

안경테소재 합금(Ti-6Al-4V)의 크리프 특성

황경중*, 윤종호*

Creep Behaviours of Glasses Rim Material Alloy

Kyung-Choong Hwang, Jong-Ho Yoon

Abstract

Titanium alloy has widely been used as glasses rim material because it has high specific strength and also is light, harmless to men. But, we have little design data about the creep behaviors of the alloy. Therefore, in this study, an apparatus has been designed and built for conducting creep tests under constant load conditions. A series of creep tests on them have been performed to get the basic design data and life prediction of titanium products and we have gotten the following results. First, the stress exponents decrease as the test temperatures increase. Secondly, the creep activation energy gradually decreases as the stresses become bigger. Thirdly, the constant of Larson-Miller parameters on this alloy is estimated about 13. And last, the fractographs at the creep rupture show both the ductile and the brittle fracture according to the creep conditions.

Key Words : Creep Rate(크리프 속도), Rupture Strain(파단변형율), Creep Rupture(크리프 파단), SEM(주사형 전자현미경), Life Prediction(수명예측), Activation Energy(활성화에너지)

1. 서론

Ti(Ti-6Al-4V)합금은 비강도가 높은 장점과 경량이면서 인체에 유해하지 않다. 즉, 가벼우면서도 알레르기 등이 유발되지 않는 장점 때문에 외국에서는 안경테로써 많이 활용되고 있다. Ti합금의 안경테는 고부가가치가 있으며, 아직 우리나라에서는 일본 등의 선진국에서 적용하고있는 정도로 많은 활용이 되지 않고 있는 실정이다. 국내에서 생산되는 기존의 안경테들은 비교적 제작하기 쉬운 양백(Nickel silver)이나 모넬(Monel)의 소재를 주로 사용하였다. 그러다 보니 제품들의 질이 좋지 않아서 개발도상국에서 대량생산되어 수출되는 저가 안경테들의 공략을 받아서 우리나라 안경산업은 도산위기에 처하는 산업체가 증가하고 있다. 이렇게

어려운 안경산업의 부흥을 위해서는 고급 Ti 안경테를 생산하는 것이 급선무이다. 최근에 티타늄 안경테를 생하여 수출하면 약 10 여\$ 정도 받을 수 있으나 기존의 양백(Cu54~67%, Ni12~28% 기타)이나 모넬(Ni67%, Cu30% Fe1.4% 기타)의 경우 동종 모양의 안경테를 생산 수출하였을 때 약 3\$ 정도에 불과 하다. 그것마저도 인건비가 비교적 저가인 개발도상국에 추월을 당하는 현상이 발생하고 있다. 우리나라 안경테 업체가 국가경쟁력은 물론 자생력 상실 위기에 처해있는 실정이다. 국내에서는 Ti 안경테 소재는 전량 수입에 의존하는 실정인데 그에 따른 가공방법 또한 쉽지는 않다.

본 연구에서는 기존에 생산하던 안경테가 아닌 분말야금법으로 고부가가치가 있는 Ti 안경테 소재를 개발하기 위해, 선행조건으로 고부가가치가 있는 Ti 소재에 대한 관련 실험을 통하여 기계적 성질과 화학적 성분은 물론 고온상태의 크리프 실험을 하여 어느 정도의 취성과 연성파괴 양상이 일어나는지 먼저 확인하였다. Ti합금의 크리프에 관한 연구

* 경일대학교 공과대학 기계공학부

는 국내에서는 박¹⁾ 과 이²⁾ 등이 Ti-6Al-4V 합금으로 크리프 특성을 연구한 바 있다. Cuddy³⁾는 크리프 중에 유발되는 내부응력 및 구조에 대한 연구를 수행하였다. Bradley⁴⁾는 실온에서 순수한 알루미늄의 피로 크리프특성에 대한 연구 등이 발표된 바 있다.

