

동적재료모델을 활용한 티타늄합금의 고온성형성 고찰

염종택* · 현용택* · 나영상* · 박노광*

Hot Workability Characterization of Ti Alloys Using Dynamic Material Model

J. T. Yeom, Y. T. Hyun, Y. S. Na and N. K. Park

Abstract

Hot-compression tests were carried out to investigate the hot workability of Ti64 and Ti6246 alloys at different temperatures and strain rates. Processing maps were developed on the basis of the dynamic material model unifying the relationship among constitutive behavior, hot workability and microstructure development. Stable regions, defined on the basis of four stability criteria, $0 < m < 1$, $\delta \log(m) / \delta \log(\dot{\epsilon}) < 0$, $s > 1$ and $\delta \log(s) / \delta \log(\dot{\epsilon}) < 0$, were found to be associated with dynamic recovery and recrystallization.

Key Words : Ti64 Alloy, Ti6246 Alloy, Dynamic Material Model, Four Stability Criteria

1. 서 론

티타늄합금의 미세조직은 크게 α 상의 형태에 따라 등축정(equiaxed structure), α 상 및 β 상이 서로 일정한 방향관계를 가지고 얇은 층상으로 조직을 이루는 Widmanstätten α 조직 그리고 이들이 일정한 비율로 존재하는 혼합조직(bimodal structure)등과 같이 분류할 수 있으며, 등축정조직은 강도, 연신율, 피로균열생성에 대한 저항성 및 저주기 피로특성 등이 우수한 반면 Widmanstätten α 조직은 크리프 저항성, 파괴인성 및 피로균열 전파에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾ 일반적으로 티타늄합금은 열처리 및 가공열처리 방법 등에 의해 미세조직이 다양하게 변화되며, 이에 따라 상당한 기계적성질의 차이를 나타내는 것으로 알려져

있으며,⁽²⁾ 특히 정밀성형 등과 같은 신 소성가공을 통해 복잡형상의 부품을 Near-Net Shape으로 제조함으로써 재료비, 가공비 등의 제조원가를 낮추고, 공정조건 관리를 용이하게 하여 조직 및 기계적 성질이 우수한 제품을 제조할 수 있는 방향으로 공정설계를 해 나가고 있다. 이러한 정밀성형, 열간단조 등과 같은 소성가공을 최적화하기 위해서는 재료의 고온변형거동 및 가공성과 함께 온도, 변형률, 변형속도 등과 같은 공정변수에 따른 소성가공 안정구간에 대한 고찰이 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 동적재료모델을 이용하여 $(\alpha + \beta)$ 합금인 Ti64와 Ti6246 두 합금에 대한 고온변형안정성과 조직적 고찰을 통해 향후 티타늄합금에 대한 소성가공의 기초자료로서 활용하고자 하였다.

* 한국기계연구원, 재료공정연구부

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 합금은 ($\alpha+\beta$)형 티타늄합금인 Ti-6Al-4V과 Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo로 각각 TIMET사와 HOWMET사에서 제조된 것으로 이들의 초기 미세조직은 Fig. 1에 나타내었다.

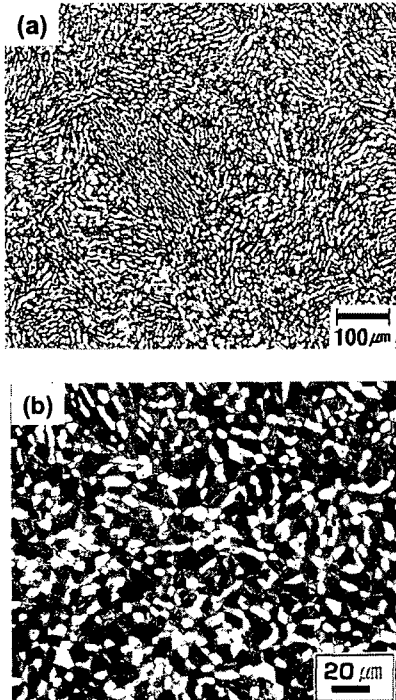


Fig. 1 An optical microstructure of the as-received (a) Ti-6Al-4V and (b) Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo

