

티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 조직변화에 따른 기계적 특성 평가

권재도[†] · 배용탁* · 최성종**

(2001년 3월 17일 접수, 2002년 1월 22일 심사완료)

The Evaluation of Mechanical Properties on the Changes of Microstructure for Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)

Jae Do Kwon, Yong Tak Bae and Sung Jong Choi

Key Words : Ti-6Al-4V Alloy, $\alpha+\beta$ Titanium Alloy, Microstructure(미세조직), Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Fractal Dimension(프랙털 차원)

Abstract

The characteristics of mechanical behavior are investigated for Ti-6Al-4V alloy. Four kinds of the specimens are prepared under different heat treatments in order to produce different microstructures. In the present investigations, impact, tensile and fatigue crack growth tests are performed for each test specimen. The results obtained through the investigations are compared. Additionally fractal dimensions of crack pass are obtained using the box counting method. The results are, 1) the microstructures shows as equiaxed, bimodal and Widmanstatten microstructures respectively, 2) the impact energy and elongation are superior for the bimodal microstructure, and the hardness and tensile strength are superior for the Widmanstatten microstructure, 3) the fatigue crack growth rate is similar to all microstructures in low ΔK region while that of equiaxed microstructure is the largest, and that of Widmanstatten microstructure is the lowest in high ΔK region respectively, 4) the fractal dimension D of Widmanstatten microstructure shows higher value than that of the equiaxed and bimodal microstructures under 200 magnification view of the SEM micrographs.

1. 서론

티타늄은 제련이 어렵고 용점이 높으며, 제작 단가가 비싸기 때문에, 생산성 및 활용도는 강이나 알루미늄 합금에 비하여 낮은 편이다. 그러나 티타늄 합금은 비중이 4.5로 강의 60%정도로 가벼우며 비강도, 내열성 및 내식성이 우수하여 우주 항공용, 의료용 생체재료 등 여러 분야에서 응용되고 있다.⁽¹⁻³⁾

특히, 실용 합금으로 널리 알려져 있는 Ti-6Al-4V 합금은 대표적인 $\alpha+\beta$ 상 티타늄 합금으로서, 합금을 구성하는 합금원소와 더불어 미세조직의

형상 및 분포에 의하여 기계적 특성이 변하는 것으로 알려져 있다.^(4,5)

Ti-6Al-4V 합금에 대한 연구들로는, Imam 등은 퀴칭한 Ti-6Al-4V의 피로와 조직적 특성에 관한 연구에서 900°C로 열처리 후 퀴칭을 했을 때 다른 열처리에 비해 보다 나은 피로수명과 연성, 항복강도, 인장강도 및 탄성계수를 가진다고 보고되고 있다.⁽⁶⁾ Nakasa 등은 수소분위기 하에서 Ti-6Al-4V 합금강의 피로균열 발생과 진전에 관한 연구에서 피로균열 발생은 수소분위기 하에서의 시험편이 공기 중에서의 시험편보다 먼저 발생되고 또한 응력확대계수는 상대적으로 크게 나타난다고 보고하고 있다.⁽⁷⁾ 그 외에도 티타늄에 관한 연구들은 TiAl 베이스 합금의 파괴인성에 관한 연구,⁽⁸⁾ 표면처리가 프레팅 마모 및 피로에 미치는 영향,⁽⁹⁾ 충격강도특성에 관한 연구⁽¹⁰⁾ 등 티타늄 합금에 대한 기계적 특성 평가가 활발히 이루어지고 있다. 국내에서도 Ti-6Al-4V 합금의 가공열처리에 따

[†] 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jdkwon@ynuucc.yu.ac.kr

TEL : (053)810-2462 FAX : (053)813-3703

* 회원, 영남대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 영남대학교 기계공학부

른 조직 및 피로특성변화에 관한 연구,⁽¹¹⁾ 열처리 조건에 따른 미세조직 변화 및 미세조직의 균열 생성 거동에 미치는 영향⁽¹²⁾ 등이 발표되고 있으나 아직 기지 조직과 균열발생 및 성장 기구해명에 있어서 분명하지 않은 점들도 있으며, 미세조직과 강도특성에 관한 축적된 데이터도 불충분하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 항공용 재료로서 가장 널리 사용되고 있는 Ti-6Al-4V 합금의 조직변화에 따른 기계적 특성평가 및 기초자료 확보를 위하여, 열처리로 조직을 변화시킨 Ti-6Al-4V 합금의 기계적 특성 및 피로균열진전 특성을 평가해 보고자 하였다.

또한 균열진전양상의 정량적인 평가를 위하여 광학 현미경으로 피로균열시험 후의 측면을 촬영하고, 박스 법(box counting method)으로 프랙털 차원(fractal dimension)을 구하였다.^(13,14)

2. Ti-6Al-4V 합금의 열처리 및 조직관찰

본 연구에 사용된 재료는 Ti-6Al-4V 합금 압연판이며, 화학조성은 Table 1 과 같다.

