

Ti의 Ω 법을 이용한 고온 크리프 거동해석

조진화[†] · 이헌식* · 정순억**

Creep Behavior Analysis of Pure Ti by Omega Method

Ji-hwa Cho, Hen-Six Lee and Soon-Uk Jeong

Key Words: Creep Test of Ti(티타늄의 크리프 시험), Omega Method(Ω 법), Apparent Activation Energy(겉보기 활성화 에너지), Behavior(거동)

Abstract

Creep behavior of Ti had been studied in a stress from 9.8 to 29.4 MPa and temperature rang from 873K to 973K with a special reference to tertiary creep. It was found that stress exponent of Ti was larger than that of the general pure metal and the compound metal. The relationship between true strain and strain rate in tertiary creep was appeared as the equation, $\ln \dot{\epsilon} = \ln \dot{\epsilon}_0 + \Omega \cdot \epsilon$. Also, Apparent activation energy of was appeared as 274.92kJ/mol by using the equation

$$\dot{\epsilon}_0 = A \cdot \sigma_0^{*n} \exp(-Q_0/RT)$$

1. 서론

크리프시험이란 상온이상에서 사용되는 재료를 일정하중 일정응력 일정하중 하에서 시간의 경과와 더불어 재료의 변형이 진행되는 현상을 관찰하는 것으로 많은 연구자들이 고온에서의 재료의 성질에 대한 연구를 실시하고 있다. Ti는 경량이면서도 비강도가 높고 내식성도 뛰어난 재료로서 산업설비 외에도 일상생활에까지 많이 사용되고 있다. 향후 개발되는 항공기에서는 엔진의 성능 향상을 위하여 터빈입구온도가 높아지고 이

경우 Compressor의 온도도 증가되어 600℃ 이상에서 사용되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Ti를 사용하여 일정 하중 크리프 시험을 실시하고, 그 결과를 Ω 법⁽¹⁻⁴⁾으로 해석하여 온도별 크리프거동의 차이를 규명하였다.

2. 실험방법

2.1 공시재 및 시험편

Table 1 Chemical composition of Ti

Comp	Ti	Fe	O	N	C
Wt(%)	99.80	0.05	0.10	0.04	0.01

본 연구에서 사용한 공시재는 Ti로 그 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 시험편은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 지름 10.06mm 표점거리 50mm의 봉상시험편으로 신장계를 부착하기 위

[†] 회원, 경상대학교 대학원

E-mail : gsumarin@naver.com

TEL : (055)640-3126

* 회원, 경상대학교 대학원

** 책임저자, 회원, 경상대학교 기계항공공학부

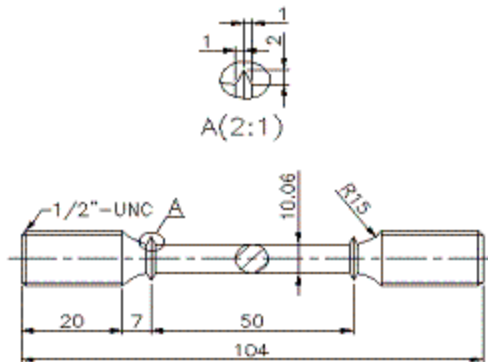


Fig. 1 Static creep test specimen

해서 돌기부분을 가진 형상으로 CNC로 가공하여 제작되었다.

본 연구의 정하중 크리프 시험에는 일정 하중 방식의 레버식 시험기를 사용하였다. 시험기의 변형률의 측정에는 1/200mm까지 측정 가능한 신장계를 사용하여 변형률을 연속적으로 자동 기록하였다. 크리프 시험은 873-973K의 온도 범위에서 초기 응력을 9.8 ~ 29.4 MPa의 범위에서 행하였다. 크리프시험은 각각의 시험 온도에서 12 시간동안 유지하여 열적인 안정을 확인한 후 실시한다.

