

열노출 온도에 따른 CP 티타늄, Ti-6Al-4V 합금의 미세조직/기계적성질 변화 및 저온브레이징 특성

선주현*** · 신승용** · 홍주화*†

*충북대학교 공과대학 신소재공학과

**한국생산기술연구원 에코공정연구부

Effects of Holding Temperatures on Microstructure and Mechanical Properties of CP Titanium and Ti-6Al-4V Alloy and Its Low Temperature Brazing Characteristics

J. H. Sun***, S. Y. Shin**, J.W.Hong*†

*Department of Advanced Materials Engineering, Chungbuk National University,
410, Sungbong-Ro, Heungduk-Gu, Cheongju 361-763, Korea

**Department of Eco Materials & Processing, Korea Institute of Industrial Technology
7-47, Dongdo-Dong, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-840, Korea

Abstract Titanium and its alloys were brazed in the range of 850-950°C within 10 min. of brazing time using expensive infra red or other heating methods. However, brazing time needs to be extended to get temperature-uniformity for mass production by using continuous belt type furnace or high vacuum furnace with low heating rate. This study examined effects of holding temperature for 60 min. on microstructure and mechanical properties of titanium alloys. Mechanical properties of titanium alloys were drastically deteriorated with increasing holding temperature followed by grain growth. Maximum holding temperatures for CP (commercial pure) titanium and Ti-6Al-4V were confirmed as 800°C and 850°C, respectively. Both titanium alloys were successfully brazed at 800°C for 60 min. with the level of base metal strengths by using Zr based filler metal, $Zr_{54}Ti_{22}Ni_{16}Cu_8$.

(Received December 2, 2009; Accepted December 11, 2009)

Key words: CP-titanium, Ti-6Al-4V, Brazing temperature, mechanical properties.

1. 서 론

티타늄 및 티타늄 합금은 합금 내부에 분포하는 α 상 및 β 상의 분율 및 분포형태를 조절하기 위해 복잡한 열처리 공정을 거쳐 제조되며 합금 내부에 α 상 및 β 상을 미세하게 석출시킴으로서 강도를 증가시킨다. 이러한 티타늄 및 티타늄 합금은 용접 및 브레이징법에 의하여 접합되어 사용된다. 티타늄 합금의 접합 시 브레이징 공정 중의 열 노출에 의한 합금 내부의 상변화 및 결정립 성장을 억제하지 않으면 합금의 인성저하로 인한 항복강도의 저하 및 경도저하 등의 초기 티타늄 합금의 특성을 유지할 수 없게 된다[1-3]. 따라서 모재 용융점 이상의 고온으로 상승하는 용접법 보다는 모재 용점이하에서 접

합이 가능한 브레이징법이 주로 사용되고 있다.

티타늄 브레이징을 위한 필러메탈 중 Ti(Zr)계 필러메탈의 경우 티타늄 합금 모재와 성분이 유사하여 쉽게 모재 속으로 확산하기 때문에 상온 및 고온강도가 우수한 티타늄 합금 접합체를 얻을 수 있다는 장점이 있다. 그러나 현재 산업계에서 주로 사용하고 있는 Ti(Zr)계 필러메탈의 용점은 850-950°C로 접합 온도에서 장시간 유지 시 모재의 재결정 및 결정립 성장에 따른 특성저하가 발생할 수 있다는 것이 단점으로 지적되어 왔다[4]. 따라서 현재의 티타늄 브레이징 기술은 고주파 및 적외선 가열방식을 이용하여 급속 승온 및 급속냉각으로 티타늄 합금 모재의 열 영향을 최소화 시키거나 접합 후 재열처리 하는 방법을 사용한다[5-6].

†E-mail : jhhong@cbnu.ac.kr

한편, 티타늄 합금의 사용 용도를 민간 산업분야로 확대하기 위해서는 산업계에서 주로 사용하고 있는 접합방법인 고진공로 및 연속식 분위기로 등의 사용을 통한 티타늄 합금의 접합이 가능해야 한다. 또한 대량 생산 공정에서는 접합부품 전체의 온도 균일도를 유지하기 위해 접합 유지시간이 길어져야 한다. 그러나 접합시간의 상승은 티타늄 모재합금의 결정립 성장에 따른 항복 및 인장강도의 저하를 유발 할 수 있다[4].