Ti-6Al-4V 합금의 대표적인 미세조직 형태는 등축조직(equiaxed microstructure), Widmanstatten 조직(Widmanstatten microstructure) 및 이들이 혼합되어 있는 혼합조직(bimodal microstructure)으로 구분되어 진다.

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

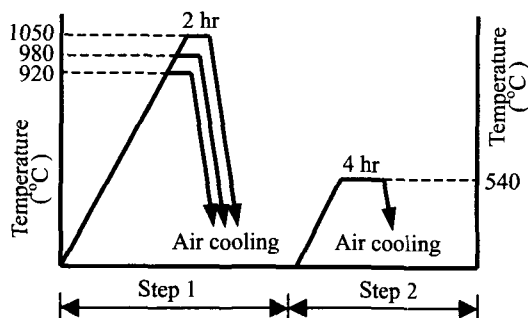


Fig. 1 Heat treatment of Ti-6Al-4V alloy

이러한 Ti-6Al-4V 합금의 미세조직 변화에 따르는 기계적 특성을 평가하기 위하여 Fig 1에 나타낸 바와 같이 두 단계로 나누어 전기로에서 열처리를 하였다.

1단계에서는 β 변태선 온도(약 1000°C) 이상인 1050°C와 그 이하인 980°C 및 920°C로 구분하여 각각 2시간씩 유지시킨 후 상온에서 공냉하였다. 그리고 2단계에서는 1단계로 열처리한 모든 시험편에 대하여 540°C에서 4시간 동안 유지시켜 상온에서 공냉하는 방법으로 시효처리를 하였다.

Fig. 1에서 제시한 방법으로 열처리 된 재료에 대하여 10% HF + 5% HNO₃ + 85% H₂O 용액을 사용하여 에칭하고 200배의 광학현미경으로 관찰한 조직을 Fig. 2에 나타내었다. (a)는 압연판으로서 등축조직에 가까운 형태를 나타내고 있으며, (b)와 (c)는 920, 980°C에서 열처리한 것으로 등축조직과 층상조직이 혼재하는 혼합조직을 나타내고 있다. 그러나 980°C에서 열처리한 조직 Fig. 2의 (c)는 920°C에 비하여 더 많은 층상조직을 함유하고 있다. (d)는 1050°C에서 열처리한 것으로서 Widmanstatten 조직을 나타내고 있다.

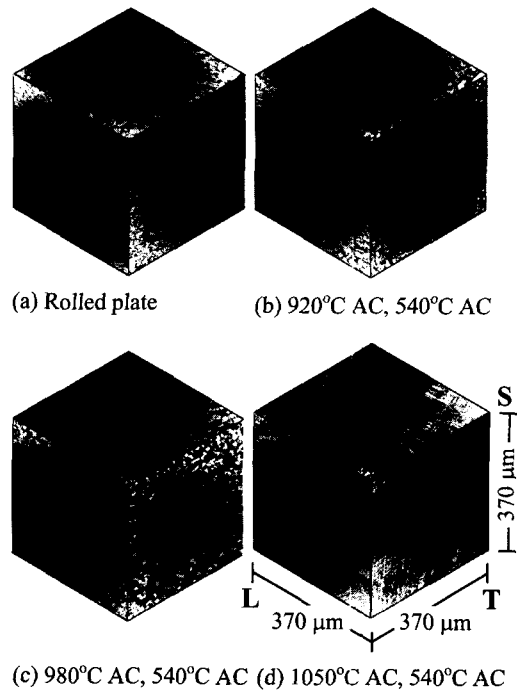


Fig. 2 Optical micrographs of heat treated Ti-6Al-4V alloy

3. 시험편의 제작 및 경도특성

시험편은 고온산화의 영향을 고려하여 우선 블록(block)으로 제작한 다음, 앞에서 언급한 방법으로 열처리한 후 와이어 가공으로 제작하였다.

또한 Fig. 3에 도시한 바와 같이 압연방향에 대해 평행한 방향(균열에 수직한 방향)으로 채취하였다.

