

# Ti-6Al-4V의 피로균열성장거동에 관한 연구(I)

우홍식<sup>†</sup> · 한지원<sup>\*</sup>

동국대학교 안전공학과 · 호서대학교 기계공학부  
(2001. 8. 6. 접수 / 2001. 10. 22. 채택)

## A Study on the Fatigue Crack Growth Behavior in Ti-6Al-4V Alloy(I)

Heung-Sik Woo<sup>†</sup> · Ji-Won Han<sup>\*</sup>

Department of Safety Engineering, Dongguk University · Department of Mechanical Engineering, Hoseo University  
(Received August 6, 2001 / Accepted October 22, 2001)

**Abstract :** Fatigue crack growth behaviour of Ti-6Al-4V alloy is investigated in air and salt solution environment at room temperature and 200°C. Fatigue crack growth rate is known to be fast for the formation of corrosive product in hot salt environment. For the effect on corrosion fatigue crack growth behaviour of region II, fatigue crack growth rate in atmosphere had a little gap to both case, 200°C and room temperature. However, it showed very fast tendency in salt corrosive atmosphere, and it was remarkably accelerated in 200°C temperature salt environment. When  $\Delta K$  was approximately  $30MPa\sqrt{m}$ , fatigue crack growth rate had a little difference between at room temperature and at 200°C high temperature, however in case of salt corrosive environment, the room temperature was 3.5 times faster and 200°C high temperature for 16 times than air environment respectively.

**Key Words :** corrosion fatigue, hot salt corrosion fatigue, low cycle fatigue

### 1. 서 론

Ti-6Al-4V제는 1950년대에 개발된 이후, 전체 Ti-합금 수요의 50% 이상을 차지하고 있으며 주로 항공기 터빈 엔진 날개나 자동차의 엔진 밸브 등 각종 열기관의 부품 등으로 사용되어 왔으며 최근에는 인체의 인공관절로도 수요가 증가하고 있다.<sup>1)</sup>

그리고 최근에 고온재로 개발된 많은 합금 중에서 특히, 티타늄합금은 기존의 자동차용 소재에 비하여 고온에서도 비강도가 타 소재에 비하여 월등히 높기 때문에 소재 가격이 고가임에도 불구하고 자동차의 경량화 소재로 오래 전부터 주목받아 오고 있다. 또한 티타늄과 티타늄합금은 타 소재에 비해 신뢰성이 크며 아크와 진공 속에서 2~3중의 제조공정을 거치기 때문에 결함이 거의 없다고 알려져 있다.

그러나 대부분의 Ti합금은 고온염하에서의 응력 부식균열(hot salt stress corrosion cracking; HSSCC)현

상에 매우 민감한 것으로 알려져 있으며,<sup>2,3)</sup> 특히  $\alpha$ - $\beta$  Ti합금은 고온에서 사용되는 다른 Ti합금에 비해 HSSCC에 덜 민감한 것으로 알려져 있으나, Al의 함량이 증가됨에 따라서 HSSCC에 대한 감수성은 크게 증가하는 것으로 보고되고 있다.<sup>4)</sup> 그러나 대부분의 기계 부품은 사용 중에 반복하중을 받게 되므로 정하중에 의한 HSSCC보다는 반복하중에 의한 고온염 부식피로(hot salt corrosion fatigue; HSCF)에 대한 연구가 절실히 필요한 실정이다. 한편, 이에 대한 적용의 필요성이 요구되는 실제 예로서는 항공기의 엔진 부위에 부착된 염에 의한 엔진 부품의 손상을 들 수 있다.<sup>5)</sup>

그리고 Ti합금에 대한 고온염 부식환경에 대한 파괴역학관점에서의 피로균열성장거동 특성을 연구하는 것은 항공 우주산업기기 등의 안전성 및 보수 유지, 건전성 평가에 매우 절실한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Ti-6Al-4V의 실제 사용온도는 400°C 이하이므로 실온, 200°C 환경에서 각각 5%의 KCl과 LiCl을 혼합한 수용액을 시험편에 분사시켰을 때의 고온염 부식피로균열성장특성을 조사

