

<논문 >

## Ti-6Al-4V 합금의 조직 변화에 따른 프레팅 피로거동

배용탁 \* · 최성종 \*\* · 권재도 †

(2004년 9월 30일 접수, 2005년 2월 2일 심사완료)

### The Fretting Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Alloy on Change of Microstructure

Yong Tak Bae, Sung Jong Choi and Jae Do Kwon

**Key Words :** Ti-6Al-4V Alloy(Ti-6Al-4V 합금), Equiaxed Microstructure(등축조직), Lamellar Microstructure(침상조직), Widmanstätten Microstructure(Widmanstätten 조직), Plain Fatigue Limit(단순피로한도), Fretting Fatigue Limit(프레팅 피로한도)

#### Abstract

The effect of microstructure on mechanical behavior for Ti-6Al-4V alloy was studied. Two different kinds of specimens are prepared using heat treatments (rolled plate, 1050°C) in order to produce different microstructures. Various kinds of mechanical tests such as hardness, tensile, fatigue and fretting fatigue tests are performed for evaluation of mechanical properties with the changes of microstructures. Through these tests, the following conclusions are observed: 1) Microstructures are observed as equiaxed and widmanstätten microstructures respectively. 2) Impact absorbed energy is superior for the equiaxed microstructure, and the hardness and tensile strength are superior for the widmanstätten microstructure. 3) The fatigue endurance of widmanstätten microstructure shows higher value than that of the equiaxed microstructure. 4) The fatigue endurance in fretting condition was reduced about 50% from that of the non-fretting condition.

#### 1. 서 론

티타늄은 비중이 4.5로 일반 강에 비하여 가볍고 비강도, 내열성 및 내식성이 우수하여 우주항공, 의료용 생체재료, 자동차 및 고속전철 등 다양한 분야에서 그 응용성과 소비량이 증가되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 티타늄은 사용환경의 특성에 따라서 특정 합금 원소를 첨가 시킨 형태로 사용되어지고 있으며, 그 활용도의 증가와 더불어 국내 및 국외에서 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>(4-6)</sup>

티타늄 합금의 열처리에 의한 조직변화는 기계적 강도변화로 이어지므로 재료조직이 피로수명 및 강도에 미치는 영향을 평가하여 설계에 필요한 기초자료를 확보해야 할 필요가 있다.

일반적으로, 프레팅 손상은 접촉하고 있는 두 표면 사이에서 상대적인 미끄럼(relative slip) 현상을 일으킬 때 발생한다. 이러한 현상으로 인하여 접촉부에서는 마찰력과 마모가 발생되며, 초기 경사 균열의 발생과 더불어 피로수명에 상당한 영향을 미치게 된다. 기계 및 구조물 파손사고의 중대한 요인으로 알려진 일반피로 손상에 대한 연구는 오래 동안 활발하게 진행되어왔지만, 상대적으로 프레팅 피로손상에 대한 연구는 상당히 미비한 실정이다.<sup>(7-9)</sup>

따라서, 본 연구에서는 현재 상용 티타늄 합금으로 널리 알려진 Ti-6Al-4V 합금에 대하여 열처리로 조직을 변화시켜 이에 따른 기본 기계적 특성을 평가하고자 하였다. 또한 단순피로한도(plain fatigue limit)와 프레팅 환경 하에서의 피로한도(fretting fatigue limit)의 비교 평가를 통한 수명의 감소율과 단순 및 프레팅 피로시험 후, 파단면과 접촉부를 관찰하여 파괴기구도 함께 검토하고자 하였다.