본 연구에서는 Ti합금을 대상으로 응력과 온도를 변화시키면서 정적 크리프시험을 통하여 각종 실험 데이터를 구하는 한편 크리프 변형기구를 규명하고 파단의 균열형태를 관찰하여 파괴기구를 분석함으로써 본 재료의 안정된 사용범위를 예측하고자한다. 크리프 시험의 조건으로는 4가지의 온도조건과 4단계의 하중을 가하여 Ti합금에 대한 크리프시험을 하여 해당소재의 잔여수명을 예측할 수 있고 파괴양상을 파악하여 향후 본 연구를 토대로 신소재 개발의 주목적인 분말야금법으로 안정된 소재를 개발하는데 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 크리프이론

2.1 크리프 강도 및 이론

허용응력을 규정하는 크리프강도는 크리프 파단 시험을 통하여 얻어지고, 이들을 이용한 기계부품들의 수명예측이 가능하다. 크리프시험에서는 시험편에 일정한 하중을 유지시킨 후 파단에 소요되는 파단시간(rupture time)과 파단 변형률(rupture strain)을 관찰한다. 최저 크리프 변형속도를 측정하여 재료의 유효수명 및 사용조건에 맞는 허용 하중을 알아낼 수 있다. 일정한 하중을 가하고 시험하는 경우는 시험도중 시험편의 단면적 감소에 따라 응력이 계속 증가하게 된다. 크리프 변형속도는 응력에 크게 의존하므로 일정한 응력하에서 시간에 따른 변형을 측정하여 온도와 응력의 불변 조건 하에서 정상 크리프 변형속도(steady state creep rate)를 측정할 수 있다. 정상적인 크리프곡선에서 변형초기에는 시간변화에 대한 크리프속도가 낮으나 어느 정도 시간이 경과된 후에는 변형속도가 일정해진다. 그 후 계속하여 변형이 진행되면 변형속도가 점진적으로 빨라지는 구간에 도달되며 결국은 파단된다.⁵⁻⁷⁾

3. 실험 및 연구방법

3.1 시험편 및 실험방법

고온 크리프시험에 사용된 합금은 Ti, Al 및 V가 주성분을 이루고 있으며, 소량의 Fe와 O를 함유한 합금으로 화학적 성분은 Table 1과 같다. 크리프시험편 제작은 ASTM 규격에 따라 와이어 방전 가공기를 사용하여 시험편을 가공하였다. 시험편의 치

수는 Fig. 1에 나타내었으며, 기계적 성질은 Table 2와 같다. 시험편 소재에 대한 풀림온도는 800℃로 1시간 정도 유지한 후에 노냉처리 하였다.

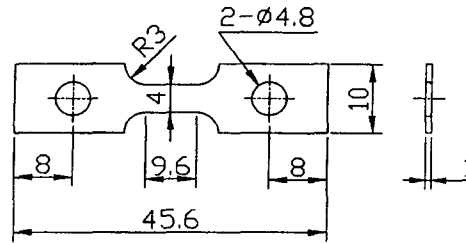


Fig. 1 Dimensions of tensile creep specimen (unit ; mm)

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V Alloy

Al	V	Fe	O	H	N	C	Cu	Sn	Ti
6.22	4.01	.15	.14	.0072	.004	.004	.003	.002	BAL.

Table 2 Mechanical properties of specimen.

Yield point Strength (MPa)	Ultimate Tensile Strength (MPa)	Percent Elongation	Hardness (H _{RC})
138.3	148.7	12	34

3.2 크리프시험 장치

실험장치는 Andrade와 F. Garofalo 등이⁸⁻⁹⁾ 고안한 레버-빔 형의 기기를 이용하였다.

실험장치에 부착된 가열로는 타원형의 적외선 노이며, 시험편은 가열로의 석영관 내에 장치할 수 있도록 되어있다. 실험할 때 노내에 일정한 시험온도가 유지되도록 시험편의 온도변화가 $\pm 1^\circ\text{C}$ 이하로 조절되도록 하는 제어장치를 노에 연결하였다. 그리고 시험편의 크리프변형량은 LVDT를 활용하여 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 까지 측정 가능하도록 측정하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 도시하였다.

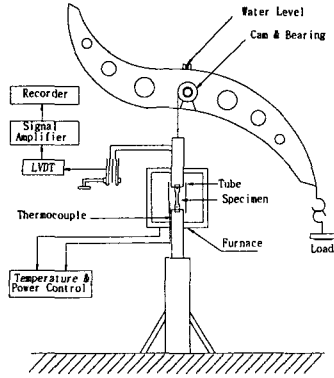


Fig. 2 Schematic diagram of static creep tester with constant load.

3.3 시험방법

Fig. 2에 보인 크리프 시험편의 양단은 볼트로 고정시키고, 열전대를 시험편 중앙에 위치시켰다. 또한 석면을 이용하여 열이 밖으로 새지 않도록 하였다.