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
woohs@mail.dongguk.ac.kr

하여 실험온도 변화에 따른 기계적 성질의 변화와 Ti-6Al-4V의 열처리에 따른 미세조직의 변화가 고온염 부식피로균열성장거동에 미치는 영향을 비교, 검토하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 시험편

본 실험에 사용된 재료는 미국의 티타늄 합금 제조회사인 TIMET사에서 제작된, annealed된 Ti-6Al-4V 재료써 비강도가 탄소재에 비하여 월등히 높으며, 또한 내식성, 및 내열성이 우수한 특징을 가지며 항공우주산업분야나 로켓 chamber, 잠수함의 외각재, 자동차의 valve계통, 커넥팅로드 등에 주로 사용되며 그 화학적성분은 Table 1에 나타내었다.

원재료는 미세조직의 대부분이 등축정(equi-axed)  $\alpha$ 상이었으며 이것을 본 연구에서는 조직 I이라 부른다. 미세조직의 변화를 얻기 위하여 우선 조직 I을 아래와 같이 서로 다른 온도에서 열처리를 실시하여 조직 II와 조직 III를 얻었다. 여기에서 조직 II를 얻은 일련의 열처리 과정은 항공기 부품 등의 제조시 실제 이용되고 있는 과정이며,<sup>6)</sup> 조직 III의 열처리 과정은 조직 II의  $\alpha$ 등축정 체적분율을 변화시키기 위한 이유로 채택하였다.

조직 I  $\left\{ \begin{array}{l} 954^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{수냉} \rightarrow 704^{\circ}\text{C}(2\text{시간}) \rightarrow \text{공냉} \rightarrow \text{조직 II} \\ 975^{\circ}\text{C} \rightarrow \text{수냉} \rightarrow 500^{\circ}\text{C}(2\text{시간}) \rightarrow \text{공냉} \rightarrow \text{조직 III} \end{array} \right.$

인장시험편은 KS B 0801에 준한 3호 시험편으로 하였으며, 피로시험편은 ASTM E 647-93에 의하여 CT시험편으로 제작하였으며 그 치수 및 형상은 Fig. 1과 같다.

### 2.2. 실험 및 측정장치

인장실험은 INSTRON 4206으로 행하였으며 피로 시험은 본 연구자들이 자체설계, (주)신원테크에서 보완, 설계 제작한 공압식 lever형 시험기를 사용하였으며 ASTM E 647-93에 제시된  $\Delta P$ -일정 피로실험법을 따라 피로실험을 수행하였다. 실험중  $P_{max}$

Table 1. Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy (\* unit : ppm)

Element	Al	V	C	Fe	N	H	O	Ti
wt.%	6.1	3.9	0.12	0.18	0.10	75*	0.11	Bal.

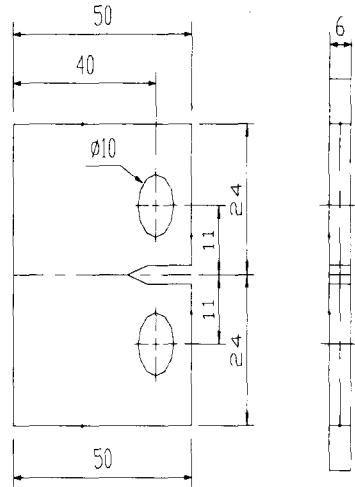
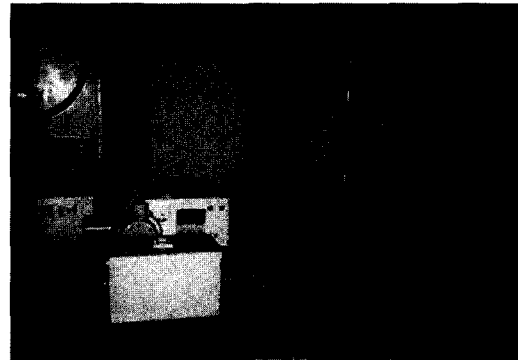
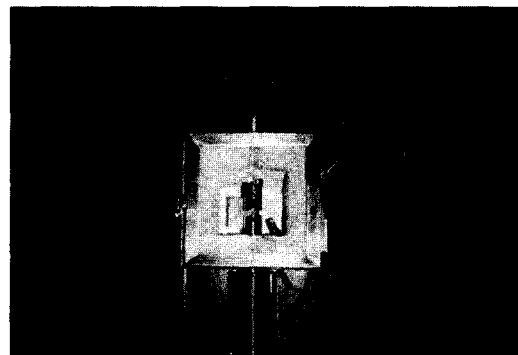