† 책임저자. 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jdkwon@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2462 FAX : (053)810-4627

\* 회원. 영남대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원. 영남대학교 기계공학부

## 2. 열처리 방법 및 조직관찰

본 연구에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V 합금 압연판재이며, 화학조성은 Table 1과 같다. Ti-6Al-4V 합금은 대표적인  $\alpha+\beta$ 상 티타늄 합금으로서, 합금을 구성하는 조직의 형상 및 분포에 의하여 기계적 특성이 변하는 것으로 알려져 있다.<sup>(10,11)</sup>

이들 조직 변화에 따르는 손상평가를 위하여 Fig. 1에 제시한 바와 같이 전기로에서 2단계로 나누어 열처리를 하였다. 1단계에서는  $\beta$ 변태선 이상의 온도인 1050°C로 2시간 동안 유지시킨 후 상온에서 공냉 처리 하였다. 이를 다시 540°C에서 4시간 동안 유지시킨 후 상온까지 공냉하는 2단계 열처리로 시효(aging)처리를 하였다.

이와 같은 방법으로 열처리된 재료와 압연판에 대하여 10%HF + 5% HNO<sub>3</sub> + 85% H<sub>2</sub>O용액으로 에칭(etching)하였다. 이를 200배의 광학현미경으로 관찰한 조직사진은 Fig. 2에 제시하였다.

Fig. 2(a)는 압연판재로서, 등축  $\alpha$  결정립(흰색)

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V alloy

Composition, wt. %					
Al	V	Fe	O	N	Ti
6.362	4.235	0.169	0.186	0.008	89

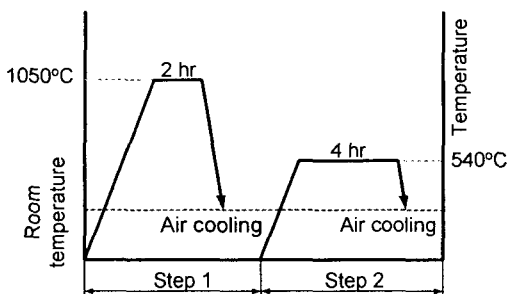
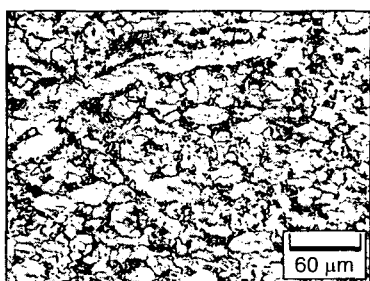


Fig. 1 Heat treatment process of Ti-6Al-4V alloy



(a) Rolled plate



(b) Heat treated material

Fig. 2 Optical micro graphs of Ti-6Al-4V alloy

사이에  $\beta$ 상(검은색)이 혼재하는 등축조직(equiaxed microstructure)을 관찰할 수 있었다.

1050°C로 열처리된 (b)에서는 전반에 걸쳐  $\beta$  결정립이 존재하였으며, 조직의 경계를 중심으로 내부에서는 서로 다른 방향성을 가지는 층상조직(lamellar microstructure)으로 이루어진 Widmanstätten 조직<sup>(12)</sup>이 형성되어 있었다.

## 3. 경도, 충격 및 인장특성

모든 시험편은 압연방향에 평행한 방향(균열에 수직한 방향)으로 동일하게 채취하였다. 또한 고온산화의 영향을 고려하여 블록으로 채취한 다음 Fig. 1에서 언급한 것과 같은 방법으로 열처리하여 와이어 컷(wire cut) 가공으로 제작하였다.

Ti-6Al-4V 합금의 조직별 기계적 특성은 Table 2에 나타낸 바와 같다. 경도특성은 로크웰 경도시험기(Rockwell hardness tester) C스케일로 10점을 수행하여 그 평균값으로 평가하였다. 경도특성은 등축조직에 비하여 Widmanstätten조직이 크게 나타났다.

충격 시험에 이용된 시험기는 Instron사의 살피 충격시험기(Instrumented Charpy impact tester)로 용량은 300 J이다. 시험편은 KS B 0809에 의거하여 가공하였으며, 이때 노치의 형상을 동일하게 하기 위하여 와이어 컷을 이용하였다. 시험은 실온에서 수행하였다. 그 결과 충격흡수에너지는 등축조직이 27 J, Widmanstätten조직이 24 J로 등축조직이 크게 나타났다.

