확산되어 응고하여  $\alpha'$  마르텐사이트 상과 침상의 초석  $\alpha$ 상이 혼재하는 것으로 사료된다<sup>2)3)</sup>. Ti-6Al-4V의 동종 재질 용접부의 용융금속에서는 급랭으로 인해 plate형태의  $\alpha'$  마르텐사이트 조직을 나타내었다. C-P Ti와 Ti-6Al-4V의 이종 재질 용접부의 용접금속과 동종재질 용접부 EPMA Mapping 분석결과를 그림 3에 나타내었다.

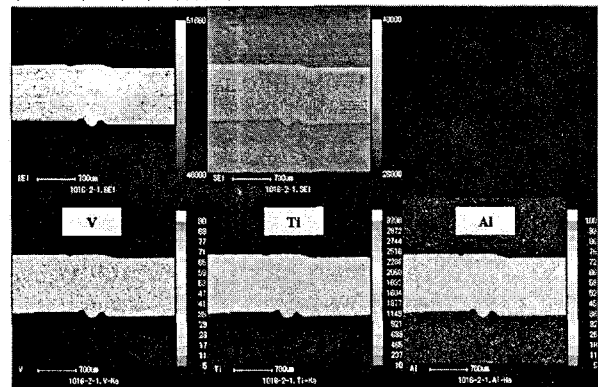


Fig. 3 EPMA mapping for Ti-6Al-4V alloy weld cross section

### 3.2 비커스 경도 시험 및 인장 시험 결과

접합부의 기계적 특성을 평가하기 위해 비커스 경도시험, 인장시험을 실시하였고, 접합부의 비커스 경도분포도를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 결과 Ti-6Al-4V합금 판재의 전자빔용접부는 모재에서 360Hv, 용접금속과 열영향부에서 용융 후 급랭으로 인한  $\alpha'$  마르텐사이트의 형성으로 400~425Hv정도의 높은 경도값을 나타내었다. C-P Ti의 경도분포는 모재에서 180~200Hv, 용접부와 열영향부에서 160~180Hv 정도로 큰 차이를 보이지 않았다. 이것은 C-P Ti의 기계적 성질이 결정립 크기 보다는 재료내부에 존재하는 재료 내부에 존재하는 미세 석출물에 의해 변화하기 때문으로 판단된다. C-P Ti와 Ti-6Al-4V합금의 이종 재질 용접부에서는 용접금속의 경도가 270Hv로 C-P Ti와 Ti-6Al-4V의 경도값의 중간정도를 나타내어 미세조직에서  $\alpha'$  마르텐사이트 상과 acicular  $\alpha$ 상이 혼재하는 현상에 대한 결과로 사료된다<sup>4)</sup>.

인장 시험 후 측정된 항복강도(YS)와 최대인장 강도(UTS), 연신률(Elongation)을 Fig. 8에 나타내었다. C-P Ti와 Ti-6Al-4V의 동종 재질간의 접합부의 인장강도는 두 소재 모두 모재에 비해 크게 변화 하지 않았다. 이것은 전자빔 용접 공정의 장점인 좁은 열영향부에 의한 것으로 결론 지을 수 있다. 연신률은 평균값으로 C-P Ti가 36.5%에서 25.5%로 Ti-6Al-4V합금이 13.85%에서 12.5%로 조금씩 저하 하였는데, 이것은 용접부의 용융으로 인해 모재의 어닐링 효과가 사라졌기 때문으로 사료된다<sup>5)</sup>.

