

研究論文

Ti-6Al-4V합금의 고상 확산접합에 관한 연구

강 호 정* · 강 춘 식**

A Study on the Solid State Diffusion Bonding of Ti-6Al-4V Alloy

H. J. Kang* and C. S. Kang**

Key words : Solid state diffusion bonding, Power law creep, Interface diffusion, Surface diffusion

Abstract

Solid state diffusion bonding is the joining process performed by creep and diffusion, which is accelerated by heating below melting temperature and proper pressing, in vacuum or shielding gas atmosphere. By this process we can obtain sufficient joint which can't be expected from the fusion welding. For Ti-6Al-4V alloy, the optimum solid state diffusion bonding condition and mechanical properties of the joint were found, and micro void morphology at bond interface was observed by SEM. The results of tensile test showed sufficient joint, whose mechanical properties are similar to that of base metal

850℃, 3MPa is considered as the optimum bonding condition. Void morphology at interface is long and flat at the initial stage. As the percentage of bonded area increases, however, small and round voids are found. Variation of void shape can be explained as follows. As for the void shrinkage mechanism, at the initial stage, power law creep is the dominant, but diffusion mechanism is dominant when the percentage of bonded area is increased.

1. 서 론

현대 사회는 과학 기술이 비약적으로 발전함에 따라 첨단 소재의 개발 필요성과 더불어 가공 기술

의 발전을 절실히 요구하고 있다. 고상확산접합도 첨단 가공 기술 중의 하나로써 기존의 용융접합법으로는 얻기 힘든 우수한 접합부를 얻을 수 있는 접합 방법이다.

고상 확산접합법은 진공이나 보호가스 분위기에

* 1996년 9월 19일 접수

* 비회원, 포항제철 기술연구소

** 정회원, 서울대학교 금속공학과

서 모재를 용점 이하의 온도로 가열하고 적절한 압력을 가하여 고온에서 크리프변형과 원자의 확산에 의해 접합하는 방법이다.

Ti-6Al-4V합금은 티타늄 합금 중에서 가장 널리 사용되는 재료로써, 높은 비강도와 우수한 내식성을 지니기 때문에 항공기의 재료 및 화학공업 분야의 소재로 많이 쓰이고 있다. 특히 SPF/DB¹⁾의 적용으로 복잡한 항공기의 부품을 간단한 방법으로 제작할 수 있는데, 미국 등지에서는 이미 상용화되어 있는 기술이다. 그러나 국내에서는 아직 고상 확산접합에 대한 연구뿐만 아니라 Ti합금에 대한 연구도 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 티타늄 합금의 고상 확산접합을 통해 앞으로 항공재료의 수요에 대한 대비와 확산접합 기구에 대한 이론적인 고찰을 목적으로 하고 있다.

확산접합에서 공동의 수축 기구는 확산접합 과정을 이해하고 접합 조건을 결정하는데 매우 중요하므로 80년대 중반에서 최근에 이르기까지 확산접합의 공동 수축 기구를 모델링하여 이론적인 계산을 시도한 연구보고²⁻¹⁰⁾가 많이 나오고 있다. 그런데 현재까지는 계산 결과를 실험 결과와 비교함으로써 모델링이 타당한지를 검증하는 단계이고, 계산 결과를 실제 공정상에 응용한 연구 결과는 보이지 않는다. 따라서 본 연구에서는 고상확산접합이 지니는 장점들을 확인해 보고, 공동 수축 기구에 대한 이론적인 고찰과 Ti-6Al-4V합금의 고상 확산접합 실험을 통해서 접합중에 압력의 단계적인 변화가 접합성에 어떠한 영향을 미치는가를 살펴보고자 하였다.

2. 실험 방법

Ti-6Al-4V 합금은 티타늄 합금 중에서 가장 널리 사용되는 상용합금으로써 α, β 2상으로 이루어져 있다. 즉, HCP구조를 가지는 저온 안정상(α)과 BCC구조를 가지는 고온 안정상(β)이 공존하기 때문에 우수한 기계적 성질을 지니고 있으며 또한 내식성이 매우 우수하다. 이 합금의 화학 조성은 Table 1과 같으며, 첨가원소중에서 알루미늄은 α 상 안정화 원소이고, 바나듐은 β 상 안정화 원소이다.

확산접합을 진공 중에서 행하기 위해서 Fig. 1과 같은 실험 장치를 사용하였다. 기계식 펌프와 확

산 펌프를 사용하여 석영관 내부의 진공도를 10^{-5} Torr 이하로 유지하였다. 할로젠 램프를 사용하여 접합 온도까지 가열하였고, 가열 속도는 $80 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, 냉각 속도는 $50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 이다. 접합 압력은 시편의 단면적을 고려하여 0.5-4 MPa의 압력이 걸리도록 하중을 가하였다.