Ti-6Al-4V 합금의 조직변화에 따른 인장특성은 KS B 0801 정형 시험편 13호의 규격에 준하여 폭 20 mm, 평행부 거리 60 mm, 모서리 반경 20 mm 두께 4 mm로 제작하여 수행하였다. 시험속도는 1 mm/min으로 50 mm의 변위측정기를 부착하여 수행하였다. 그 결과, Widmanstätten조직에서 항복

강도와 인장강도가 크고, 등축조직에서 연신율이 크게 나타났다. 이러한 현상은 슬립(slip)변형을 일으키기 쉬운  $\alpha$ 상이 방향이 불규칙한 층상으로 존재하고,  $\beta$ 상에 의하여 그 연속성을 방해 받기 때문으로 생각된다.

#### 4. 단순 및 프레팅 피로특성

##### 4.1 시험편의 형상 및 프레팅 피로시험 장치

Ti-6Al-4V 합금의 조직변화에 따른 피로수명 평가에 사용된 시험편은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 ASTM E 466 피로시험편 규격<sup>(13)</sup>에 의거하여 폭 7 mm, 평행부 50 mm, 모서리 반경 80 mm, 두께 4 mm로 동일하게 가공하였다. 또한 Fig. 3의 좌측에는 사용되어진 접촉패드(contact pad)로서, 재질은 탄소강(SM45C)으로 양단에 2 mm의 평행부가 있으며, 접촉면(contact surface)을 대칭으로 배치하기 때문에 안정된 접촉 상태에서 시험 할 수 있는 브릿지 패드(bridge pad)를 사용하였다. 시험편의 평행부와 패드 접촉부는 표면 거칠기 효과의 차이를 최소화하기 위하여 #2000까지 에머리 페이퍼(emery paper)를 이용하여 동일하게 단계적으로 연마하여 사용하였다.

Ti-6Al-4V 합금의 조직변화에 따르는 피로수명 평가를 위하여 사용된 프레팅 피로시험 장치들의 모식도는 Fig. 4에 나타내었다. 이 장치는 초기 면압을 가한 후 자연적으로 면압이 감소하는 형태로서, 실제 기계 및 구조물에서의 작용 상태와 가장 유사하게 제작된 것이다. 제시된 Fig. 4의 프루빙 링(proving ring)은 모든 프레팅 피로시험편에 대하여 초기 면압을 일정하게 부여하기 위한 것이다.

암(arm)은 마찰력(friction force), 변위계(extensometer)는 국부 상대슬립(local relative slip)을 시험 중에 검출하기 위하여 직접 설계 및 제작한 장치로서, Fig. 5와 같이 보정 후 사용하였다. 사용된 시험기는 Instron사의 유압 서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue tester; model 8516)로서, 최대 용량은 10

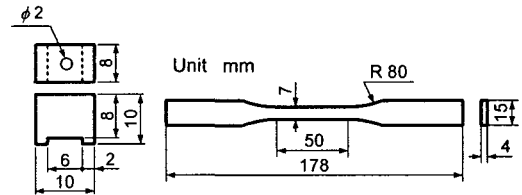


Fig. 3 Shape and dimension of fretting fatigue specimen and bridge pad

Table 2 Mechanical property of Ti-6Al-4V alloy

Microstructure	Equiaxed	Widmanstätten
Hardness (H <sub>RC</sub> )	32.7	35.7
Impact absorbed energy (J)	27	24
0.2% proof strength (MPa)	936	986
Tensile strength (MPa)	1003	1048
Strain	22.5	5.4

