

Ti-6Al-4V의 저주기 피로균열성장거동에 관한 연구

강봉수*, 한지원**, 김봉철*, 우홍식*
동국대 안전공학과*, 호서대 기계공학부**

1. 서론

Ti-6Al-4V재는 1950년대에 개발된 이후, 전체 Ti-합금 수요의 50% 이상을 차지하고 있으며 주로 항공기 터빈 엔진 날개나 자동차의 엔진 밸브 등 각종 열기관 부품으로 사용되어 왔으나 최근에는 인체의 인공관절로도 수요가 증가하고 있다¹⁾.

한편, Ti-6Al-4V재의 사용환경은 고온 및 고온부식인 관계로 현실적 안전상의 측면이나 공학적, 기술적 측면에서의 중요성에도 불구하고 고온이라는 제약 때문에 활발한 연구가 진행되지 못하는 실정이다.

대부분의 Ti합금은 고온염화에서의 응력부식균열(hot salt stress corrosion cracking; HSSCC)현상에 매우 민감한 것으로 알려져 있다^{2,3)}. 특히 α - β Ti합금은 고온에서 사용되는 다른 Ti합금에 비해 HSSCC에 덜 민감한 것으로 알려져 있으나, Al의 함량이 증가함에 따라 감수성은 크게 증가하는 것으로 보고되고 있다⁴⁾. 그러나 대부분의 기계 부품은 반복하중을 받게 되므로 정하중에 의한 HSSCC보다는 반복하중에 의한 고온염 부식피로(hot salt corrosion fatigue; HSCF)에 대한 연구가 절실히 필요한 실정이다. 또한, 이에 대한 적용의 필요성이 대두되는 실제 예로서는 항공기의 엔진 부위에 부착된 염에 의한 엔진 부품의 손상을 들 수 있다⁵⁾.

그리고 Ti합금에 대한 고온염 부식환경에서 파괴역학관점에서의 피로균열성장 거동 특성을 연구하는 것은 항공 우주산업기기등의 안전성 및 보수유지, 건전성 평가에 매우 절실한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 Ti-6Al-4V의 실제 사용온도는 400°C 이하이므로 실온, 200°C, 400°C 환경에서 각각 5%의 KCl과 LiCl를 분사시켰을 때의 고온염 부식피로성장특성을 조사하여 실험온도 변화와 염부식에 대한 기계적 성질 및 고온염 부식피로균열성장 특성에 미치는 영향을 비교, 검토하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 미국의 티타늄 합금 제조회사인 TIMET사에서 제작된, annealed된 Ti-6Al-4V 재이며 경량으로서, 강도, 내식성, 및 내열성이 우수

한 특징을 가지며 항공우주산업분야나 로켓 chamber, 잠수함의 외각재, 자동차의 valve계통, 커넥팅로드 등에 주로 사용되며 그 화학적성분은 Table. 1에 나타내었다.

원재료는 미세조직의 대부분이 등축정(equi-axed) α 상이었으나 항공기 부품 등의 제조시에 이용되는 열처리⁶⁾를 실시하여 이를 조직 I 이라 하였으며 조직 I 의 α 등축정 체적분율을 변화시키기 위하여 조직 II 의 열처리 과정을 채택하였다.

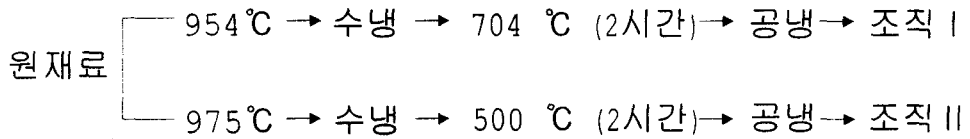


Table.1 Chemical compositions of Ti-6Al-4V alloy (* unit : ppm)