시편은 계면관찰용과 인장시험용 두 가지로 준비하였다. Table 2에 각 시편의 규격과 확산접합의 실험 조건을 나타내었다. 초소성을 지니는 Ti-6Al-4V 합금의 고상확산접합에 관한 기존의 연구¹¹⁻¹⁷⁾들을 바탕으로 접합조건을 결정하였는데, 접합온도는 α/β 상변태 온도가 $990 \text{ }^\circ\text{C}$ 근처이므로 이 온도보다는 낮아야 하고 또한 온도가 너무 낮으면 원자의 확산이 충분하지 못하기 때문에 $850 - 925 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 결정하였다. 접합 압력의 경우, 0.5MPa에서 접합시간이 너무 길었기 때문에 압력을 점차 증가시키면서 4MPa까지 변화시켰다. 시편의 표면은 sand

Table 1. Chemical Composition of Ti-6Al-4V Alloy

	C	Al	V	Fe	Cu	Mn	Ti
wt%	0.005	6.34	3.90	0.19	0.02	0.01	Balance

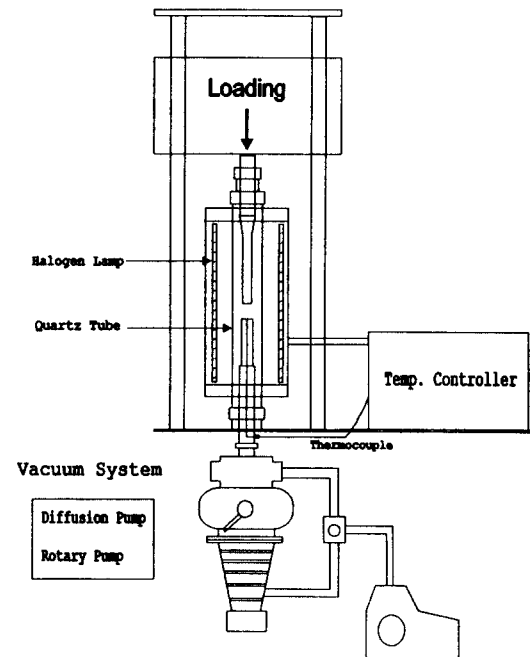


Fig 1. Schematic diagram of DB equipment

paper (#600) 로 연마한 후에 1분간 아세톤으로 초음파 세척하였다.

Table 2. Experimental Condition of the Solid State DB

Specimen Size	Surface Observing	16mm × 2.5mm
	Tensile Test	16mm × 55mm
Bonding Temp.	850, 875, 900, 925 °C	
Bonding Pressure	0.5, 1, 2, 3, 4 MPa	
Bonding Time	10, 30, 60, 120 min	
Vacuum	10-5 Torr	
Surface Roughness	Ra 0.8µm , Rmax 6µm	

일반적으로 확산접합시에 표면에 생성되는 산화물이 확산의 장애물이 되기 때문에 접합을 방해하는 역할을 한다. 그러나 티타늄 합금의 경우 1000K 이상에서는 수 초내에 TiO로 존재하던 산화물이 용해되기 때문에 확산접합시 양호한 접합부를 얻을 수 있다고 보고^{18,19)} 되어 있다.

접합시편의 분석을 위해 변형률과 접합율의 측정, 접합편의 미세 공동 형태의 SEM관찰, 접합후 모재의 경도값 측정, 그리고 인장시험 등을 행하였다.

확산접합 전과 후의 시편의 두께를 측정하여 모재의 변형률을 조사하였고, 또한 시편을 접합편에 수직으로 절단한 후에 단면을 5% HF(40%), 5% HNO₃, 90% H₂O 에칭액에서 2 - 3 초 동안 에칭하여 광학현미경으로 미세 조직 관찰 및 접합율을 조사하였다. 접합 계면에 있는 미세한 공동의 형상을 알아보기 위해서 에칭을 한 후 SEM을 이용하여 고배율로 관찰하였다. 공동의 형상 관찰을 통해서 공동 수축에 관여하는 지배적인 수축기구를 간접적으로 알 수 있다. 확산접합 후의 모재의

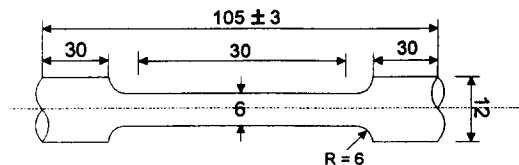


Fig 2. Dimension of tensile test specimen

경도값의 변화를 살펴보기 위해서 10kgf의 하중 하에서 비커스 경도시험을 행하였다.