Ti64합금의 경우(Fig. 1(a)) lath형의 α 상이 결정립을 따라 α/β 층상조직으로 발달되어 있음을 관찰할 수 있으며, lath형 α 상의 체적율은 65%로 측정되었다. 반면에 Ti6246합금의 경우(Fig. 1(b)) 등축의 초정 α 상이 약 26%의 부피분율을 나타내고 있으며, 약 74%의 부피분율을 갖는 Widmanstätten조직의 혼합조직으로 이루어져 있는 것을 관찰할 수 있다. 이들의 고온변형거동의 조사를 위해서 고온압축시험을 이용하였다. 이때 시편의 형상은 지름 8mm×길이 12mm의 원통형으로 제작하였고, Themacmaster-Z장비를 이용하여 수행하였다. 이때 Ti64합금은 시험온도 915-1015℃에서 20℃간격으로 변형속도 10^{-3} - 10^1 /s에서 10^1 간격으로 수행되었고, Ti6246합금은 시험온도 800-1000℃에서 50℃간격으로 변형속도 10^0 - 10^{-3} /s에서 10^1 간격으로 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유동곡선에 대한 변형속도와 온도의 관계

진변형률과 진응력의 관계는 Ti64합금과 Ti6246합금 모두 비슷한 경향을 가지며, 변형속도가 빠른 경우($\dot{\epsilon} > 10^{-1}$) 매우 제한된 가공연화현상이 발견되고 있을뿐 다른 조건의 유동곡선에서는 최대응력을 나타낸 후 변형이 진행됨에 따라 응력이 일정하게 유지되는 정상상태를 나타내고 있음을 관찰 할수 있었다. 이와 같은 가공연화현상은 변형열로 인한 것으로 여겨지며, Seetharaman, Boothe, and Lombard⁽³⁾ 등의 연구결과 또한 변형열에 기인하여 가공연화 현상이 발생하는 것으로 보고하고 있다.

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

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

여기서, a, b, c 등의 상수값은 표 2에 나타내었다. 또한 주어진 변형속도에서 $\ln(\sigma)$ 과 $1/T$ 의 관계를 다음과 같은 다항식으로 표현함이 가능하다.

$$\ln(\sigma) = a + b(1/T) + c(1/T)^2 \quad (2)$$

3.2 등적재료모델의 이론적 고찰

등적재료모델은 재료의 조성적 거동, 열간 성형성 및 미세조직적 변화 사이의 관계를 연계시킨 것으로, 열간 가공시 복잡한 재료들의 가공성, 파괴 및 유동 거동을 거시적으로 표현하기 위한 방법으로 개발되었다.⁽⁴⁾

Parasad, Gegel, Morgan, Malas⁽⁵⁾들은 Ti-6242합금의 연구에서 재료가 주어진 온도와 변형속도조건에서 변형을 받았을 때 재료의 에너지분산특성은 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 입증한바 있다. 일정한 온도와 변형률조건에서 변형속도에 따른 유동응력의 변화를 생각하면, 어떤 주어진 변형속도에서 재료에 흡수되는 순간적 에너지(P)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (3)$$

그들을 간단히 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = G + J \quad (4)$$

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

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 크랙과 같은 내부파괴, 동적인 상태에서 발생하는 석출상의 용해 및 성장, 바늘구조의 동적구형화 그리고 동적상태하에서의 변형유기상변태 및 석출등을 들 수 있다. G 와 J 의 표현을 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ 식과 결합시켜 적분하면 다음과 같은 식(5), 식(6)을 얻을 수 있다.

$$G = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} = \int_0^{\sigma} (\sigma/K)^{1/m} d\sigma = \dot{\epsilon}\sigma m / (m+1) \quad (5)$$

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \int_0^{\dot{\epsilon}} K\dot{\epsilon}^m / d\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}\sigma / (m+1) \quad (6)$$

식(5)와 식(6)을 식(3)에 대입하면, 결국 고온변형시의 재료가 흡수한 에너지는 다음과 같은 식 (7)으로 표현할 수 있다.

$$\dot{\sigma}\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}\sigma m / (m+1) + \dot{\epsilon}\sigma / (m+1) \quad (7)$$

재료의 소성변형에 대한 J (dissipator co-content)의 효과를 정량적으로 분석하기 위한 방법으로 식 (8)에 제시된 에너지 분산효율(efficiency of dissipation), η 을 정의함으로써 가능하며 이것은 변형속도민감도(m)에 의존한다.

