

Ti-3Al-2.5V 합금의 피로균열전파특성에 미치는 미세조직 및 온도의 영향

임병수*, 김현철**

The Effect of Microstructure and Temperature on Fatigue Crack Propagation in Ti-3Al-2.5V Alloy

B. S. Lim*, H. C. Kim**

Abstract

Ti alloys, with the advantageous tensile strength/density ratio and the chemical stability, have been used widely in the aerospace and chemical engineering industries and their usages are still expanding in various industrial areas. In the automotive industry, because of their superior merits of weight reduction and fuel saving, Ti alloys are expected to be used as various part materials including connecting rods, engine valves, springs and retainers, which are all subjected to the fatigue loads.

In this study, using Ti-3Al-2.5V, the effects of temperature and microstructure change on fatigue crack propagation has been investigated. Five different microstructures were tested at the temperatures of room temperature, 200°C, 300°C and 400°C under the same frequency 20Hz.

Some of the conclusions obtained are as follows: (1)Microstructurally, the morphology of less α -phase and finer lamellar structure of α and β -Ti showed better resistance to the fatigue crack propagation. (2)Fatigue crack growth rate increased with test temperature.

Keyword : Fatigue Crack Propagation(피로균열 전파), Electric Potential Drop Method(전위차법), Ti-alloys(티타늄 합금), Bi-modal Microstructure(혼합조직)

* 성균관대학교

** 두원공업전문대학

1. 서 론

각종 열기관 부품, 원자력 발전소의 압력용기, 핵 반응로 및 가스터빈 날개 등 많은 기계 구조물과 부품들은 작동 중 고온에서 피로하중을 받게 되는데, 이로 인한 피로 및 파괴의 진행과정은 눈에 잘 띄지 않고 돌발적이어서, 이를 미연에 방지하여 피해를 최소화하는 것은 매우 중요하다. 그러나 이러한 현실적 안전상의 측면과 공학적 중요성에도 불구하고 고온에서 금속재료의 피로균열전파 특성에 관한 연구는 실온에 비하여 상대적으로 적은 편이다. 그러나 온도가 상승하면 금속재료의 각종 기계적성질 및 피로특성은 실온에 비하여 매우 큰 차이를 나타내므로 고온에서 작동되는 부품의 수명예측이나 안전성 진단은 실온에서 얻어진 연구결과만으로는 어려운 실정이다. 또한 금속재료의 기계적성질을 향상시키기 위하여 흔히 행해지는 열처리에는 미세조직을 변화시켜서 피로특성 변화를 야기시키므로, 고온에서 이에 대한 연구가 필요한 실정이다.

티타늄 합금은, 약 400℃ 보다 저온에서 내식재료로 이용되는, 스테인리스강(ANSI 304)과 비교하였을 때 비강도(강도/밀도)가 높다⁽¹⁾. 이러한 장점 때문에 티타늄 합금은 구조용 재료로서 항공, 우주, 군수분야, 자동차, 화학장치, 의료분야 등에 사용되고 있으며, 아직도 미개척 분야에 널리 이용될 가능성이 크다.

특히, 가스터빈 엔진의 임펠러(impeller), 압축기 디스크(compressor disc), 블레이드(blade) 등의 재료로 널리 이용되고 있으며, 최근에는 자동차 부품에 응용되고 있다. 자동차에서는 밸브(valve), 밸브 리테이너(valve retainer) 등에 티타늄 합금의 단조품이 이용되고 있다⁽²⁾.

티타늄 합금은 비강도 뿐 아니라 비피로강도(피로강도/밀도) 역시 우수하기 때문에 반복적인 하중이 걸리는 자동차 부품에 특히 그 사용이 적합하다. 즉 티타늄 합금은 실온 뿐 아니라 고온에서도 피로강도가 인장강도의 0.55~0.65 정도를 유지하기 때문에 기존 철강재료의 0.35~0.50 정도에 비하여 월등히 높다⁽³⁾. 따라서 고온에서 내피로성이 요구되는 엔진부품의 대체 소재로서 유망하다 하겠으며, 이러한 티타늄 합금을 사용함으로써 인하여 자동차의 경량화 및 엔진성능의 향상을 기대할 수 있겠다.

