

등축정 Ti-6Al-4V 합금의 α , β 구성상의 고온변형거동 규명

김정한¹, 이유환², 염종택¹, 박노광¹, 이종수²

High temperature deformation behavior of α and β phase of Ti-6Al-4V alloy with an equiaxed microstructure

Jeoung Han Kim¹, You Hwan Lee², Jong Taek Yeom¹, Nho Kwang Park¹, and Chong Soo Lee²

Abstract

High temperature deformation behavior of α and β phase of Ti-6Al-4V was investigated within the framework of a self-consistent approach at various temperature ranges. To examine the flow behavior of α -phase, Ti-7.0Al-1.5V alloy was used, whose chemical composition is close to that of the α phase in Ti-6Al-4V at hot working temperatures. The flow stress of β phase was predicted by using self-consistent approach. The flow stress of α phase was higher than that of β phase above 750°C, while the β phase revealed higher flow stress than α phase at 650°C. It was found that the relative strength and strain rate ratio between α and β phase significantly varied with temperature. From this approach, the mode for grain matrix deformation was proposed as a mixed type of both iso-stress and iso-strain rate modes.

Key Words : Ti-6Al-4V, Flow Behavior, Deformation, Alpha Phase, Beta Phase, Self Consistent Approach

1. 서 론

열간단조나 압출 등은 여러 산업분야에서 다양하게 응용되고 있는 기술로서 가공도중 재료의 결함이나 비균질성이 존재할 경우 생산단가가 상승하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 최적의 공정조건을 찾는 것뿐만 아니라 소재의 고온변형거동을 명확하게 규명하는 것이 중요하다. 예를 들어, 대표적인 항공기 소재인 Ti-6Al-4V 합금은 성형성을 확보하기 위해 조대한 층상의 주조조직을 미세 등방정 조직으로 분쇄하는 중간 단계의 공정이 필요한데, 이 단계의 미세조직 변화가 소재의 최종물성에 큰 영향을 미친다¹⁻²). 그러나, 2상 합금에서는 고려해야 할 미세조직 인자가 매우 많아 (결정립도, 상분율, 계면특성 등) 이들이 각각 재료의 기계적 물성에 미치는 영향을 독립적으로 연구하기 어려웠다.

김지식등은 Ti-6Al-4V합금의 고온변형에 미치는

각 구성상들의 영향을 연구하여 α/β 계면의 미끄러짐이 α/α 또는 β/β 계면에서 보다 더 용이하다고 제시하였다³). 그러나 이는 열처리를 통해 얻어진 비평형상을 고온환경에 노출하여 실험을 수행한 결과로서 미세조직 안정성 문제로 실험결과에 많은 의구심이 제시되어왔다. 또한 각각의 구성상들이 $\alpha+\beta$ 이상구조 합금의 유동응력에 미치는 영향을 제시하지 못한 단점이 있었다. 이러한 연구의 수행에 적합한 방법은 Ti-6Al-4V합금의 α 또는 β 상과 동일한 화학조성을 가지는 합금을 제조하여 각각의 기계적 성질을 측정하는 것이다.

본 연구의 목적은 α , β 구성상들이 Ti-6Al-4V합금의 고온변형에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것이다. 이를 위해 고온에서 α 상과 유사한 화학조성을 가지는 Ti-7.0Al-1.5V합금을 이용하여 고온특성을 측정하였고 이를 Ti-6Al-4V합금의 것과 비교하였다. 그 결과를 self-consistent approach를 사용하여 β 상의 거동을 예측하는데 적용하였다.

1. 한국기계연구원, 공정연구부/소성응용그룹

2. 포항공대, 신소재공학과

#교신저자: 한국기계연구원, E-mail: kjh1754@kmail.kimm.re.kr

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 재료는 2상 Ti-6Al-4V 합금과 단상 Ti-7.0Al-1.5V 합금으로서 전자는 TIMET사에서 제조된 상용소재이며 후자는 본 실험을 위해 Skull-melting 방법으로 특별히 제조된 시편이다. 단상 Ti-7.0Al-1.5V의 화학조성은 2상 Ti-6Al-4V의 α 상 조성과의 유사하도록 조절되었으며 실험온도 환경에서의 결정립도, 상분율을 측정하기 위해 상기의 시료들을 주어진 특정 온도에서 20분간 유지시킨 후 수냉 하여 미세조직을 관찰했다. 표1은 최종 열처리 미세조직의 특성을 나타내고 있다.

Table 1. Temperature dependence of the grain size and volume fraction of the α phase in Ti-6Al-4V and Ti-7.0Al-1.5V alloys.

