

Ti 합금의 피로 특성 고찰

정화일(전남대 기계공학과 대학원), 조규중(전남대 자동차공학부)

Study for Fatigue Crack Propagation Behavior of Ti-alloy

While Jung(Mechanical Eng. Dept. CNU), Kyu-Zong Cho(Automobile Eng. Dept. CNU)

ABSTRACT

Ti-6Al-4V has been used widely in biomedical field. But because of its toxicity, the β stabilizing element, V, in Ti-6Al-4V has been replaced by Nb, Ta. Ti-10Ta-10Nb has been developed for biomedical applications. The fatigue crack propagation behavior of Ti-alloy(Ti-10Ta-10Nb) was investigated, in comparison with that of pure Ti. In order to better understand the fundamental fatigue behavior of Ti-10Ta-10Nb, rotating bending fatigue tests have been carried out. Ti-10Ta-10Nb has a better fatigue strength than pure Ti. In this paper, fatigue life has been predicted with Nisitani's equation of the fatigue crack propagation that can be established by measuring fatigue crack growth rates.

Key Words : Ti-10Ta-10Nb, Fatigue crack propagation(피로크랙전파), Fatigue crack growth rate(피로크랙전파속도), $\alpha+\beta$ type titanium alloy($\alpha+\beta$ 티타늄합금)

1. 서론

Ti 과 그 합금은 내식성(corrosion resistance), 생체 적합성(biocompatibility), 생체유착성(bio-adhesion or boneingrowth), 생체기능성(biofunctionability)등의 생체 재료들의 요구사항을 만족하여 최근 각광을 받는 생체용 재료이다. 대표적인 $\alpha+\beta$ 형 티타늄 합금인 Ti-6Al-4V 합금은 Pure Ti 에 비해 피로강도가 높고, Ti 과 유사한 골유착(bioadhesion) 특성, 높은 비강도 및 우수한 내식성 때문에 생체재료로 가장 널리 사용되어왔으나, 최근 Al 과 V 의 생체안정성에 대한 문제가 대두되면서 새로운 합금의 개발을 요구하게 되었다. 본 연구에서는 세포독성이 지적되지 않은 재료인 Ta, Nb 을 합금 원소로 첨가하여 개발된 새로운 Ti 합금(Ti-10Ta-10Nb)에 대하여, 회전형 굽힘 피로 실험을 실시하고 피로강도의 특성을 고찰하였다.

피로크랙 전파 거동에 대한 연구는 생체재료로 사용되는 재료에서 갑작스럽게 발생하는 기능상실(catastrophic failure)을 방지하기위해서 매우 중요하다. 비교를 위해서 피로크랙 전파 거동은 생체용 재료로서 널리 사용되고 있는 pure Ti 와 함께 실시하였다.

2. 실험

2.1 합금(Ti-10Ta-10Nb)의 제조

실험에 사용된 합금(Ti-10Ta-10Nb)의 제작 순서는 Fig. 1 과 같으며, Ti 이 산소와 반응성이 매우 좋기 때문에 합금 제작의 모든 공정은 진공 상태(Ar gas 분위기)에서 진행 되었다.

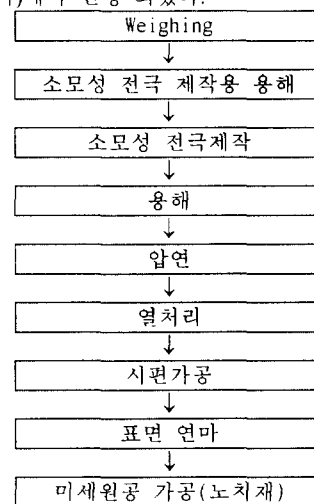


Fig. 1 Procedures of specimen manufacture

2.2 실험 방법

본 실험에 사용된 재료로는 생체재료를 목적 널

리 사용되는 Pure Ti 와 새로 개발한 합금 Ti-10Ta-10Nb 이며, 재료의 화학적 성질과 기계적 성질을 각각 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of specimens

Pure Ti (Wt%)				
N	H	Fe	O	Ti
0.001	0.001	0.08	0.11	BAL
Ti-10Ta-10Nb (Wt%)				
Ta	Nb	Ti		
9.23	10.22	80.45		