이에 본 연구에서는 최근 개발된 Ti-3Al-2.5V 합금을 이용하여 실제 작동온도를 포함하는 실온으로부터 400℃의 온도범위에서, 열처리 및 온도변화가 피로균열 전파 특성에 미치는 영향을 실험적으로 조사하고자 한다.

2. 실험방법

본 연구에서 사용한 재료는 일본 Daido Steel사에서 개발한 열간 압출된 Ti-3Al-2.5V합금이며, 기계가공성을 향상시키기 위하여 황(S) 및 REM(Rare Earth Metal ; Ce,La등)을 첨가한 것으로, 그 화학성분은 Table 1과 같다.

Table 1. Chemical composition of Ti-3Al-2.5V alloy

Element	Al	V	N	C	H	Fc	S	REM	Ti
wt. %	3.5	2.4	0.05	0.20	0.015	0.4	0.23	0.29~1.3	Bal.

티타늄의 결정구조는 885℃ 이하에서는 조밀육방정(hexagonal closepacked, hcp)의 α 상이며, 885℃ 이상에서는 체심입방정(body centered cubic, bcc)의 β 상이다. 그러나 순수한 티타늄에 합금 원소를 첨가하면 원소의 종류에 의해 α/β 변태 온도가 변화하고 또 변태온도에 폭이 생겨서 $\alpha + \beta$, 2상 영역이 나타나게 된다. 이 들 첨가 원소에 따라 각종 합금이 개발되어 있지만, 실온에서의 상에 따라 α 티타늄합금, $\alpha + \beta$ 티타늄합금, β 티타늄합금으로 대별된다. 본 연구에서는 $\alpha + \beta$ 티타늄합금을 사용하였으며, 원재료는 미세조직의 대부분이 기지 전체에 걸쳐 침상의 transformed β 조직으로 이루어져 있다. 미세조직의 변화를 얻기 위하여 우선 원재료를 $\alpha + \beta$ 영역에서 단조하여 pan cake 형태로 제조한 다음 아래와 같이 서로 다른 온도에서 가열한 후 냉각하여 마르텐사이트 조직을 구하였다. 이후 재차 가열과정을 거쳐 변화된 아래의 조직들을 얻었다.

원재료	960℃(1시간) → 수냉 → 700℃(3시간) → 공냉 → 조직 I
	950℃(1시간) → 수냉 → 500℃(3시간) → 공냉 → 조직 II
	940℃(1시간) → 수냉 → 700℃(3시간) → 공냉 → 조직 III
	900℃(1시간) → 수냉 → 700℃(3시간) → 공냉 → 조직 IV
	880℃(1시간) → 수냉 → 500℃(3시간) → 공냉 → 조직 V

조직 I, II, III은 β 영역에서 용체화 처리한 후 비교적 빠른 속도로 냉각하여 층상조직을 얻은 후 α 상이 석출되도록 하였고, 조직 IV, V는 $\alpha + \beta$ 영역에서 각각 용체화 처리한 것으로 등축의 α 상 체적 분율이 서로 다른 조직이 되도록 열처리한 것이다.

인장시편은 KS B 0801에 준하여 3호 시편으로, 피로시편은 ASTM E647-93¹⁴⁾에 의하여 CT시편으로 제작하였다. 그 치수 및 형상은 각각 Fig. 1, 2와 같으며, 시편의 가공 이전에 모든 열처리를 마쳤다.