본 연구에서는 열 노출 시간을 60분으로 확장시킨 후, 티타늄 합금의 열 노출 온도별 미세조직, 강도, 경도분포를 관찰함으로써, 브레이징 공정 중 장시간 유지 시에도 모재합금의 특성이 유지 될 수 있는 최적의 접합온도를 제시하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 상용필러메탈 및 최근 보고된 774°C의 용점을 갖는 Zr 기지 4원 필러메탈[7,8]을 이용하여 접합온도에 따른 접합부 강도를 관찰하여 티타늄 및 티타늄 합금의 저온 브레이징 가능성을 확인하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 티타늄 및 티타늄 합금모재

열노출 온도에 따른 티타늄 및 티타늄 모재합금의 특성변화를 관찰하기 위한 티타늄 모재 합금은 일본 Daido Steel사의 티타늄 합금을 사용하였으며 Table 1과 같은 특성을 갖는 CP(commercial pure) titanium, Ti-6Al-V 합금을 사용하였다.

2.2 열노출 시험조건

Fig. 1(a)와 같은 열사이클을 이용하여 목표 온도로 가열하여, 60분간 유지시킨 후 100°C/min의 속도로 냉각하였다. 이때 분위기는 5×10^{-5} torr 의 고진공을 유지하였으며 열처리 온도는 800-1020°C의 온도구간에서 실시하여 각 합금의 초기 모재특성과 비교하였다. 승온속도는 770°C까지 100°C/min으로 하였으며 이후 목표온도까지 3°C/min으로 서서히 가열 한 후 목표온도에서 유지시켰다.

2.3 미세조직관찰

모재합금의 열처리 온도별 미세조직 변화를 관찰하기 위해서 3 mL HF + 5 mL HNO₃ + 100 mL H₂O Kroll 용액에서 10-20초 간 에칭 한 후 금속현미경

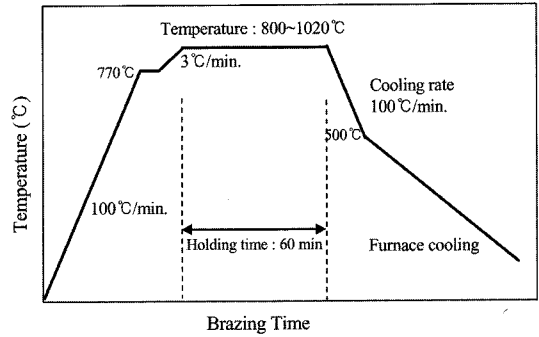


Fig. 1. Schematic diagram of thermal cycle for the heat treatment of the base metal.

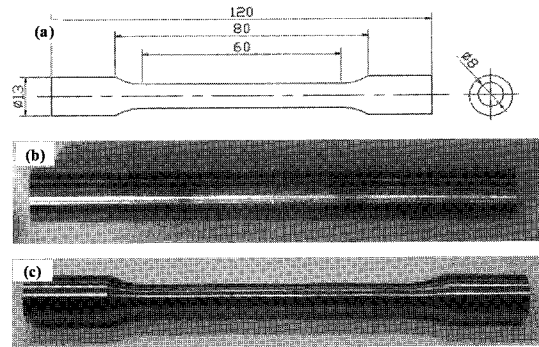


Fig. 2. Dimension and shape of a specimen for tensile test; (a) dimension, (b) after heat treatment and (c) after machining.

을 이용하여 관찰 하였다.

2.4 기계적 강도측정

Φ15 mm × 120 mm 크기의 봉상시편의 CP titanium 및 Ti-6Al-4V 합금을 열노출 시킨 후 Fig. 2(a) 와 같은 봉상 형태의 인장시편을 제작하였다. 가공된 최종 인장시편편의 외관을 Fig. 2(c)에 보였다. 인장시편은 KS B 0802 규격에 따라 총 5개의 시편을 시험한 후 평균값을 구하였다. 인장시험을 위하여 다기능 인장시험기(Unitech-M, RB301 Unitech M, R&B)를 사용하였으며 5×10^{-4} /s의 변형속도로 실시하였다. 또한 모재합금의 열노출 온도별 경도분포는 마이크로 비커스 경도계(MHV-2000)를 사용하여 측정하였다.

2.5 티타늄 및 티타늄 합금 접합

Zr₅₄Ti₂₂Ni₁₆Cu₈, Zr₅₀Ti₂₆Cu₂₄, Ti₄₉Zr₂₆Ni₁₀Cu₁₅ 조성의 합금을 이크멜팅 장치를 이용하여 제조한 후 펠

Table 1. Mechanical properties of the base metal.