Table 2 Summary of creep tests

Temp	Initial stress (MPa)	Rupture strain	Creep life (s)	Reduction of area (%)	Re-mark
873	14.7	1.4	1,253,484	2.21	○
		1.18	376,236	3.29	
	19.6	1.18	331,416	3.24	○
		1.2	321,558	3.4	
		1.02	321,516	3.08	
		1.4	284,760	2.05	
	29.4	1.24	46,872	4.17	○
		1.78	52,092	4.11	
1.14		61,596	3.41		
923	12.74	1.22	400,964	2.51	○
	14.7	1.3	174,060	2.51	○
	19.6	1.28	43,704	5.1	○
973	9.8	1.02	245,304	3	○
	12.74	1.44	51,300	3.31	
		1.58	57,600	1.7	○
	14.7	1.42	33,300	1.51	○

2.2 Ω 법에 의한 크리프 거동 해석

크리프의 시간축을 기술하는 여러 가지 방법이 이전부터 제안 되어 왔으나, 시간축에 포함되어 있는 파라미터의 물리적 의미는 명확하지 않다. 그러나 Ω 법은 정하중 크리프 곡선을 해석하기 위해서 고안되어진 것으로 파라미터의 물리적 의미는 명확하다.⁽⁴⁾ 본 연구의 해석에 이용된 Ω 법을 간단히 소개한다.

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln \dot{\epsilon}_0 + \Omega \cdot \epsilon \quad (1)$$

여기서, ϵ 는 진변형률, $\dot{\epsilon}$ 는 3차 크리프 영역에 있어서의 변형률속도, $\dot{\epsilon}_0$ 는 크리프 전영역에서 식 (1)이 성립한다고 가정 했을 때의 초기 변형률속도 그리고, Ω 는 실선의 기울기로서 (Fig. 3참고) 단위변형률의 증가에 대한 변형률 속도의 증가를 나타내고 있다. Ω 값은 응력 및 온도 의존성이 비교적 작지만, $\dot{\epsilon}_0$ 는 응력 및 온도 의존성이 크다. 그리고 크리프의 대부분이 3차 크리프 영역에 속할 경우에는 식 (1)을 시간 t_0 에서 파단시간 t_r 까지 적분하여, $\exp(-\epsilon_r)$ 이 1보다 작은 것을 고려하면 크리프 수명 t_r 은 이하의 식으로 나타낸다.^(5,7)

$$t_r = \frac{1}{\Omega \cdot \dot{\epsilon}_0} \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 온도 및 응력에 따른 크리프 거동

Ti의 일정 하중 크리프 시험으로 얻은 파단변형률, 파단수명, 단면감소율의 결과를 Table 2에 나타낸다. Fig. 2는 각 온도에서 응력별 결과이다. 873K, 923K에서는 제일 높은 응력을 제외한 모든 응력에서는 위쪽으로 볼록한 제 1차 크리프가 나타나지 않고 제 3차 크리프곡선 형상을 나타내고 있다. 그러나 973 K에서는 모든 응력에서 제 1차크리프가 나타남을 알 수 있다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 파단 시간은 응력과 온도가 증가함에 따라서 감소한다. 또한, 모든 경우에서 파단 변형률과 단면감소율은 파단시간에 관계없이 일정한편이다.