크리프시험 설정조건은 시험편에 미치는 영향을 알아보기 위하여 500℃로부터 20℃의 온도간격으로 상승시켜 520, 540 및 560℃의 4가지의 온도조건을 설정하였으며, 응력은 200, 220, 240 및 260 MPa의 4가지 조건을 설정하여 전체적으로 16가지의 조건 하에서 시험을 실시하였다. 시험조건은 Table 3에 나타내었다. 시험후 주사 전자현미경(SEM)으로 파 단면을 관찰하여 파괴의 양상을 분석한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. 크리프

본 연구에서 크리프시험 조건인 온도범위 500~560℃의 구간과 응력범위 200, 220, 240 및 260 MPa의 구간에서 온도와 하중을 변화시키며, 시험한 결과 Fig. 3의 크리프곡선을 얻었다. 시험에서 얻어진 시간-변위 값으로부터 시간변화에 대한 진 변형률 (pure strain)을 계산하여 그린 것이다. ϵ_0 이 초기 변형률이라 하면, 전체 변형률, ϵ 은 다음 식으로 정의된다.

$$\epsilon = \ln(e + 1) = \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) \quad (1)$$

여기서, e : 공칭 변형률, l_0 : 초기 길이

Δl : 변형길이

Table 3 Experimental static creep data of Ti-6Al-4V alloy.

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Creep rate, (hr ⁻¹)	Rupture time, (hr)
500	200	7.825×10^{-7}	over 168
	220	1.082×10^{-6}	"
	240	1.465×10^{-6}	"
	260	2.426×10^{-6}	"
520	200	1.235×10^{-6}	over 168
	220	2.113×10^{-6}	"
	240	3.138×10^{-6}	130
	260	6.250×10^{-6}	70
540	200	1.991×10^{-6}	123
	220	3.426×10^{-6}	112
	240	5.617×10^{-6}	64
	260	1.232×10^{-5}	24
560	200	2.697×10^{-6}	82
	220	5.830×10^{-6}	60
	240	1.054×10^{-5}	31
	260	2.615×10^{-5}	14

각각의 시간 t 에 대한 변형률 ϵ_t 를 이용하여 정상 상태 크리프속도 $\dot{\epsilon}_s$ 는 다음 식으로 된다.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

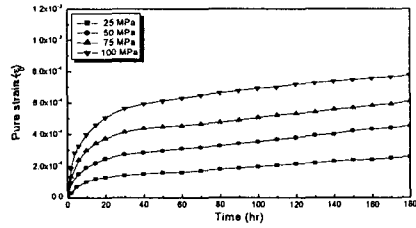
여기서, $\dot{\epsilon}_s$: 정상상태의 크리프속도

ϵ_1, ϵ_2 : t_1, t_2 에서 변형률

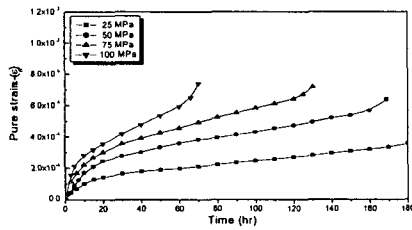
t_1, t_2 : 각각의 크리프시간

Fig. 3의 크리프 변형률 곡선은 Table 3을 기초로 하여 그린 것이다. (a)는 500℃에서의 크리프 곡선으로 초기 단계가 짧게 나타났으며, 정상 크리프 구간이 계속되는 현상을 보여준다. 200~260 MPa에서는 시험편의 파단이 일어나지 않았고, 1주일(168시간) 이상동안 계속해서 늘어나는 양상을 보여주고 있다. (b)는 온도 520℃에서는 전 구간에서 I 단계, II 단계 및 III단계가 구분 가능한 일반적인 크리프 곡선 형태를 보여주었다. 크리프 시험 응력 200~220 MPa에서는 1주일 이상 계속 늘어났다. 240~260 MPa 조건 하에서 각각 시험편의 파단시간은 각각 130 및 70시간만에 일어났음을 보여준다. (c)는 온도 540℃에서 크리프저항성과 파단 변형은 200~260 MPa 조건 하에서 시험편의 파단에 소요된 시간은 123,

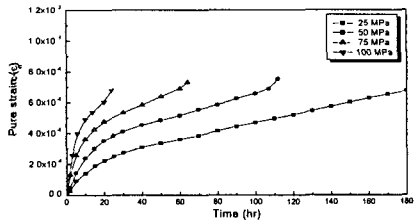
112, 64 및 24시간만에 나타났다. (d)는 온도 560°C에서는 하중의 증가에 따라 크리프저항성이 감소하였고 파단 변형률도 감소하였으며, 200~260 MPa에서