Fig. 1. CT Geometry (unit : mm)

의 크기는 소규모 항복조건을 만족하도록 하였으며, 일정 응력비( $R=0.08$ )하에서 하중반복속도는 0.2Hz, 실험 온도는 실온, 200°C에서 반복주기하중은 사다



(a) Corrosion fatigue test and the rest equipment



(b) The shape of high temperature chamber

Fig. 2. Corrosion fatigue test system

리풀과형으로 하여 피로실험을 진행하였다. 그리고 실험환경은 앞의 조건을 동일하게 하면서 대기환경에서의 피로실험 및 시험편에 염을 분사하는 고온염 부식피로에 대한 실험을 수행하였다.

피로예비균열은 기계가공 노치로부터 2mm를 넣었으며 실험시에 사용한 고온조는 설정온도에서  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 오차를 갖는 성능을 갖고 있다. 한편, 고온조의 전면에는 강화유리를 부착하여 이동식 현미경으로 균열길이의 측정이 가능하게 하였으며 정량펌프에 timer를 설치하여 각각 5%의 LiCl과 KCl 공정염 수용액을 매 5분마다 1초씩 약 10cc의 부식액을 고온조내의 노즐을 통하여 시험편의 표면에 직접 분사하였다. Fig. 2는 시험기와 고온조의 모습을 나타내었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

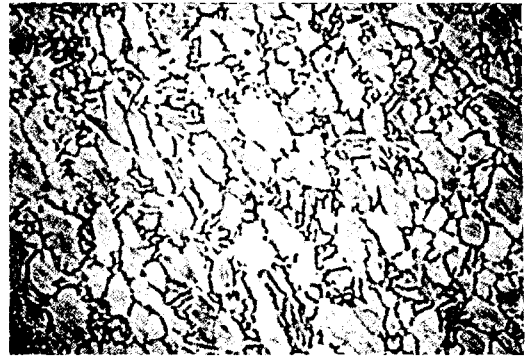
#### 3.1. 미세조직 및 인장강도

Fig. 3은 조직 I, II, III의 사진이다. 사진(a)는 조직 I으로서, 등축정 모양(equi-axed)인  $\alpha$ 상이 대부분이며  $\alpha$ 상 주변으로 검게 나타난  $\beta$ 상이 약간 보이는 조직이다.

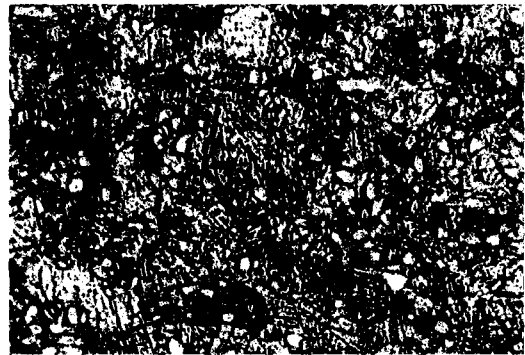
사진 (b)는 조직 II으로서 기지(matrix)는  $\alpha$ 와  $\beta$ 상이 층상조직을 이루고 있는 혼합조직(bi-modal structure)이며, 그 안에 등축정  $\alpha$ 가 분포하고 있다.