접합부의 인장강도와 연신율을 모재와 비교해 보기 위해 인장시험을 행하였다. 인장시험편은 Fig. 2과 같은 규격으로 제작하였고, 인장시험시의 변형속도는 $0.56 \times 10^{-3}/\text{sec}$ 이다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 접합 조건에 따른 모재의 변형률과 접합율

접합 압력과 온도, 그리고 접합 시간을 변화시키면서 확산접합을 행한 후에 모재의 변형률과 계면 접합율을 측정해 보았다. Fig. 3은 접합시간을 10분, 30분, 60분으로 변화시키면서 모재의 변형률을 측정한 결과로써 변형률이 시간에 직선적으로 증가하기 때문에 변형속도가 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 이것은 가공경화와 전위의 소멸과 재배열에 의한 회복이 서로 상쇄되어 일정한 크리프 변형 속도를 가지는 정상 상태가 되기 때문이다. Fig. 4는 접합 시간이 증가함에 따라 계면 접합율이 어떻게 변하는가를 나타내고 있다. 온도와 압력에 상관없이 비슷한 경향을 보이고 있는데 접합 초기에 접합율이 빨리 증가하다가 10분 이후로는 접합율의 증가 속도가 매우 완만해짐을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 초기에는 크리프가 공동의 수축에 크게 기여하지만 접합율이 약 80% 이상이 되면 크리프가 공동의 수축에 기여하는 정도가 감소한다는 사실을 알 수 있다.

Fig. 5는 접합 조건에 따른 접합 상태를 접합율을 기준으로 분류한 것으로 고온, 고압일수록 접합율이 높아짐을 알 수 있다. 그러나 지나치게 온도가 높거나 압력이 높은 경우에 모재의 변형이 심해지므로 바람직하지 않다. Fig.6은 같은 접합 온도에서 접합 압력을 달리 했을 때에 계면 접합율이 달라지는 것을 나타내고 있다.

3.2 접합율에 따른 계면 공동의 형상

확산접합시 접합부의 표면을 미시적으로 보면 수µm정도의 요철이 항상 존재하는 상태이고 초기

에 외부에서 압력을 가했을 때 소성변형이 일어나면서 일부분만 접착이 일어나면서 접합 계면에 공동이 남게 된다.

접합시에 계면에 생기는 공동이 어떻게 수축되는가 하는 것에 대한 많은 연구가 행해졌다. 고상 확산접합시 계면에 생기는 공동의 수축기구 중에

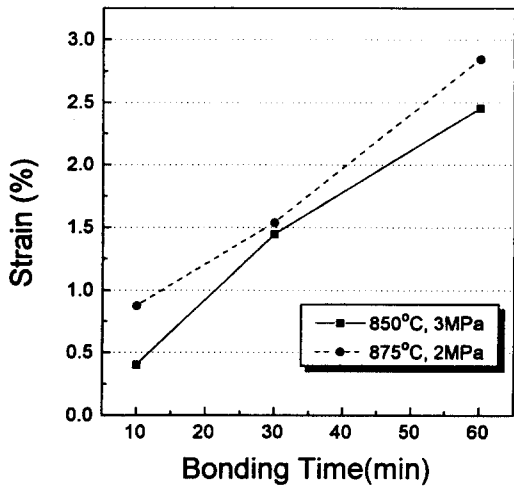


Fig 3. Deformation of the base metal with bonding time

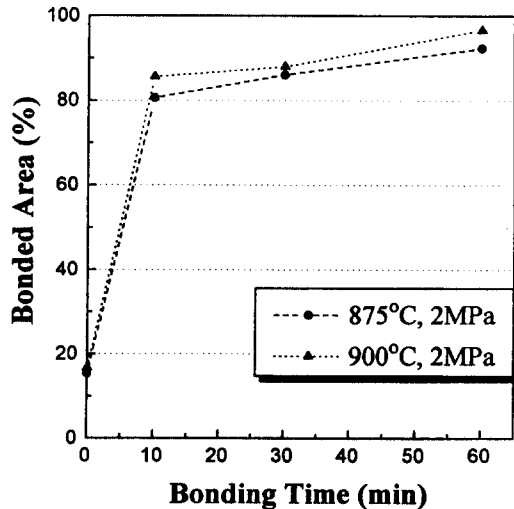


Fig 4. Variation of percentage of bonded area with bonding time

서 중요한 것은 먹수법칙 크리프, 계면 확산, 표면 확산 등이다. 이들 몇 가지 기구들 중에서 지배적인 기구가 무엇인가에 따라서 계면 공동의 형상이 영향을 받게 된다. 항복에 의한 초기 소성변형과 먹수 법칙 크리프에 의해서는 주로 세로 방향으로의 공동 수축이 일어나고, 계면확산과 표면 확산에 의해서는 주로 가로 방향으로의 공동 수축이 일어난다. 따라서 어느 기구가 더 지배적이냐에 따라서 공동이 수축되는 양상이 달라질 것을 예상할 수 있다. 먹수 법칙 크리프가 지배적인 경우에는 공동의 형상이 납작하게 될 것이고, 계면확산이나 표면 확산이 지배적인 경우에는 공동의 형상이 둥글 것으로 예측할 수 있다.