Table 2 Mechanical properties of specimens

Material	Tensile Strength (Mpa)	Yield Strength (Mpa)	Vickers hardness HV
Pure Ti	487	364	662
Ti-10Ta-10Nb	630	510	1396

시험편의 치수가공 전에 재료의 잔류응력 제거와 조직의 균일화를 위해서 각각 열처리(Pure Ti: 650°C-5 시간, Ti-10Ta-10Nb: 500°C-5 시간)를 실시한 후, Fig 2 와 같이 가공하고 연마지로 #200 에서 #2000 까지 표면 연마를 실시하였다. 노치재의 경우에는 A 와 같은 미소원공을 주었다.

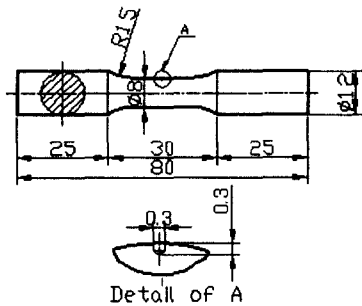


Fig. 2 Geometry of Specimen

실험에 사용된 시험기는 Shimadzu 사의 Ono 식 회전 굽힘 피로 시험기를 사용하였고, 회전수는 3000rpm 이며 응력비(R)는 -1 이다.

2.3 실험이론

피로수명은 부하응력(σ) 및 피로크랙길이($2a$)와 관계된다. Nisitani 등은 파단수명비가 크랙길이에 비례 관계가 있다고 하였다.

$$N / N_f \propto \log a \quad (2-1)$$

$$da / dN \propto a^p \quad (2-2)$$

식(2-1)부터 (2-2)에서,

$$da / dN = C 2 a^p \quad (2-4)$$

(C, p 은 상수)

식(2-4)를 변수 분리하여 적분하여 다음과 같은 피로 수명 예측식을 구할 수 있다.

$$N_{op} = \frac{2a_{op}^{(1-p)} - 2a_i^{(1-p)}}{(1-p)c} + N_i \quad (2-5)$$

(a_i : 초기 피로크랙길이, a_{op} : 임의의 피로크랙길이, N_i : 초기 반복회전수, N_{op} : 임의의 반복회전수)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로특성

피로한도의 결정은 10^7 cycle 이후에도 파단되지 않는 응력을 피로 한도로 채택하였다. Fig. 3 은 두 종류 평활재 시험편의 S-N 곡선을 나타낸다.

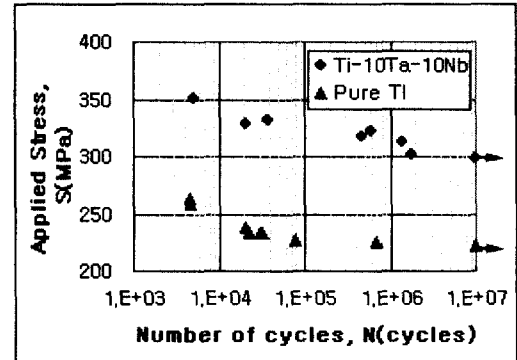


Fig. 3 S-N Diagram of specimens

두 재료에 대해서 회전형 굽힘피로실험(R=-1)을 실시한 결과 피로한계(S_e)는 Pure Ti 와 Ti-10Ta-10Nb 각각 216.41Mpa 과 300Mpa 이었다.

3.3 피로크랙길이와 파단수명비의 관계

Fig. 4 는 원공결함이 있는 시험편에 대하여 평활재 시험편의 피로한계(S_e)의 110%, 105%, 100%, 95%, 90%의 작용하중이 가해졌을 때 표면 피로크랙길이 ($2a$)와 반복 회전수(N)의 관계를 나타낸 것이다.

