

Ti-6Al-4V합금의 비틀림 및 압축변형에 따른 고온변형거동 고찰

염종택^{1,2#}, 정은정¹, 김정한¹, 홍재근¹, 박노광¹, 이종수²

Investigation of High Temperature Deformation Behavior in Compression and Torsion of Ti-6Al-4V Alloy

J. T. Yeom, E. J. Jung, J. H. Kim, J. K. Hong, N. K. Park, C. S. Lee

Abstract

High temperature deformation of Ti-6Al-4V alloy with a lamellar colony microstructure was investigated by hot compression and torsion tests. The torsion and compression tests were carried out under a wide range of temperatures and strain rates with true strain up to 2 and 0.7, respectively. The processing maps were generated on the basis of compression and torsion test data and using the principles of dynamic materials modeling (DMM). The shapes of the strain-stress curves in alpha-beta region and processing maps obtained on the two different tests have been compared with a view to evaluate the effect of the microstructure evolution on the flow softening behavior of Ti-6Al-4V alloy with a lamellar colony microstructure.

Key Words : Ti-6Al-4V Alloy, High Temperature Deformation Behavior, Compression Tests, Torsion Test, Flow Softening

1. 서론

Widmanstätten조직을 가지는 Ti-6Al-4V합금에 대해 ($\alpha+\beta$)영역에서 변형시 가장 큰 미세조직적 변화는 α lath 또는 plate의 구상화(globularization)로 구상화과정에서 상당한 유동연화를 수반하게 된다. Malcor[1] 등은 Ti-6Al-4V합금에 대해 온도 $T_{\beta}-30^{\circ}\text{C}$ (T_{β} : β 상의 변태온도)와 변형속도 1.4s^{-1} 에서의 단조에 대해 변형량이 1.02정도에서는 부분적인 구상화가 발생하였고, 변형량이 1.43으로 증가한 경우 완전구상화가 얻어졌음을 보고한 바 있다. 이러한 연구결과는 α 상의 구상화거동이 1.0이상의 대변형에 의해 정량적으로 분석함이 가능하다는 것을 나타내는 결과이다.

일반적으로, 대변형에 대한 유동응력의 측정은 압축시험 및 비틀림시험에 의해서 얻어진다. 그

이유는 인장시험의 경우 소성변형중 흔히 일어나는 게이지부위의 국부necking으로 인해 대변형률에서의 소성변형거동을 이해하기 어렵기 때문이다. 압축시험은 단조공정과 유사한 변형모드이며, 쉽게 유동응력을 얻을 수 있는 장점으로 비틀림시험에 비해 소성가공력을 계산하는데 흔히 적용하고 있는 시험방법이나, 금형과의 접촉으로 인한 마찰과 열손실 등에 기인하여 소성변형 dead zone이 형성되기 때문에 진변형량 1.0이상의 변형을 얻기가 쉽지 않다. 반면에 비틀림시험의 경우 압축시험에 비해 대변형에서의 유동응력을 측정함이 유리하나, 통상적으로 비틀림시험법은 봉상의 시험편을 사용하기 때문에 표면과 내부의 변형률 차이가 발생하고 원주방향으로 소성변형응력이 변하게 되어 비틀림각도와 모멘트(힘)로부터 얻어진 평균 변형량-응력은 진 변형량-응력과 차이가

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소, 특수합금연구그룹

2. 포항공과대학교, 신소재공학과

교신저자: 재료연구소, E-mail:yjt96@kims.re.kr

발생할 수 있다. 본 연구에서는 Widmanstätten조직을 가지는 Ti-6Al-4V합금에 대해 비틀림시험과 함께 고온압축시험을 수행하고, 각각의 변형모드에 따른 고온변형거동을 이해하고자 하였으며, 대변형 연구에서 비틀림시험의 신뢰성을 알아보하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 원소재 및 열처리

본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V 합금은 704°C 에서 2 시간 동안 어닐링된 지름 100mm 빌렛으로, 초기조직은 등축정을 나타내었다. Widmanstätten 조직의 α 상 lath 또는 plate 두께변화에 따른 고온변형거동을 알아보기 위해서, 다음과 같은 두가지 열처리에 의해 압축시험과 비틀림시험에 대한 조직조건을 제어하였다.