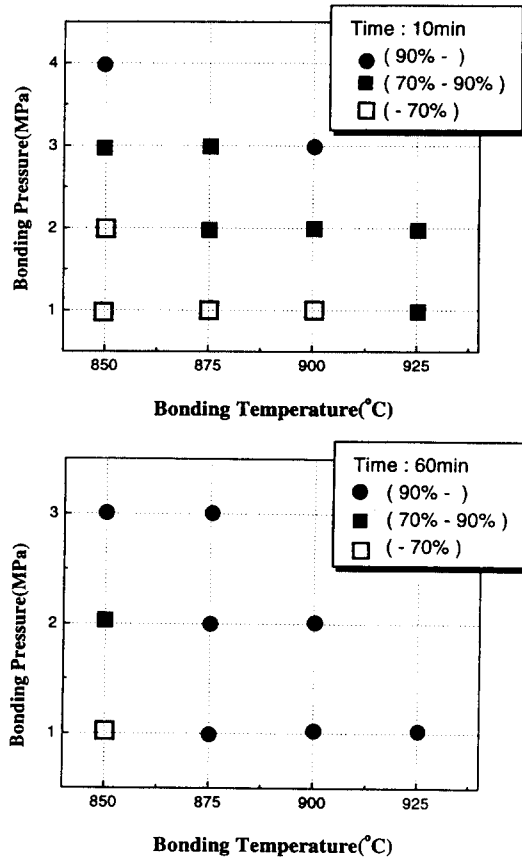


Fig 5. Percentage of bonded area with bonding pressure and temperature
a) Bonding time : 10min,
b) Bonding time : 60min

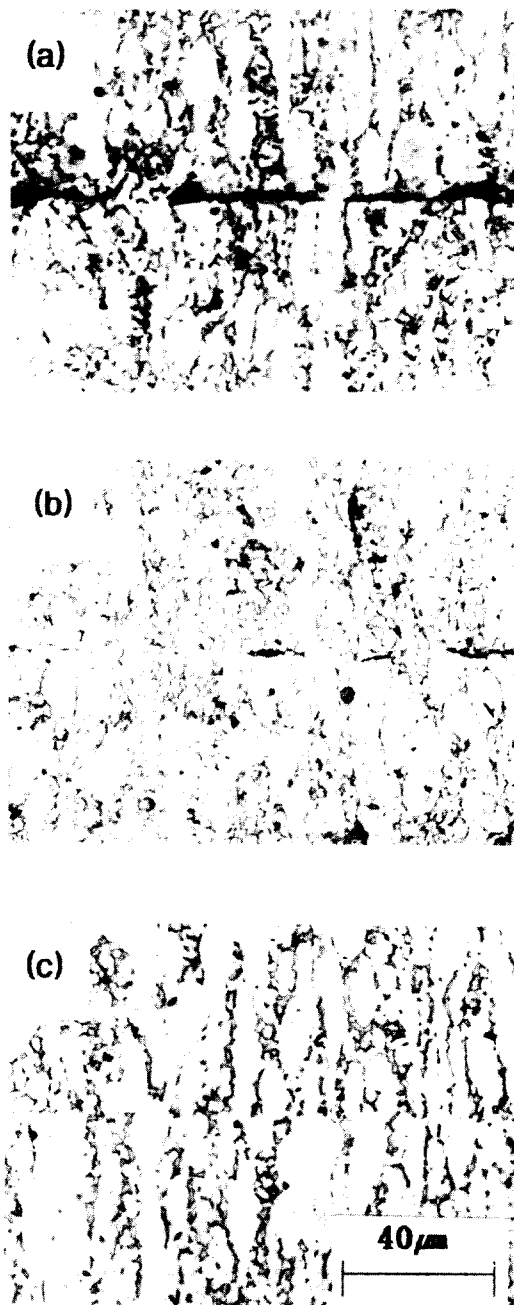


Fig 6. Variation of interface morphology with bonding pressure
a) 0.5MPa, b) 2MPa, c) 4MPa