(* Nihon Diado Steel)

Alloys	Chemical contents (wt%)						β -transus temperature (°C)	Yield Strength (MPa)	UTS (MPa)
	Ti	Al	V	Fe	C	O			
CP-Ti (Grade2)	bal.	-	-	0.3	0.04	0.2	900	367	438
Ti-6Al-4V	bal.	5.9	4.1	0.25	0.08	0.2	997	953	1007

Table 2. Chemical compositions of the $Zr_{54}Ti_{22}Ni_{16}Cu_8$ metallic glass ribbons

Alloy	Chemical contents (at%)				Melting temperature (°C)	
	Zr	Ti	Ni	Cu	Solidus	Liquidus
$Zr_{54}Ti_{22}Ni_{16}Cu_8$	53.1	23.0	15.8	8.1	774	783
	52.9	23.1	15.8	8.2		
$Zr_{50}Ti_{26}Cu_{24}$	53.1	23.0	15.8	8.1	798	809
	52.9	23.1	15.8	8.2		
$Ti_{49}Zr_{26}Ni_{10}Cu_{15}$	53.1	23.0	15.8	8.1	839	847
	52.9	23.1	15.8	8.2		

트스피닝 장치를 이용하여 폭 3 mm, 두께 40-50 μm 인 박판의 비정질 포일을 제조하였다. 제조된 필러메탈을 electron probe micro-analyzer(EPMA, JXA-8900R, JEOL)를 이용하여 성분분석 및 Differential thermal analysis(DTA, SDTQ600, TA instruments)를 이용하여 용점을 측정한 결과를 Table 2에 보였다. 접합모재의 경우 Table 1의 특징을 갖는 $\phi 15\text{ mm} \times 60\text{ mmL}$ 크기의 CP titanium 및 Ti-6Al-4V 합금을 사용하였다.

5×10^{-5} torr의 고진공 분위기에서 목표 온도로 가열 후, 60분간 유지시킨 후 로냉하였다. 접합온도는 800-900°C의 온도구간에서 실시하였고 승온 및 냉각 속도는 모재 열처리 조건과 동일하게 하였다. 접합시편은 #1000 크기의 연마포를 이용하여 표면을 연마한 후 아세톤 및 알코올을 이용하여 세척하였다. 접합부 인장강도는 모재의 강도시험법과 동일한 방법을 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 티타늄 모재합금의 열노출 온도에 따른 특성변화

열 노출 온도에 따른 CP titanium 합금의 미세조직 및 기계적 특성 변화를 관찰하였다. Fig. 3은 모재의 초기조직 및 60분의 유지시간 하에서 열 노출

온도에 따른 모재 합금의 미세조직 변화를 광학현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. 초기 모재조직은 (Fig. 3(a)) 약 10 μm 이하의 등축 α 상이 균일하게 배열되어 있는 전형적인 CP titanium 조직을 확인할 수 있다. 열 노출 온도가 800°C로 증가하면서 모재의 α 상 결정립이 약 20-30 μm 으로 성장하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 상용 필러메탈을 이용하여 CP titanium을 접합하는 온도인[9] 850°C의 온도에서 60분간 유지 시 CP titanium의 α 상 결정립은 500 μm 이상으로 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있으며 초기의 모재조직을 유지하지 못하고 있는 것으로 확인 되었다. 또한 열 노출 온도가 1020°C로 증가하면서 모재의 재결정이 발생한 것으로 확인 되었다. 따라서 열 노출 온도에 따른 미세조직 분석 결과 접합시간이 60분 이상의 장시간에서는 800°C 이하의 접합온도가 필요하다는 것을 명확하게 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 열 노출 온도에 따른 CP titanium 모재의 인장 및 항복강도를 측정된 결과이다. 모재의 인장강도는 열 노출 온도에 따라 큰 감소를 보이지 않지만 항복강도의 경우 830°C의 열처리 온도 이상의 조건에서 급격하게 감소하여 1020°C의 열처리 온도에서 60분간 유지 시 300 MPa 이하의 항복강도를 보였다. 열 노출 온도가 900°C까지 상승함에 따라 모재의 경도는 초기 157 Hv에서 126 Hv까지