- i) 1040°C 에서 1 시간 유지후 급냉 (Condition 1)
- ii) 1040°C 에서 1 시간 유지후 노냉 (Condition 2)

i)번 열처리조건인 경우 1 μ m 이하의 α' 마르텐사이트 조직이 얻어졌으며, ii)번 열처리조건은 약 9 μ m 정도의 α lath 두께를 가지는 조대한 Widmanstätten 조직을 나타내었다.

2.2 비틀림 및 고온압축시험

비틀림시험과 고온압축시험은 800°C 에서 950°C 까지 50°C 간격으로, 변형속도는 1, 0.1, 0.01 s⁻¹ 조건에서 수행되었다. 비틀림시험의 경우 변형량 2 까지 진행하였고, 고온압축시험은 변형량 0.7 까지 수행하였다. 비틀림시험으로부터 얻어진 비틀림각 (θ)과 모멘트(M)을 전단응력(τ)과 전단변형률(γ)로 전환하기 위하여 Fields 와 Backofen [2]등이 제시한 다음과 같은 관계식을 활용하였다.

$$\tau = M(3 + m + n) / 2\pi r^3 \quad (1)$$

$$\gamma = r\theta / L \quad (2)$$

여기서, m 과 n 은 각각 변형속도 민감도지수와 가공경화지수를 나타내며, L 은 시험편 측정부위의 길이를 나타낸다. 가공경화지수 n 은 고온에서 거의 0 에 가깝기 때문에 변형속도 민감도 지수 m 이 더욱 큰 영향을 미치며, m 은 다음과 같은 식과 함께 curve fitting 방법에 의해 구할 수 있다.

$$m = \left(\frac{\partial \ln \tau}{\partial \ln \dot{\gamma}} \right)_{\dot{\theta}} = \left(\frac{\partial \ln M}{\partial \ln \dot{\theta}} \right)_{\theta} \quad (3)$$

여기서, $\dot{\theta}$ 는 비틀림각속도, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형속도를 의미한다. 이러한 전단응력과 전단변형률을 일축압축, 일축인장의 등가상태로 바꾸기 위해서 von Mises 항복조건을 적용할 수 있으며, 결국 전응력과 전변형률의 관계식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{3}\tau \quad (4)$$

$$\varepsilon = \gamma / \sqrt{3} \quad (5)$$

한편, 고온압축과 비틀림에서 얻어진 변형량-응력곡선은 변형열을 고려하여 보정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유동응력곡선 및 조직 분석

그림 1은 압축시험과 비틀림시험에서 얻어진 각 초기조직별 유동응력곡선을 비교 분석한 그래프이다. 두 초기조직에 따른 유동응력의 변화를 살펴보면 비틀림시험과 압축시험결과가 다소 차이가 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이는 식 (3)을 활용하여 온도와 변형속도에 따라 변화하는 변형속도민감도 지수 m을 구하는 과정에서 발생된 오차에 기인한 것으로 판단된다.

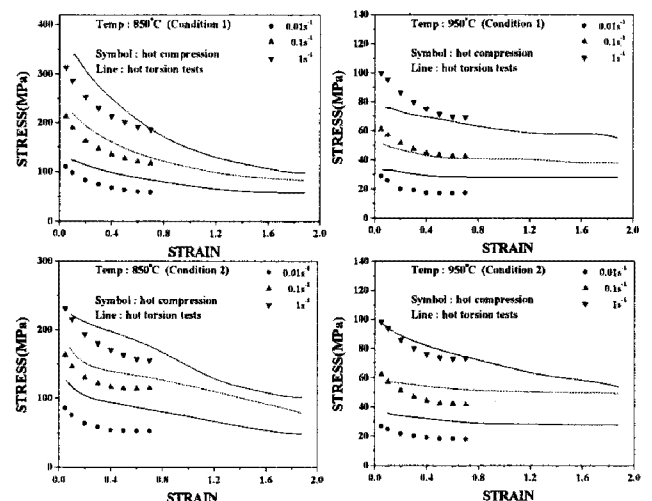


Fig. 1. Stress-strain curves obtained from the compression and torsion tests at the different experimental test conditions such as temperature, strain rate and initial microstructure.