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

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

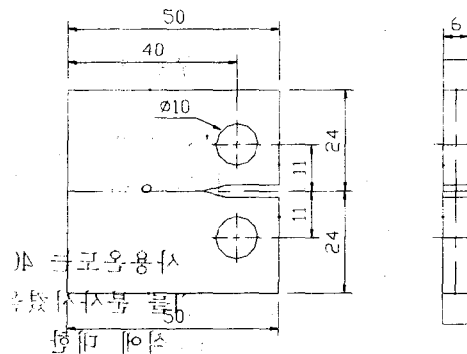


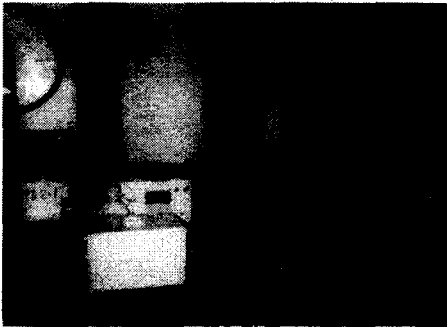
Fig.1 CT geometry (unit : mm)

2.2 실험 및 측정장치

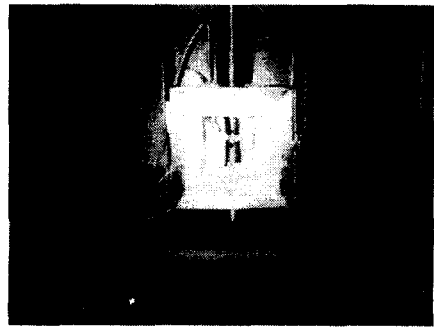
인장실험은 INSTRON 4206으로 행하였으며 피로시험은 자체설계 제작한 공압식 lever형으로 하였으며 ASTM E 647-93에 제시된 ΔP 일정 피로실험법을 따라 수행하였다. 실험 중 P_{max} 의 크기는 항상 소규모 항복조건을 만족하도록 하였으며, 일정 응력비(R=0.08)하에서 하중반복속도는 0.2Hz로 실온, 200°C, 400°C

에서 각각 사다리꼴과형으로 하여 진행하였다. 또한, 200℃, 400℃에서는 염을 분사하여 고온염 부식에 대한 실험을 수행하였다.

피로예비균열은 기계가공 노치로부터 2mm를 넣었다. 한편 고온조는 설정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 오차를 가지며 고온조의 전면에 강화유리를 부착하여 이동식 현미경으로 균열길이의 측정이 가능하게 하였으며 정량펌프에 Timer를 설치하여 각각 5%의 LiCl과 KCl 공정염 수용액을 매 5분마다 2초씩 분사하였다. Fig. 2는 시험기와 고온조의 모습을 나타내었다.



(a) Corrosion fatigue test and the rest equipment



(b) The shape of high temperature chamber

Fig. 2 Corrosion Fatigue Test System

3. 실험결과 및 고찰

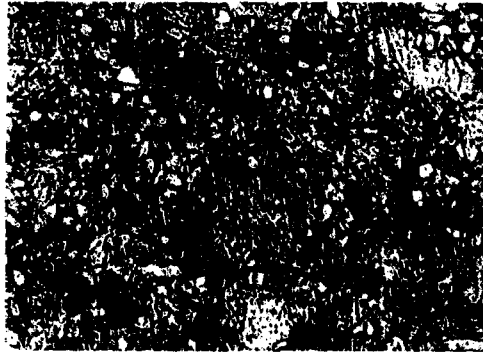
3.1 미세조직 및 인장강도

Fig. 3은 조직 I, II의 사진이다. 사진 (a)는 조직 I으로서 기지(matrix)는 α 와 β 상이 층상조직을 이루고 있는 혼합조직(Bi-modal structure)이며, 그 안에 등축정 α 가 분포하고 있다.

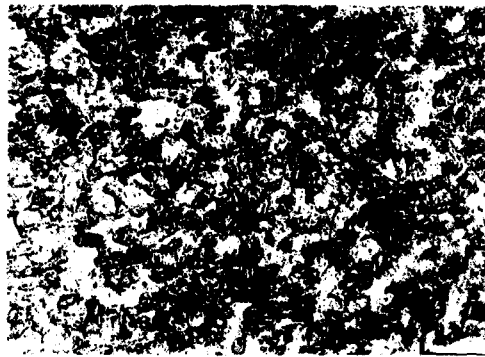
사진 (b)는 조직 II로서 조직 I 과 마찬가지로 혼합조직이나, 등축상의 결정립의 크기가 보다 미세화 되었고 전체 α 의 양도 적어진 점이 조직 I 와의 차이점이다. 조직 II가 조직 I 에 비하여 $\alpha + \beta$ 의 층상조직이 증가한 것은 초반 열처리과정 중 마르텐사이트를 얻기 위한 가열온도가 상태도 $\alpha + \beta$ 지역에서의 온도차이에 따른 각 상의 분율차이를 급격하게 만드는 온도구간에 존재하기 때문인 것으로 생각된다.