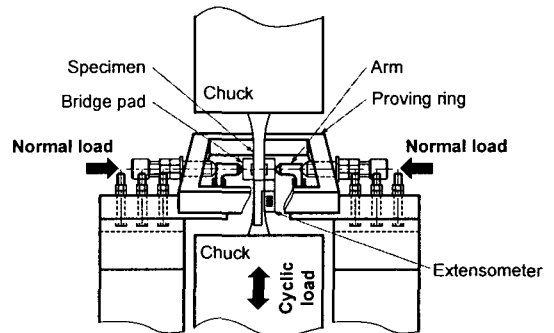


Fig. 4 Schematic illustration of the fretting fatigue test

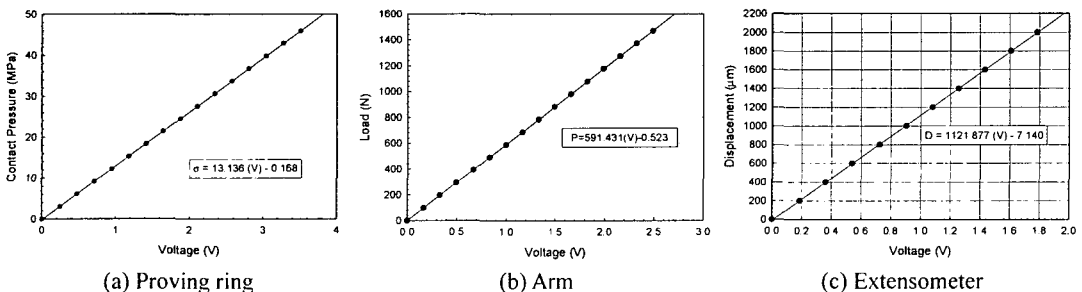


Fig. 5 Calibration curve of fretting fatigue apparatus

ton이다.

시험 조건은 단순 및 프레팅 피로시험편 모두에

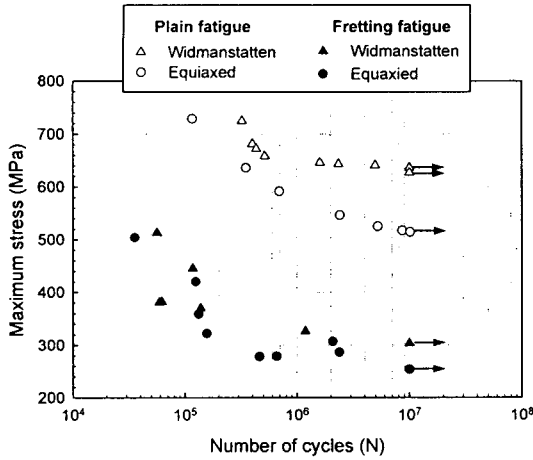
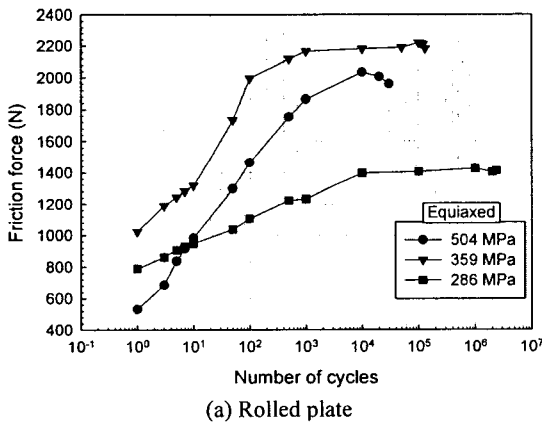
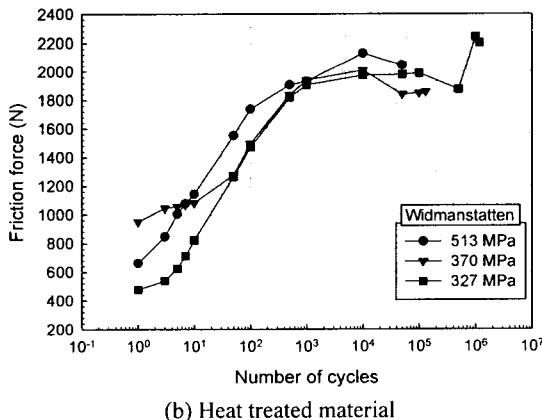


Fig. 6 S-N curve of plain and fretting fatigue test



(a) Rolled plate



(b) Heat treated material

Fig. 7 Relationship between friction force and number of cycles

대하여 응력비 R=0.1의 정현파형(sine wave), 인장-인장 형태를 채택하였으며, 주파수는 15 Hz로 실온에서 수행하였다. 그러나 프레팅 피로의 경우 초기 1000 사이클까지는 데이터의 안정적인 검출을 위하여 1 Hz로 하고, 그 이후에는 15 Hz로 일정하게 유지하였으며, 초기 접촉면압(contact pressure)은 30 MPa로 동일하게 하였다.