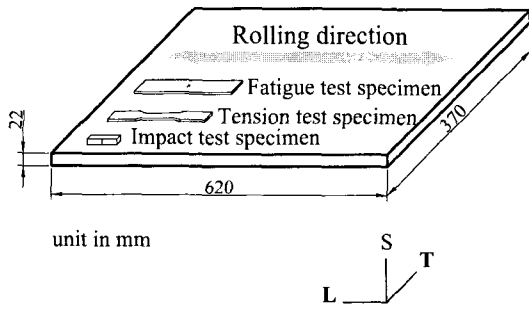


Fig. 3 Sampling direction of specimens

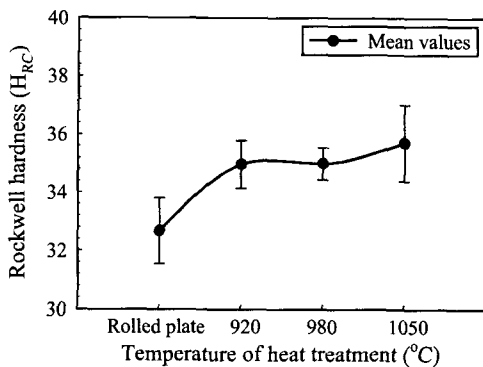


Fig. 4 Results of hardness test in Ti-6Al-4V alloy

Ti-6Al-4V 합금의 조직별 경도특성을 비교하기 위하여 로크웰 경도시험기 C 스케일로 12점을 수행하였다. 그 중 최대 및 최소값 2점씩을 버린 10 점을 선정하여 Fig. 4에 나타내었다. 경도특성은 등축조직인 압연판, 920, 980°C에서 열처리한 혼합조직, 1050°C Widmanstatten 조직 순으로 나타났다.

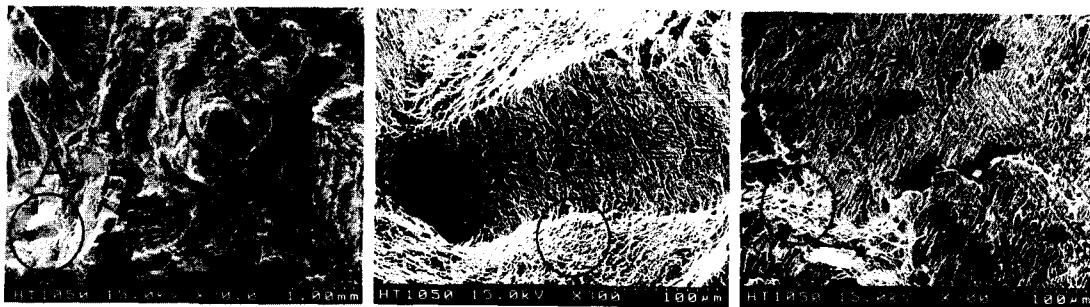
4. Ti-6Al-4V 합금의 충격 및 인장특성

시험에 이용된 시험기는 Instron사의 샤피 충격 시험기(Instrumented Charpy impact test machine)로서, 시험기의 용량은 300 J이다. 충격 시험편은 KS B 0809에 의거하여 가공하였다. 또한 노치의 형상을 일정하게 가공하기 위하여 와이어 컷(wire cut)을 사용하였으며, 시험 온도는 상온에서 수행하였다.

Table 2에 나타낸 시험 결과와 같이 1050°C로 열처리한 재료가 24 J로 가장 낮은 충격흡수에너지를 나타냈으며, 920°C로 열처리한 재료가 35 J로 가장 높은 수치를 나타내었다.

Fig. 5는 1050°C로 열처리된 재료의 충격시험 후 파면을 관찰한 SEM사진이다. 저 배율로 관찰한 (a)와 같이 전반적으로는 다른 열처리재에 비하여 거친 파면을 형성하고 있었으며, A, B부분처럼 취성파면의 양상을 보이는 곳이 혼재하고 있었다. 그러나 고 배율로 관찰한 (b), (c)의 C와 같이 국부적으로는 딴플이 관찰되었으며, 취성 입계파면처럼 보이는 곳도 α상과 β상의 방향성을 알 수 있는 흔적이 남아 있었다. 또한 압연판, 920°C 및 980°C로 열처리된 충격시험편은 파면의 전반에 걸쳐 딴플을 관찰할 수 있었다.

Ti-6Al-4V 합금의 조직별 인장특성 관찰은 ASTM E 8M-95a(KS B 0801 정형시험편 13호)의 규격에 준거하여 폭 20 mm, 평행부 거리 60 mm, 모서리 반경 20 mm, 두께 4 mm인 시험편을 제작하여 인장시



(a) Heat-treat Ti-6Al-4V alloy (b) Magnification view of A in (a) (c) Magnification view of B in (a)

Fig. 5 SEM micrographs of impact fracture surface (At 1050°C AC, 540°C AC)

Table 2 Results of Charpy impact test of Ti-6Al-4V alloy

Test in room temperature: 24.5°C				
Heat treatment (°C)	Rolled Plate	920	980	1050
Impact absorbed energy (J)	27	35	29	24

Table 3 Results of tension test for Ti-6Al-4V alloy

	0.2% proof strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Strain (%)	Reduction in area (%)
Rolled plate	910	971	18	32
920°C	880	980	20	34
980°C	830	967	18	32
1050 °C	890	1023	9	9

험을 수행하였다.

인장시험에 사용된 시험기는 Shimadzu사의 Auto graph AG-25T이고, 1 mm/min의 속도로 50 mm 변위 측정기(extensometer)를 부착하여 시험을 수행한 후, 그 시험 결과를 Table 3에 나타내었다. 열처리 조건이 1050°C인 경우에서 인장강도와 항복강도가 가장 크고, 920°C에서 연신율이 가장 높게 나타났다. 이것은 슬립(slip)변형이 발생하기 쉬운 α 상의 방향이 불규칙한 층상조직으로 존재하고 있는 β 상에 의하여 그 연속성을 방해 받기 때문으로 생각된다.