Temp. (°C)	Alloys	
	Ti-6Al-4V	Ti-7.0Al-1.5V
	α vol. fraction (grain size)	α vol. fraction (grain size (μm))
650	80% (17 μm)	100% (34 μm)
600	79% (17 μm)	100% (34 μm)
750	77% (17 μm)	100% (35 μm)
815	66% (17 μm)	100% (35 μm)
900	46% (17 μm)	100% (35 μm)
950	20% (15 μm)	100% (36 μm)

Ti-6Al-4V합금의 고온변형특성을 분석하기 위해 고온압축 실험을 수행하였다. 실험수행은 Gleeble-3500을 통해서 이루어졌으며 사용된 고온압축시편은 직경 10mm, 높이 12mm의 봉상시편이었다. 두 시편사이의 α 상 결정립도 차이에 의한 유동응력의 변화를 최소화 하기 위해 Hall-Petch식을 이용하여 결정립도 $\sim 35\mu\text{m}$ 의 Ti-7.0Al-1.5V 합금 강도를 결정립도 17 μm 의 것으로 조정하였다.

$$\sigma = \sigma_0 + k_s / \sqrt{d} \quad (1)$$

3. 실험 결과

그림 1은 상온에서 950°C까지의 8가지 구간에서 진변형율속도 $10^{-1}/\text{sec}$ 로 압축실험을 한 결과를 보여주고 있다. Ti-7.0Al-1.5V의 경우 650°C 이하에서는 변형초기에 가공경화 현상을 보여주고 그 이상의 온도에서는 안정상태의 유동곡선을 나타낸다. Ti-6Al-4V의 경우도 비슷한 거동을 보이고 있으나 전자와는 달리 상온에서 0.3 이상의 변형율을 받았을 때 표면균열이 발생했다. 또한, Ti-6Al-4V의 경우 650°C 이하의 온도에서 유동응력이 Ti-7.0Al-1.5V의 경우보다 높았다. 이는 $\alpha + \beta$ 의 2상조직이 α 단상조직보다 가공저항성이 높다는 것을 의미한다. 그러나 650°C 이상의 온도에서는 반대로 Ti-7.0Al-1.5V의 유동응력이 Ti-6Al-4V의 것보다 더 높았다. 이러한 결과는 Ti-6Al-4V 합금내의 α , β 상의 상대적인 강도비가 온도에 따라 변화하고 있다는 것을 의미한다.

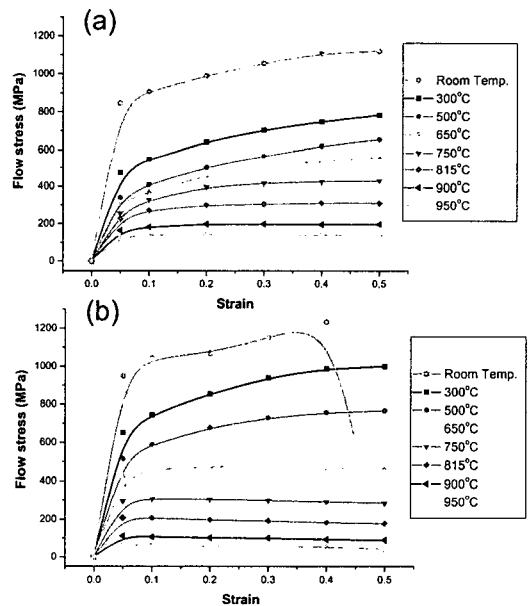


Fig. 1 True stress-true strain curves of (a) Ti-7.0Al-1.5V and (b) Ti-6Al-4V at a strain rate of 10^{-1}s^{-1} .

4. 고찰

4.1 Self-consistent approach

상기한 고온압축실험을 통해 $\alpha + \beta$ 2상조직과 α 단상조직의 유동곡선을 구할 수 있었으나 β 단상조직의 변형거동은 직접 얻을 수가 없었다. 이는

α 상과는 달리 β 상은 온도의 변화에 따라 상 내부의 화학조성이 크게 변화하기 때문에 적합한 β 합금을 제조하기 힘들었기 때문이다. 간접적으로 β 상의 변형거동을 예측하기 위해 Fig.1의 유동 곡선을 Self-consistent approach를 통해 분석하였다. Self-consistent 모델은 linear elastic solid에 대해 Hill에 의해 제시된 후 linear viscoplastic 소재에 적용되었는데 여기서 각 상의 유동 거동은 다음 식(2)로 표현이 가능하다.