실험 결과, 공동의 형상은 접합 압력이나 온도의 영향보다는 접합율의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 즉, 접합 압력이나 온도에 관계없이 접합율이 낮은 경우는 납작한 모양의 공동이 계면에 많이 존재하였고, 접합율이 높은 경우에는 둥근 모양의 공동이 많았다. Fig. 7은 접합율이 낮은 경우와 높은 경우에 공동의 모양을 SEM으로 관찰한 것이다. 접합율이 낮은 경우에는 광학현미경 사진으로도 공동의 모양을 관찰할 수 있었지만, 접합율이 높은 경우에는 공동의 크기가 너무 작아서 고배율인 SEM사진을 통해서만 공동의 형상을 선명하게 관찰할 수 있었다.

접합율이 낮은 경우에 계면에 걸리는 압력은 외부에서 가한 압력과 상관없이 모재의 항복강도에 의해서 결정된다. 보통 이 압력은 외부에서 가한

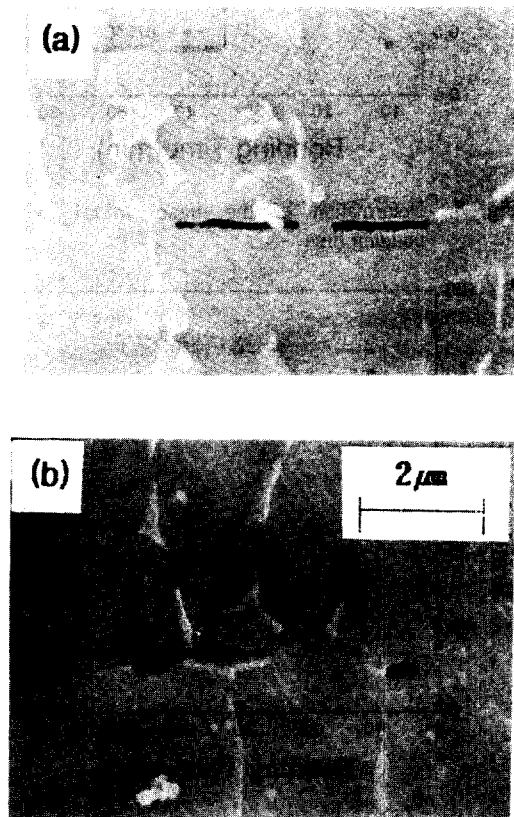


Fig 7. SEM photograph of the interface void
a) 900°C, 3MPa, 10min
b) 900°C, 1MPa, 60min

응력보다 훨씬 큰 값이기 때문에 접합 초기에는 확산보다는 크리프에 의한 공동 수축이 지배적이다. 한편 접합율이 증가함에 따라서 계면의 압력은 점점 감소하여 외부에서 가한 압력에 접근하게 되고, 크리프의 속도도 감소한다. 즉, 접합율이 높아질수록 크리프 기구의 영향은 줄어들고 반대로 확산 기구의 영향은 증가한다.

3.3 접합 온도와 압력에 따른 기계적 특성의 변화

Fig. 8은 접합 온도와 압력에 따른 경도 변화를 나타내었다. 경도값은 압력이나 온도에는 큰 영향을 받지 않으며 접합 시간이 증가함에 따라서 점차로 감소하는 경향을 보였다. 모재의 경도가 감소하는 이유는 고온에서 결정립내의 전위의 소멸 현상 때문이다. 900°C, 2MPa의 경우, 접합 온도가 낮은 경우에 비해서 초기에는 경도가 빨리 감소하였지만 경도의 감소폭이 작기 때문에 접합 시간을 60분으로 유지한 경우 접합 온도가 낮은 경우보다 오히려 경도가 높게 나타나고 있다. 이것은 900°C, 2MPa의 경우 고온에서의 변형량이 많아서 가공경화 효과가 회복에 의한 조직의 연화를 상쇄시키기 때문인 것으로 판단된다.