4.2 단순 및 프레팅 피로수명 평가

Ti-6Al-4V 합금의 조직변화에 따르는 피로특성을 평가하기 위하여 최대응력(maximum stress,  $\sigma_{max}$ )과 파단 사이클과의 관계로 Fig. 6에 나타내었다.

단순피로한도(plain fatigue limit)는 등축조직이 약 514 MPa, Widmanstätten조직이 636 MPa로 나타났다.

반면, 프레팅 피로한도(fretting fatigue limit)는 등축조직이 253 MPa, Widmanstätten조직이 303 MPa로 단순피로한도에 비하여 낮게 나타났다. 이것은 프레팅을 받지 않는 경우, 압연판인 등축조직에 비하여 1050°C로 열처리된 Widmanstätten조직의 피로한도가 약 24% 증가하였으며, 프레팅을 받을 경우는 등축조직에 비하여 Widmanstätten조직이 약 20% 높음을 의미하고 있다. 또한 프레팅을 받지 않을 경우의 등축조직에 비하여 프레팅을 받는 경우, 등축조직은 51%, Widmanstätten조직은 52% 정도로 감소하였으며, 이는 프레팅 환경이 피로수명에 미치는 위험성을 시사하고 있다.

Fig. 7(a)에는 프레팅 피로시험 시에 취득한 마찰력과 사이클 수와의 관계를 최대 응력들에 대하여 제시하였다. 등축조직과 Widmanstätten조직 모두에서 약 1000 사이클까지는 마찰력이 급격히 증가하고 그 이후에는 일정한 값을 유지하는 경향을 가지고 있었으나, 응력에 따른 마찰력의 연계성은 인정되지 않았다. 이는 수직한 형태의 시험조건으로 인하여 프레팅 피로시험 시에 발생하는 마모분(debris)의 접촉부 잔류량과 외부로의 유출량이 불규칙하기 때문으로 추측된다. 반면, 상대슬립과 사이클 수와의 관계는 Fig. 7(b)와 같이 1000사이클까지 급격하게 감소한 후에 어느 정도 일정한 값을 유지하는 경향을 보였다.

4.3 패드 접촉부 및 파단면 관찰

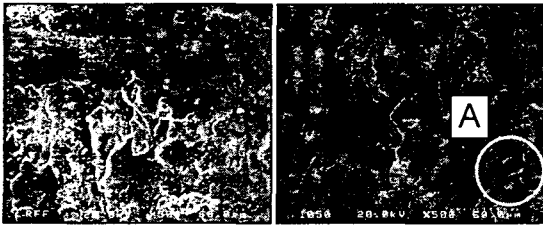
접촉부의 프레팅 손상(fretting damage)에 의한 균열 성장기구를 규명하기 위하여 파단 후 시험편의 패드 접촉부를 주사형 전자현미경 (Scanning Electron Microscope: SEM)으로 관찰하여 Fig. 8에 제시하였다.

Fig. 8(a)는 등축조직, (b)는 Widmanstätten조직의

접촉부로서, 두 시재 모두에서 프레팅 손상으로 인한 흔적을 관찰 할 수 있었다. 그러나 Widmanstätten조직의 경우 등축조직에 비하여 프레팅 손상의 정도가 심하였으며, 표시한 A부와 같이 프레팅 손상으로 발생된 정류균열로 보이는 곳도 있었다. Fig. 9는 등축조직에 대하여 단순 피로시험 후의 파단면을 SEM으로 관찰한 것이다. (a)는 균열 발생 부를 촬영한 것으로 시재의 내부에서 균열이 발생하여 성장한 것을 촬영한 것이다. 그러나 대부분의 시험편은 표면에서 균열이 발생하여 성장 및 파단을 하였다. (b)는 균열 성장부를 촬영한 것으로 연성 스트라이에이션(ductile striation)이 관찰되었으며, 최종 파단부인 (c)에서는 등축 딴플을 관찰할 수 있었다. Fig. 10은 Widmanstätten조직의