사진 (c)는 조직 III로서 조직 II와 마찬가지로 혼합조직이나, 등축상의 결정립의 크기가 보다 미세화되었고 전체  $\alpha$ 의 양도 적어진 점이 조직 II와의 차이점이다. 조직 III가 조직 II에 비하여  $\alpha+\beta$ 의 층상조직이 증가한 것은 초반 열처리과정 중 마르텐사이트를 얻기 위한 가열온도가 상태도  $\alpha+\beta$ 지역에서의 온도차이에 따른 각 상의 분율차이를 급격하게 만드는 온도구간에 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

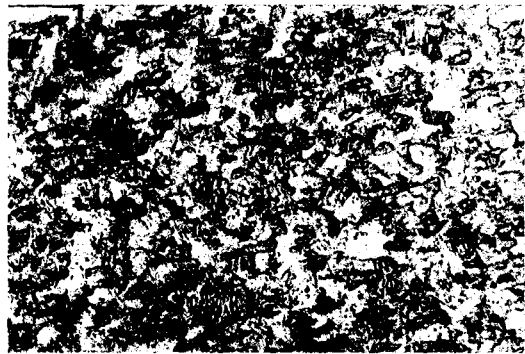
Table 2는 미세조직 및 온도변화에 따른 인장실험의 결과이다. 조직별 온도별로 항복강도의 변화를 살펴보면, 혼합조직 III이 가장 강한 것으로 나타나 있다. 실온에서는 조직 I의 항복강도를 기준으로 할 때, 조직 II와 III의 항복강도는 증가하는 경향이 나타났으며,  $200^{\circ}\text{C}$ 에서도 이와 같은 경향을 나타내었다. 또한 인장강도의 조직별, 온도별 변화 역시 항복강도의 변화와 비슷한 경향을 나타내고 있다. 그러나 조직별 연신율의 변화를 보면, 조직 II는 조직 I과 비슷한 경향을 나타내나 조직 III의 연신율은 조



(a) Equi-axed, I



(b) Bi-modal, II



(c) Bi-modal, III

Fig. 3. Optical micrograph of microstructure

Table 2. Mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy at various temperatures

Mech. Prop.	$\sigma_y$ (MPa)			UTS (MPa)			Elongation (%)		
	Micro structure			Micro structure			Micro structure		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
실온	843	973	1063	905	1022	1187	20	19	14
$200^{\circ}\text{C}$	628	694	862	736	818	1031	19	18	15

직 I에 비하여 저하되고 있음을 알 수 있다.

따라서, 이러한 결과를 토대로 하면 조직 III는 조직 I, II에 비교하여 취성을 갖는다고 판단되어 균열 성장에 대한 저항성이 작을 것으로 생각된다.

한편, 등축정  $\alpha$ 상은 연성, 균열생성에 대한 저항성이 우수하며, 층상조직은 강도, 내creep성, 파괴인성, 균열의 전파에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타나 있으므로<sup>7)</sup> 이들 두 조직이 혼합된 혼합조직 II과 III, 특히 층상조직이 많은 조직 III는 조직 II보다 강도가 좋으며 고온에서 타 조직에 비해 우수한 성질을 나타낸다 하겠다.

### 3.2. 저주기 및 고주기 피로균열성장거동에 관한 비교, 고찰

Fig. 4는 조직 II에 대해서 본 연구와 동일한 조건에서, 다만 하중반복속도를 고주기인 20Hz로 실시한 김<sup>8)</sup>의 연구결과와 하중반복속도를 저주기인 0.2 Hz로 실시한 본 연구결과와의  $da/dN-\Delta K$ 관계를 비교, 제시한 것이다.

고주기 피로실험일 경우,  $\Delta K$ 가 약  $19 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  이하인 near threshold 영역에서는 200°C 대기환경이 실온대기환경보다 피로균열성장속도가 약 1.5배 정도 빠르게 나타났으나 피로균열의 안정성장영역인 II

영역에서의 피로균열성장거동은 실험온도와는 상관없이 거의 일치하게 나타났다. 그러나 저주기 피로 실험인 경우에는 실험시의 하중이 고주기 피로실험보다 크므로서 near threshold 영역이 넓게 나타나지 않았으나, II영역에서는 200°C 대기환경이 실온대기 환경보다 피로균열성장속도가 1~2배 정도 빠르게 나타났다. 그러나 거시적인 면에서 II영역에서는 고주기나 저주기 피로실험은 큰 차이가 없다고 할 수 있으나, 일반적으로 실험온도가 증가하면 피로균열 성장속도가 증가한다는 것은 많은 연구에서 밝혀졌 는바,<sup>9,10)</sup> 고온실험에 대한 위의 데이터를 비교한 결과, 고온실험에서는 고주기 피로실험보다 저주기 피로실험이 더 타당하다고 사료된다.

