

Ti-6Al-4V 합금의 고온변형거동 규명

염종택* · 김두현* · 니영상* · 박노광*

(2001년 5월 29일 접수)

Characterization of Hot Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy

J. T. Yeom, D. H. Kim, Y. S. Na and N. K. Park

Abstract

Compression tests were carried out to investigate the hot-deformation behavior of Ti-6Al-4V alloy in the temperature range of 915°C to 1015°C and the strain rate range of 10^{-3}s^{-1} to 10s^{-1} . Under the given test conditions, the hot-deformation of Ti-6Al-4V alloy was mainly led by dynamic recovery rather than by dynamic recrystallization. The activation energy for the plastic deformation in $\alpha+\beta$ field was about 894 kJ/mol and β field was 332 kJ/mol. Processing map for hot working are developed on the basis of the variations of efficiency of power dissipation ($\eta=2m/m+1$) and flow instability criterion using the dynamic material model. The optimum process condition in the $(\alpha+\beta)$ field was obtained at the temperature ranges of 930°C to 955°C and a strain rate of 10^{-3}s^{-1} .

Key Words : Ti-6Al-4V Alloy, Hot Deformation, Efficiency of Power Dissipation, Dynamic Material Model, Flow Instability Criterion

1. 서 론

티타늄 합금 중 가장 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금은 높은 비강도과 우수한 파괴인성 및 부식저항성등과 같은 특성을 가지고 있는 전형적인 $(\alpha+\beta)$ 형 티타늄 합금으로 300°C까지의 비교적 고온에서 견딜수 있기 때문에 항공기용 엔진 및 기체구조 재료로 많이 사용되고 있다. 또한 이 합금은 near- α 계 합금에 비해 용접, 단조 및 기계가공이 용이하기 때문에 적절한 가공열처리를 통

해 미세조직을 제어함이 가능하다.⁽¹⁾

지금까지 이합금의 사용용도는 주로 항공기 엔진의 압축기와 구조보강재로 사용되어져 왔기 때문에 고주기 피로특성이 우수한 등축정조직을 얻는 가공열처리조건이 선호되어 왔으나, 최근의 연구동향은 각 부품의 사용조건에 맞는 미세조직을 다양하게 조절함으로서 내구성을 향상시키려는 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽²⁾ 또한 압축기 디스크의 단조공정시 중심부인 bore부는 인장특성과 저주기피로특성이 우수하고, 블레이드가 장착되는

* 한국기계연구원 재료공정연구부

rim부에서는 크리프 및 응력-파단특성이 우수한 dual-properties 가지는 디스크를 요구하기에 이르렀다. 이러한 단조공정에 의한 특성의 제어는 단조온도, 변형속도 및 upsetting ratio등의 단조공정변수들을 적절히 조절함으로서 가능하며, 실제 단조공정에 앞서 합금의 고온변형거동을 이해하고 예측하는 일이 선행되어야 할 것이다. 따라서 본 연구에서는 고온압축시험을 통해 Ti-6Al-4V합금의 ($\alpha + \beta$)영역과 β 영역에서의 고온에서의 변형거동을 연구하였고, 각 변형온도 및 변형속도에 따른 유동응력의 변화를 정량화하였으며, 고온압축조건에 따른 미세조직을 관찰함으로서 이 합금의 고온변형특성과 미세조직과의 관계를 이해하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 Ti-6Al-4V 합금은 미국의 TIMET사에서 제조된 대표적인 ($\alpha + \beta$)형 티타늄합금으로 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy (wt.%)

Al	V	C	Fe	N
6.5	3.9	0.011	0.16	0.003
H	O	Y	others	Ti
0.005	0.19	>10ppm	0.4	Bal.

이 합금의 β 변태점은 α 상 안정화원소인 산소의 함량에 따라 차이를 보이며 산소함량이 비교적 적은 경우는 낮은 β 변태점을 나타낸다. 이 합금의 β 변태점은 971~993°C이며, 초기 빌렛의 미세조직은 Fig. 1에 나타내었다. Fig.에서 보는바와 같이 lath형 α 상의 결정립을 따라 α / β 충상조직이 발달되어 있음을 관찰할 수 있으며, lath형 α 상의 총체적율은 65%로 측정되었다.