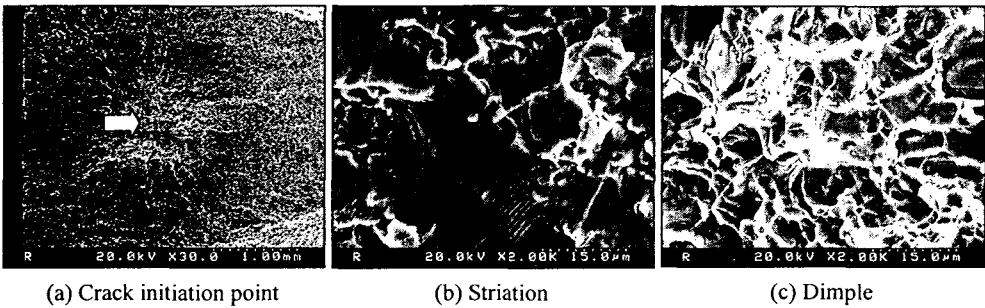
파단면으로 저 배율로 관찰한 결과이며, 등축조직에 비하여 상당히 거칠었다. (a)는 균열발생지점이며, 균열성장 부를 촬영한 (b)에서는 제시한 바와 같이 재료조직의 방향성 알 수 있는 곳과 연성 스트라이에이션이 관찰 되었다. (c)는 최종 파단부로 딴플(dimple)을 관찰할 수 있었고, 이 딴플 영역에서도 재료조직의 방향성을 암시하는 파면들이 형성 되어 있었다.

Fig. 11과 Fig. 12는 등축조직과 Widmanstätten조직에서 프레팅 손상을 받은 경우의 피로파면을 관찰 한 것이다. Fig. 11과 Fig. 12의 (a)는 균열발생 부를 촬영한 것이다. 일반적으로 프레팅 피로균열 진전방향은 접촉응력과 외부응력이 중첩된 응력의 최대 주응력에 수직이다. 즉, 접촉면의 표면 근처에서는 마찰력의 영향에 의하여 균열이 표면에 대하여 경사지게 진전하고, 내부로 진전함에 따라서 마찰력의 영향권에서 벗어나 표면에 수직하게 진전한다고 알려져 있다.<sup>(14)</sup> Fig. 11과 Fig. 12의 (a)에 표시한 A가 이러한 경사균열의 영역에 해당하는 부분이다. 이러한 곳에서는 상하의 파면이 면압의 영향으로 반복 접촉되어 발생한 마모손상의 흔적과 모분이 관찰되었다. Fig. 11 및 Fig. 12의 (b)는 균열성장부로서 연성 스트라이에이션을 관찰할 수 있었으며, Fig. 11(c)와 Fig. 12(c)에 표시한 B부는



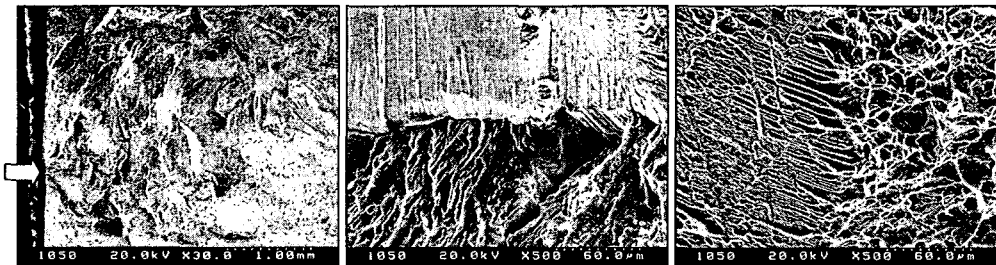
(a) Equiaxed (b) Widmanstätten

Fig. 8 SEM micrographs of contact surface



(a) Crack initiation point (b) Striation (c) Dimple

Fig. 9 SEM micrographs of fracture surface for Ti-6Al-4V alloy (Equiaxed: plain fatigue test)