확산접합에 의한 접합부가 실제로 모재와 유사

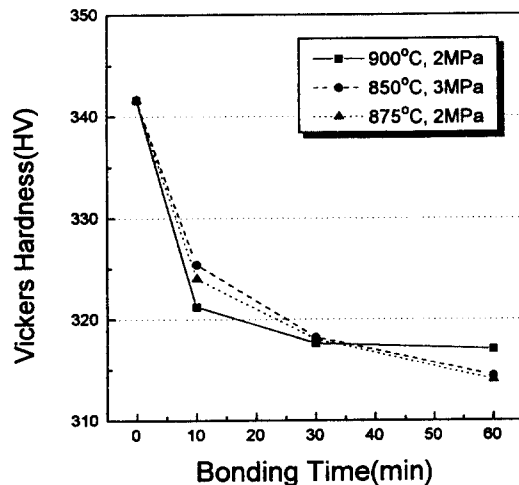


Fig 8. Vickers hardness with bonding pressure and temperature

한 인장 특성을 지니는가를 알아보기 위해서 인장 시험을 행하였다. 인장 시험의 접합 조건은 예비 실험을 통해서 접합율이 95% 이상 되는 온도와 압력, 그리고 유지시간으로 정하였다. 인장 시험 결과 모든 시편에서 접합부가 아닌 모재에서 파괴가 발생하였다. Fig. 9는 각각의 조건에서의 인장 시험의 결과를 나타낸 것으로 As-received 상태와 비교하였을 때, 대체로 인장강도와 항복 강도는 약

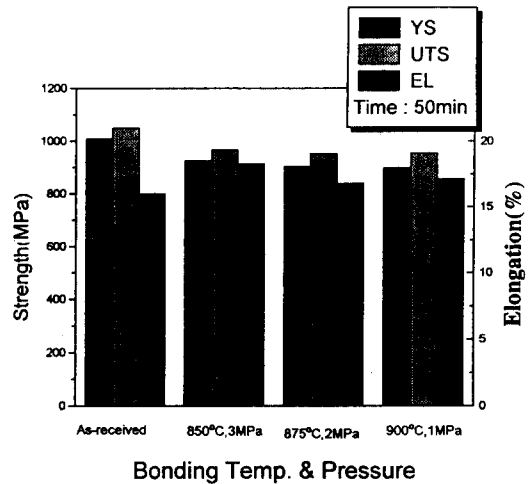


Fig 9. Results of the tensile test with different bonding condition

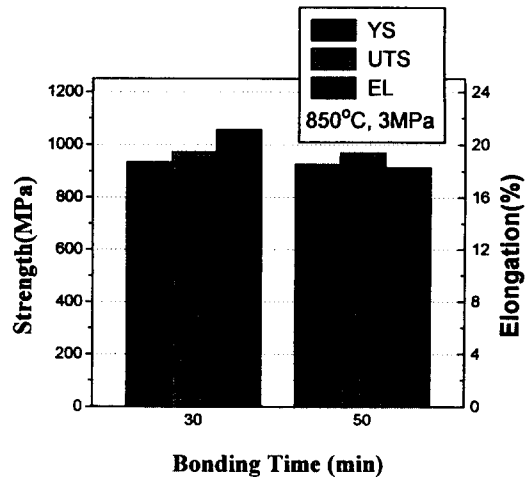


Fig 10. Result of the tensile test with bonding time
a) 850°C, 3MPa
b) 875°C, 2MPa

간씩 감소하고 반대로 연신율은 조금 증가하였다. 고온에서 장시간 가열에 따른 회복(recovery) 현상으로 강도는 저하되고, 반면에 연신율은 증가된 것임을 알 수 있다.

Fig. 10은 접합 시간을 30분, 50분으로 하였을 때 인장 특성이 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. 접합 시간을 30분으로 유지한 경우 모든 시편이 접합부가 아닌 모재에서 파괴가 일어났고, 인장강도, 항복강도, 연신율 모두 접합 시간이 50분인 경우에 비해 더 좋았다. 따라서 접합 시간이 30분일 때 이미 양호한 접합부가 얻어졌고, 더 오래 유지함에 따라 결정립 크기의 증가 때문에 기계적 특성이 나빠졌음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 확산접합의 조건에 따른 기계적 특성을 살펴본 결과 Ti-6Al-4V 합금의 고상 확산접합시에 가장 적합하다고 생각되는 조건은 850℃, 3MPa이라고 생각한다. 왜냐하면 접합 온도는 낮을수록 기술을 실용화하는데 유리하고, 접합시간은 가능한 짧을수록 좋기 때문에 3MPa이 적절하다.

3.4 압력의 단계적 변화가 접합성에 미치는 영향

확산 접합의 장점 중의 하나가 변형량이 적다는 것이다. 그런데 접합압력이 높은 경우 접합 시간은 단축할 수 있지만, 모재의 변형량이 크기 때문에 확산접합의 장점을 살릴 수 없다. 반면, 접합압력이 낮은 경우에는 공동 수축속도가 너무 느리기 때문에 양호한 접합부를 얻는데 걸리는 시간이 너무 길어서 실용성이 없다.