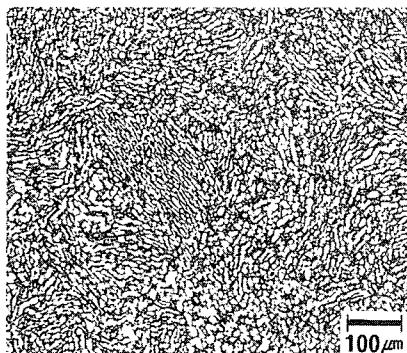


Fig. 1 An optical microstructure of the as-received Ti-6Al-4V alloy

Ti-6Al-4V합금의 열간성형성을 알아보기 위해서 고온압축시험을 수행하였다. 이때 시편의 형상은 지름 8mm×길이 12mm의 원통형으로 제작하였고, ThermoMaster-Z장비를 이용하여 10^{-2} torr의 진공분위기에서 유도가열되었다. 시편의 내부까지 균일한 온도분포를 이루게 하기 위해서 시험온도 도달후 5분간 유지되었고, 냉각중에 발생되는 미세조직의 변화를 없애기 위해서 압축시험후 시편은 급냉되었다. 시험온도는 915~1015°C에서 20°C간격으로 변형속도는 $10^{-3} \sim 10^1$ s⁻¹에서 10^1 간격으로 수행되었고, 진변형률(true strain) 0.6까지 압축되었다. 압축시험 전과 후의 시편 단면은 Kroll용액(1-3mHF(40%) + 2-6mHNO₃ + 100mH₂O)을 이용하여 3-10초정도 부식시킨 후 광학 현미경으로 미세조직을 분석하였다. 각 압축조건별 초경 α 상의 체적분율은 이미지 분석기를 통해 측정되었고, 통계프로그램을 이용한 다중회귀분석법(multiple regression)으로 Ti-6Al-4V합금의 변형활성화에너지를 구하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 진변형률 및 진응력의 관계

Fig. 2는 Ti-6Al-4V합금의 915~1015°C의 온도구간과 $10^{-3} \sim 10^1$ s⁻¹의 변형속도범위에서 얻어진 전형적인 진변형률과 진응력의 관계 곡선들을 나타낸 것이다. 변형속도가 빠른 10^1 s⁻¹인 경우에서 매우 제한된 가공연화현상이 발견되고 있을뿐 다른 조건의 유동곡선에서는 최대응력을 나타낸 후 변형이 진행됨에 따라 응력이 일정하게 유지되는 정상상태를 나타내고 있음을 관찰 할수 있다. 이와같은 매우 제한된 가공연화현상의 관찰은 Ti-6Al-4V합금의 주 고온변형기구가 전위의 집적과 소멸의 과정을 거치는 동적회복현상에 의해 지배됨을 의미한다. Seetharaman, Boothe, Lombard⁽³⁾연구자들은 Ti-6Al-4V합금에서 관찰되는 유동곡선의 양상에서 가공연화의 정도는 709~809°C의 비교적 낮은온도에서 변형속도가 감소함에 따라 감소하며, 다른 조건의 경우 변형이 진행됨에 따라 일정한 응력을 나타내는 정상상태를 보임을 발견하고, 매우 제한된 가공연화현상이 α 상의 동적구상화(dynamic spheroidization)에 기인한 것으로 설명하였다. 이러한 α 상의 구상화는 조대한 α 상에 대한 낮은 표면에너지(surface energy)와 상대적으로 미세한 판상의 β 상의 표면에너지사이의 차이가 구동력으로 작용하며, 결국 α 상의 구상화는 변형하는 동안 전위의 이동경로를 증가시키므로서 가공연화를 일으키게 되는 것이다.

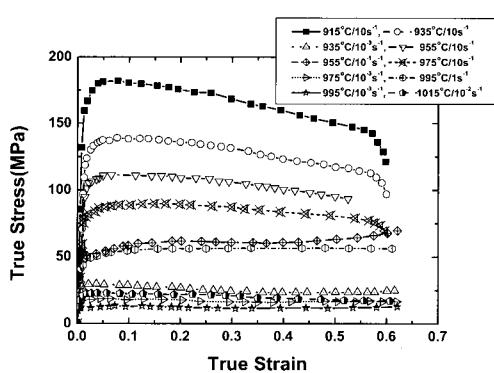


Fig. 2 True stress and strain curves obtained from the Ti-6Al-4V alloy

한편, Fig. 2에 나타낸 유동곡선은 주어진 변형온도에 대하여 $\log(\sigma)$ 과 $\log(\dot{\epsilon})$ 의 관계를 다음과 같은 다항식 (polynomial equation)으로 표현할 수 있다.

$$\log(\sigma) = a + b \log \dot{\epsilon} + c (\log \dot{\epsilon})^2 \quad (1)$$

주어진 온도조건에 따른 a, b, c 등의 상수값은 Table 2에 나타내었다.