Fig. 3은 변형률 속도와 진변형률과의 관계를 편대수 그래프로 나타낸 것이다. 전응력 범위에서 변형률 속도의 대수와 진변형률의 사이에

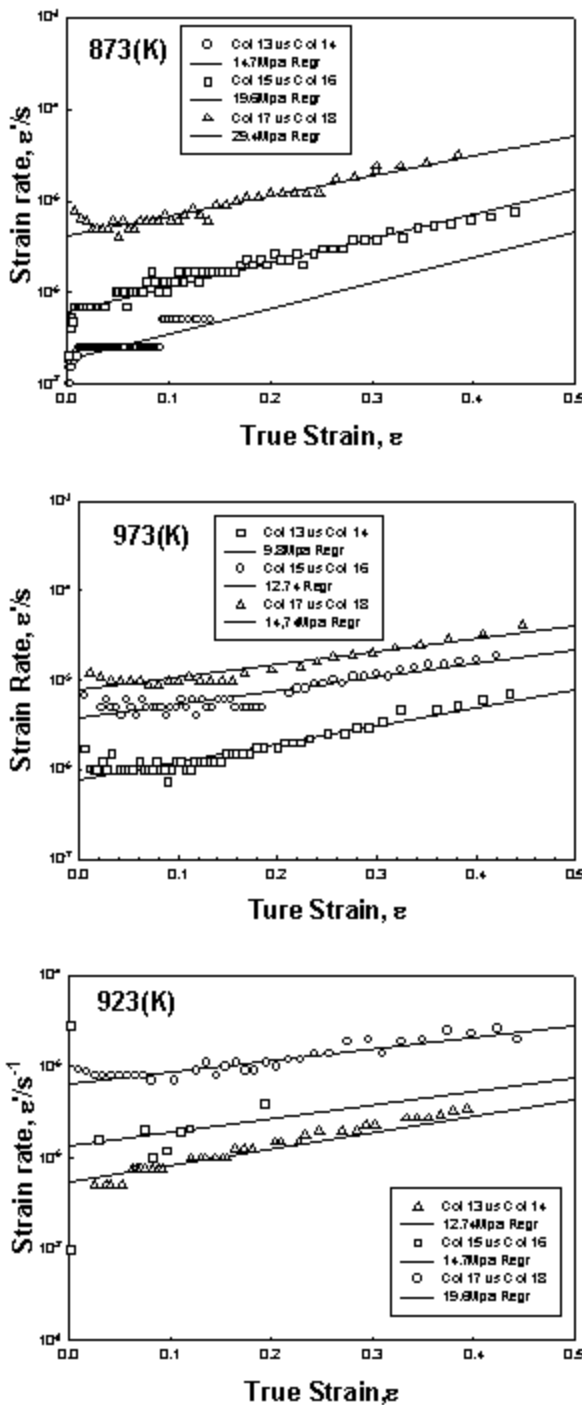


Fig.3 Relationship between true strain and strain rate

는 비교적 넓은 범위에 걸쳐서 식 (1)에서와 같이 직선관계가 성립한다. 이들 직선으로부터 기울기 n 및 가상적 초기 변형률 속도를 결정하는 경우에 합금강은 3차 크리프의 끝부분에서 급격한 곡선의 증가를 나타내지만 Ti에서는 직선범위

Table 3 Summary of imaginary initial strain rate and strain rate acceleration factor

Temp (K)	Initial stress (Mpa) σ_0	Imaginary initial strain rate $\dot{\epsilon}_0$ (s^{-1})	rate acceleration factor Ω
873	14.7	1.8×10^{-7}	2.82
	19.6	6.3×10^{-7}	2.64
	29.4	4.24×10^{-6}	2.15
923	12.74	5.54×10^{-7}	1.78
	14.7	1.35×10^{-6}	1.49
	19.6	6.65×10^{-6}	1.27
973	9.8	7.94×10^{-7}	1.98
	12.74	3.78×10^{-6}	1.51
	14.7	7.75×10^{-6}	1.42

에서 크게 벗어나는 현상을 나타내지 않았다. 명백히 3차 크리프 영역이라고 판단되는 부분의 변형률 속도와 진변형률의 수치를 사용해 회복직선을 구했다. Fig. 3은 가상적 초기 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_0$ 와 변형률 속도 가속 인자 Ω 의 측정결과를 Table 3에 나타낸다. Table 3에서부터 알 수 있듯이 $\dot{\epsilon}_0$ 와 Ω 는 온도 및 응력에 민감하다. 이 점은 다른 단상합금에서의 결과와 일치하였다.⁽⁵⁾ 또한, Table 3을 보면 온도가 일정할 경우, 응력이 증가하면 Ω 는 감소하고, 응력이 일정할 경우에는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향이 보였다.

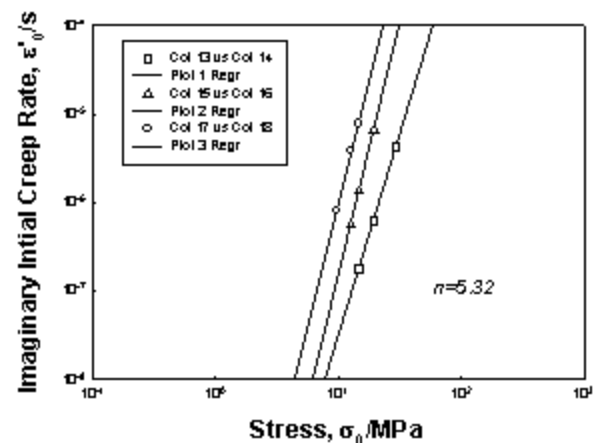


Fig 4 Stress dependence of imaginary initial creep rate

Fig. 4는 Ti의 가상적 초기 변형률 속도와 응력의 관계를 나타낸 양 대수 그래프이다. 가상적 초기 변형률 속도와 응력과의 사이에는 대수 그래프상 직선 관계가 성립하고, 둘 사이의 관계는 다음 식으로 나타낸다.

$$\dot{\epsilon}_0 = A_0 \cdot \sigma_0^{n_0}$$

(3)

여기서, A_0 는 온도에 의존하는 정수, n_0 는 직선의 기울기로서 응력지수이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 Ti의 응력지수의 평균치는 5.32이다.