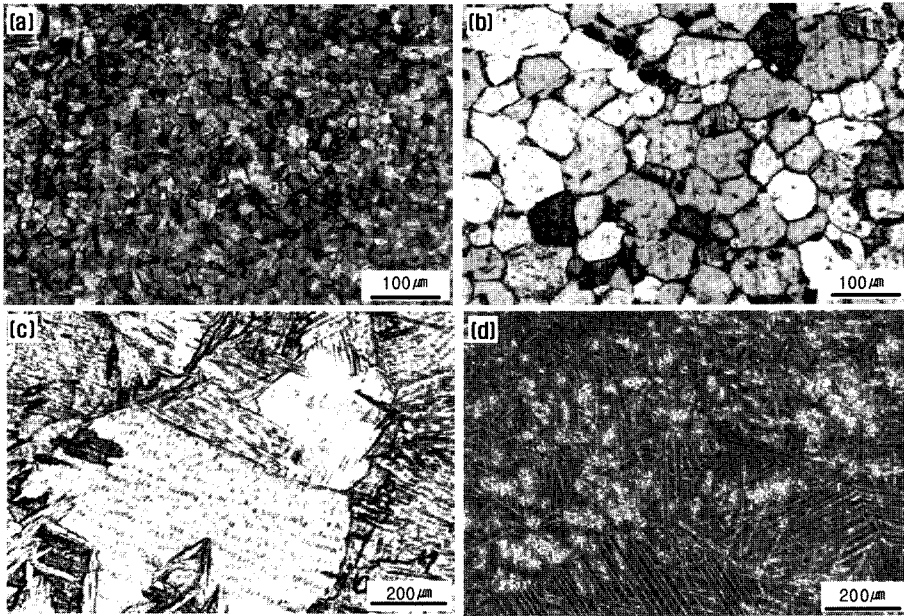


Fig. 3. Optical micrographs of the CP titanium base metal showing the grain growth and the phase transformation with elevated holding temperatures for 60 min; (a) as received base metal, (b) 800°C, (c) 850°C and (d) 1020°C.

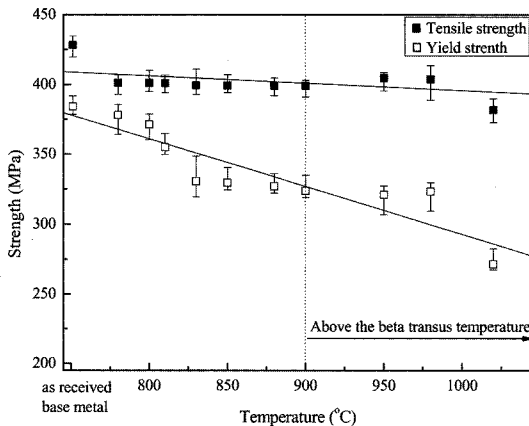


Fig. 4. Relations between holding temperatures and tensile strengths of the CP titanium grade 2 base metal tested for 60 min.

감소하였으며 이후 모재의 β 천이온도 이상의 온도인 950°C에서 열 노출 시 경도는 다시 증가하는 것으로 확인되었다(Fig. 5).

이상의 결과로부터 CP titanium 합금은 60분 이상의 장시간 유지 시 브레이징 온도에 의하여 급격한 특성저하가 발생할 수 있음을 확인하였으며 미세조직, 강도, 경도 측정결과 800°C 이하의 온도에서 접합 해야만 모재 특성저하가 최소화된 접합체를 얻

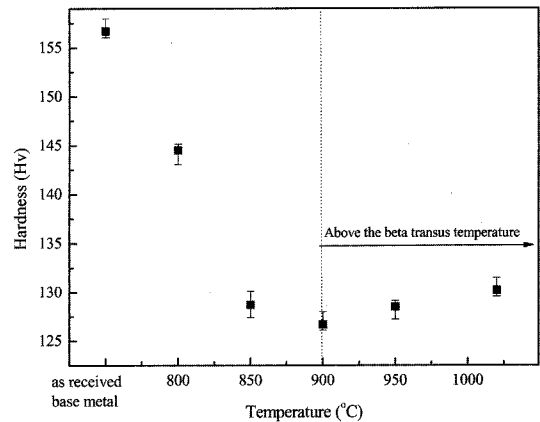


Fig. 5. Relations between holding temperatures and hardness of the CP titanium grade 2 base metal tested for 60 min.

을 수 있을 것으로 확인되었다.