Table. 2는 미세조직 및 온도변화에 따른 인장시험의 결과로서 실험온도가 증가함에 따라 항복강도 및 인장강도는 감소하였으나 연신율에 있어서 조직 I 은 온도의 영향을 크게 받지 않았으나 조직 II는 400℃에서 크게 증가하였다.

따라서 이때의 기계적성질을 비교하면 조직 II는 실온과 200℃에서 연신율은 낮지만 강도는 가장 우수하였으며 이러한 강도의 우수성을 400℃로 온도가 증가



(a) Bi-modal, I



(b) Bi-modal, II

Fig. 3 Optical micrograph of microstructure

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

Mech. Prop. Temp.(°C)	σ_Y (MPa)			UTS (MPa)			Elongation (%)		
	Microstructure			Microstructure			Microstructure		
	원재료	I	II	원재료	I	II	원재료	I	II
실온	842.6	972.7	1063.0	904.5	1022.0	1187.0	20.2	19.0	14.4
200°C	627.8	693.8	862.3	736.0	818.0	1031.0	19.4	17.6	14.8
400°C	478.2	584.5	740.9	612.4	730.1	925.5	20.5	18.9	19.3

함에 따라 연신율의 증가와 더불어 크게 나타났다. 이에 등축정 α 상은 연성, 균

열생성에 대한 저항성이 우수하며, 층상조직은 강도, 내creep성, 파괴인성, 균열의 전파에 대한 저항성이 우수한 것으로 나타나 있다⁷⁾. 따라서 이들 두 조직이 혼합된 혼합조직 I 과 II, 특히 층상조직이 많은 조직 II는 조직 I 보다 강도가 좋으며 고온에서 타 조직에 비해 우수한 성질을 나타낸다 하겠다.

3.2 저주기 및 고주기 피로균열성장거동에 관한 비교, 고찰

Fig. 4는 조직 I 에 대한 본 연구와 동일한 조건에서 다만 하중반복속도를 20Hz로 실시한 김⁸⁾의 연구결과와 하중반복속도를 0.2Hz로 한 본 연구결과와의 $da/dN-\Delta K$ 관계를 나타낸 것이다.

고주기피로실험일 경우, near threshold 영역인 ΔK 가 약 $19MPa\sqrt{m}$ 이하에서는 200℃ 환경이 실온환경보다 피로균열성장속도가 약 1.5배정도 빠르게 나타났으나 피로균열의 안정성장영역인 II 영역에서의 피로균열성장거동은 거의 일치하게 나타났다. 그러나 저주기피로실험인 경우에는 실험시의 하중이 고주기피로실험보다 큼으로서 near threshold 영역이 크게 나타나지 않았으나, II 영역에서는 200℃ 환경이 실온환경보다 피로균열성장속도가 1~2배정도 빠르게 나타났다. 그러나 거시적인 면에서 II 영역에서는 고주기나 저주기피로시험은 큰 차이가 없다고 할 수 있으나 일반적으로 실험온도가 증가하면 피로균열성장속도가 증가한다는 것은 많은 연구에서 밝혀졌는바^{9,10)}, 고온실험의 경우에는 위의 데이터를 비교한 결과 저주기피로실험이 더 타당하다고 사료된다.