$$\sigma_i = k_i^L \dot{\epsilon}_i \quad (2)$$

여기서, k^L 은 “viscosity”를 의미하며 첨자($i = \alpha, \beta$)는 각 구성상을 나타낸다. 전체 구성상의 viscosity인 k_{sc}^L 는 식(3)과 같이 표현될 수 있으며 ρ 와 f 는 각각 k_β^L/k_α^L 와 α 상의 부피분율을 의미한다.

$$k_{sc}^L / k_\alpha^L = (1/6)\{3 - 2\rho + 5(1-f)(\rho-1) + \sqrt{[3 - 2\rho + 5(1-f)(\rho-1)]^2 + 24\rho}\} \quad (3)$$

Suquet은 상기한 분석을 식(4)와 같은 power-law viscoplastic 형태로 확장했다⁴⁾.

$$\sigma_i = k_i \dot{\epsilon}_i^{m_i} \quad (4)$$

m 은 변형율속도 민감도계수를 의미하는데 본 모델에서는 $m_\alpha = m_\beta = m_{Ti-64}$ 를 만족해야 적용이 가능하다. 전체 구성상과 α 상의 viscosity인 k 와 k_α 의 관계는 식(5)와 같이 정의될 수 있다.

$$k / k_\alpha = \min_{\rho \geq 0} \{ (k_{sc}^L / k_\alpha^L)^{(m+1)/2} \times [f + (1-f)\rho^{(m+1)/(m-1)} (k_\beta / k_\alpha)^{2/(1-m)}]^{(1-m)/2} \} \quad (5)$$

식(5)에서 우측항 대괄호안의 기호는 $\rho \geq 0$ 을 만족해야 함을 의미한다. 식(5)의 해는 해석적으로는 얻어질 수 없는 값으로 컴퓨터를 이용하여 수치적으로 구해야 한다.

4.2 모델 결과

표 2는 2상 Ti-6Al-4V 합금과 단상 Ti-70Al-1.5V 합금의 온도별 항복강도, 변형율속도 민감도계수, Ti-6Al-4V의 상분율로 4.1절에서 언급한 모델에 적용될 물성정보들이다. 여기에서 변형율민

감도계수는 α 상과 β 상의 경우가 거의 비슷해서 앞절에서 언급한 조건을 만족시키고 있다.

Table 2. 0.2% offset yield stress and strain rate sensitivity of Ti-70Al-1.5V and Ti-6Al-4V. And, α phase volume fraction in Ti-6Al-4V as a function of temperature.

Temp. (°C)	Y.S. (MPa)		m		α -vol. fraction in Ti-64 (%)
	σ_α	σ_{Ti-64}	α -Ti	Ti-64	
650	319	356	0.06	0.06	81
750	280	256	0.08	0.09	72
815	227	187	0.10	0.11	66
900	192	108	0.13	0.13	46
950	149	63	0.15	0.15	20

표 2의 물성 파라미터를 4.1절의 self-consistent 모델에 적용하면 표 3과 같이 각 구성상의 viscosity를 얻을 수 있다.

Table 3. Viscosity like parameter k_{Ti-64} , k_α , and k_β as a function of temperature.

Temp. (°C)	k_{Ti-64}	k_α	k_β
650	471.5	391.3	1041.1
750	408.7	366.3	632.5
815	311.3	340.5	242.8
900	238.1	289.1	156.2
950	145.7	259.0	81.5

표 2의 변형율 민감도계수와 표 3의 viscosity를 식(4)에 대입하여 $10^{-1}/\text{sec}$ 조건에서 β 상의 항복강도 예측치를 온도별로 얻을 수 있었다. 여기서 α 상과 Ti-6Al-4V의 강도는 실험치이다. 그림 2는 이를 온도별로 제시한 그래프로서 β 상의 예측치가 Y. Combres 등에⁵⁾ 의해 제시된 Beta-CEZ의 변형거동과 유사한 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 압축 실험 결과에서 예측했듯이 700°C를 기준으로 α 상과 β 상의 상대적인 강도비가 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 이에 대한 원인은 α 상과 β 상

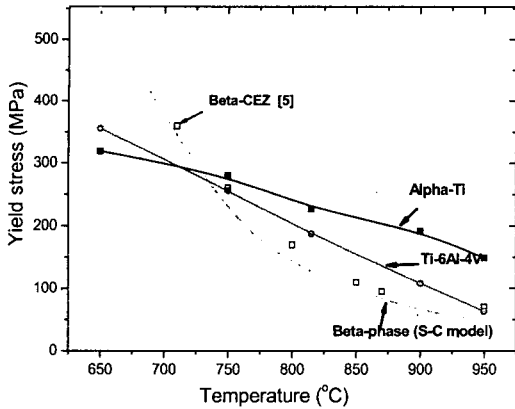


Fig. 2 Predicted flow curve of β phase obtained from self-consistent approach and measured flow curves of Ti-6Al-4V and Ti-7.0Al-1.5V alloy.