역수 법칙 크리프에 의한 공동의 수축은 접합 계면에서의 크리프와 벌크에서의 크리프를 구분해야 한다. 즉, 초기 접합율이 낮을 때에 접합 계면에 걸리는 압력은 외부에서 가한 압력에 관계없이 그 재료의 고온 항복강도와 같기 때문에 접합 계면에서의 변형 속도가 벌크에 비해서 훨씬 빠르다. 그러나 접합율이 높아질수록 계면에서의 응력이 감소하기 때문에 변형속도가 감소하게 되고 공동 수축의 속도도 감소한다. 따라서 접합율이 높아질수록 크리프가 공동 수축에 기여하는 정도는 감소한다. Fig. 11은 공동의 초기 형상을 마름모꼴로 가정했을 때 좌표계를 나타낸 것이고, Takahashi 등³⁾

에 의하면 크리프에 의한 계면 공동의 수축 속도는 다음 식으로 주어진다.

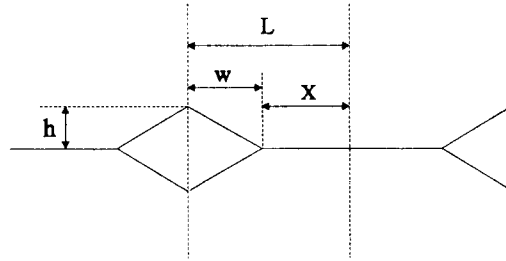


Fig 11. Coordinate system of rhombic void

$$\dot{X} = \frac{AX}{[1 - (X/L)^2]^n} \left[\frac{2\sigma_B}{nG} (L/X - 1) \right]^n$$

A ; 크리프 상수

σ_B ; 외부에서 가한 압력

G ; 전단 계수

여기서, n값은 보통 3 - 8 정도이므로, 접합 초기에는 $L/X \gg 1$ 이므로 크리프에 의한 공동 수축 속도가 매우 빠르다. 그러나 L/X 값이 감소할수록, 즉 접합율이 증가할수록 크리프에 의한 공동 수축 속도는 급격히 감소하게 된다.

이상에서 보았듯이 접합율이 증가함에 따라서 공동수축기구가 크리프기구에서 확산기구로 변하기 때문에 초기에는 접합 압력을 높게 유지해서 계면에서의 크리프에 의한 공동 수축 속도를 증가시키고 나중에는 압력을 낮춤으로써 모재의 변형량을 줄일 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 따라서 접합 압력을 변화시키면서 접합을 했을 때 모재의 변형량과 접합율이 어떻게 변하는지를 압력을 일정하게 유지한 경우와 비교해 보았다. Fig. 12는 접합 압력을 일정하게 유지했을 때 (A, B)와 단계적으로 변화시켰을 때 (C)의 접합율과 변형률을 서로 비교한 결과이다. 압력을 초기에 3MPa에서 나중에는 1MPa로 변화시켰으므로, 모재의 변형률을 감소시키면서 접합율은 증가시킬 수가 있었다. 하지만 B조건에 비해서 C 조건이 접합 시간은 더 오래 걸렸다. 그러나 크리프 변형의 속도가 확산속도보다 압력에 더 민감하게 변하기 때문에, 확산속도의 감소에 접합 시간이 증가하는 효과 보다는 모재의 변형을 감소시키는 효과가 더 크다. 따라

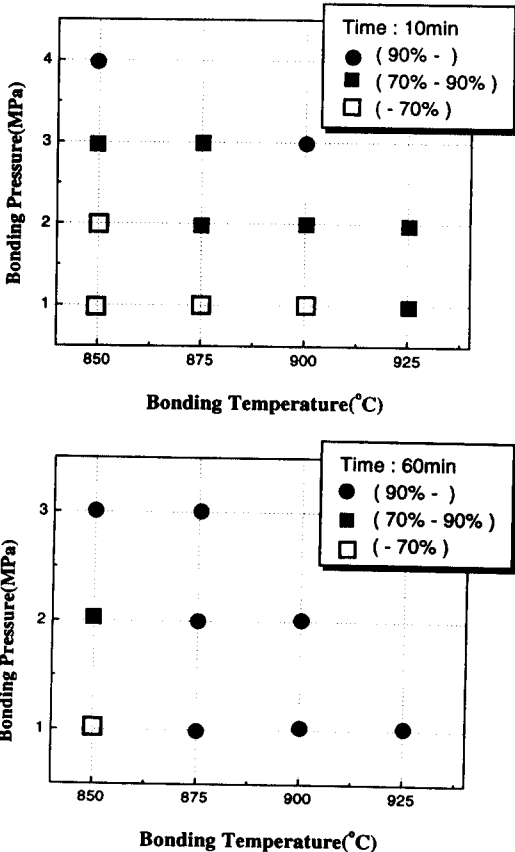
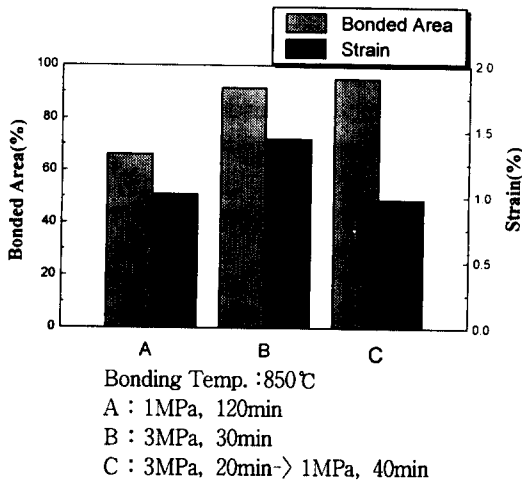