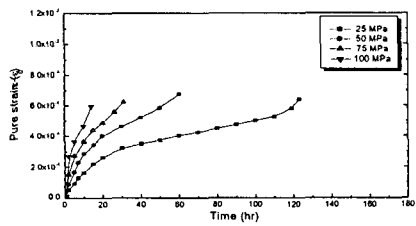
(a) 500°C



(a) 520°C



(c) 540°C



(d) 560°C

Fig. 3 Creep strain curves as time functions

각 시험편의 파단시간은 82, 60, 31 및 14시간만에 나타났다

4.2 크리프변형과 응력의존성

크리프 변형율속도의 응력 의존성은 Cuddy 와 Garofalo가 제안한 정상 변형율속도에 대한 다음 식으로 표시된다.^{3,7)}

$$\dot{\epsilon}_s = K\sigma^n \quad (3)$$

여기서, K 는 구조상수, σ 는 응력(MPa),
 n 은 응력지수

식(3)의 양변에 로그를 취하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\log \dot{\epsilon}_s = \log K + n \log \sigma \quad (4)$$

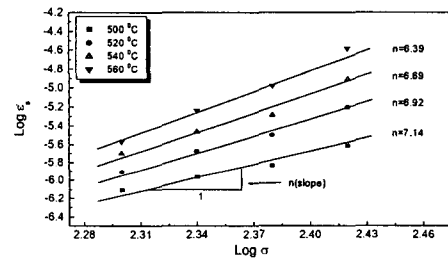


Fig. 4 Dependence of creep rate on applied stresses

식(4)에 따라 $\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 4이다.

$\dot{\epsilon}_s$ 와 σ 의 관계는 선형적으로 나타났으며, 이 직선의 기울기가 응력지수값(n)이 된다. 크리프시험 온도가 500°C에서 560°C로 20°C씩 증가함에 따라 응력지수 값은 각각 7.14, 6.92, 6.69 및 6.39의 순서로 점점 작아지는 경향을 보여주며, 평균값은 약 6.79 정도이다. 이와 같은 경향은 온도가 높아질수록 전위밀도가 감소하고 이에 따라 응력 감소효과가 높아지기 때문으로 사료된다.

4.3 크리프변형에 대한 활성화 에너지

크리프변형은 열적 활성화과정에 의해 진행되므로 크리프 변형속도는 다음의 Arrhenius방정식으로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_s = K \cdot \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right) \quad (5)$$

여기서, Q_c : 크리프 활성화에너지(kcal/mol),
 K : 응력, 조직, 온도에 따른 구조상수,
 R : 기체상수(8.314 kcal/mol)
 T : 절대온도(K)

식(5)의 양변에 로그를 취하면 다음같이 된다.

$$\ln \dot{\epsilon}_s = \ln K - \frac{Q_c}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (6a)$$

$$\text{즉, } \log \dot{\epsilon}_s = \log K - \frac{Q_c}{2.303RT} \quad (6b)$$

이 식으로부터 Q_c 값은 $\ln \dot{\epsilon}_s$ 과 $1/T$ 와의 기울기 $[-Q_c/(2.303R)]$ 로부터 구할 수 있으므로 Fig. 5 에서 직선의 기울기를 계산하면 크리프 활성화에너지 Q_c 를 계산할 수 있다. 가해진 응력 200~260 MPa에 대해 각기 활성화에너지를 계산하면 180.79, 172.38, 170.72 및 167.29 kcal/mol 값을 얻었으며, 평균값은 약 172.80 kcal/mol 정도이다. 활성화에너지는 응력이 증가함에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있는데, 이와 같은 현상은 Bradley 등이 주장한 크리프 활성화에너지와 유효 응력 관계에서도 확인할 수 있다.⁴⁾

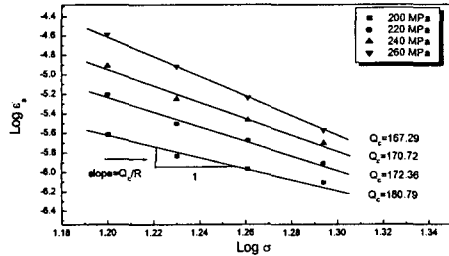


Fig. 5 Dependence of creep rate on temperature

4.4 크리프 잔존수명 예측

크리프시험 데이터 Table 3에서 재료의 파괴시간을 비교해보면 외부응력 증가에 따라 파괴수명은 급격히 감소하고 있다. 같은 응력에서 온도증가에 따라 파단수명은 급격히 감소한다. 어느 온도영역에서의 파단수명을 알고 있으면 다른 온도영역에서의 파단수명을 예측할 수 있다. 파단수명의 예측은 비교적 간편하면서도 여러 합금에 폭넓게 적용되는