5. Ti-6Al-4V 합금의 피로균열진전 특성

피로균열진전 시험에 사용된 시험편은 CCT 시험편(Center Cracked Tension specimens)으로서, 중앙노치는 피로발생 특성에 미치는 영향과 가공경화를 최소화하기 위하여 센터 드릴로 중앙에 홀(hole)을 뚫은 후, 와이어 가공으로 인공노치 길이, $2a = 6.6$ mm, 곡률반경, $\rho = 0.2$ mm로 일정하게 가공하였다. 또한 피로균열길이의 정확한 측정을 위하여 시험편의 표면을 조직관찰에서와 같은 방법으로 연마하여 시험에 사용하였다.

본 시험에 사용된 시험기는 Instron사의 유압 서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine; model 8516)로서 최대 용량은 10톤(ton)이다. 시험 조건은 모든 피로 시험편에 대하여 응력비 $R=0.1$, 주파수

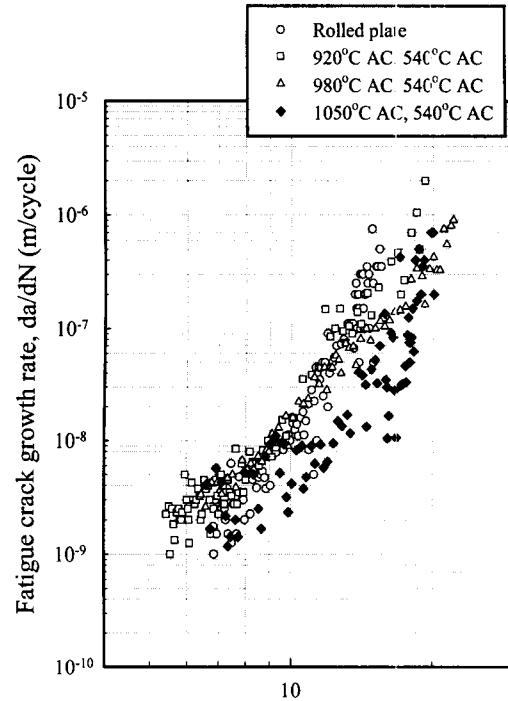


Fig. 6 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK

10 Hz, 인장-인장 하중형태로 일정하게 수행하였다. 균열길이의 측정은 1/100 mm까지 측정이 가능한 이동식 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 피로균열진전시험 결과는 Fig. 6에 피로균열진전속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)의 관계로 나타내었다. 저 ΔK 영역에서는 모든 시험편의 균열진전속도가 유사하게 나타났으며, 고 ΔK 영역에서는 압연판의 균열진전속도가 가장 빠르게 나타났으며 그 다음으로 920°C, 980°C 열처리된 재료 순이고, 1050°C의 경우에는 균열진전속도의 변화폭이 크며 밴드(band)를 형성하고 있는 것을 알 수 있었다. 이것은 피로균열의 전파기구가 기본적으로 균열첨단에서의 슬립발생에 의하여 이루어진다는 사실을 고려하면, 층상조직에 있어서는 α 상에서 발생하는 슬립이 β 상에 의하여 저지당하기 때문에 균열진전속도의 변화폭이 층상조직의 양에 반비례하는 경향을 나타낸다고 여겨진다.⁽¹⁵⁾

또한 균열진전방향에 대한 α 상의 방향이 불규칙하며, Fig. 2의 (d)에서 나타나듯이 노드 강도가 큰 β 상(검은 부분)이 균열진전을 방해하여 균열의 사

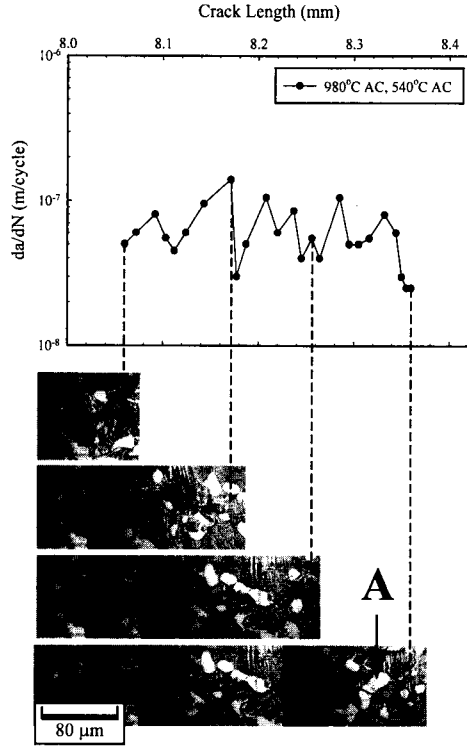


Fig. 7 Growth behaviour of short crack (980°C AC, 540°C AC)