한편, 850°C에서 두 초기조직에 따른 비틀림시험과 압축시험의 연화거동이 거의 유사한 반면, 950°C의 경우 비틀림시험결과의 유동연화 폭이 압축시험에 비해 다소 작음을 관찰할 수 있다. 특히, $1s^{-1}$ 에서 유동연화 폭이 크게 차이를 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 일반적으로, 이러한 유동연화는 α lath 또는 plate의 구상화(globularization)과정에서 나타나는 전위의 이동과 관계가 있으며, 결국 950°C 온도조건에서 비틀림시험의 경우 이러한 α 상의 구상화거동이 압축시험에 비해 상대적으로 낮게 발생하였음을 의미한다. 그림 2는 950°C, 변형속도 $1s^{-1}$ 조건에서 비틀림 및 압축시험된 시험편에 대한 조직관찰결과를 나타낸 것이다. 비틀림시험과 압축시험된 시험편의 미세조직은 FEM해석을 수행하여 유효 변형량이 각각 2.0, 0.7에 해당하는 부위에 대하여 관찰하였다. 비틀림시험의 경우 lath α 상을 거의 찾아볼 수 없으며, 미세한 등축정 α 과 마르텐사이트상을 관찰할 수 있는 반면, 압축시험은 lath α 과 미세 등축정 α 상이 혼재하고 있고 α 상의 상분율이 상대적으로 높음을 관찰할 수 있다.

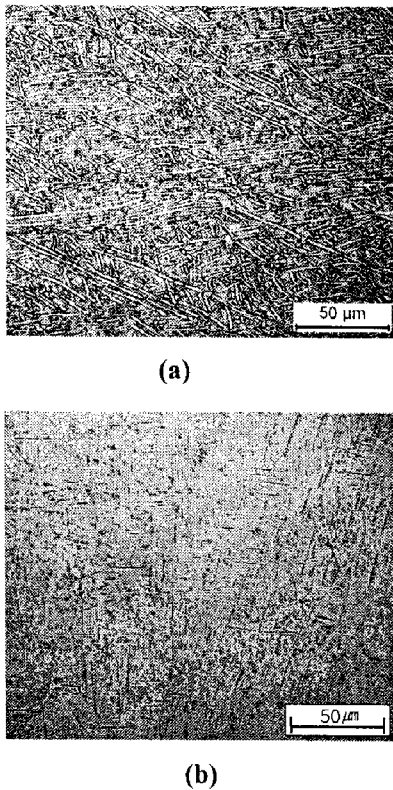


Fig. 2 Microstructures observed in (a) the compression and (b) the torsion tested samples at the strain rate of $1s^{-1}$ and temperature of 950°C

이는 비틀림시험에 의한 변형열이 압축시험에 비해 상대적으로 높아 $\alpha \rightarrow \beta$ 상변태가 촉진된 것으로 판단된다.

3.2 동적재료모델에 기초한 변형공정지도

Widmanstätten조직을 가지는 Ti-6Al-4V합금의 비틀림과 압축변형에 따른 고온변형거동을 이해하기 위하여 열간가공시 복잡한 재료들의 가공성, 파괴 및 유동거동을 거시적으로 표현하는 방법인 동적재료모델[3]에 기초한 변형공정지도를 활용하고자 하였다. 이 모델에 따르면, 재료의 소성변형에 대한 에너지 분산의 효과를 정량적으로 분석하기 위한 기준으로 다음과 같은 에너지 분산효율(efficiency of dissipation), η 을 제시하였다.