Table 2 The value of the constants a, b and c in Eq.(1) at $\dot{\epsilon}=0.6$

Temperature (°C)	a	b	c
915	2.10142	0.06152	-0.03974
935	2.01806	0.05544	-0.05012
955	1.89137	0.08180	-0.03977
975	1.79119	0.10825	-0.02910
995	1.75158	0.10715	-0.03540
1015	1.70406	0.15730	-0.03734

Fig. 3은 유동곡선들로부터 진변형률이 0.6인 조건에서의 온도에 따른 유동응력의 변화를 나타낸 것으로 β 변태점을 기준으로 온도에 따른 유동응력의 변화폭에 차이를 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 즉 β 변태점이하인 ($\alpha + \beta$)영역에서는 변형온도가 증가함에 따라 유동응력의 감소폭이 큰데 반해 β 변태점이상의 β 영역에서는 온도증가에 따른 유동응력의 감소폭에 큰 차이가 없음을 알수 있다. 이러한 경향은 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 의 상변태에 기인한 것으로 Seetharaman, Boothe, Lombard⁽³⁾의 Ti-6Al-4V

합금의 고온변형에 관한 연구결과와 Prasad, Gegel, Doraivelu, Malas, Morgan, lark, barker⁽⁴⁾들의 Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 합금에 관한 연구결과들과 잘 일치한다.

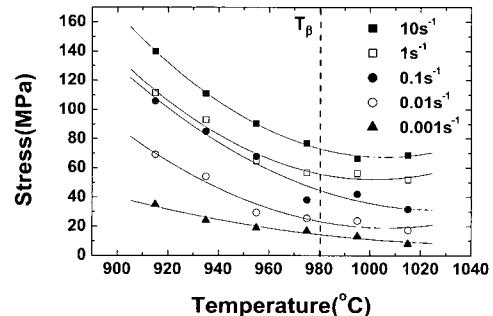


Fig. 3 The variation of flow stress with temperature at different strain rates for strain levels of 0.6

3.2 열적 활성화에너지 결정

고온 변형시 유동응력거동은 주어진 온도 및 변형속도 조건들에 의해 결정되며 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = A f(\sigma) g(T) \quad (2)$$

(A : 구조의존함수, $f(\sigma)$: 응력의 함수, $g(T)$: 온도항으로 exponential 함수)

일반적으로 $f(\sigma)$ 은 σ^n , $\exp(\alpha \sigma)$, $(\sinh(\beta \sigma))^n$ 등과 같은 많은 이론식⁽⁵⁾에 의해 결정되어 왔으며, 이러한 $f(\sigma)$ 의 표현들 중에서 저응력에서 고응력까지의 넓은 응력조건에서 적용가능한 크리프 변형에 대한 현상적 접근방법을 기초로 Sellar와 Tegart⁽⁶⁾가 제안한 경험식인 하이퍼볼릭 사인식을 이용하여 본 연구에 적용하고자 하였으며, 식 (3)에 표현하였다.

$$\dot{\epsilon} = A (\sinh(B\sigma))^n \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

(A, B : 상수, n : 응력지수)

식 (3)의 양변에 자연로그를 취하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln(\sinh(B\sigma_{max})) - Q/RT \quad (4)$$

식 (4)의 미지수들을 구하기 위해서 다중 회귀분석

(multiple regression)을 통한 통계학적 방법을 이용하여 활성화에너지값을 얻었다. 먼저 각각의 온도와 변형속도에 해당하는 유동응력을 대입하고 임의의 B값을 직접대입법에 의해 입력한 후 가장 높은 상관계수값을 나타냈을 때의 활성화 에너지값을 취하였다. 한편, 앞서 관찰된 유동응력 변화양상은 변형속도 뿐만 아니라 β 변태점을 기준으로 변형온도에도 상당한 영향을 받고 있음을 알수 있었다. 즉, $\alpha + \beta$ 영역인 915~975°C의 온도구간에서는 변형온도에 따른 유동응력의 감소량이 크게 나타나는 반면 β 영역인 995°C, 1015°C에서는 유동응력의 감소량이 거의 관찰되지 않음을 알수 있다. 이러한 경향은 Ti-6Al-4V의 β 변태점에 의한 조직상의 차이에 기인한 것으로 하이퍼볼릭 사인식으로 표현되는 구성방정식을 $\alpha + \beta$ 영역과 β 영역으로 분리하여 표현하고자 하였으며, Table 3에 미지수값을 나타내었다. 이때 회귀분석결과로 얻어진 상관계수값은 0.97로 평가되었다.

