

# Ti-6Al-4V 합금의 미세조직에 따른 정적 및 동적 변형에 관한 연구

이동근\* · 이유환\* · 이성학\* · 허선무\*\* · 이종수\*

## The Effect of Microstructure on the Static and Dynamic Deformation Behavior of Ti-6Al-4V Alloy

D. G. Lee, Y. H. Lee, S. H. Lee, S. M. Hur and C. S. Lee

### Abstract

The effects of  $\alpha$ -phase morphology on the static and dynamic deformation behavior of a Ti-6Al-4V alloy was investigated in this study. Static tension test, static and dynamic torsion test, and hot compression test were conducted on three microstructures of Ti-6Al-4V alloy, i.e., equiaxed, widmanstätten and bimodal microstructures. Fracture surfaces of all three microstructures represented ductile fracture appearance, though the formation of adiabatic shear bands was noticed at dynamic torsion test. The susceptibility of forming adiabatic shear bands was greatest in the equiaxed microstructure and lowest in the bimodal microstructure, which was evidenced by hot compression test.

**Key Words** : Ti-6Al-4V, Microstructure, Equiaxed, Widmanstätten, Bimodal, Dynamic Deformation, Adiabatic Shear Bands.

### 1. 서론

Ti-6Al-4V 합금은 ( $\alpha+\beta$ )형 합금으로서 높은 비강도, 뛰어난 내부식성 및 고온에서의 우수한 기계적 성질 때문에 Ti 합금 중에서도 가장 많이 사용되는 합금이다<sup>(1)</sup>. 이 합금의 기계적 특성은  $\alpha$ ,  $\beta$  두 상의 결정학적 배열과 같은 미세조직적 인자와 변형속도 및 온도 등에 매우 민감하게 변화하는데<sup>(2)</sup>, 대표적인 미세조직은 열처리 조건에 따라 등방성(equiaxed), 층상(widmanstätten)조직과 이 두 조직의 혼합조직인 이중조직(bimodal)으로 구분된

다. 현재 이러한 미세조직을 바탕으로 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 높은 변형속도를 경험하는 극심한 조건 하에서의 기계적 특성을 평가하기 위해 다양한 방법이 시도되고 있는데, 이는 우주항공산업, 자동차 산업 및 군수산업에 이르기까지 동적 하중 하에서의 변형 및 파괴거동에 대한 연구가 절실히 요구되고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금의 정적, 동적 변형 및 파괴 현상에 대하여 연구하였으며, 그 결과를 미세조직에 따른 단열성 전단밴드의 형성 가능성과 연계하여 고찰하였다<sup>(3)</sup>.

\* 포항공과대학교 신소재공학과  
\*\* 국방과학연구소 기술연구본부

## 2. 실험방법

본 연구에서는 그림 1 과 같은 열처리 방법으로 그림 2와 같은 3가지 미세조직(Equiaxed, Widmanstätten, Bimodal)을 얻어내었다. 그림 2에 나타난 바와 같이  $\alpha$  상의 형상에 따라 세 가지 미세조직이 구분되며, 이렇게 얻어진 각각의 미세조직에 대하여 인장시험(변형률속도 약  $10^{-3}/s$ )과 Torsional Kolsky Bar<sup>(4)</sup>를 이용하여 정적 비틀림 시험(변형률속도 약  $10^{-4}/s$ ), 동적 비틀림 시험(변형률속도 약  $10^3/s$ ), 그리고 고온 압축시험(온도 범위  $750^{\circ}C \sim 950^{\circ}C$ , 변형률속도 범위  $10^{-2}/s$ ,  $10/s$ ,  $10^2/s$ )을 수행하였다.

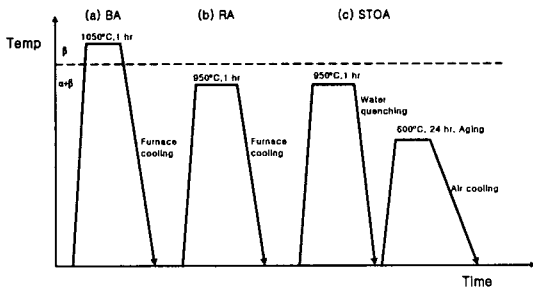


Fig. 1 Schematic representation of heat treatments ; (a) Widmanstätten, (b) Equiaxed, (c) Bimodal