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \quad (6)$$

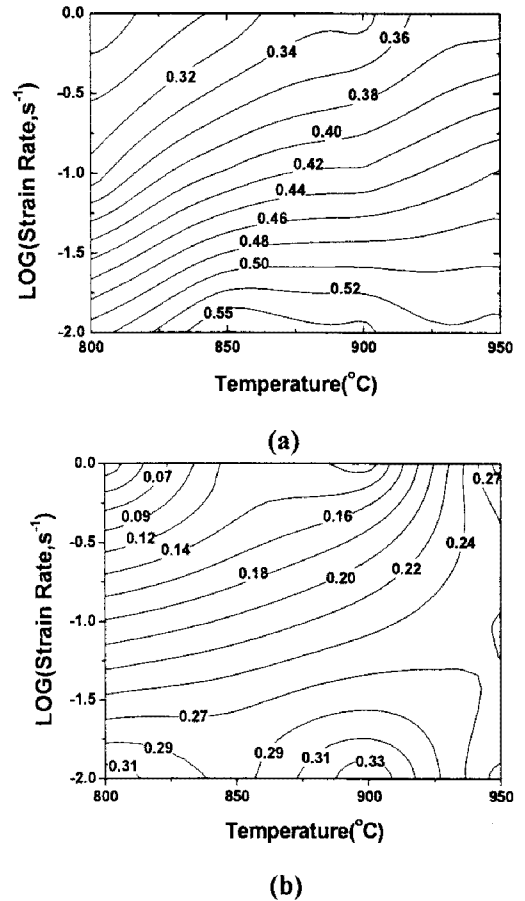


Fig. 3 Deformation process maps within (a) the compression tested specimens($\epsilon=0.7$) and (b) the torsion tested specimens($\epsilon=2.0$).

여기서, m 은 변형속도민감도 지수이다. 결국, 이러한 에너지 분산효율(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미시구조적 변화가 가장 활발함을 의미하게 된다.

그림 3은 비틀림시험과 압축시험으로부터 얻어진 유동응력곡선으로부터 작성된 초기 마르텐사이트조직에 대한 변형공정지도를 나타낸 것이다. 비틀림시험의 경우 최대 에너지분산효율치가 0.33으로 900°C, 변형속도 $10^{-2}s^{-1}$ 조건에서 관찰되었고, 반면에 고온압축시험의 경우 최대 에너지분산효율치가 0.55로 840-900°C온도구간과 변형속도 $10^{-2}s^{-1}$ 조건에서 관찰되었다. 이러한 에너지분산효율값의 차이는 각 영역에 해당하는 조건에 대한 미세조직관찰결과, 압축시험의 경우 변형량 0.7에서 얻어진 변형공정지도를 1 μ m α 상의 구상화거동이 활발히 일어나고 있는 반면, 비틀림시험의 경우 변형량 2.0에서 얻어진 변형공정지도를 α 상의 완전구상화에 기인한 것임을 알 수 있었다.

이상의 결과를 토대로, 비틀림시험은 진 응력-변형량을 도출하기 위한 방법론에서 여전히 많은 문제점이 있기는 하지만, 대변형의 고온변형거동을 설명하기 위한 유용한 시험방법임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 Widmanstätten조직을 가지는 Ti-6Al-4V합금에 대해 비틀림시험과 고온압축시험을 수행하고, 유동응력곡선과 동적재료모델을 기초로 변형공정지도 등을 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 비틀림 시험과 압축시험에서 구한 변형량-응력 곡선은 다소 차이를 나타내었으며, 이는 각 온도 및 변형속도별 변형속도민감도지수(m)을 적용하는데 기인한 오차임을 알 수 있었다.

(2) 주어진 온도 및 변형속도조건에서 동적 구상화거동은 비틀림변형보다 압축변형에서 더욱 활발히 일어나는 것으로 관찰되었다.

(3) 변형공정지도를 통한 두 변형모드의 고온변형거동을 살펴본 결과, 비틀림시험의 경우 압축시험결과에 비해 낮은 에너지분산효율치를 나타내었는데, 이는 α 상의 완전구상화에 기인한 것으로 판단되었다.

후 기

본 연구는 기본연구사업과 2003년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다.(ROA-2003-000-10309-0).

1.

참 고 문 헌

- [1] J. G. Malcor, F. Montheillet and B. Champin, 1985, Titanium: Science and Technology, (ed. G. Luetjering, U.Zwicker and W. Bunk), Oberursel, Germany, DGM, pp. 1495~1502.
- [2] D. F. Fields, W. A. Backofen, 1957, in Proceed. of the 60th Annual Meeting of the American Society for Testing and Materials, Vol.57, pp.1259~1272.
- [3] Y.V.R.K. Prasad et al., 1984, Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6242, Metall. Trans. A, Vol. 15, pp.1883~1892.