일반적으로 고온변형시 주어진 온도와 변형속도는 조직의 변화에 중요한 인자로 작용하며, 그 영향은 Zener-Holloman 인자에 의해 규정된다. 본 연구에서 얻어진 활성화 에너지값을 이용하면 결국 Zener-Holloman 인자는 식(5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A(\sinh(B\sigma_{max}))^n \quad (5)$$

Table 3 Material constants of the Ti-6Al-4V alloy determined from high temperature deformation tests

Alloy	Q (kJ/mol)	n	B (MPa ⁻¹)	A(s ⁻¹)
$\alpha + \beta$	894	5.69987	0.0053	1.382×10^{40}
β	332	3.83813	0.0282	1.453×10^{12}

Fig. 4는 Zener-Holloman인자와 최대응력(σ_{max})의 관계를 그래프로 나타낸 것으로, ($\alpha + \beta$)영역인 Fig. 4(a) 및 β 영역인 Fig. 4(b) 모두 직선관계를 잘 만족하고 있음을 알 수 있다.

이 그래프를 통해 Ti-6Al-4V합금의 단조공정과 같은 실제 소성변형에서 주어진 변형속도와 온도조건하에서 가공에 필요한 최대응력을 외삽시켜 구할수 있으며, 이는 유용한 자료로 활용할 수 있다.

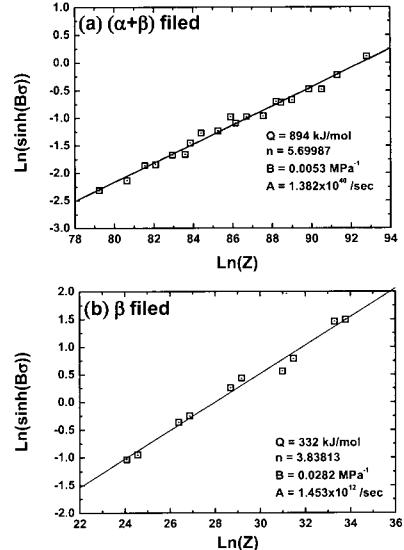


Fig. 4 Plots of $\ln(Z)$ versus $\ln(\sinh(B\sigma))$ in (a) ($\alpha + \beta$) and (b) β files

3.3 Ti-6Al-4V합금의 변형속도민감도(m)

주어진 재료에 대하여 고온유동응력기동은 변형속도가 클수록 증가하며, 일정한 변형률에서 이러한 관계는 식(6)과 같이 표현된다.

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \quad (6)$$

여기서 K는 강도상수로 변형률, 온도, 재료등에 의존하며, m은 변형속도민감도이다. 식(6)의 양변에 상용로그를 취하면 식(7)을 얻을수 있으며, 결국 식(7)에서 얻어지는 각각의 기울기가 변형속도민감도(m)에 해당하며, 식(8)과 같이 정의할 수 있다.

$$\log(\sigma) = \log K + m \log(\dot{\varepsilon}) \quad (7)$$

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\varepsilon}} \right)_T \quad (8)$$

또한 앞에서 언급한 식 (1)을 적용하여 Ti-6Al-4V합금의 각 온도별 $\log(\sigma)$ 대 $\log(\dot{\varepsilon})$ 의 관계식을 식 (8)과 결합하면, 식 (9)와 같은 간단한 식을 얻을 수 있다.

$$m = b + 2c \cdot \log(\dot{\varepsilon}) \quad (9)$$

3.4 Ti-6Al-4V의 고온변형에 대한 정량적 분석

Ti-6Al-4V합금의 고온변형은 β 변태점을 기준으로 한 온도의 영향뿐만 아니라 변형속도에 대해서도 밀접한 관계를 나타내며, 동적재료모델(Dynamic Material Model)을 통한 재료의 고온변형거동에 대한 분석이 많은 연구자들에 의해 진행되어 왔다. Prasad, Gegel, Morgan, Malas⁽⁷⁾들은 Ti-6242합금의 연구에서 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 에너지 분산특성은 고온에서 재료를 변형시킬 때 재료의 소성변형에 의해서 소모되는 에너지와 미시구조적 변화를 유발하는데 소모되는 에너지에 기인한다고 하였으며, 결국 이러한 미시구조적 변화는 온도와 변형속도의 함수로 얻어지는 변형속도민감도(m)를 통해서 예측함이 가능함을 입증한 바 있다. 일정한 온도와 변형률조건에서 변형속도에 따른 유동응력의 변화를 생각하면, 어떤 주어진 변형 속도에서 재료에 흡수되는 순간적 에너지(P)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \dot{\sigma}\dot{\varepsilon} = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (10)$$