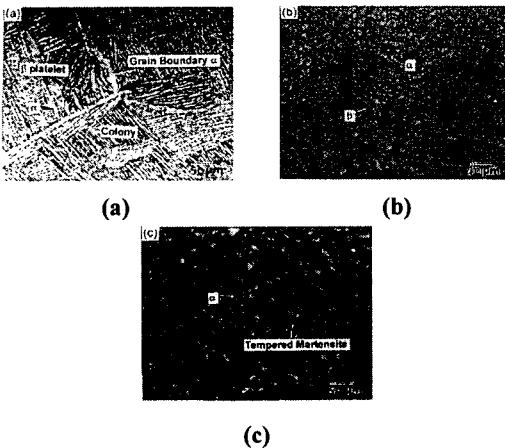


Fig. 2 Optical photographs of (a) Widmanstätten, (b) Equiaxed, (c) Bimodal

## 3. 실험결과

인장시험에서 얻어진 결과를 표 1에 나타내었다. 항복 강도와 인장강도 값은 Widmanstätten, Equiaxed, Bimodal 조직 순으로 증가하고 인장연성은 Bimodal,

Widmanstätten, Equiaxed 조직의 순으로 증가하는 것으로 나타났으며<sup>(2)</sup>, 인장파면을 관찰하여 본 결과 모든 미세조직에서 연성파괴가 관찰되었다.

Table 1 Tensile Results of the Three Microstructures

Microstructure	Yield strength (MPa)	Ultimate Tensile strength (MPa)	Elongation (Pct)
Widmanstätten	829	897	12.7
Equiaxed	872	959	15.1
Bimodal	1070	1134	10.7

그림 3에는 정적 비틀림 시험 후 얻어낸 전단응력-변형률 곡선을 나타내었다. 강도 및 연성의 전체적인 경향은 인장시험과 매우 비슷한 경향을 나타내며, 파면 역시 모든 미세조직에서 연성파괴의 형태인 dimple이 관찰되었다. 또한 파면 주위에서는 다수의 공동(void)이 관찰되었고, 전단밴드는 거의 관찰할 수 없었다. 그림 4에는 동적 비틀림 시험의 결과를 나타내었는데, 전체적으로 강도와 연성의 경향은 인장 및 정적 비틀림 시험과 유사하며, strain rate hardening 의 효과로 응력은 증가하는 대신 변형량은 감소하는 것으로 나타났다. 이 경우에도 역시 파면은 대부분이 연성파괴가 관찰되었고, 파면주위에 다수의 공동과 빠른 변형률 속도로 인한 단열성 전단밴드(Adiabatic Shear Band 이하 ASB)가 관찰되었는데, Equiaxed 조직에서는 다량의 ASB가 발생하였고, Widmanstätten 조직에서는 약간의 ASB와 공동, 그리고 Bimodal 조직에서는 다수의 공동이 관찰되었으며 ASB는 거의 관찰할 수 없었다.

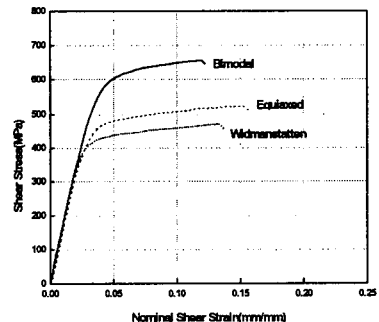


Fig. 3 Shear stress-strain curves obtained from static torsion tests for three microstructures

고온 압축시험 후 얻어낸 유동응력 곡선 중 주요한 조건만을 그림 5에 나타내었다.

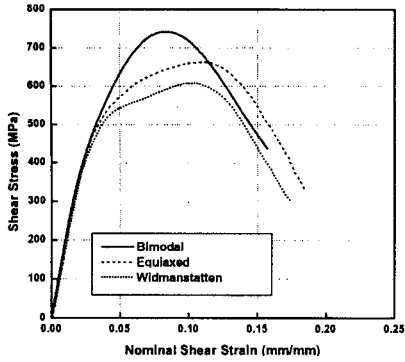


Fig. 4 Shear stress-strain curves obtained from dynamic torsion tests for three microstructures

변형온도 감소와 변형률 속도가 증가에 따라 높은 응력을 나타내었으며, 대부분의 경우 Bimodal 조직이 가장 높은 최대응력(peak stress)을 나타내었으며, 변형연화(softening)도 타 조직에 비해 매우 큰 편이었다.