### 3.3. 고온염 부식피로균열성장거동

Fig. 5는 본 연구에서 조직 II에 대한 실온대기, 실온 염부식, 200°C대기, 200°C 염부식으로 하중반복속도를 0.2Hz로 실험한  $da/dN-\Delta K$ 의 관계를 나타낸다. 피로수명 사이클을 정량적으로 비교하면 염 부식환경의 파단사이클의 수는 대기환경에서 보다 약 64% 감소하였다. 전절에서 고찰하였듯이 대기환경에서는 실험온도와 상관없이 피로균열성장거동은 유사하게 나타났으나 실온염 및 고온염 부식환경인

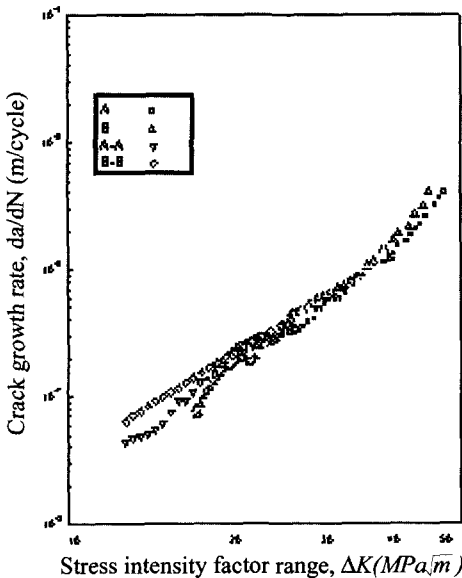


Fig. 4.  $da/dN-\Delta K$  of bimodal microstructure (II) for different temperatures and frequencies at air environment A(Room Temp., 0.2Hz), B(200°C, 0.2Hz), A-A(Room Temp., 20Hz)<sup>8)</sup>, B-B(200°C, 20Hz)<sup>8)</sup>

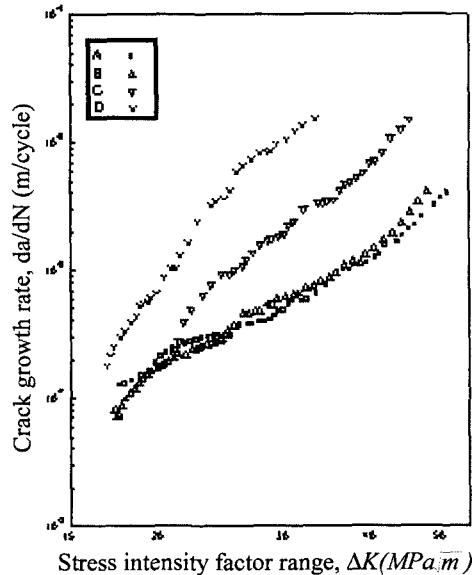


Fig. 5.  $da/dN-\Delta K$  of bimodal microstructure (II) for different temperatures and frequencies at 0.2Hz, A(Room Temp., AIF), B(200°C, AIF), C(Room Temp., KCl+LiCl), D(200°C, KCl+LiCl)

경우에는 피로균열성장속도가 대기환경에 비교하여 매우 빠르게 나타났으며 특히, 200°C 고온염 환경에서는 피로균열성장속도의 현저한 가속을 볼 수 있었다.  $\Delta K=30MPa\sqrt{m}$ 일 경우, 실온대기와 200°C 대기환경에서는 피로균열성장거동이 거의 비슷하게 나타나나, 실온염부식인 경우는 실온대기환경에 비해 약 3.5배정도 빠르게 나타났으며 200°C 염부식인 경우는 약 16배 정도 빠르게 나타났다. 이는 부식피로과정이 온도가 증가함에 따라서 열적으로 활성화되기 때문이며 이는 이동식현미경으로 염이 분사될 때를 관찰하여 보면 균열선단에 부식이 촉진되는 것을 관찰할 수 있는 것으로부터 유추 해석할 수 있다. 또한 Beevers<sup>11)</sup> 등은 Ti-6Al-4V재에 대한 강도 및 미세조직의 차이가 피로균열성장거동에 크게 영향을 준다고 하였으나 Crooker 등<sup>12)</sup>은 이에 대해 반대의 결론을 발표하였으며 이는 앞으로도 더욱 연구를 진행하여야 할 과제이다.