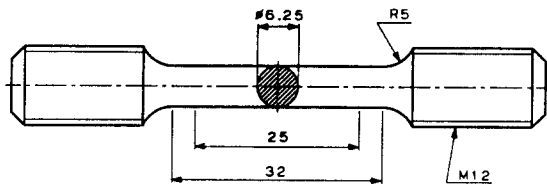


Fig. 1 Geometry of tension specimen

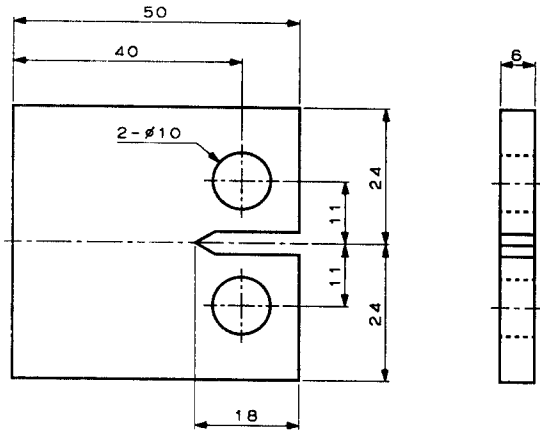


Fig. 2 Geometry of compact tension specimen

실험에 사용된 인장시험기는 INSTRON 4206이며, 변형속도는 $10^{-3} S^{-1}$ 으로 행하였다. 피로실험은 미세조직별 시편에 대하여 ASTM E647-93에 제시된 방법에 준하여 수행하였다. 실험중 P_{max} 의 크기는 항상 소규모 항복조건을 만족하도록 하였으며, 일정 응력비($R=0.1$) 하에서 Table 2와 같은 조건별로 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 피로시험기는 일본 Saginomiya사 제품의 전기저항식 가열 고온chamber가 장착된 10ton 용량의 Dynamic Servo Fatigue Testing Machine이

며 하중은 $\pm 1kg$ 내로, 온도는 $\pm 2^{\circ}C$ 내로 조절할 수 있다.

Table 2. Fatigue test conditions

Specimen	Microstructure	Temperature($^{\circ}C$)
A	I	room temp.
B		400
C		200
D	II	300
E		400
F	III	room temp.
G		200
H		300
I	IV	400
J		room temp.
K		200
L	V	300
M		400
N		200
O	V	300
P		400

Cycle진행에 따른 피로균열길이의 측정은 실온에서 0.01mm의 정밀도를 갖는 이동식 현미경에 의한 방법과 전위차법(Electric Potential Drop Method : E.P.D.)에 의한 방법을 함께 사용하였고, 이로부터 고온에서 균열길이를 계산하는데 필요한 Calibration Curve를 구하였다. 본 연구에 사용된 E.P.D.장치는 미국 Keithley사 제품의 Model 182 digital voltmeter와 국내 E.D.Engineering사의 30V, 20A 용량의 정전류 공급장치로 구성되어있다. Fig.3은 본 실험에서 채택한 Jonson에 의하여 제시된 시편의 전류공급위치 및 전압측정위치를 나타내고 있다⁵⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 열처리 및 미세조직

열처리 별로 얻어진 조직 I ~ V를 살펴보면 모두 등극등축한 α 조직과 층상의 $\alpha + \beta$ 조직이 혼합된 조직으로 되어 있으며, 조직 I에서 조직 V로 변함에 따라 α 등축정의 체적비가 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 열처리 전과 후에 얻어진 대표적인 조직의 사진을

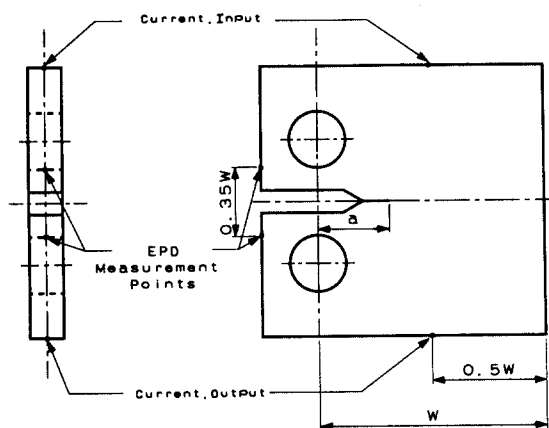
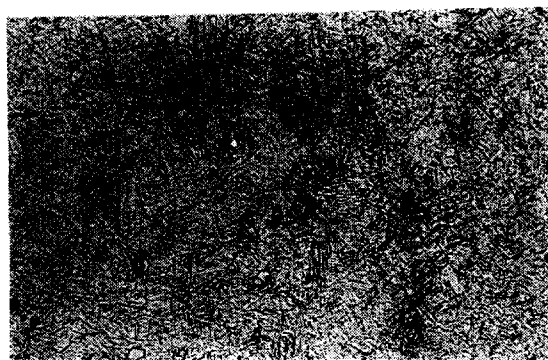
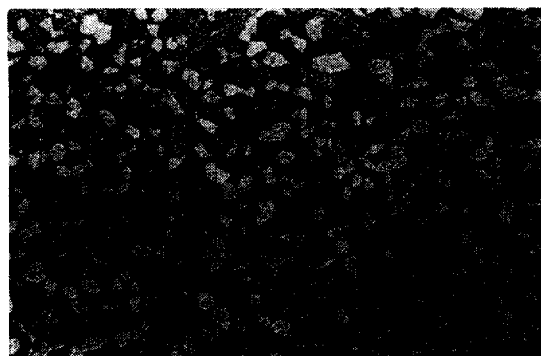