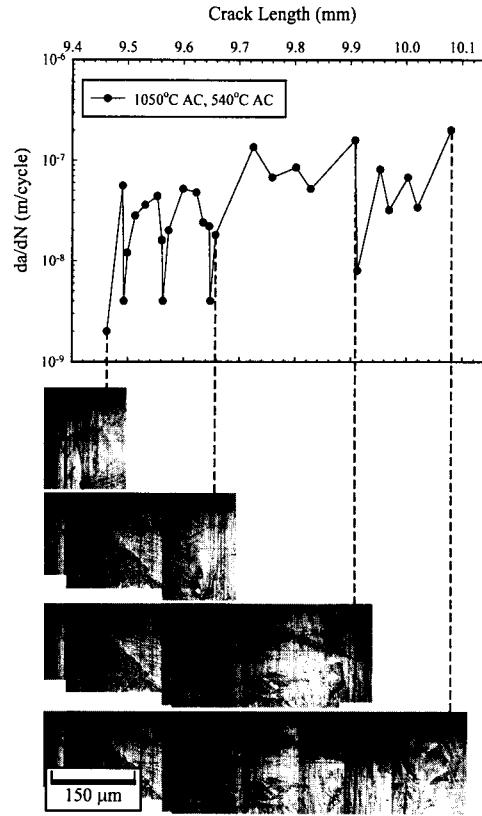


Fig. 9 Growth behaviour of short crack (1050°C AC, 540°C AC)