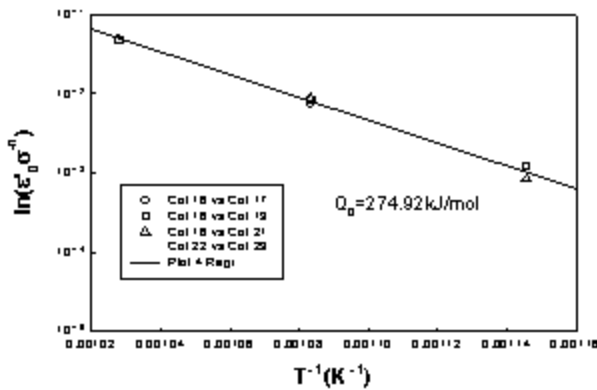


Fig. 5 Temperature dependence of stress compensated imaginary initial creep rate

Fig. 5는 Ti의 가상적 초기 변형률 속도의 온도 의존성을 나타낸 것이다. 응력이 다른 경우에서도 비교할 수 있도록 종속의 가상적 초기 변형률 속도를 응력으로 규격화하였다. Fig. 5에서 가상적 초기 변형률 속도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_0 = A \cdot \sigma_0^{n_0} \exp(-Q_0/RT) \quad (3)$$

여기서, A 는 온도에 의존하지 않는 정수, Q_0 는 결보기 활성화 에너지로서, 그 값은 2798.98 및 274.92 kJ/mol 이다. 값의 유효성을 검토하기 위해서 식 (4)를 이용하여 계산한 가상적 초기 변형률 속도의 계산치와 실험치와의 비교를 Fig. 6에 나타낸다. 미소한 오차는 있으나 가상적 초기 변형률 속도의 계산치와 실험치는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

크리프에 관한 지금까지의 연구에서는 최소 크리프 속도의 응력 및 온도 의존성을 수식화 하는 경우가 많았기 때문에 본 연구에서는 최소 크리

프 속도의 구성 방정식을 결정하여 가상적 초기 변형률 속도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

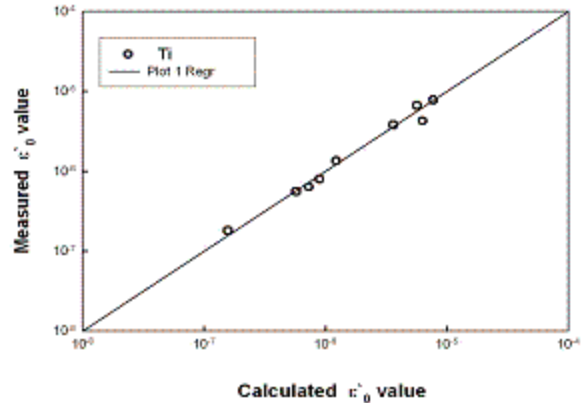


Fig. 6 Comparison of calculated imaginary initial creep rate with experimental life

크리프에 관한 지금까지의 연구에서는 최소 크리프 속도의 응력 및 온도 의존성을 수식화 하는 경우가 많았기 때문에 본 연구에서는 최소 크리프 속도의 구성 방정식을 결정하여 가상적 초기 변형률 속도의 경우와 비교 검토하였다.

$$\dot{\epsilon}_m = A_m \cdot \sigma_0^{n_m} \exp(-Q_m/RT) \quad (5)$$

위 식은 최소 크리프 속도의 구성 방정식으로, 여기서 A_m 은 온도에 의존하지 않는 정수, Q_m 은 결보기 활성화 에너지, n_m 은 응력지수이다. 식 (4)와 식 (5)를 비교하면 A_0 와 A_m 의 값은 어느 정도 차이가 있으나, 응력지수 및 결보기 활성화 에너지는 큰 차이가 없다.