Fig. 3 CT Geometry and potential wire placement locations

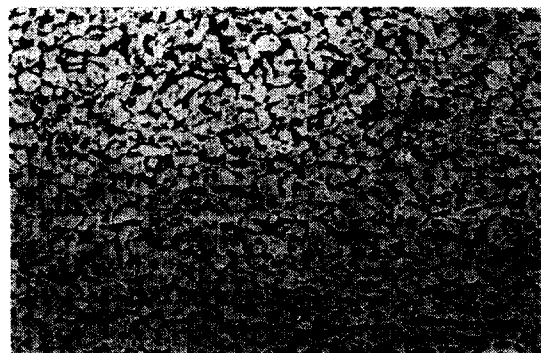
Fig. 4에 나타내었다. 사진 (a)는 열처리 전 조직사진으로 기지 전체에 걸쳐 침상의 transformed β 조직을 이루고 있음을 보여 주고 있다. 사진 (b)는, 조직 II로, 950°C (β -Ti 구간)에서 용체화 처리된 후 급냉하고 그 후 500°C (α -Ti 구간)에서 가열된 조직으로, 사진의 회고 둥근 부분은 석출된 α -Ti상을, 검은 부분은 침상의 transformed β 와 α 상이 미세하게 층을 이루는 층상 조직을 보여주고 있다. 사진 (c)는, 조직 V로, 880°C ($\alpha + \beta$ 구간)에서 가열한 후, 사진 (b)의 시편과 같은 후속 열처리된 조직사진으로 두 조직이 비슷하나, α 조직이 더 크고 많아졌다.



(a) Before heat treatment ($\times 200$)



(b) Microstructure II ($\times 400$)



(c) Microstructure V ($\times 400$)

Fig. 4 Optical micrograph of microstructures

이와 같이 α 조직과 층상의 $\alpha + \beta$ 가 혼합된 복합 미세조직을 얻는 이유는, 일반적으로 고온피로, creep 등에 이러한 조직이 더 좋은 성질을 나타내기 때문이다⁶⁾. Table 3은 Fig. 4에서 제시한 미세조직의 크기와 체적분율이다. 조직 II에 비하여 조직 V의 α -Ti 조직이 $31 \times 10^{-4} \text{mm}$ 정도 커지고 양이 45% 정도 많아졌음을 알 수 있다.

Table 3. Microstructures of Ti-3Al-2.5V alloy after different heat treatments

Microstructure	Heat Treatment Condition	Grain Size Dia. ($\times 10^{-4} \text{mm}$)	ASTM G.S. Number	Description	Volume Fraction of α phase (%)
II	950°C (1hr) \rightarrow W.Q. \rightarrow 500°C (3hrs) \rightarrow A.C.	47	12.2	fine	25
V	880°C (1hr) \rightarrow W.Q. \rightarrow 500°C (3hrs) \rightarrow A.C.	78	10.7	coarse	70

Table 4는 미세조직 및 온도변화에 따른 인장실험 결과이다. 원소재의 실험에서의 항복강도와 인장강도는 각각 770, 850MPa 이었고, 연신율은 13% 이었다. 열처리한 시편의 조직별, 온도별 항복강도의 변화를 살펴보면, 실온의 경우를 제외하고는, 혼합조직 V가 가장 강한 것으로 나타났다. 200℃에서 조직 II의 항복강도를 기준으로 하여 조직 V는 약 22%에 해당하는 높은 상승치를 보였으며, 300℃, 400℃에서도 각각 7%, 3% 증가한 항복강도를 나타내었다.