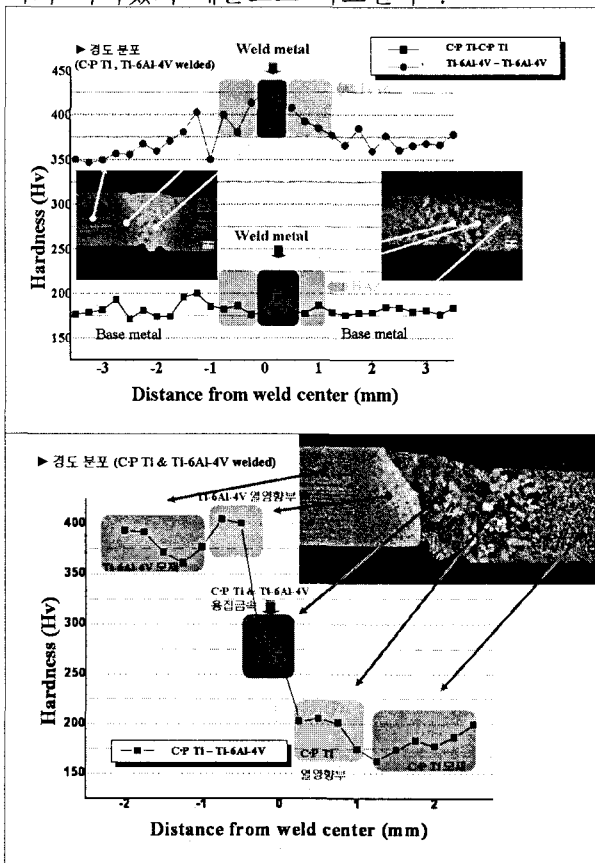


Fig. 4 Distribution of Vickers Hardness a) C-P Ti, Ti-6Al-4V welded b) C-P Ti & Ti-6Al-4V dissimilar welded

3.3 액압성형성 시험

그림 5에서 보듯이 C-P Ti의 액압성형성 시험시 용접금속에서 파단된 것을 관찰할 수 있다. 성형성의 지표로 삼은 돔의 높이는 모재와 용접부에서 각각 32.4mm와 17.7mm로 모재에 비해 현저히 저하하였으며 이것은 마르텐사이트 등의 경화조직에 의해 낮아진 연신률이 원인으로 판단된다.

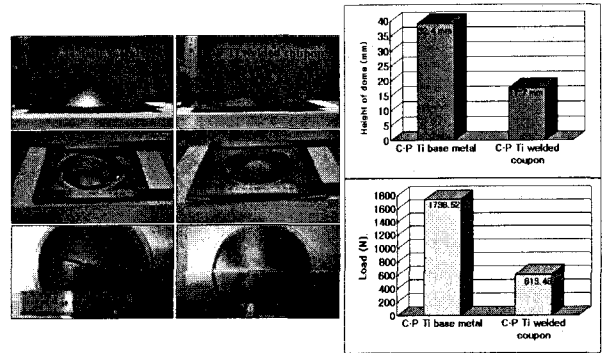


Fig. 5 Failure modes in the formability test & result

4. 결론

C-P Ti와 Ti-6Al-4V합금의 동종 및 이종재질의 전자빔 용접 수행후 접합부의 미세조직과 기계적 특성을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) C-P Ti의 동종 재질 접합부는 용접금속과 열영향부에서 조대한 등축  $\alpha$  결정립이 관찰되었으나 인장강도의 변화가 크지 않은 것으로 보아 미세 석출물에 의해 강도가 확보 된 것으로 판단되므로 입열량이 적은 전자빔 용접이외의 공정을 사용해도 산화만 방지 된다면 용접후의 인장강도는 크게 변화하지 않을 것으로 생각된다. 그러나 결정립 조대화에 의해 연신률이 10%정도 낮아진 것을 알 수 있었다.
- 2) Ti-6Al-4V합금의 동종재질접합부는 V의 과포화에 의한  $\alpha'$  마르텐사이트상의 형성으로 강도가 증가, 연신률은 변하지 않은 것으로 나타났다
- 3) C-P Ti와 Ti-6Al4V합금의 이종 재질의 접합부의 용접금속이  $\alpha'$  마르텐사이트 상과 acicular  $\alpha$ 가 혼재된 것은 용융된 용접금속에 합금원소인 Al과 V의 양이 감소하여 Ms가 높아졌기 때문이라고 판단된다.

참고 문헌

- 1) 타이타늄 협회, [타이타늄의 세계] p.28
- 2) William F. Smith : 金属材料 p.444
- 3) T.Mohandas, D.Banerjee, and V.V Kutumba Rao, MMTA, vol. 30A, pp.3 March 1999-789, Fusion zone microstrucrutre and porosity in electron beam welds of  $\alpha+\beta$  titaniumlloy,
- 4) K. C. Wu : weld. J., 1977, vol. 60, pp. 219s-226s
- 5) Matthew J.Donachie, Jr. Titanium A Technical Guide 2nd Edition, ASM. p.55~p.58