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (8)$$

이러한 에너지 분산효율(η)은 소재에 가해지는 총에너지에 대해서 재료의 미시구조적 변화를 효과적으로 기술하는데 사용될 뿐만 아니라 안정 및 불안정 영역을 묘사하는데도 사용될 수 있다. 여기서 m 은 변형속도 민감도 계수로 통상 다음과 같이 표현된다.

$$m = \left(\frac{\partial \log \sigma}{\partial \log \dot{\epsilon}} \right)_T \quad (9)$$

한편, 엔트로피의 상호관계로부터 온도 민감도계수를 나타낼 수 있다.

$$s = \left(\frac{1}{T} \frac{\partial \ln \sigma}{\partial (1/T)} \right)_{\dot{\epsilon}} \quad (10)$$

3.3 티타늄합금의 성형안정구간 분석

Malas와 Seetharaman⁽⁶⁾ 등은 동적재료모델에서 정의하는 안정영역과 불안정 영역을 구분짓는 기준으로 다음과 같은 4가지 조건을 제시하였으며, 이들 조건을 만족시킬 때 안정한 것으로 판단할 수 있음을 발표하였다.

$$0 < m < 1 \quad (11)$$

$$\partial m / \partial (\log \dot{\epsilon}) < 0 \quad (12)$$

$$s > 1 \quad (13)$$

$$\partial s / \partial (\log \dot{\epsilon}) < 0 \quad (14)$$

결국, 이들 영역들의 정의는 에너지가 안정기구로 소모되는지 불안정기구로 소모되는지를 의미한다. 본 연구에서는 이러한 소성안정기준을 통해 고온압축변수(변형속도, 온도)에 따른 Ti64, Ti6246합금들의 안정구간과 불안정구간을 평가하였다. Fig2는 Ti64합금에 대하여 진변형률이 0.5인 조건에서 변형속도와 온도에 따른 에너지 분산효율(η)과 4가지 안정구간 기준을 적용한 결과를 나타낸 것이다.

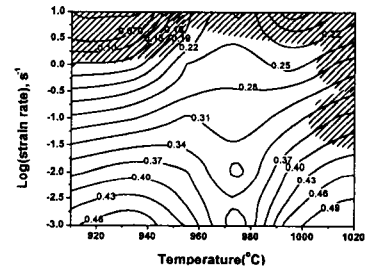


Fig. 2 Power dissipation efficiency map obtained from Ti-6Al-4V alloy ($\epsilon=0.5$)

여기서 빗금친 부분은 소성불안정구간을 나타낸 것이다. Fig. 2에서 알수 있는바와 같이 에너지분산 효율은 변형속도가 감소할수록 증가함을 관찰할 수 있으며, $(\alpha+\beta)$ 영역에서 변형속도에 따른 에너지분산 효율의 변화는 $0.1s^{-1}$ 이상에서는 에너지분산 효율(η)이 0.28이하로 나타난 반면 $0.01s^{-1}$ 이하에서는 0.3-0.5구간의 비교적 높은 에너지 분산효율을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 또한 $(\alpha+\beta)$ 영역의 경우 최대 에너지분산 효율은 920°C

-945°C의 온도구간과 970°C부근에서 변형속도가 낮은 10^{-3}s^{-1} 의 변형속도에서 관찰됨을 알수 있으며, 결국 이 조건이 가장 적합한 소성가공조건임을 의미하는 것이다. 한편 β 영역에서의 에너지분산 효율은 온도증가에 따라 증가하고 있으며, $1015^\circ\text{C}/10^{-3}\text{s}^{-1}$ 인 조건에서 가장 높은 에너지 분산 효율값을 보이고 있음을 알수 있다. 또한 전반적으로 ($\alpha+\beta$)영역에서의 변형에 비해 높은 에너지 분산 효율값을 나타내고 있음을 알수 있다. 또한, 소형불안정구간은 주로 변형속도가 비교적 높은 구간에서 나타낸 것을 관찰할 수 있다.

Ti6246합금의 분석 또한 비슷한 경향을 보임을 알수 있었고, 동적재결정과 $\alpha+\beta\rightarrow\beta$ 의 상변태가 높은 에너지 분산 효율값을 나타내는 중요한 인자임을 짐작할 수 있었다.

4. 결 론

지금까지 Ti64, Ti6246합금에 대한 고온성형성에 대한 연구를 통해 본 연구에서 얻어진 변형공정도는 재료의 유동거동과 함께 재료의 최적 열간성형조건을 도출하는데 직접적으로 이용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본연구는 과학기술부에서 지원한 특정연구사업의 일환으로 진행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) G.K. Turnbull, 1982, "Microstructure Control of Ti-6Al-4V forging" Titanium and Titanium alloys -Source 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) 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, p. 279~289
- (6) J.C. Malas and V. Seetharaman, 1992, "Using material behavior models to develop process control strategies", JOM June, pp.8~13