Ti-6Al-4V 합금 모재의 초기조직 및 열 노출 온도에 따른 미세조직 관찰결과를 Fig. 6에 보였다. 초기 모재조직(Fig. 6(a))은 α 상과 $\alpha + \alpha\beta$ 상으로 구성된 bimodal 조직이 관찰되었다. 이때 Ti-6Al-4V 합금의 α 상의 크기가 다소 틀린 이유는 티타늄 합금의 초기 상태가 압출 직후 상태였기 때문으로 생각된다. 반면 열 노출 온도가 800°C로 증가하면서 모

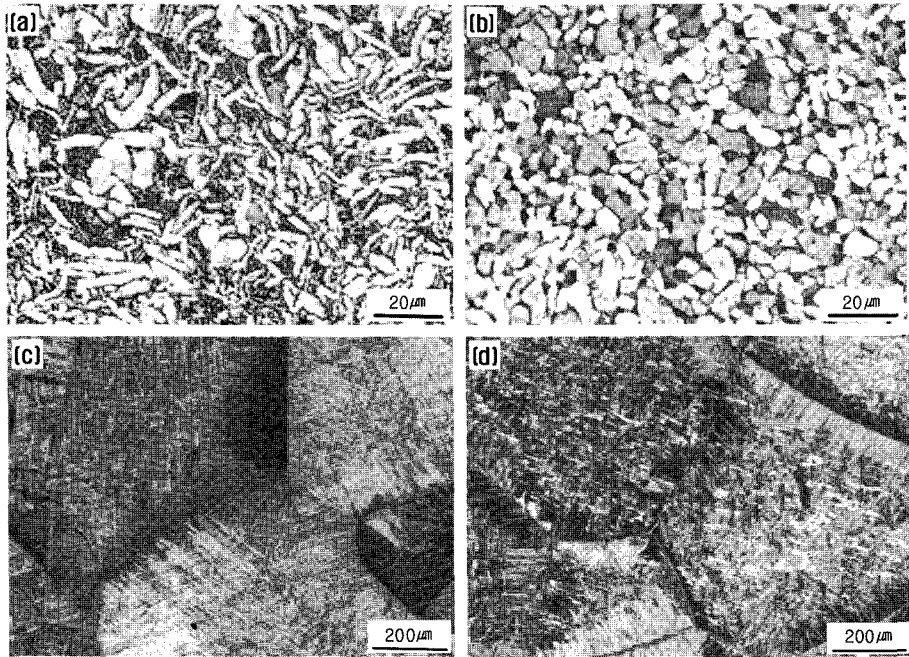


Fig. 6. Optical micrographs of the Ti-6Al-4V alloy showing the grain growth and the phase transformation with elevated holding temperatures for 60 min; (a) as received base metal, (b) 800°C, (c) 900°C and (d) 1020°C.

제조조직은 균일한 α 상 결정립 크기를 갖는 등축 α 상 조직으로 전환되었으며 전형적인 bimodal 조직을 형성하였다. 따라서 Ti-6Al-4V 합금의 경우 800°C의 온도에서 60분 이상 장시간 가열하여도 모재 조직의 결정립 성장은 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 그러나 현재 상용 필러메탈을 이용하여 Ti-6Al-4V 합금을 접합하는 온도인[9] 900°C의 온도에서 60분간 유지 시 Ti-6Al-4V의 등축 α 상 결정립은 500 μm 이상으로 급격하게 증가하는 것을 명확하게 확인할 수 있다. 또한 열 노출 온도가 β 천이온도 이상인 1020°C로 증가하면서 모재의 재결정이 발생한 것으로 확인되었다.

열 노출 온도에 따른 모재의 인장 및 항복강도를 측정할 결과 모재의 인장강도 및 항복강도는 열 노출 온도에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으며 항복강도의 경우 약 980°C의 온도조건에서 모재강도 대비 10% 이상의 강도 하락이 관찰되었다 (Fig. 7). 또한 Fig. 5 - Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 열 노출 온도가 상승함에 따라 모재의 경도는 감소하였으며 모재의 재결정온도 이상에서 다시 증가하였다. 따라서 Ti-6Al-4V 합금은 60분 이상의 장시

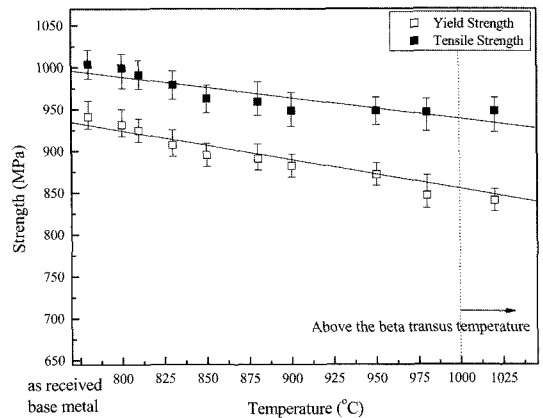


Fig. 7. Relations between holding temperatures and tensile strengths of the Ti-6Al-4V alloy tested for 60 min.