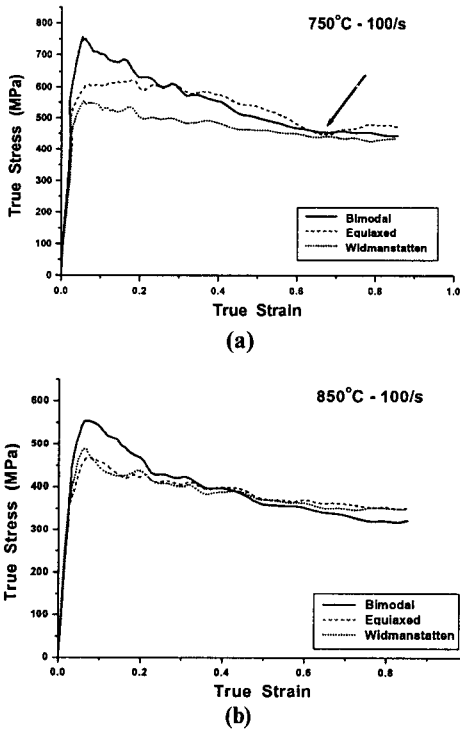


Fig. 5 Flow stress-strain curves obtained from hot compression tests at (a)750°C, (b)850°C with  $10^2/s$  strain rate

내부조직 관찰결과 비교적 온도가 낮고 변형률 속도가 큰 조건(750°C,  $10^2/s$ )에서 세 조직 모두 두터운 ASB가 관찰되었으며, 심지어 Equiaxed 조직은 750°C,  $10^2/s$  에서 압축하중 축에 45° 방향으로 파괴가 발생하였다(그림

6). 이 방향은 압축시편 내부를 관찰하여 본 결과 ASB 형성방향과 동일하였으며, 이와 같은 영역을 따라 파괴가 발생하였다<sup>(5)</sup>. 같은 변형률 속도에서 온도가 증가할수록 ASB 영역은 단순한 전단 변형의 형태로 나타났다.

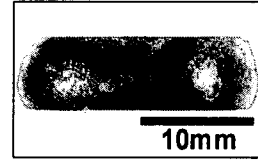


Fig. 6 The shape of fractured specimen obtained from hot compression tests of Equiaxed at 750°C,  $10^2/s$

#### 4. 고찰

Ti-6Al-4V 합금은 미세조직학적 주요 인자들에 의해 인장성질 등 정적 변형특성뿐만 아니라 동적 변형특성이 다르게 나타나게 되는데 이들에 대해 정적 하중 조건, 고온 압축하중 조건 및 동적 하중 조건 하에서의 기계적 성질, 변형 거동 및 파괴 거동을 미세조직과 연관시켜 해석하였다. 표 1과 그림 3, 4에서 보여주듯이 세 조직에 대해 인장성질, 정적 비틀림 성질 및 동적 비틀림 성질이 비슷한 경향을 나타내고 있다. 연성 재료에 동적 변형이 가해졌을 때 나타날 수 있는 특징적인 현상으로 국부적 변형집중 영역의 생성을 들 수 있다.

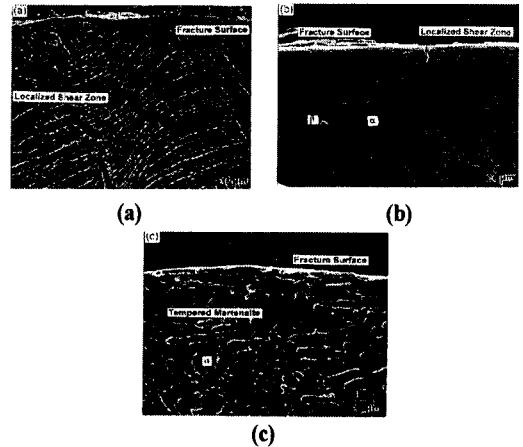


Fig. 7 SEM photographs of the deformed area of fractured torsional specimens under dynamic loading condition ; (a) Widmanstätten, (b) Equiaxed, (c) Bimodal

동적 비틀림 시험한 시편의 파면에 수직인 단면을 관찰한 그림 7을 보면 Widmanstätten 조직의 경우 약 60~70  $\mu m$  폭을 가지는 국부적인 변형집중 영역이 존재하며, Equiaxed 조직의 경우 파면 근처에 약 16.5  $\mu m$  정도

의 두께로 등방성  $\alpha$  입자의 형상을 알아볼 수 없을 정도로 전단응력 방향과 평행하게 국부적으로 집중 변형된 영역이 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 이것은 항복이후 소성변형으로 재료 내부에 축적된 에너지의 90% 이상이 열로 변환되게 되는데<sup>(6)</sup>, 타이타늄의 낮은 열전도로 인하여 이러한 영역이 연화되어 소성변형 집중영역이 형성된 것으로 생각되며, Bimodal 조직의 경우는 파면근처에 이러한 국부적 소성변형 집중 영역이 나타나지 않았고, 많은 공동이 존재하였다. 국부적인 소성변형 집중영역의 형성 가능성을 정량적으로 평가하기 위해 정적시험 시편과 동적시험 시편의 변형된 영역에서 공동의 생성 수를 조사하였다. 그림 8에서와 같이 내부로 갈수록 전체적으로 점차 공동의 수는 감소하는 경향을 나타내고 있는데, 이것은 외부에서 가해지는 에너지를 소모하기 위하여 대부분 ASB 생성과 공동의 생성 두 가지 중 선택적으로 에너지가 분배됨을 의미하는 것이다. Equiaxed 조직의 경우에는 다량의 공동 생성보다는 ASB 형성으로 에너지를 소모함으로써 ASB 생성의 경향이 클 것이라고 예상되며, 반대로 Bimodal 조직의 경우에는 ASB 생성보다는 공동의 생성으로 에너지를 소모한다고 예상 할 수 있다.