Table 4. Mechanical properties of Ti-3Al-2.5V alloy at various temperatures

Temp. (°C)	Mech. Prop.	σ_{ys} (MPa)		U.T.S.(MPa)		% Elongation	
		Microstructure		Microstructure		Microstructure	
		II	V	II	V	II	V
room temp.		760	730	850	820	18.3	20.5
200		43	527	540	617	24.5	25.5
300		425	455	535	540	21.3	21.9
400		409	422	508	512	19.3	20.3

인장강도의 조직별, 온도별 변화 역시 항복강도와 비슷하여, 200℃에서 조직 II의 인장강도를 기준으로 하여 조직 V는 14%에 해당하는 높은 값을 나타내었으며, 300℃, 400℃에서도 약간 높은 것으로 나타났다. 원재료와 조직 II, V의 항복강도와 인장강도의 온도별 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

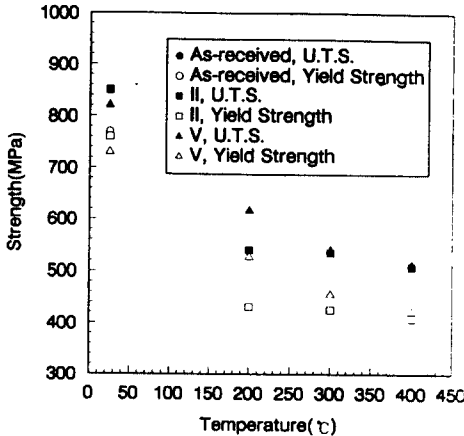


Fig. 5 Yield strength and U.T.S. vs. Temperature in Ti-3Al-2.5V alloy, microstructure II and V

조직별 연신율의 변화를 보면, 실온의 경우 조직 II, V는 원재료에 비해 각각 41%, 58% 높은 값을 보였으나 온도가 증가함에 따라 조직 II와 조직 V의 연신율은 거의 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 기계적 성질은 조직별로 비교할때, 혼합조직 V가 제일 우수한 것으로 나타났다.

3-2. 피로시험

Fig. 6은 실험방법에서 기술한 E.P.D.방법으로 고온에서 균열길이 측정을 위하여 조사된 calibration curve 결과이다. 그림에서 얻어진 $V/V_{ref.}$ 와 a/W 의 관계식은 실온에서 5회의 실험을 통하여 얻어진 결과의 평균값으로서 수치해석 프로그램인 Mathematica를 이용하여 구한 것이다. $V_{ref.}$ (기준전압) 값은 $a/W=0.275$ 일때의 V (전압)값이며, cycle진행에 따라 균열길이가 0.5mm 진전하였을때, 즉 a/W 가 0.0125 증가할때 마다 V (전압)를 측정하여 각 균열길이에 대한 관계를 구한 것으로, 가장 적합한 curve fitting 식^{4, 5)}은 3차식으로 아래와 같이 정리 되었다.

$$\frac{V}{V_{ref.}} = 1.97095 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 1.20446 \left(\frac{a}{W}\right)^2 + 1.31585 \left(\frac{a}{W}\right) + 0.502266$$

5회에 걸친 a/W 에 대한 $V/V_{ref.}$ 값의 표준편차는 0.001 ~ 0.01 정도로 나타났으며, 이는 실제 균열길

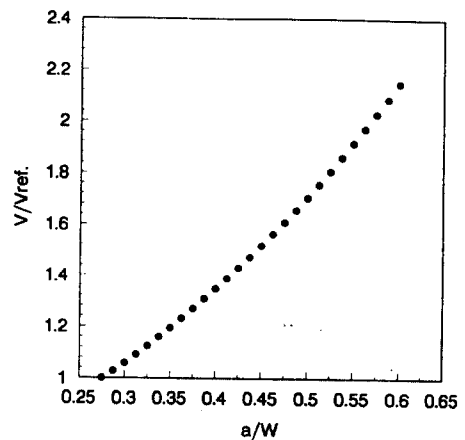


Fig. 6 $V/V_{ref.}$ vs. a/W curve at room temperature in Ti-3Al-2.5V alloy

이와 비교할때 0.2~2% 정도의 오차를 의미한다. 따라서, 실험에 따르게 되는 오차를 고려하면, 본 실험에 사용한 calibration curve 는 균열길이 환산에 충분한 신뢰성을 가지고 있다 하겠다.