Fig. 6은 조직 II와 조직 III에 대한 실험온도를 달리한 염부식 환경에서의  $da/dN-\Delta K$ 의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이  $\Delta K$ 가 17~40  $MPa\sqrt{m}$ 인 균열의 안정성장구간에서는 Paris의 II영역 특성인  $da/dN=C(\Delta K)^m$  관계가 잘 나타나고 있다. 한편, 피로균열성장거동은 조직 III의 200°C 염부식, 조직

II의 200°C 염부식, 조직 II의 실온염부식, 조직 III의 실온염부식순으로 빠르게 나타났으며 동일한  $\Delta K$ 값에 대해서는 실험온도가 높을수록 조직 II와 조직 III의 피로균열성장속도는 증가하였다. 이러한 피로거동은 온도가 증가함에 따라 산화효과 및 균열선단에 염에 의한 부식물이 생성되어 균열을 촉진시키는 것으로 볼 수 있으며, Suzuki 등<sup>13)</sup>이 연구한 Cr-Mo-V강의 피로균열성장 특성에 대한 온도의 영향과 잘 일치하고 있다. 김<sup>8)</sup>의 연구결과에서 조직 II와 조직 III의 결과를 비교하면 층상의 혼합조직  $\alpha+\beta$ 가 차지하는 체적비가 높은 조직 III가 조직 II에 비하여 균열성장 저항력이 우수하다고 하였다. 그러나 본 연구에서는 실험환경이 실온 염부식일 때는 조직 III가 조직 II에 비하여 균열성장 저항력이 우수하였으나 200°C 염부식에서는 이와 반대의 결과를 얻었다. 따라서, 체적비 변화와 부식환경 및 온도가 균열성장에 미치는 구체적인 영향에 대한 연구는 앞으로 더 연구가 진행될 예정이다.

한편, 균열의 안정성장영역에서 불안정성장영역으로 전환되는 II영역의 분기점에서의  $\Delta K$ 는 약 40  $MPa\sqrt{m}$ 으로서, 지금까지 밝혀진 Ti-6Al-4V재의  $K_{Ic}$ 는 85~107  $MPa\sqrt{m}$ 임을 참고하면, 고온염 부식피로에서 안정성을 평가하는  $\Delta K$ 구간은 최대  $K_{Ic}/2$ 을 기준으로 수명을 평가하는 것이 옳다고 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Ti-6Al-4V의 피로균열성장거동에 대한 실험온도 및 부식환경의 영향을 살핀 것으로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 실온과 200°C에서 조직 I, II, III로 갈수록 항복강도와 인장강도는 증가하였으나 연신율을 비교하여 보면 조직 I과 II에서는 커다란 변화는 보이지 않지만 조직 III에서는 연신율이 급격히 감소하므로 조직 III가 조직 I과 II에 비하여 더 취성재료임을 알 수 있었다.

2) 고주기 피로실험은 실온 및 200°C 대기환경에서 II영역에서의 피로거동은 차이가 나지 않으나 저주기 피로실험은 이에 대한 차이가 발생함으로 고온에서는 저 주기 피로실험이 타당하다고 판단된다.