3.3 고온 염 부식피로균열성장거동

Fig. 5는 200℃에서의 조직 I 의 대기, 고온염 그리고 조직II의 고온 및 고온염 부식피로거동인 $da/dN-\Delta K$ 관계를 나타낸다. 피로수명 사이클은 파괴역학적인 관점에서 정성적으로는 분석할 수 없지만 정량적으로 비교하면 조직 I 인 경우는 고온염 환경의 파단사이클 수는 고온대기환경 파단사이클 수의 34%로 나타났으나 조직II는 조직 I 에 비하여 고온염 환경을 비교할 경우, 더욱 짧은 10%정도로 나타났다. 3.2에서 고찰하였듯이 대기환경인 경우에 실온과 200℃에서의 피로균열거동은 거의 유사하게 나타났으나 고온염 부식환경인 경우에는 피로균열성장속도가 매우 빠르게 나타났으며 $\Delta K=30MPa\sqrt{m}$ 일 경우, 조직 I 의 염부식 피로는 고온대기보다 피로균열성장속도가 10배정도 빠르게 나타났으며 조직II는 조직 I 보다 2배정도 빠르게 나타났다. 이는 부식피로과정은 온도가 증가함에 따라서 열적으로 활성화되기 때문이며 이동현미경으로 염이 분사될 때를 관찰해 보면 균열선단에 부식이 촉진됨을 관찰할 수 있었다. 그리고 Ti-6Al-4V재에 대한 강도 및 미세조직의 차이가 피로균열성장거동에 미치는 영향에 대해 Beevers¹¹⁾ 등은 크게 영향을 준다고 하였으나 Crooker 등¹²⁾은 이에 대한 반대의 결론을 발표하여 이는 앞으로도 더욱 더 연구를 진행하여야 할 과제이다.

한편, 균열의 안정성장영역에서 불안정성장영역으로 전환되는 II 영역의 분기점에서의 ΔK 은 약 $40MPa\sqrt{m}$ 으로서, 지금까지 밝혀진 Ti-6Al-4V재의 K_{Ic} 는

85~107 $MPa\sqrt{m}$ 임을 참고하면, 고온염 부식피로에서 안정성을 평가하는 ΔK 구간은 최대 $K_{Ic}/2$ 을 기준으로 수명을 평가하는 것이 옳다고 생각된다.

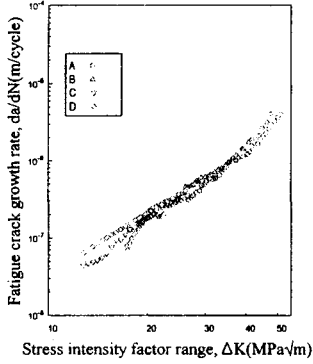


Fig. 4 da/dN- ΔK relations in microstructure I

A(AIR, 0.2Hz), B(200°C, 0.2Hz)
C(AIR, 20Hz), D(200°C, 20Hz)

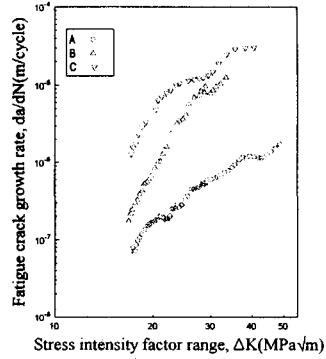


Fig. 5 da/dN- ΔK relations in 0.2Hz

A(조직 I, 200°C) B(조직 I, 200°C, 염)
C(조직 II, 200°C, 염)

4. 결론

본 연구에서는 저주기 고온염 부식피로에 관한 온도의 영향을 살핀 것으로 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 미세조직의 변화를 통하여 실온~400°C 온도구간에서 항복강도와 인장강도는 온도가 증가할수록 감소하였으나 원재료와 비교해서는 30~55% 증가하였다.
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 일치하게 나타났으나 200°C에서의 염부식피로는 대기환경 및 200°C 대기환경보다도 매우 빠르게 나타났으며 염부식환경에서의 불안정성장구간인 $K_{Ic}/2$ 로 평가하는 것이 옳다고 판단된다.

참고문헌

- 1] 이용태, 현용택, “자동차용 티타늄 합금 부품의 개발현황 및 전망”, 기계와 재료, Vol. 4, No. 3, pp. 31~50, 1992
- 2] V.C.Peterson, : ASTM STP 397, p.80, 1966
- 3] R.R.Boyer and W.F.Spurr: Met. Trans., A, 9, p.1443, 1978
- 4] J.R.Myers and J.A.Hall: Corrosion, 33, p. 252, 1977

이하생략