Fig. 7~9는 β 영역에서, Fig. 10, 11은 $\alpha + \beta$ 영역에서 용체화처리한 시편으로, 실험온도가 실온, 200°C, 300°C, 400°C일때 조사한 각 미세조직별 $da/dN - \Delta K$

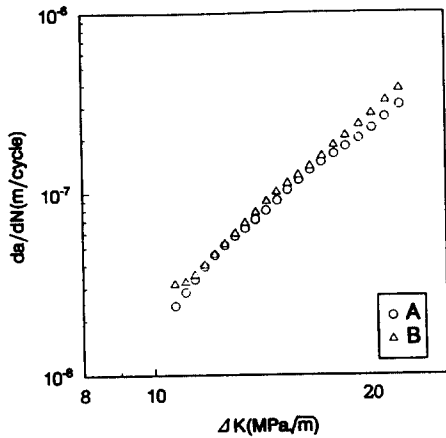


Fig. 7 da/dN vs. ΔK curve of microstructure (I) for different temperature (Table 2)

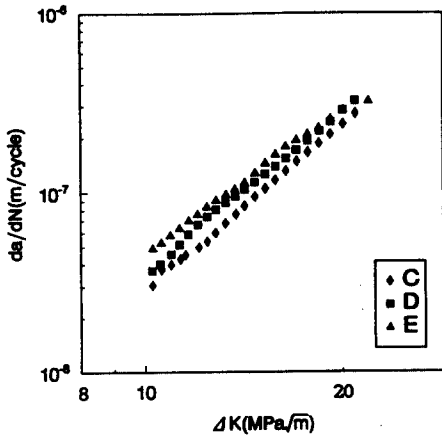


Fig. 8 da/dN vs. ΔK curve of microstructure (II) for different temperature (Table 2)

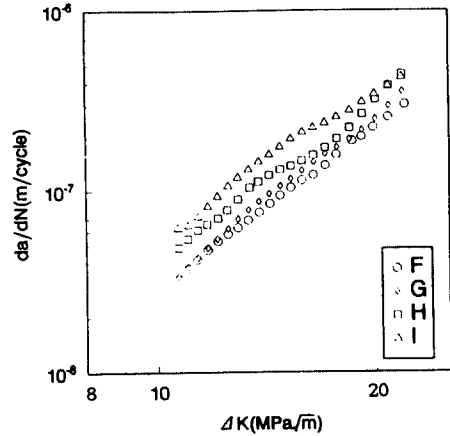


Fig. 9 da/dN vs. ΔK curve of microstructure (III) for different temperature (Table 2)

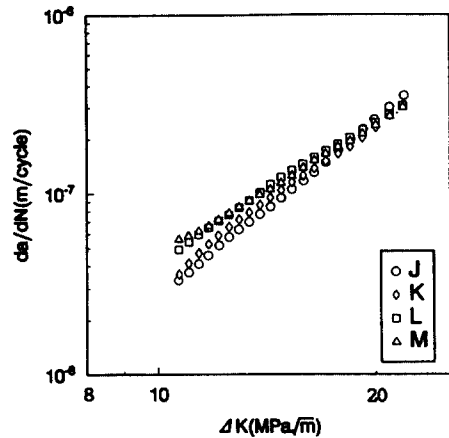


Fig. 10 da/dN vs. ΔK curve of microstructure (IV) for different temperature (Table 2)

곡선이다. 모든 조직에서 공통적으로 온도가 증가함에 따라 균열진전속도는 증가하였다.

즉 Fig. 7은 조직 I에서 실험온도가 실온에서 400°C로 증가함에 따라 전체 ΔK 범위에서 균열진전속도 da/dN 이 증가함을 나타내고 있으며, 미세조직 II, III, IV 및 V의 경우도 조직 I과 마찬가지로, 온도가 증가함

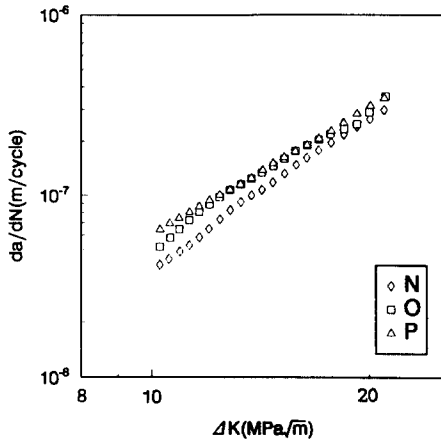


Fig. 11 da/dN vs. ΔK curve of microstructure(V) for different temperature(Table 2)

에 따라 균열진전속도가 모두 증가하는 같은 경향을 보여주고 있다(Fig. 8~Fig. 11).