Larson-Miller변수로 사용하였는데, 이 변수 P 는 다음 식으로 계산된다.

$$P = f(\sigma) = T (\log t_r + C) \quad (7a)$$

$$\log t_r = \frac{P}{T} - C \quad (7b)$$

여기서, T : 켈빈 온도(K), σ : 응력(MPa),
 t_r : 파단 시간 (hr), C : 상수

Table 3의 데이터를 이용하여 각각의 응력별로 $\log(t_r)$ 과 절대온도의 역수($1/T$)간의 상관관계 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 응력별로 직선식의 계산을 위해 최소 자승오차 회귀직선식을 구하면 각 응력별 기울기는 P 의 값이 되고, 상수 C 는 13정도로 확인되었다. 즉,

$$P = T (\log t_r + 13) \quad (8)$$

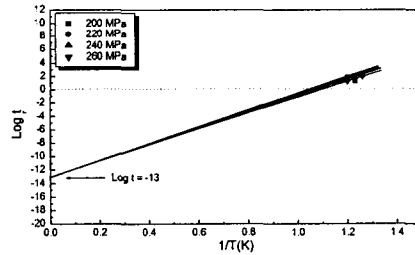


Fig. 6 Determination of constant at Larson-Miller parameters from relation plots between $\log(t_r)$ and $(1/T)$ according to the stresses

이 식으로부터 온도와 응력 조건들이 주어지면 Ti 합금의 수명(t_r)이 계산될 수 있다.

4.5 주사현미경 고찰

Ti합금(Ti-6Al-4V)의 시험편을 800℃에서 1시간 동안 유지시킨 후 노냉으로 풀림한 후에 부식시켰다. 파단면의 미세 조직관찰은 주사 전자현미경으로 관찰하였으며, 16 가지의 실험조건들 중에서 대표적인 파단

면의 사진들을 분석해 본 결과 입내파단에 의한 취성 파괴 현상 및 입계파단에 의한 연성파괴 현상들이 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 Ti(Ti-6Al-4V) 합금강에 대한 크리프 시험과 그 시편들의 파단면을 관찰하였다. 결과들을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 크리프 시험온도가 증가함에 따라 크리프 변형에 따른 응력지수는 7.14, 6.92, 6.69 및 6.39로 점차적으로 감소하는 경향이 나타났다.
- (2) 크리프 변형의 활성화에너지는 가해진 응력의 증가에 따라서 180.79, 172.38, 170.72 및 167.29로 점차적으로 감소하는 경향을 보였다.
- (3) Ti합금강은 본 연구의 조건들에서 Larson-Miller변수의 계산에서 수명예측 상수 C값은 약 13정도로 계산되었다.
- (4) Ti합금의 크리프 시험에서 온도와 응력의 조건에서 입계파단에 의한 연성파괴 현상이 주도적으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 박용권 “플라즈마 침탄/CrN 코팅된 Ti-6Al-4V 합금의 기계적특성” 충북대학교대학원 박사학위논문, 2003.
- 2) 이근식 “플라즈마 침탄처리된 Ti-6Al-4V 합금의

Creep 특성” 충북대학교대학원 석사학위논문, 2002.

- 3) L. J. Cuddy, "Internal Stresses and Structures Developed During Creep", Met. Trans., Vol.1, pp.395~401, 1970.
- 4) W. L. Bradley, S. W. Nam and D. K. Matlock, "Fatigue Perturbed Creep of Pure Aluminum at Ambient Temperatures", Met. Trans., Vol.7A, pp.425~430, 1976.
- 5) J. H. Dorn, "The Mechanical Behaviour of Materials at Elevated Temperature" McGraw-Hill, New York, pp.432~443, 1961.
- 6) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena", Proc. Roy. Soc., Series A, London, UK, Vol.84, pp.1~12, 1910.
- 7) F. Garofalo, Fundamentals of Creep and Creep-Rupture in Metals, The Macmillian Company, New York, p.258, 1965.
- 8) E. N. da C. Andrade, "On the Viscous Flow in Metals and Allied Phenomena", Proc. Roy. Soc., Series A, London, UK, Vol.84, pp.1~12, 1910.
- 9) F. Garofalo, O. Richmond and W. F. Domis, "Design of Apparatus for Constant Stress or Constant Load Creep Tests", Trans. of ASME, Series D, J. of Basic Engineering, Vol.84, pp.287~293, June 1962.