그들을 간단히 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = G + J \quad (11)$$

$$G = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} \text{ 이고, } J = \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \text{ 이다.}$$

여기에서 G (dissipator content)는 재료의 소성변형에 의해 소모되는 에너지로 대부분 열로 변환되며, J (dissipator co-content)는 재료의 동적인 미시구조적 변화를 유발하는데 소모되는 에너지로 재료의 동적인 미시구조적 변화의 예로는 동적회복, 동적재결정, 공공생성 및 V자형 크래프 같은 내부파괴, 동적인 상태에서 발생하는 석출상의 용해 및 성장, 바늘구조의 동적구형화 그리고 동적상태하에서의 변형유기상변태 및 석출등을 들수 있다. G 와 J 의 표현을 식 (6)과 결합시켜 적분하면 다음과 같은 식 (12), 식 (13)을 얻을 수 있다.

$$G = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} = \int_0^{\sigma} (\sigma/K)^{1/m} d\sigma = \dot{\varepsilon}\sigma m / (m+1) \quad (12)$$

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma = \int_0^{\dot{\varepsilon}} K \dot{\varepsilon}^{1/m} / d\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}\sigma / (m+1) \quad (13)$$

식 (12)와 식 (13)을 식 (10)에 대입하면, 결국 고온변형 시의 재료가 흡수한 에너지는 다음과 같은 식 (14)으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\sigma}\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}\sigma m / (m+1) + \dot{\varepsilon}\sigma / (m+1) \quad (14)$$

재료의 소성변형에 대한 J (dissipator co-content)의 효과를 정량적으로 분석하기 위한 방법으로 식 (15)에 제시된 에너지 분산효율(efficiency of dissipation), η 을 정의함으로서 가능하며 이것은 변형속도민감도(m)에 의존한다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (15)$$

이러한 에너지 분산효율(η)은 소재에 가해지는 총에너지에 대해서 재료의 미시구조적 변화를 효과적으로 기술하는데 사용될 뿐만 아니라 안정 및 불안정 영역을 묘사하는데에도 사용될 수 있다. 안정한 금속유동에 대한 변형속도민감도(m)은 0에서 1사이에서 얻어질 수 있고, 에너지 분산효율(η)이 최대인 경우 재료의 동적 미시구조적 변화가 가장 활발함을 의미하게 된다. 한편 Srinivasan과 Prasad⁽⁸⁾들은 고온변형동안에 유동 불안정성을 평가하기 위한 continuum criterion으로 다음과 같은 소성불안정 인자를 제안하였다.

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(m/m+1)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (16)$$

여기서 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 이 음의 값을 나타내는 경우 유동불안정 구간으로 정의되며, 본 연구에서는 이러한 criterion을 통해 고온압축변수(변형속도, 온도)에 따른 Ti-6Al-4V합금의 안정구간과 불안정구간을 평가하였다.

Fig. 5는 진변형률이 0.6인 조건에서 변형속도와 온도에 따른 에너지 분산효율(η)과 continuum criterion을 적용하여 불안정구간을 나타낸 도표와 함께 미세조직을 관찰한 결과를 나타내었다. 에너지분산 효율은 변형속도가 감소할수록 증가함을 관찰할 수 있으며, ($\alpha+\beta$)영역에서 변형속도에 따른 에너지분산 효율의 변화는 $0.1s^{-1}$ 이상에서는 에너지분산 효율(η)이 0.24이하로 나타난 반면 $0.01s^{-1}$ 이하에서는 0.3~0.5구간의 비교적 높은 에너지 분산효율값을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 또한

($\alpha + \beta$)영역의 경우 최대 에너지분산 효율은 920°C~960°C의 온도구간에서 10^{-3}s^{-1} 의 변형속도로 나타났으며, 이것은 이 조건이 Ti-6Al-4V합금의 가장 적합한 소성가공조건임을 의미하는 것이다. 한편 β 영역인 995°C와 1015°C에서의 에너지분산 효율은 온도증가에 따라 증가하고 있으며, $1015^{\circ}\text{C}/10^{-3}\text{s}^{-1}$ 인 조건에서 가장 높은 에너지 분산 효율값을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 전반적으로 ($\alpha + \beta$)영역에서의 변형에 비해 높은 에너지분산 효율값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 결국 $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ 의 상변태에 기인한 것으로 판단된다. 에너지 분산효율값이 ($\alpha + \beta$)영역에서 최대 및 최소치를 보