의 온도에 따른 슬립계와 고용강화효과의 변화로 해석 된다. 저온에서는 α , β 의 주 슬립계의 수가 2~3 개로 비슷한 수준이나 온도가 상승함에 따라 최대 48 개의 슬립 시스템이 β 상에서 작동하게 된다. 반면 α 상은 최대 12 개로 제한되어 있어 상대적으로 고온 유동성이 떨어진다. 한편, 그림 3 은 Semiatin 등에 의해 제시된 각 구성상의 Al 과 V 의 고용한이다. α 상의 경우는 온도상승에 따른 화학조성의 변화가 거의 없으나 β 상은 대표적 강화 고용체인 V 이 큰 폭으로 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, α 상의 고용강화효과는 고온에서도 유효하나 β 상의 경우는 크게 약화 됨을 의미한다.

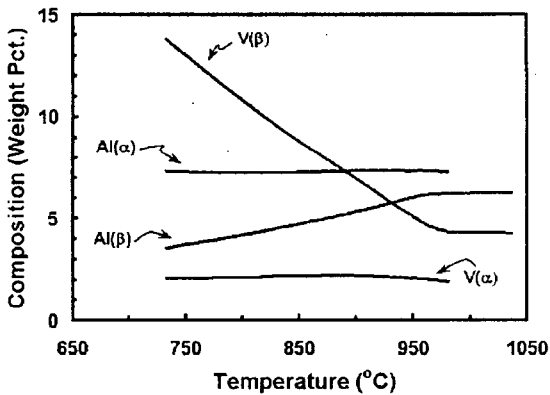


Fig. 3 Phase compositions for Ti-6Al-4V alloy⁶⁾

그림 2 에서 예측한 결과를 검증하기 위해 NIKON QM-2 고온경도기를 사용하여 각 상의 고

온경도를 측하였다. 그림 3 의 경도시험 결과는 700°C 부근에서 각 구성상의 상대적인 강도비가 역전된다는 그림 2 의 결과와 잘 일치하고 있다.

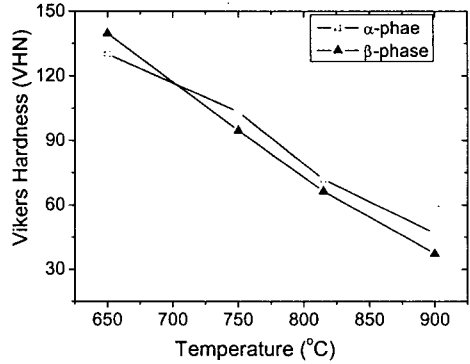


Fig. 4 The variation of high temperature hardness of α and β phase in Ti-6Al-4V with temperature increase.

4. 결론

본 연구에서는 2 상 Ti-6Al-4V 과 이 합금재료의 α 상과 흡사한 화학조성을 가지도록 제조된 단상 Ti-7.0Al-1.5V 의 고온변형거동을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 상온~950°C 의 온도 범위에서 고온압축 실험을 수행하였고 그 결과를 Self-consistent 모델을 이용해 분석하였다. 이를 통해 β 상의 고온강도에 대한 예측치를 얻을 수 있었고 이를 α 상과 Ti-6Al-4V 의 강도와 비교 분석하였다.

후기

본 연구는 과기부에서 시행한 2003 National Research Laboratory 프로그램의 지원하에 이루어졌으므로 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] S.L. Semiatin and T.R. Bieler, Acta Mater., 2001; 49: 3565
- [2] J.H. Kim, S.L. Semiatin, and C.S. Lee, Acta Mater. 2003; 51: 5613.
- [3] J.S. Kim, Y.W. Chang, and C.S. Lee, Metall. Trans. A, 1998; 29: 217.
- [4] P.M. Suquet, J. Mech. Phys. Solids, 1993; 41: 981.
- [5] Y. Combres, B. Champin, Metallurgy and Technology of Practical Titanium Alloys, TMS, PA, 1994: 247.
- [6] S.L. Semiatin, S.L. Knisley, P.N. Fagin, F. Zhang, Barker, Metall. Mater. Trans. A, 2003; 34: 2377