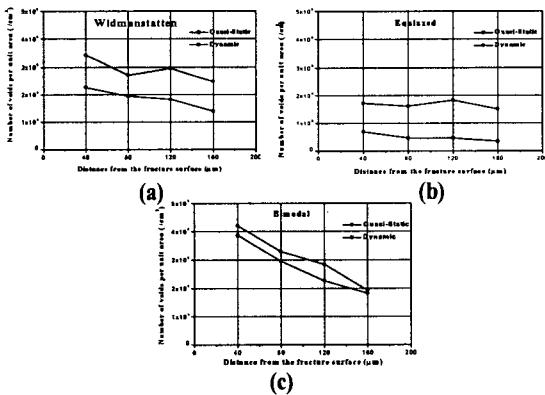


Fig. 8 SEM photographs of the deformed area of fractured torsional specimens under dynamic loading condition ; (a) Widmanstätten, (b) Equiaxed, (c) Bimodal

고온 압축시험에서는 상온에서 잘 나타나지 않던 Bimodal 조직에서도 단열성 전단 밴드가 관찰되었다. 앞서 비틀림 시험에서는 가해지는 에너지의 분산을 변형 집중과 공동의 생성으로 나누어서 고려하였으나, 위와 같은 고온압축시험에서는 공동의 생성은 거의 나타나기 어렵다. 결국 압축하중에서는 이러한 에너지의 분산은 거의 모두 변형에 소모되는 것으로 생각되며, 변형이 비교적 균일하게 발생하는 경우와 특정 영역에 집중되는 경우로 나뉘게 될 것으로 판단된다. 이러한 관점에서

Equiaxed 조직은 위와 같은 조건에서 비교적 균일한 변형이 일어나지 않는 것으로 예상된다. 이는 미세조직에 따른 고온변형 특성 및 불안정성과 매우 깊은 관련이 있을 것으로 사료된다.

## 5. 결론

Ti-6Al-4V 합금의 세 가지 미세조직에 대하여 인장, 정적 비틀림, 동적 비틀림 및 고온압축시험 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험결과 세 조직 모두 변형속도와는 무관하게 dimple 형태의 연성 파괴특성을 나타내었으며, 강도는 Bimodal > Equiaxed > Widmanstätten 순으로 나타났으며, 연성은 Equiaxed > Widmanstätten > Bimodal 순으로 나타났다.

(2) 공동의 생성 정도와 ASB 형성 정도에서는 Equiaxed, Widmanstätten 조직의 경우 국부적인 소성변형 집중 영역의 생성으로 인해 다량의 에너지가 소모되었고, Bimodal 조직의 경우는 공동 생성으로 에너지를 소모하였다.

(3) 고온압축시험에서도 특정 조건에 있어서 Equiaxed 조직은 단열성전단밴드의 형성이 용이하며 매우 취약한 것으로 나타났다.

(4) Widmanstätten 조직은 좁은 폭의 국부적인 소성변형 집중 영역이 일부 존재하고, Equiaxed 조직은 보다 좁은 폭의 국부적 소성변형 집중 영역이 존재하여 전단밴드를 형성하며, Bimodal 조직의 경우는 이러한 소성변형 집중 영역이 거의 관찰되지 않았다.

## 참고 문헌

- (1) A. Gysler and G. Lutjering, 1982, Metall. Trans. A, 13A, pp. 1435~1443.
- (2) H. Margolin, J.C. Williams, J.C. Chesnutt and G. Lutjering, 1980, Proc. of the 4th Int's Conf. on Ti, 1, pp. 169~216.
- (3) D.G. Lee, S.H. Kim, S.H. Lee and C.S. Lee, 2001, Metall. Trans. A, 32A, pp. 315~324.
- (4) H. Kolsky, 1949, Proc. Phys. Soc., London, Sect. B, 62, pp. 676. Hill, R., 1979, "Theoretical plasticity of textured aggregates", Math. Proc. Camb. Phil. Soc., Vol. 85, p. 179.
- (5) K. Cho, S. Lee, S.R. Nutt and J. Duffy, 1993, Acta Metall., 41, pp. 923~932.
- (6) J.J. Mason, A.J. Rosakis and G. Ravichandran, 1994, Mech. of Matls., 17, pp. 135~145.