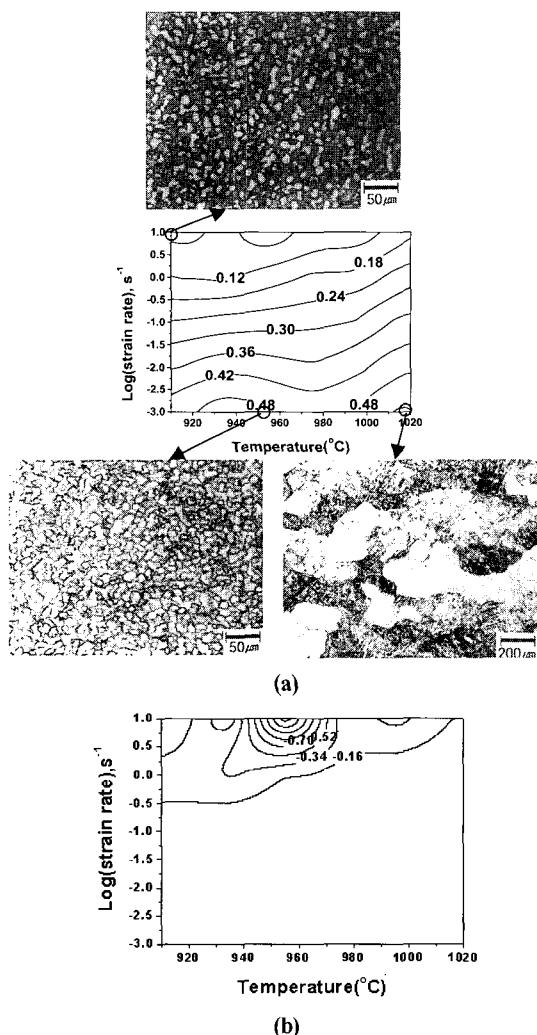


Fig. 5 Power dissipation efficiency map(a) and instability map(b) obtained from the Ti-6Al-4V alloy ($\epsilon = 0.6$)

인 미세조직과 β 영역에서 최대를 나타낸 미세조직을 관찰한 결과에서, ($\alpha + \beta$)영역에서 최소 에너지 분산효율값을 나타낸 $915^{\circ}\text{C}/10\text{s}^{-1}$ 인 조건에서 관찰된 미세조직은 α 상의 분율이 감소되었으며, 조대한 β 상이 관찰된다. 이러한 조대 β 상으로 인해 에너지 분산효율이 최소치를 나타낸 것으로 판단된다. 반면에 최대 에너지 분산효율값을 나타낸 $955^{\circ}\text{C}/10^{-3}\text{s}^{-1}$ 조건의 경우 온도가 상승함에도 불구하고 ($\alpha + \beta$)영역에서 미세한 구형의 α 상이 관찰되었다. Semiatin, Thomas, Dadras⁽⁹⁾들은 Ti합금의 가공열처리공정변수와 미세조직과의 관계에 대한 연구에서 $927^{\circ}\text{C}/10^{-3}\text{s}^{-1}$ 의 조건에서 ($\alpha + \beta$)영역에 미세한 α 상이 형성된 것을 발견한 바 있다. 결국 이러한 미세 α 상의 형성은 동적재결정에 기인한 것으로 판단된다. $1015^{\circ}\text{C}/10^{-3}\text{s}^{-1}$ 인 조건에서의 미세조직은 충상조직을 나타내고 있으며 이것은 β 변태점이상의 온도에서 변형된 결과임을 짐작할 수 있다.

한편, Ti-6Al-4V합금의 Continuum criterion의 해석결과는 모든 온도범위에서 10^1 ~ $10^{-0.5}\text{s}^{-1}$ 의 변형속도구간을 유동불안정구간으로 정의하고 있으며, 결국 이러한 구간에서의 소성변형의 경우 전단변형밴드, 균열생성 등과 같은 변형결함이 나타낼 수 있음을 암시한다.

3.5 고온변형에 따른 미세조직의 변화

Ti-6Al-4V합금의 Fig. 6은 ($\alpha + \beta$)영역에서 고온압축된 경우의 온도와 변형속도에 따른 미세조직을 관찰한 것이다. 등축정 α 상의 함량은 변형속도와 변형온도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 975°C 의 10^1s^{-1} , 10^{-1}s^{-1} 의 변형속도에서는 다른조건과 달리 충상(lamellar) 구조의 미세조직이 관찰된다.