(a) Crack initiation point (b) Direction (c) Dimple

Fig. 10 SEM micrographs of fracture surface for Ti-6Al-4V alloy (Widmanstätten: plain fatigue test)

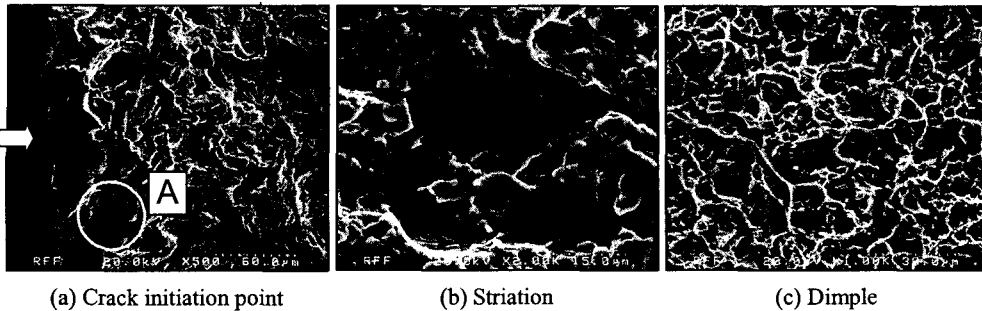


Fig. 11 SEM micrographs of fracture surface for Ti-6Al-4V alloy (Equiaxed: fretting fatigue)

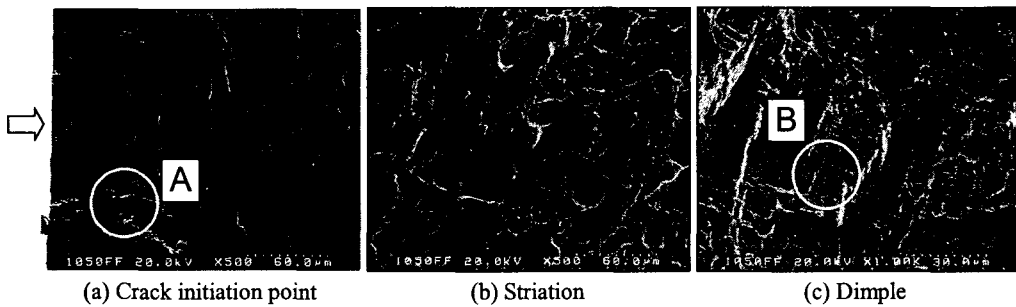


Fig. 12 SEM micrographs of fracture surface for Ti-6Al-4V alloy (Widmanstätten: fretting fatigue)

최종 파단부로서, 단순피로에서의 동일한 담플을 관찰할 수 있었다.

## 5. 결론

Ti-6Al-4V 합금의 압연판과  $\beta$ 점 이상의 1050°C로 열처리하여 조직변화에 따른 단순피로와 프레팅 환경 하에서의 피로시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압연판은 등축조직이었으며, 1050°C로 열처리한 시재는 Widmanstätten조직으로 나타났다.

(2) 등축조직은 충격특성이 우수하였으며, Widmanstätten조직은 경도 및 인장특성이 우수하였다.

(3) 단순피로시험에서의 피로한도는 Widmanstätten조직이 등축조직에 비하여 약 24%정도 증가하였으며, 프레팅 피로시험에서는 Widmanstätten조직이 등축조직에 비하여 약 20%정도 높게 나타났다.

(4) 단순피로에 대한 프레팅을 받을 경우의 피로한도 감소율은 등축조직이 약 51%, Widmanstätten조직이 약 53%정도로 모두 50% 이상의 피로한도의 감소를 보였으며, 이는 프레팅 손상으로 인한 위험성을 시사하고 있다.