간 유지 시 브레이징 온도에 의하여 급격한 특성저하가 발생할 수 있음을 확인 하였으며 미세조직, 강도, 경도 측정결과 850°C 이하의 온도에서 접합해야만 모재 특성저하가 최소화된 접합체를 얻을 수 있을 것으로 확인되었다.

결과적으로 CP titanium 및 Ti-6Al-4V 합금의 경우 각각 850°C 및 900°C의 열 노출 조건에서 급격

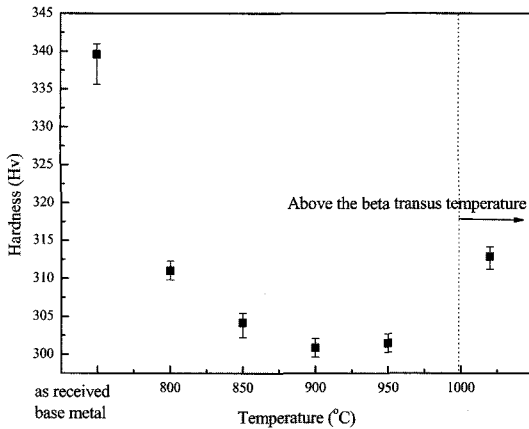


Fig. 8. Relations between holding temperatures and hardness of the Ti-6Al-4V alloy tested for 60 min.

한 결정립 성장이 발생하였다. 각각의 온도는 현재 상용 필러메탈중 최저용점을 가지는 $37.5\text{Ti}37.5\text{Zr}10\text{Ni}15\text{Cu}$ (MBF-5002, T_1 : 843°C) 조성의 필러메탈을 이용하여 티타늄 및 티타늄 합금을 접합하는 최저온도로서[9] 접합 온도에서의 유지시간이 길어질 경우, 티타늄 합금의 β 친이온도 이하에서 접합을 진행하더라도 모재의 결정립 성장에 의한 모재강도의 감소 등의 접합 조립체의 특성이 저하될 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 열노출 온도에 따른 모재합금의 강도 및 경도 측정결과 CP titanium의 경우 브레이징 시 모재의 열화가 없는 온도 조건은 800°C 이며, Ti-6Al-4V 합금의 경우 850°C 로 관찰되었다. 이는 현재 상용필러메탈을 이용하여 티타늄 및 티타늄 합금을 접합하기 위한 온도보다 매우 낮은 온도로서 티타늄 합금의 접합 시 특성저하를 억제하기 위하여 저용점의 브레이징 필러메탈의 개발 및 티타늄 합금 저온 브레이징에 관한 연구가 필요하다는 것을 확인하였다.

3.2. 접합온도에 따른 티타늄 합금 접합부 기계적 특성

최근 보고된 Zr 기지 3원 및 4원 공정필러메탈 ($\text{Zr}_{54}\text{Ti}_{22}\text{Ni}_{16}\text{Cu}_8$, $\text{Zr}_{50}\text{Ti}_{26}\text{Cu}_{24}$) 및 상용 필러메탈 중 최저용점을 가지는 $\text{Ti}_{49}\text{Zr}_{26}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ (MBF-5002) 조성의 필러메탈을 이용하여 800°C 에서 900°C 의 온도 구간 및 60분의 유지시간을 갖는 접합조건에서 CP titanium 및 Ti-6Al-4V 합금을 접합한 후 접합부

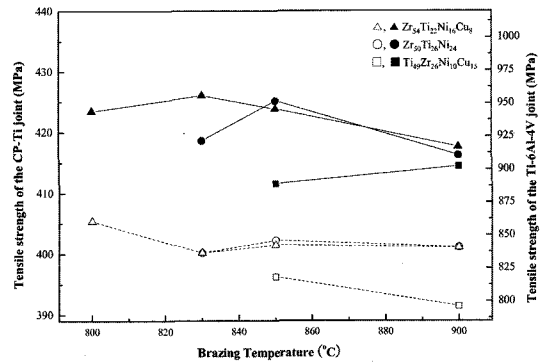


Fig. 9. Tensile strengths of the CP titanium and Ti-6Al-4V joint brazed with increasing the brazing temperature; open symbols are CP titanium joint strengths, and closed symbols are Ti-6Al-4V joint strengths.