또한 α 상의 함량 변화는 온도보다는 변형속도에 따라 더욱 크게 변화하는 것을 알 수 있으며, 이러한 원인은 고온변형시 소재내에 발생하는 변형열과 밀접한 관계가 있다. 즉, 소재내에 발생하는 변형열은 온도상승을 일으키게 되어 유동응력을 감소시키는 요인으로 작용하게 된다.

일반적으로 소성변형시 소재의 온도는 소성일로 생성되는 열에 의해 상승하며, 부피당 소성일 w 는 응력-변형률 곡선의 아래 면적과 일치한다. Hosford와 Caddel⁽¹⁰⁾에 따르면 내부에 축적되는 에너지의 비율은 변형이 작을 때 5%정도에서 변형이 큰 경우 1~2%정도로 감소하며, 그 나머지는 모두 열로 방출된다고 하였다. 만약 단열조건이라면 앞에서 언급된 온도증분은 식 (17)과 같이 표현될수 있다.

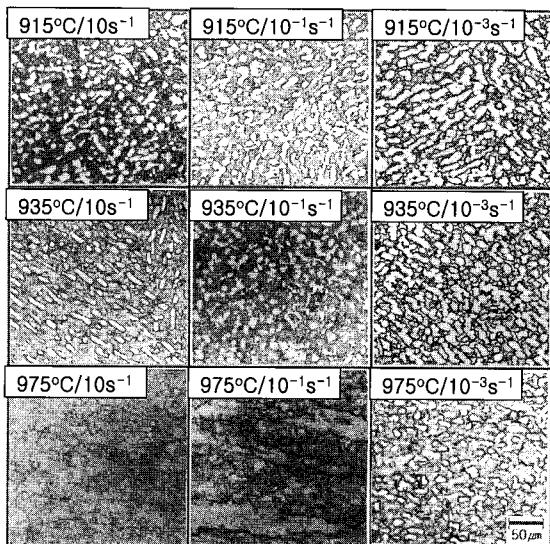


Fig. 6 Microstructure obtained from the compression tests of the Ti-6Al-4V alloy

$$\Delta T = \frac{\alpha \int \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}}{\rho C_p} = \frac{\alpha \bar{\sigma}_a \bar{\epsilon}}{\rho C_p} \quad (17)$$

(α : 축적되는 열의 분율, $\bar{\epsilon}$: 소성변형률, ρ : 소재의 밀도, C_p : 질량열용량, $\bar{\sigma}_a$: 변형률이 0에서 $\bar{\epsilon}$ 까지 도달할때까지의 평균 σ 값)

식 (17)을 토대로 고온압축시 축적되는 열의 분율을 98%로 가정하고, Ti-6Al-4V 합금의 밀도인 $4.42 \times 10^3 (\text{kg}/\text{m}^3)$ 과 온도에 따라 변화하는 열용량($C_p = 523.02726 + 0.34734T - 0.00029T^2 + 4.5277E-7 T^3 (\text{J}/\text{kg}\text{ }^\circ\text{C})$)⁽¹¹⁾를 대입하면 변형시의 온도증분을 계산함이 가능하다.

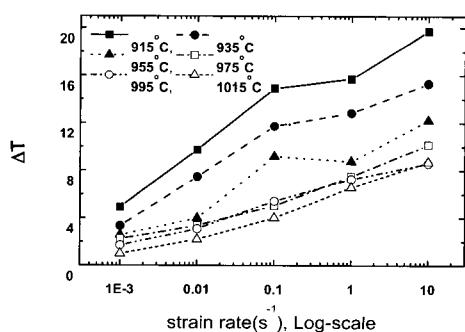


Fig. 7 The variation in ΔT measured as a function of the strain rate at different temperatures

Fig. 7은 0.6까지 변형되었을 때 각온도별 변형속도에 대한 온도증분을 계산한 결과이다. 온도가 증가함에 따라 온도증분은 감소하며, 변형속도가 증가함에 따라 온도증분은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 975°C에서 10s^{-1} 의 변형속도인 경우 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 정도의 온도증분을 보이며, 0.1s^{-1} 의 변형속도를 적용한 경우는 온도증분이 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 정도를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 온도증분은 앞서 언급된 ($\alpha+\beta$)상 영역에서 고온 압축되었음에도 불구하고 975°C의 변형온도에서 0.1s^{-1} 와 10s^{-1} 의 변형속도인 경우 충상구조가 관찰되는 현상을 잘 설명할 수 있게 하는 것으로, 변형속도가 증가함에 따라 온도증분(ΔT)만큼의 온도상승이 일어나 미세조직의 변화를 가져오며 결국 β 상 변태점이하에서 변형된 경우에도 변형속도가 높은 조건의 경우 β 변태점이상의 온도상승으로 인해 충상구조를 나타내게 된다. 또한 미세조직관찰과 온도증분의 계산을 통해 이합금의 β 변태점이 $980\text{ }^\circ\text{C}$ 정도임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 고온압축시험을 토대로 변형속도와 온도 및 유동응력 거동에 따른 고온변형거동을 고찰하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Ti-6Al-4V 합금의 고온변형시 유동응력거동을 통해 주변형기구는 동적재결정 보다는 동적회복에 의한 지배됨을 알수 있었다.