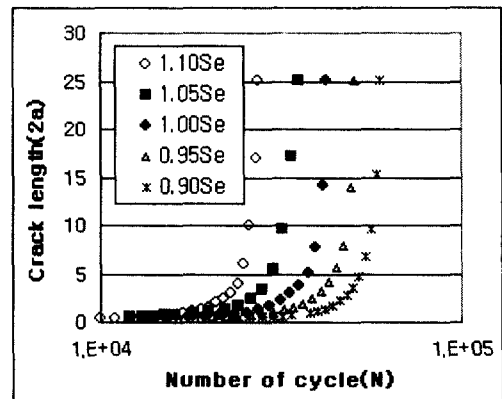


Fig. 4 Relation between crack length and number of cycles for Ti-10Ta-10Nb

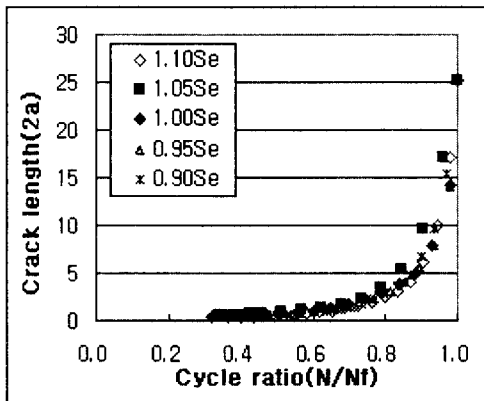


Fig. 5 Relation between crack length and cycle ratio for Ti-10Ta-10Nb

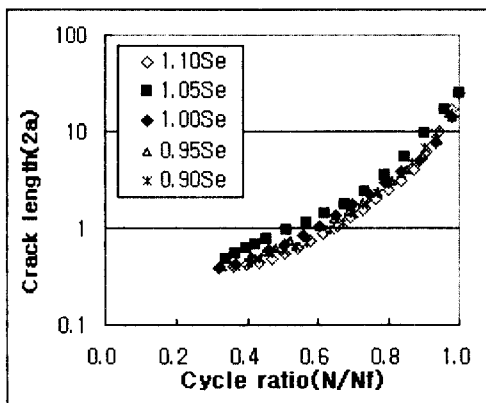


Fig. 6 Relation between crack length and cycle ratio for Ti-10Ta-10Nb

Fig. 6 에서 나타난 바와 같이 표면 크랙 길이(2a)와 파단수명비(N/N_f) 사이에는 비례 관계가 있음을 알 수 있다. Nisitani 가 제안한 표면 크랙 길이(2a)와 파단수명비(N/N_f)과의 관계식(3-1)을 적용해 보면,

$$\log 2a = A + B(N / N_f) \quad (3-1)$$

비례상수 B 의 범위가 2.42~2.65 내에 있었다. 참고로, Pure Ti 의 경우에는 B 의 범위가 1.7~2.1 내에 존재하였다.

3.4 피로크랙 전파속도 (d2a/dN)와 피로크랙 길이 (2a)와의 관계

Fig. 7 에서 나타나는 것처럼 초기 피로크랙 길이가 작은 불안정 성장구간을 제외하면, 피로크랙 길이와 피로크랙 전파속도 사이의 기울기가 대체로 일정함을 알 수 있다.

가해진 응력에 따른 그래프에서 피로크랙 진전길이(2a)와 피로크랙 전파속도(d2a/dN)에 대하여 $y=Ax^B$ 형태의 curve fitting 을 한 후, 구해진 식에서 그래프의 기울기를 구하고 이를 이용하여 식(2-4)의 p 값, C 값으로 취하였다.

Table 4 는 가해진 응력에 따른 식(2-4)의 p, C 값을 나타낸 것이다.

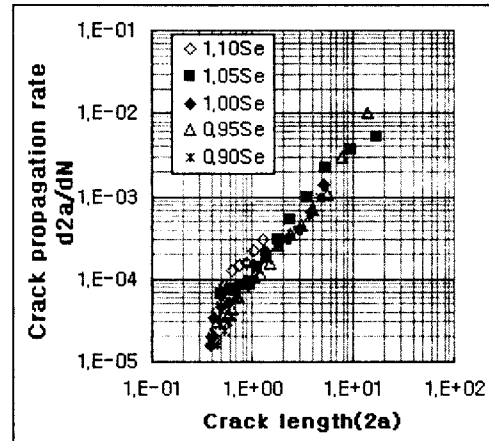


Fig. 7 Relation between crack length and fatigue crack growth rates for Ti-10Ta-10Nb