위에서 고찰한 바와 같이 온도가 증가하면 강도가 감소하고 균열 진전율이 증가하기 때문에 고온상태에서 작동되는 부품 및 기계구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 고온강도, 미세구조적 안전성 그리고 피로균열 성장 저항성 등의 성질을 골고루 갖추어야 하며⁽⁷⁾, 피로균열 성장기구에 대한 정확한 지식이 필요하다. 그러나 Ti-Al계 합금의 피로손상기구는 아직까지 정확하게 규명되어 있지 않으므로⁽⁸⁾ 이에 대한 폭 넓은 연구가 앞으로 더 필요한 실정이다.

Fig. 12~Fig. 15는 각 온도별로 미세조직의 차이에 따른 da/dN- ΔK 곡선이다. 실험결과를 살펴보면, ΔK 값이 큰 범위에서는 다소 차이가 있으나, 대체적으로 조직 I에서 V로 미세조직이 변환에 따라 균열진전속도가 증가하는 것으로 조사되었다. 즉 Ti합금의 미세복합조직 중에서도 α 상의 체적분율이 줄고 β 상으로 구성되어 있는 $\alpha + \beta$ 상의 분율이 증가하면 균열진전 저항력이 우수해 진다는 것을 입증하는 것이다.

이미 발표된 Ti-6Al-4V합금의 피로파괴거동에 대한 연구결과^(9, 10)에 의하면, 혼합조직의 경우 외부에서 가해지는 응력에 의해 공동(void)이 생성된 후 성장하고 합체하는 것 보다는 피로하중이 가해지는 동안 공동이 지

속적으로 성장하는 것으로 알려져 있다. 이때 α 상과 β 상조직 간의 계면이 공동의 주된 생성처로서 작용하지만, α 상은 균열의 지속적인 성장을 억제하는 역할도 하는 것으로 알려지고 있다^(9, 10). 따라서 피로균열 전파를 미세조직의 공동생성과 균열전파 관점에서 보면, 등축의 α 상이 많으면 균열의 핵이 되는 공동의 생성과 성장이 어렵게 되고, β 상조직이 많으면 균열의 전파가 어렵게

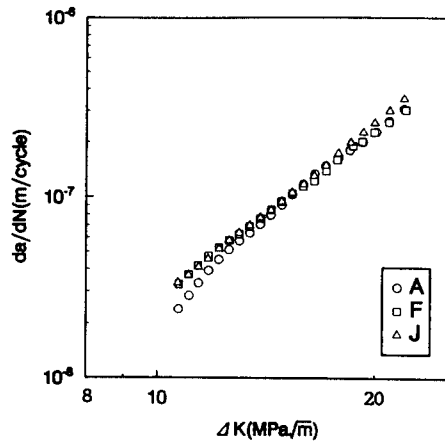


Fig. 12 da/dN vs. ΔK curve for microstructure changes at room temperature(Table 2)

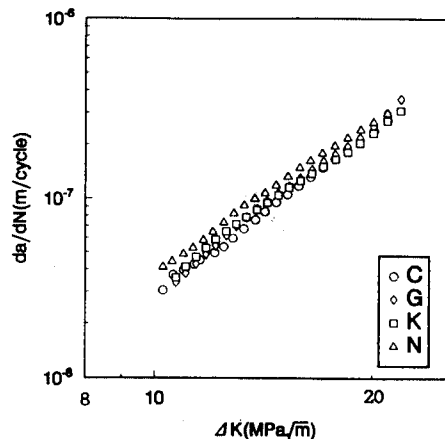


Fig. 13 da/dN vs. ΔK curve for microstructure changes at 200°C(Table 2)

된다. 그러므로 전반적인 피로균열의 저항을 유리하게 높여 줄 수 있는 등축상 α 의 적절한 체적율이 존재할 것으로 생각된다.