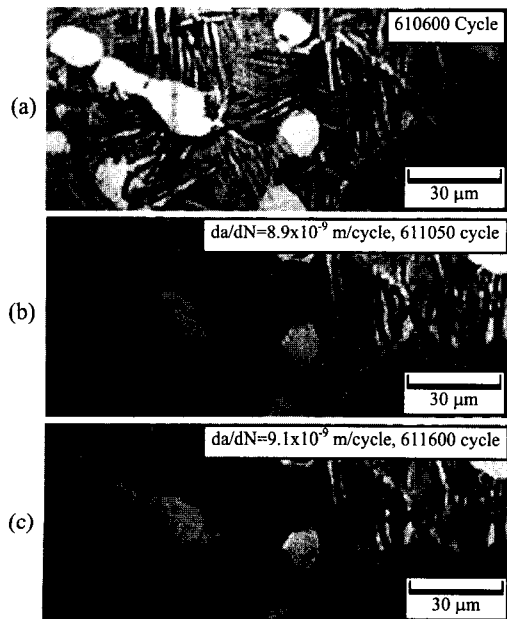


Fig. 8 Higher-Magnification views of crack tip in Fig. 7

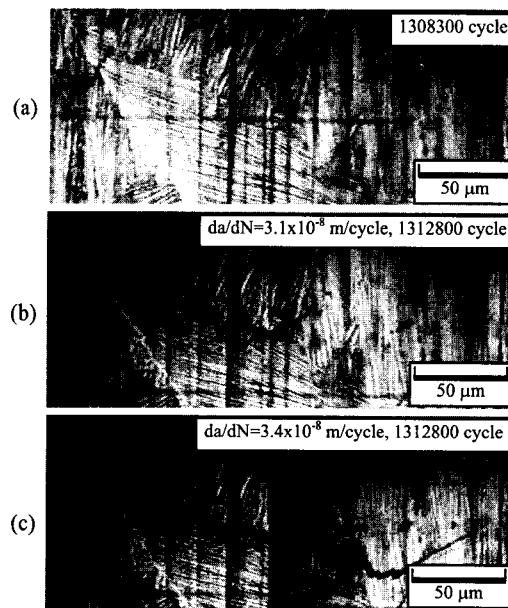


Fig. 10 Higher-Magnification views of crack tip in Fig. 9

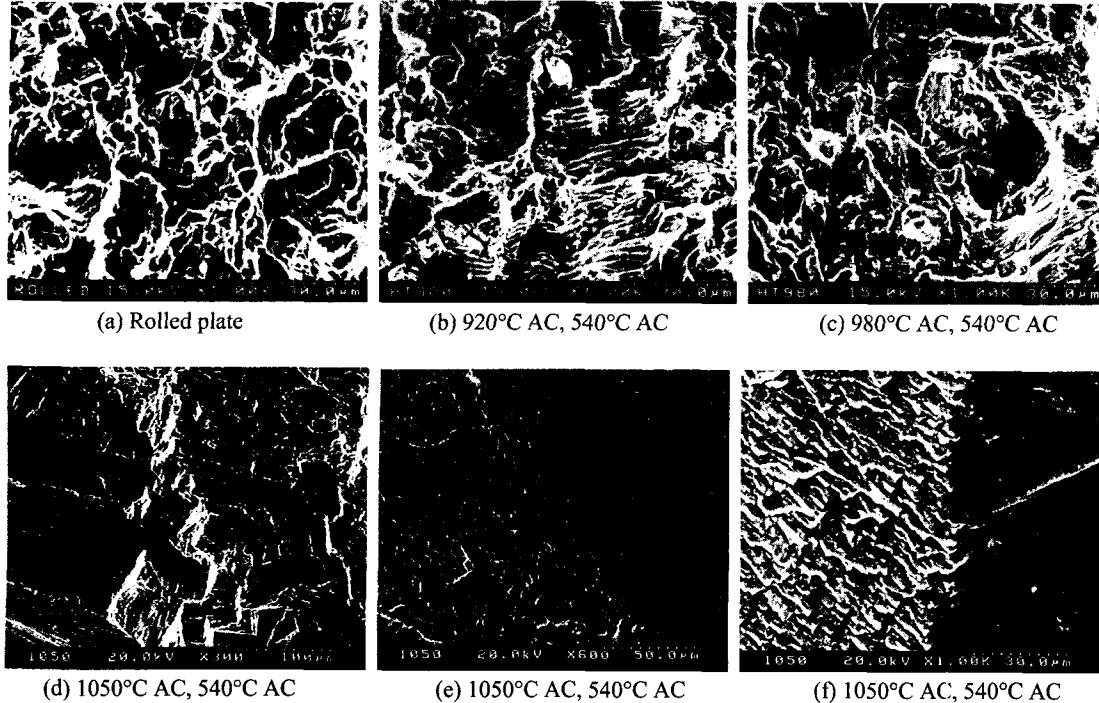


Fig. 11 SEM micrographs of the fatigue fracture surface

행(蛇行)현상이 발생하기 때문으로 사료된다.

Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9 및 Fig. 10 은 980°C 와 1050°C 로 열처리된 재료에 대해 피로균열진전시험 전에 표면을 10% HF + 5% HNO₃ + 85% H₂O 용액을 사용하여 얇게 에칭하고, 제작한 200 배의 이동식 광학 현미경으로 피로균열진전 경로를 촬영한 사진이다.

Fig. 7 과 Fig. 9 는 980°C, 1050°C 에서 각각 열처리된 재료로서, 시험편 중앙으로부터의 실제 균열 길이에 대한 균열진전속도를 나타낸 그래프이다.

Widmanstätten 조직인 Fig. 9 의 경우 혼합조직인 Fig. 7 에 비하여 균열진전속도의 변화폭이 심하게 나타났다.

Fig. 8 은 980°C 로 열처리된 재료로 피로균열이 primary α 상을 우회하는 피로균열의 균열진전속도 변화를 나타낸 것으로서 (a)는 피로균열 침단이 primary α 상에 근접했을 때이며, 8.9 nm/cycle 의 균열진전속도로 primary α 상을 통과한 후 (b), (c)에서 9.1 nm/cycle 의 균열진전속도로 진전 하였다. Fig. 7 의 사진에서 화살표 A 가 지시하는 곳과 같이 균열이 primary α 상을 관통하는 경우도 있었으나, 이런 경우는 극히 드물었고 대부분은 우회하여 진전 하였다. Fig. 10 은 1050°C 로 열처리된 재료이며, 방향이 다른 Widmanstätten 조직 경계에서 피로균열 (a), (b)와 같이 조직의 경계를 따라 31 nm/cycle

의 속도로 진행 한 후, 경계를 통과한 후에는 34 nm/cycle 의 속도로 (c)와 같이 진전하였다. 이와 같이 방향성이 서로 다른 경계 영역으로 균열이 진전하는 경우에는 균열진전속도가 감소하는 경향이 있었다.

Fig. 11 은 압연판과 920, 980 및 1050°C 로 열처리된 재료에 대해 피로균열진전시험 후 균열성장부의 파면을 SEM 으로 관찰한 것이다. Fig. 7 에 나타낸 바와 같이 압연판과 920, 980°C 로 열처리된 재료에서 연성 스트라이에이션이 관찰되었으며, 분포양상의 차이는 (a), (b) 및 (c)가 보여 주듯이 α 상 과 β 상이 혼합한 층상조직의 양 및 분포의 차이에 의한 것으로 사료된다. (d)는 1050°C 로 열처리된 재료의 균열성장부의 파면을 저배율로 관찰한 것으로서, 1050°C 에서 열처리된 경우는 압연판, 920°C 및 980°C 에서 열처리된 재료에 비해 상당히 파면이 거칠다는 것을 알 수 있었다. (e)와 (f)는 서로 다른 방향성을 가진 Widmanstätten 조직의 방향성을 알 수 있었고, 또한 Fig. 10 의 결과와 연관시켜 고려하면, (e) 및 (f)의 좌측 부분과 같이 파면이 조직의 방향성을 띄우며 거칠게 형성되는 부분에서는 균열진전속도가 감소하며, (f)의 오른쪽 부분과 같이 취성파면의 양상을 띄우는 곳에서는 균열진전속도가 증가하였다고 사료된다.