강도를 측정하였다(Fig. 9). 세 가지 필러메탈 중 최저용점을 가지는 $\text{Zr}_{54}\text{Ti}_{22}\text{Ni}_{16}\text{Cu}_8$ 조성의 필러메탈의 경우 800°C , 60분의 접합조건에서 CP titanium 및 Ti-6Al-4V 합금 모두 모재강도와 같은 수준의 접합강도를 유지함을 확인하였다. 그러나 접합온도가 상승하면서 모재특성저하로 인하여 접합체의 강도가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 반면 필러메탈의 용점이 4원 공정필러메탈보다 높은 $\text{Zr}_{50}\text{Ti}_{26}\text{Cu}_{24}$ 및 $\text{Ti}_{49}\text{Zr}_{26}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ 조성의 필러메탈의 경우 800°C 의 온도에서는 접합되지 않았으며 각각 830°C 및 850°C 이상의 온도에서 접합되는 것을 확인하였다. 그러나 접합온도의 상승으로 인하여 $\text{Zr}_{54}\text{Ti}_{22}\text{Ni}_{16}\text{Cu}_8$ 조성의 필러메탈을 이용하여 800°C 에서 접합된 접합체의 강도보다는 낮은 강도를 나타내어 모재의 특성저하가 진행된 것으로 판단된다.

4. 결 론

열 노출 온도에 따른 티타늄 합금 모재의 미세조직 변화 및 기계적 강도 등의 특성변화를 관찰하기 위하여 α 형 합금인 CP titanium, $\alpha + \beta$ 형 합금인 Ti-6Al-4V 합금을 각 열 노출 온도에서 60분간 유지시킨 후 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 열노출 온도에 따른 모재합금의 강도 및 경도 측정결과 CP titanium의 경우 브레이징 시 모재의 열화가 없는 온도 조건은 800°C 이며, Ti-6Al-4V 합

금의 경우 850°C로 관찰되었다. 현재 Ti(Zr)기지 상용 필러메탈을 이용하여 CP-Titanium 및 Ti-6Al-4V 합금의 접합온도는 각각 850°C, 900°C로서 60분 이상 장시간 유지 시 모재의 특성저하가 발생할 수 있다는 것을 확인하였다.

2. 브레이징 온도에 따른 CP titanium 및 Ti-6Al-4V 합금의 저온 브레이징 특성을 평가한 결과 최근 보고된 $Zr_{54}Ti_{22}Ni_{16}Cu_8$ 조성의 저융점 필러메탈을 이용하여 800°C의 저온에서 모재의 강도저하가 최소화된 고강도의 티타늄 및 티타늄 합금 접합 조립체를 얻을 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 논문은 충북대학교 2008년도 학술연구지원사업에 의하여 이루어졌습니다.

참고문헌

1. S. L. Semiatin, B. C. Kirby and G. Al. Salishchev : Metallurgical and Materials Transactions A, **35A** (2004) 2809.
2. S. L. Semiatin, S. L. Knisley, P. N. Fagin, F. Zhang and D. R. Barker : Metallurgical and Materials Transactions A, **34A** (2003) 2377.
3. Hideki Fujii : Materials Science and Engineering A, **243** (1998) 103.
4. A. Shapiro and A. Rabinkin : Welding Journal, **36** (2003), 36.
5. O. Botstein and A. Rabinkin : Materials Science and Engineering A, **188** (1994) 305.
6. C. T. Chang, Z. Y. Wu, R. K. Shiue and C. S. Chang : Materials Letters, **61** (2007) 842.
7. Dong-Myoung Lee, Ju-Hyun Sun, Dong-Han Kang and Seung-Young Shin : Journal of Materials Research, **24**(7) (2009) 2338.
8. J. H. Sun, D. M. Lee, C. H. Lee, J. W. Hong and S. Y. Shin : Journal of Materials Research, **25**(2) (2010) 296.
9. T. Onzawa, A. Suzumura and M. W. Ko : Welding Journal, **69** (1990) 462.