3) 대기환경에서의 실온, 200°C에서의 피로거동은 차이가 없게 나타났으나, 실온염부식 및 200°C 염부식에서의 피로균열성장거동은 실온 대기환경 및 200°C 대기환경보다도 매우 빠르게 나타나므로

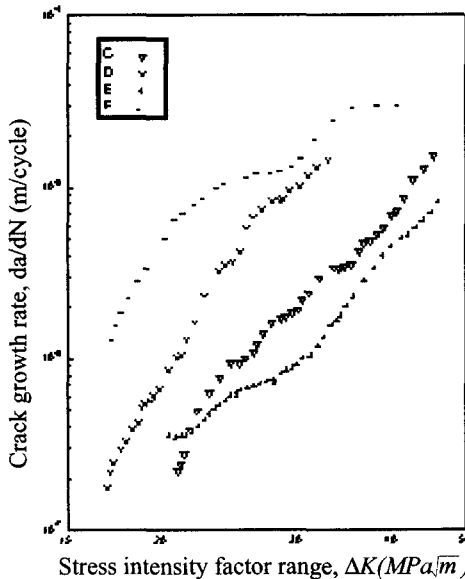


Fig. 6.  $da/dN-\Delta K$  in different microstructures and temperatures of Ti-6Al-4V alloy at 0.2Hz for KCl+LiCl environment. C(II, Room Temp.), D(II, 200°C), E(III, Room Temp.), F(III, 200°C)

염부식환경에서의 안전성을 평가하기 위한 임계균열길이는  $K_{Ic}/2$ 로 평가하는 것이 옳다고 판단된다.

**감사의 글 :** 본 연구는 동국대학교 논문게재연구비 지원으로 이루어졌음.

### 참고문헌

- 1) 이용태, 현용택, "자동차용 티타늄 합금 부품의 개발현황 및 전망," 기계와 재료, Vol. 4, No. 3, pp. 31~50, 1992.
- 2) 김성진, "LiCl-KCl 공정염중에서의 Ti-6Al-4V 합금의 입계부식과 응력부식균열," 금속공과대학 생산기술연구소 논문집, Vol. 5, pp. 43~50, 1989.
- 3) J. K. Gregory, "Fatigue crack growth of titanium alloys," in ASM Handbook, Vol. 19, Fatigue and Fracture, pp. 845~853, 1996.
- 4) 정원형 외 1명, "Ti-Al-V계 합금에서 Ti함량이 정도 및 조직에 미치는 영향," 대한금속학회지, Vol. 20, No. 1, pp. 18~25, 1982.
- 5) 이용태, 현용택, 김두현, "구조용 및 고온용 Ti합금을 이용한 항공기부품 개발(II)," 과학기술처, pp. 81~103, 1993.
- 6) Y. T. Lee, M. Peters and G. Wirth, "Effect of thermomechanical treatment of micro structure and mechanical properties of blended elemental Ti-6Al-V compacts," Material Science and Engng., A102, pp. 105~114, 1988.
- 7) G. R. Yoder, L. A. Cooley and T. W. Crooker, "Observations of microstructure-ally sensitive fatigue crack growth in widmanstatten Ti-6Al-V Alloy," Met. Trans. A, Vol. 8A, pp. 1737~1743, 1977.
- 8) 김현철, "SM 45C 강, STS410 스테인레스강 및 Ti-6Al-V 합금의 피로거동에 미치는 온도와 미세조직의 영향," 성균관대학교 박사학위논문, pp. 85~108, 1995.
- 9) S. H. Spence, W. J. Evans, and A. Goulding, "Small crack growth at elevated temperatures in a near alpha titanium alloy," Titanium '92 Science and Technology, TMS-AIME, pp. 1749~1756.
- 10) R. Foerch, and H. Ghonem, "Environmental interactions in high temperatures fatigue crack growth of Ti-1100," Met. Trans., Vol. 24A, pp. 1321~1332, 1993.
- 11) P. E. Irving and C. J. Beevers, "Microstructural influences on fatigue crack growth in Ti-6Al-4V," Mater. Sci. Eng., Vol. 14, pp. 229~238, 1974.
- 12) T. W. Crooker and D. J. Krause, "Fatigue crack growth rates in Ti-6Al-4V alloys at various yield strength and fracture toughness levels report of NRL progress," [1], p. 18, 1972.
- 13) Suzuki, Wada, Kaoru, Iino, Yutaka and Masahiko, "Fatigue crack initiation of Cr-Mo-V steel in high-temperature environment," Low-Cycle Fatigue and Life Prediction, ASTM STP 770, pp. 422~435, 1982.