6. 피로균열경로의 프랙털(fractal) 해석

프랙털 특성이란 도형의 일부를 확대하면 원래의 도형과 같은 형태가 된다고 하는 자기 유사성을 의미한다. 실제로 균열경로에의 적용에 있어서는 현미경사진에 정방형의 격자를 덮어서 균열이 지나가는 정방형의 개수 $N(\eta)$ 를 구한다. 정방형 변의 길이 η 를 변화 시켜서 같은 작업을 반복하여 정리하면 프랙털 특성이 존재 할 경우에는 log-log 그래프상에서 다음 식이 성립한다.^(13,14)

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \quad (1)$$

여기서 C 와 D 는 정수이며, 특히 D 를 프랙털 차원이라 한다. D 는 1차원에서는 $1 \cdot D/2$, 2차원에서는 $2 \cdot D/3$, 3차원에서는 $3 \cdot D/4$ 가 된다.

여기서 D 는 대상이 된 선, 면 및 공간의 복잡성을 나타낸다. 즉, 1차원일 경우 D 가 커질수록 직선 또는 평면으로부터 기복이 심해짐을 의미한다.

본 연구에서도 피로균열경로에 대하여 기복의 정도를 정량적으로 구할 목적으로 프랙털 차원을 구하였다.

Fig. 12는 프랙털 해석을 위한 예로서, (a) 980°C와 (b) 1050°C로 열처리된 시험편의 균열진전속도가 사진의 중앙부에서 각각 35 nm/cycle정도 되는

지점의 파면의 측면을 200배의 SEM으로 촬영한 것이다. 또한 촬영한 사진의 표면균열을 따라 모사하여, (c)와 같이 모사한 균열 위에 정방형의 격자를 씌워서 균열이 지나가는 정방형의 개수를 구하였다.

프랙털 해석의 결과는 Fig. 13에 log-log스케일로 나타내었다. 이 그래프에서 직선화 처리된 각 실선의 기울기가 프랙털 차원 D 이다.

Fig. 13에서 보듯이 프랙털 차원의 값은 1050°C

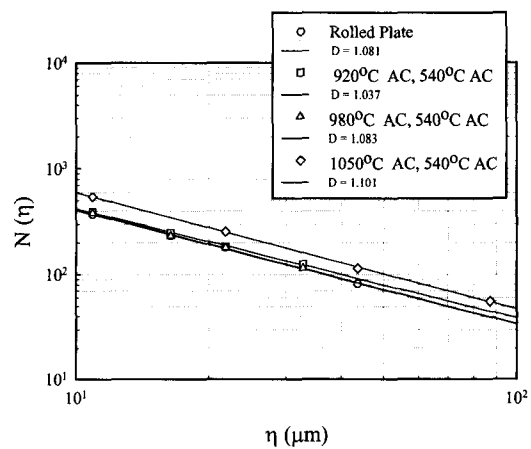
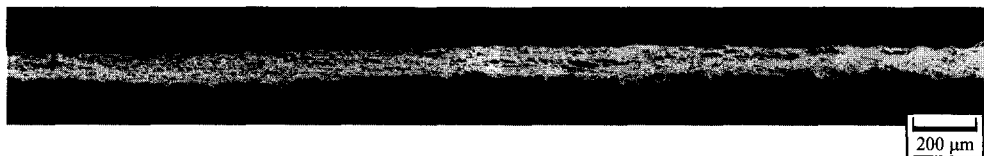
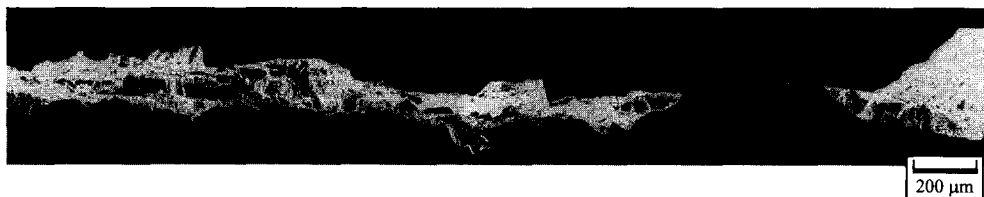


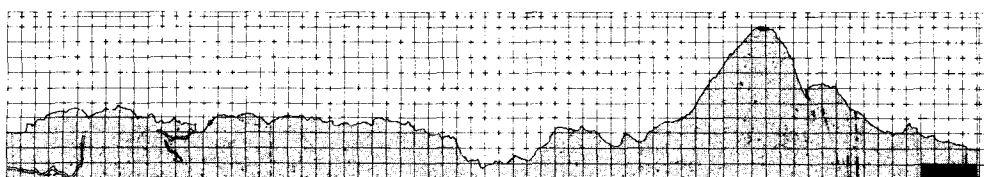
Fig. 13 Relationship between numbers of square boxes(N) and lengths of square boxes(η)



(a) 980°C AC, 540°C AC



(b) 1050°C AC, 540°C AC



(c) 1050°C AC, 540°C AC

Fig. 12 SEM micrographs and schematic views of fatigue crack pass

로 열처리된 재료에서 가장 크게 나타났으며, 980°C, 920°C 및 압연판은 유사하게 나타났다. 이것은 균열 경로의 복잡한 정도를 나타내는 것으로서 앞에서 설명한 균열 경로의 복잡성이 ($\alpha+\beta$)상의 양 및 조직에 의존함을 시사한다고 생각되어진다.