(2) 열간변형에 대한 하이퍼 볼릭사인 구성방정식을 적용한 결과 ($\alpha+\beta$)상 영역과 β 영역에 따라 변형활성화에너지값의 차이를 보였으며, 다음과 같은 식으로 표현되었다.

$\alpha+\beta$ 영역

$$\varepsilon = 1.382 \times 10^{40} (\sinh(0.0053\sigma_{\max}))^{5.7} \exp(-894 \text{ kJ/mol}/RT)$$

β 영역

$$\varepsilon = 1.453 \times 10^{12} (\sinh(0.00282\sigma_{\max}))^{3.8} \exp(-332 \text{ kJ/mol}/RT)$$

(3) 재료의 동적 미세구조 변화를 정량적으로 분석하기 위해 에너지 분산효율을 계산한 결과, 최대 에너지 분산효율은 $920\text{--}960\text{ }^\circ\text{C}/10^{-3}\text{s}^{-1}$ 인 조건에서 얻어졌고, 이것은 이 조건이 가장 활발한 동적 미세구조적 변화를 보인 것으로 미세조직을 관찰한 결과에서 미세 α 상이 형성되었음을 확인하였다.

(4) β 상 영역의 변형시 전반적으로 ($\alpha+\beta$)상 영역에 비해 높은 에너지분산 효율값(η)을 나타내었으며, 이러한 경향은 $\alpha+\beta \rightarrow \beta$ 상변태에 기인한 것이었다.

(5) 975°C의 변형온도에서 변형속도가 빠른 10^{-1} 이상의

미세조직관찰에서 층상조직이 관찰되었고, 이것은 고온 변형시 소재 내부에 발생하는 온도증분만큼의 온도상승에 기인한 것으로 이 합금의 β 상 변태온도는 980°C정도임을 알수 있었다.

참 고 문 현

- (1) G.K. Turnbull, 1982, "Microstructure Control of Ti-6Al-4V forging" Titanium and Titanium alloys -Soure Book, ASM pp.265~269.
- (2) 김두현, 이용태, 1994, "혼합조직 Ti-6Al-4V합금에서 초정 α 상이 인장성질에 미치는 영향", 대한금속학회지, 제32권, 제9호, pp.1074~1083.
- (3) V. Seetharaman, L. Boothe, and C.M. Lombard, 1991, "Compressive deformation behavior of a Ti-6Al-4V alloy at high temperatures and strain rates", Microstructure/ Property Relationships in Titanium Aluminide and Alloys, TMS, pp.605~622.
- (4) Y. Prasad, H.L. Gegel, S.M. Doraivelu, J.C. Malas, J.T. Morgan, K.A. Lark, and D.R. Bapker, 1984, "Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: Forging of Ti-6246", Metall. Trans. 15A, pp.1883~1892.
- (5) W. Roberts, 1982,"Dynamic changes that occur during hot working", Deformation, Processing and Structure, ASM, pp.109~184.
- (6) C. M. Sellar and W. Tegart, 1972, "Hot workability", Inter. Met. Rev., Vol 17, Review 158, pp.1~24.
- (7) Y. Prasad, H.L. Gegel, J.T. Morgan, J.C. Malas, 1984, "A new systems approach to dynamic modeling of material behavior in metal working processes", Titanium net shape technologies, pp.279~289.
- (8) N. Srinivasan and Y. Prasad, 1995, "Hot working characteristics of nimonic 75, 80A and 90 superalloys : a comparison using processing maps", J. Materials Pro. Tech. vol 51, pp.171~192.
- (9) S.L. Semiatin, J.F. Thomas and P. Dadras, 1983, "Processing microstructure Relationships for Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0.1Si, Metall. Trans., 14A, pp.2363~2374.
- (10) W.F. Hosford and R.M. Caddel, 1983, "Metal forming, Mechanics and metallurgy", Prentice-Hall, p.90.
- (11) Anthony F. Mills, 1992, "Heat Transfer", IRWIN Inc., Boston