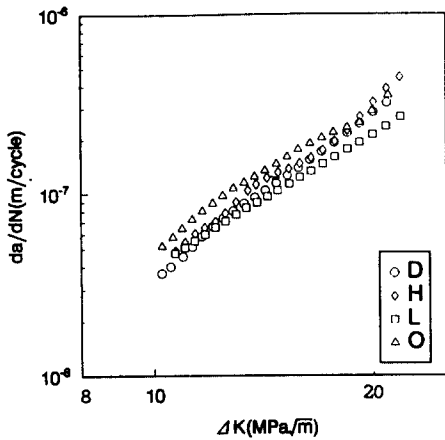


Fig. 14 da/dN vs. ΔK curve for microstructure changes at 300°C (Table 2)

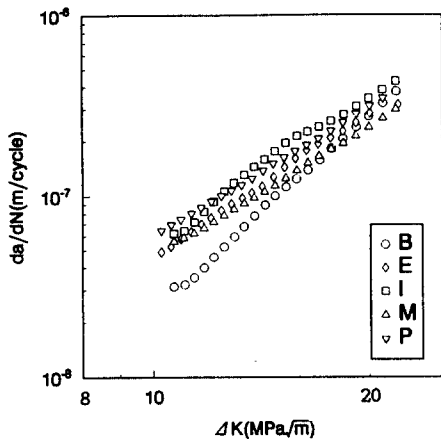


Fig. 15 da/dN vs. ΔK curve for microstructure changes at 400°C (Table 2)

4. 결론

이상의 실험결과로부터 Ti-3Al-2.5V 합금에 대하

여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로균열진전 저항력의 차이는 α 상의 체적분율의 차이에 따른 것으로 α 상이 감소 할수록 즉 $\alpha + \beta$ 의 층상 조직이 증가할수록 피로균열전파 속도가 감소하는 것으로 나타났는데 이는 $\alpha + \beta$ 의 층상조직이 균열전파 경로를 방해하는 역할을 하기 때문이다.
- (2) 모든 실험조건에서, 온도에 따른 균열진전 속도의 영향은 온도가 증가할수록 균열 진전속도가 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 실온의 경우를 제외하고는, α 상이 많은 미세조직 V가 $\alpha + \beta$ 의 층상조직이 증가한 미세조직 II 보다 더 강한 것으로 나타났으며, 온도가 증가함에 따라 그 변화의 폭은 줄어들었다.

후 기

이 논문은 성균관대학교의 1995년도 성균학술 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 이지환, 이정중, 김병일, 배차현 편저, "비철금속재료", 원창출판사, pp. 414~460, 1993
2. 이용태, 현용택, "자동차 부품용 티타늄 합금", 한국자동차공학회지, 제 15권 제4호, pp.8~13, 1993
3. 현용태, 이용태, "자동차용 티타늄 합금 부품의 개발 현황 및 전망", 기계와 재료, Vol. 4, No. 3, pp. 31~40, 1992
4. "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", ASTM Standard E647-93, pp.679~706, 1993
5. K.J.Marsh, R.A.Smith and R.O.Ritchie, FATIGUE CRACK MEASUREMENT : TECHNIQUES AND APPLICATIONS, EMAS, pp. 11~28, 1991
6. G.R.Yoder, L.A.Cooley and T.W.Crooker, "Observations on Microstructurally Sensitive Fatigue Crack Growth in Widmanstatten Ti-6Al-4V Alloy", Met. Trans. A, Vol.8A,

pp.1737~1743, 1977

7. Basant K. Parida and Theodore Nicholas, "Frequency and hold time effects on crack growth of Ti-24Al-11Nb at high temperature", *Material Science and Engng.*, A153, pp. 493~498, 1992
8. W.O.Soboyejo, J.E.Deffeys and P.B.Aswoth, "Investigation of room-and elevated-temperature fatigue crack growth in Ti-48Al", *Material Science and Engineering.*, A138, pp.95~101, 1991
9. M.A.Greenfield and H.Margolin, "The Mechanism of Void Formation, Void Growth, and Tensile Fracture in an Alloy Consisting of Two Ductile Phases", *Met. Trans. A*, Vol. 3A, pp.2649~2659, 1972
10. H.Margolin, and Y.Mahajan, "Void Formation, Void Growth and Tensile Fracture in Ti-6Al-4V", *Met. Trans. A*, Vol. 9A, pp.781~791, 1978