7. 결론

Ti-6Al-4V 합금을 920, 980 및 1050°C로 열처리한 결과, 미세조직의 변화가 기계적특성 및 피로 균열진전특성에 미치는 영향은 다음과 같다.

(1) 열처리에 따른 미세조직은 압연판이 등축조직, 920, 980°C는 혼합조직, 1050°C는 Widmanstätten 조직을 나타내었다.

(2) 충격흡수에너지와 연신율은 혼합조직이, 경도, 인장강도 및 항복강도는 Widmanstätten 조직이 우수하였다.

(3) 피로균열진전시험의 결과 저 ΔK 영역에서는 등축조직, 혼합조직, Widmanstätten 조직에 관계없이 유사하였으며, 고 ΔK 영역에서는 등축조직의 균열진전속도가 가장 빠르고 그 다음으로 혼합조직, Widmanstätten 조직 순으로 나타났다.

Widmanstätten 조직의 경우에는 균열진전속도의 변화폭이 크며 밴드(band)를 형성하고 있는 것을 알 수 있었다.

(4) 피로균열진전시험 후 파면관찰에서는 압연판, 920°C 및 980°C로 열처리된 재료의 조직에서 연성 스트라이에이션을 관찰할 수 있었으며, 분포양상의 차이는 α 상과 β 상이 혼합한 층상조직의 양과 분포의 차이에 의한 것으로 사료된다.

(5) 피로균열진전시험 후 피로균열경로에 대한 기록의 정도를 정량적으로 구할 목적으로 200배의 SEM으로 관찰한 사진의 프랙탈 해석 결과 프랙탈 차원 D 값은 기록이 가장 심한 Widmanstätten 조직에서 약 1.101으로 가장 크게 나타났다.

후 기

본 논문은 2000학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) Smelaser R. E., Swedlow J. L. and Williams J. C., 1977, "Analysis of Local Stresses and Strains in Ti-6Al-4V Widmanstätten $\alpha+\beta$ Microstructures," *ASTM STP 651*, pp. 200~245.
- (5) 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.
- (6) Imam M. A. and Gilmore C. M., 1983, "Fatigue and Microstructural Properties of Quenched Ti-6Al-4V," *Metall. Trans.*, Vol. 14A, pp. 233~240.
- (7) Nakasa K., Hortita M. and Liu J., 1991, "Fatigue Crack Initiation and Propagation in Ti-6Al-4V Alloy under Hydrogen Charging," *Trans. JSME A*, Vol. 57, No. 522, pp. 25~31. (in Japanese)
- (8) Dogan B. and Schwalbe K. H., 1997, "Fracture Toughness Testing of TiAl Base Intermetallic Alloys," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 56, No. 2, pp. 155~165.
- (9) Yongqing Fu, Nee Lam Loh, Andrew W. Batchelor, Daoxin Liu, Xiaodong Zhu, Jaiwen He and Kewei Xu, 1998, "Improvement in Fretting Wear and Fatigue Resistance of Ti-6Al-4V by Application of Several Surface Treatment and Coatings," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 106, pp. 193~197.
- (10) Kinya Ogawa and Takhi Nojima, 1988, "Impact Strength of Titanium Alloys," *J. Soc. Mat. Sci. Japan*, Vol. 37, No. 421, pp. 1171~1177. (in Japanese)
- (11) 서동이, 한진진, 1990, "Ti-6Al-4V 합금의 가공 열처리에 따른 조직 및 피로특성변화에 관한 연구," 대한금속학회지, Vol. 28, No. 1, pp. 23~31.
- (12) 강형구, 조현기, 1992, "Ti-6Al-4V 합금에 있어서 용체화처리 및 냉각조건에 따른 상의 미세조직변화," 대한금속학회지, Vol. 30, No. 11, pp. 1326~1333.
- (13) Charkaluk E., Bigerelle M. and Iost A., 1998, "Fractals and Fracture," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 61, pp. 119~139.
- (14) Saburo Matsuoka, Hdieshi Sumiyoshi and Keisuke Ishikawa, 1990, "Fractal Character of Scanning Tunneling Microscopic Images of Brittle Fracture Surfaces on Chromium," *Trans. JSME A*, Vol. 56, No. 530, pp. 47~53. (in Japanese)
- (15) Amthony W. Thompson, 1999, "Relations Between Microstructure and Fatigue Properties of Alpha-Beta Titanium Alloys," in *Fatigue Behavior of Titanium Alloys*, ed. R. R. Boyer, D. Eylon and G. Lutjering, TMS, pp. 23~30.