Fig 12. Effect of varying pressure on the percentage of bonded area and deformation of base metal

서 모재의 변형을 최소화할 필요가 있을 때는 단계적으로 압력을 감소시킴으로써 크리프 변형에 의한 시편 전체의 변형을 감소시키는 것이 바람직하다고 생각한다. A 조건과 같이 너무 낮은 압력 하에서 유지시키는 것은 접합 시간이 오래 걸리고, 높은 접합율을 얻기 위해서 오랜 시간 동안 고온에서 유지하면 C 조건보다 더 많은 변형이 발생한다.

4. 결 론

Ti-6Al-4V 합금을 고상 확산접합하여 접합부의 기계적 특성과 접합압력의 단계적 변화가 접합성에 미치는 영향을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Ti-6Al-4V 합금의 고상 확산접합시 이 계면에 존재하는 공동의 형상은 접합 압력이나 접합 온도의 영향보다는 접합율이 어느 정도인가에 영향을 많이 받았다. 즉, 접합율이 낮은 경우는 길고 납작한 모양의 공동이 많았고, 접합율이 높은 경우는 등글고 미세한 공동이 많이 발견되었다.
- 2) 인장 시험 결과, Ti-6Al-4V 합금의 고상 확산 접합시 모재와 거의 유사한 기계적 특성을 지니는 접합부를 얻을 수 있었다.
- 3) 최적의 접합 조건은 850°C, 3MPa 이었고 접합 시간은 표면 거칠기에 따라 달라지는데 보통 30 - 60 분 정도이다.
- 4) 접합 압력을 단계적으로 감소시키면서 접합을 행한 경우, 모재의 변형율을 줄이면서 접합율을 높일 수 있었다.

후 기

본 연구는 서울대학교 발전기금 일반학술 연구비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. C. H. Hamilton , N. E. Paton, "Superplasticity and Superplastic Forming", TMS(1988), 563
2. Z. X. Guo, N. Ridley, Mater. Sci. & Technol. , 3(1987), 945
3. Y. Takahashi, K. Inoue, Mater. Sci. Technol. , 8(1992), 953
4. K. Nishiguchi, Y. Takahashi, Q. J. Japan Weld Soc. , 3(1985), 303
5. Y. Takahashi, K. Takahashi, K. Nishiguchi, Acta metall. mater. , 39(1991), 3199
6. B. Derby, E.R. Wallach, J. Mater. Sci. , 19(1984), 3140
7. B. Derby, E.R. Wallach, J. Mater. Sci. , 19(1984), 3149
8. Y. Takahashi, K. Inoue, K. Nishiguchi, Acta metall. mater, 40(1993), 3077
9. A. Hill, E.R. Wallach, Acta Metall. , 37(1989), 2425
10. B. Derby, E. R. Wallach, Met. Sci. , 16(1982), 49
11. S. Fukumoto, A. Kasahara, A. Hirose, K. F. Kobayashi, Mater. Sci. Tech. , 10(1994), 807
12. M.T. Salehi, J. Philling, N. Ridley, D. L. Hamilton, Mater. Sci. Eng. A150(1992), 1
13. J. Philling, Mater. Sci. Eng. 100(1988), 137
14. A. Calvo, at al. , J. Mater. Sci. , 27(1992), 391
15. A. Wisbey, P.G. Partridge, Mater. Sci. Technol, 9(1993), 441
16. H. Andrzejewski, K. F. Badawi, B. Rolland, Welding J. , (1993), 435
17. J. Philling, D. W. Livesey, J. B. Hawkyard, N. Ridley, Met. Sci. , 18(1984), 117
18. Y. Takahashi, T. Nakamura, K. Nishiguchi, J. Mater. Sci. , 27(1992), 485-498
19. Ohashi, J. JIW, 62(1993), 512