(5) 프레팅을 받을 경우, Widmanstätten조직에서 접촉부의 마모손상이 심하게 나타났으며, 정류균열로 보이는 곳도 내포하고 있었다. 파단면은 등

조직과 Widmanstätten조직의 모든 시재에서 마모손상의 흔적과 마모분이 경사균열부에 내재하고 있었다. 또한 균열 성장부에서는 연성 스트라이에이션, 최종 파단부에는 담플을 관찰할 수 있었다.

## 후기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 원자력연구개발사업을 통해 수행되었음.

## 참고문헌

- (1) Fraker, A. C., Ruff, W., Sung P., Van Orden, A. C. and Speck, K. M., 1981, "Surface Propagation and Corrosion Behavior of Titanium Alloys for Surgical Implants," *ASTM STP 796*, pp. 206~219.
- (2) Smelaser, R. E., Swedlow, J. L. and Williams, J. C., 1970, "Analysis of Local Stresses and Strains in Ti-6Al-4V Widmanstätten  $\alpha+\beta$  Microstructures," *ASTM STP 651*, pp. 200~245.
- (3) Peters, M., Gysler, A. and Lütjering, G., 1984, "Influence of Texture on Fatigue Properties of Ti-6Al-4V," *Metall. Trans.*, Vol. 15A, pp. 1597~1605.
- (4) Seo, D. Y. and Han, J. G., 1990, "The Changes of Microstructure and Fatigue Properties by Thermomechanical Processing for Ti-6Al-4V," *J. of*

- the Korean Inst. of Metals*, Vol. 28, No. 1, pp. 23~31.
- (5) Kang, H. G. and Cho, H. K., 1992, "Microstructural Alteration of a Phase Associated with Solution Treatment and Cooling Condition in Ti-6Al-4V Alloy," *J. of the Korean Inst. of Metals*, Vol. 30, No. 11, pp. 1326~1334
- (6) Kwon, J. D., Bae, Y. T. and Choi, S. J., 2003, "The Effect of Microstructure on Mechanical Behavior for Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)," *Int. J. of Modern Physics B*, Vol. 17, No. 8&9, pp. 1297~1303.
- (7) Kwon, J. D., Choi, S. J. and Bae, Y. T., 2004, "A Study on Fretting Fatigue Behavior of Degraded 1Cr-0.5Mo Steel," *Key Engineering Materials*, Vols. 261-263, pp. 1221~1226.
- (8) Kwon, J. D., Sung, S. S. and Choi, S. J., "A study on Material Degradation and Fretting Fatigue Behavior," 2001, *J. of the Korean Inst. of Metals*, Vol. 25, No. 8, pp. 1278~1293.
- (9) Kwon, J. D., Choi, S. J., Kim, K. S., Bae, Y. T., 2003, "The Effect of Degradation on the Fretting Fatigue for 1Cr-0.5Mo Steel," *Trans. of MSME (A)*, Vol. 27, No. 11, pp. 1979~1985.
- (10) Imam, M. A., Fraker, A. C., Harris, J. S. and Gilmore, C. M., 1981, "Influence of Heat Treatment on the Fatigue Lives of Ti-6Al-4V and Ti-4.5Al-5Mo-1.5Cr," *ASTM STP 796*, pp. 105~119.
- (11) Brunski, J. B., Moccia, A. F., Jr., Pollack, S. R., Korostoff, E. and Trachtenberg, D., 1981, "Investigation of Surface of Retrieved End Osseous Dental Implants of Commercially Pure Titanium," *ASTM STP 796*, pp. 189~205.
- (12) Thompson, A. W., 1999, "Relations Between Microstructure and Fatigue Properties of Alpha-Beta Titanium Alloys", in *Fatigue Behavior of Titanium Alloys*, ed. Boyer, R. R., Eylon, D., and Lutjering, G., TMS, pp. 23~30.
- (13) ASTM, 1995, "Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials" *ASTM E 466-82*, pp. 470~474.
- (14) K. Endo, 1981, "Practical Observations of Initiation and Propagation of Fretting Fatigue Cracks," *Fretting Fatigue*, ed. R. B. Waterhouse, Applied Science Publishers Ltd, pp. 127~141.