Table 4 Experimental constants for the equation $d2a/dN=C(2a)^p$

Applied Stress/Se	p	C
1.10	1.6521	0.00020
1.05	1.4084	0.00010
1.00	1.5838	0.00009
0.95	1.5980	0.00008
0.95	1.5726	0.00011

3.4 피로수명 예측

Table 4 에서 구한 계수들을 이용하여 식(2-5)에 적용해 피로수명 예측식을 구하였다.

$$N_{op} = \frac{a_{op}^{(1-p)} - a_i^{(1-p)}}{(1-p)c} + N_i \quad (3-2)$$

Table 5 는 실험으로부터 얻어진 피로수명의 실험값과 위의 식으로부터 구한 예측치를 비교한 것이다. 노치재에 가해진 하중에 관계없이 실험에서 얻어진 값과 예측치 사이에 큰 오차 없이 일치함을 보여준다.

Table 5 Comparison of predicted and experimental values

Cycle ratio (N/N _f)	Applied Stress/Se	Number of cycles		Error (%)
		N _{exp}	N _{pre}	
0.5	1.10	14000	13714	2.04
	1.05	20500	21319	-3.99
	1.00	22500	22487	0.06
	0.95	26100	26960	-3.29

	0.90	30000	29509	1.64
0.9	1.10	25000	24233	3.07
	1.05	36500	37134	-1.74
	1.00	38500	38331	0.44
	0.95	45000	43493	3.35
	0.90	54000	51690	4.28

(Nexp: Experimented number of cycles,
Npre: Predicted number of cycles)

4. 결론

생체용 재료로서 활용을 목적으로 개발한 Ti 합금(Ti-10Ta-10Nb)의 피로 수명과 피로 거동을 알아 보기 위해서 회전형 굽힘 피로 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1)Ti-10Ta-10Nb 재료의 회전형 굽힘 피로실험(R=-1)에 대하여 피로한도는 300Mpa로 나타났다.
- (2)피로크랙길이(2a)와 파단수명비(N/N_f) 사이에는 가해진 하중에 관계 없이 서로 비례 관계가 있었으며, $\log(2a)=A+B(N/N_f)$ 식에 적용하면 재료상수 B는 2.42~2.65 범위에서 존재하였다.
- (3)실험을 통해서 얻은 재료상수를 이용하여 Nisitani의 피로크랙 전파속도(d2a/dN) 예측식에 적용해서 피로 수명을 예측한 결과 부하응력에 관계없이 실험치와 예측치 사이에 5%이하의 오차를 나타내었다.
- (4)Pure Ti와 비교해볼 때 Ti-10Ta-10Nb의 피로강도는 40%정도 높게 나타났고, 피로크랙전파 속도는 약 33.4% 빠르게 진전하는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 “생체용 Ti-Ta-Nb 계 합금개발과 생체적합성 평가”의 일환으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. ASTM E647-99, “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rate”, Vol. 0301, 1999.
2. ASTM E348, “Standard Specification for Titanium and Titanium Alloy Bars and Billets”, 2000.
3. Chung-Seog Oh and Ji-Ho Song, “Crack growth and closure behaviour of surface cracks under pure bending loading”, International Journal of Fatigue, Volume 23, Issue 3, Pages 251-258, March 2001.

4. Keiro Tokaji, Hiroyasu Kariya, “Mean stress dependence of fatigue strength and subsurface crack initiation in Ti-15Mo-5Zr-3Al alloy”, Materials Science and Engineering A, Volume 281, Issues 1-2, Pages 268-274, 15 April 2000.
5. Mitsuo Niinomi, Akira Saga and Kei-chi Fukunaga, “Long crack growth behavior of implant material Ti-5Al-2.5Fe in air and simulated body environment related to microstructure”, International Journal of Fatigue, Volume 22, Issue 10, Pages 887-897, November 2000.
6. 이동길, 이상열, 정재강, “미소원공결합을 갖는 자동차 전륜 구동축재의 온도변화에 따른 피로크랙 전파거동에 관한 연구”, 한국자동차공학회는문집, 제 6 권, 제 6 호, pp. 185-194, 1998.