3.2 크리프 응력이 파단 수명에 미치는 영향

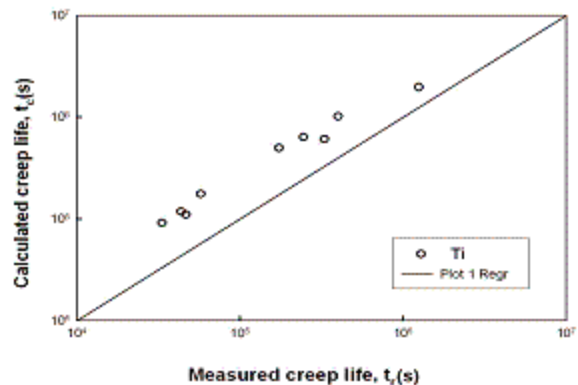


Fig. 7 Comparison of calculated creep life with experimental

정하중 크리프의 전 영역에서 식(1)이 성립하는 경우의 크리프 파단 수명은 식 (2)로 나타내어진다. Fig 7은 식 (2)의 적용성을 검증하기 위한 것으로 종축은 Table 3의 Ω 의 수치와 가상적 초기 변형률 속도의 수치를 사용하여 식 (2)로부터 계산한 크리프 파단 수명이다. 계산에 의한 파단 수명보다 실측에 의한 파단수명이 긴 이유는 크리프의 전 영역에 걸쳐서 식 (1)이 성립한다고 가정했기 때문이다.

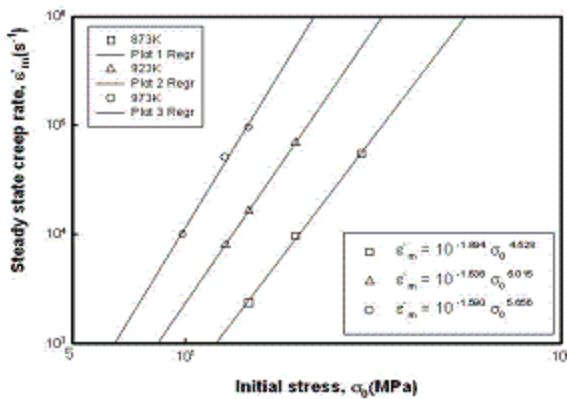


Fig. 8 Relationship between initial stress (σ_0) and steady state creep rate ($\dot{\epsilon}_m$) of Ti

Fig. 8은 각 온도에서 정상 크리프속도와 초기응력 σ_0 와의 관계를 그래프로 나타낸 것으로 873K에서 $\dot{\epsilon}_m = 10^{-1.894} \sigma_0^{4.528}$
 932K에서 $\dot{\epsilon}_m = 10^{-1.636} \sigma_0^{5.015}$
 973K에서 $\dot{\epsilon}_m = 10^{-1.590} \sigma_0^{5.666}$
 이와 같은 결과가 나왔다.

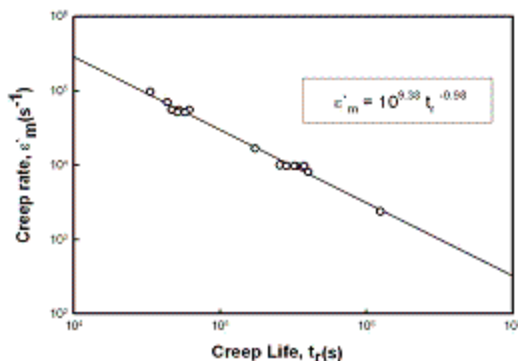


Fig. 9 Relationship between creep life (t_r) and steady state creep rate ($\dot{\epsilon}_m$) at 873K, 923K and 937K

Fig. 9는 정상 크리프 속도와 크리프 파단 시간과의 관계를 나타내었다. 그림에서부터 알 수 있듯이 $\dot{\epsilon}_m$ 과 t_r 과의 사이에는 $\dot{\epsilon}_m = 10^{0.938} t_r^{-0.99}$ 이라는 식이 성립하였다.

4. 결론

(1) Ti의 3차 그래프 영역에서 변형률속도와 대수와 진변형률과의 사이에는 다음과 같은 직선 관계가 성립하였다.

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln \dot{\epsilon}_0 + \Omega \cdot \epsilon$$

(2) 가상적 초기 변형률 속도의 응력 및 온도 의존성을 다음 식과 같이 수식화 하였다. 또한 Ti에서 결보기 활성화에너지는 2798.98 및 274.92kJ/mol 로 나타났다.

$$\dot{\epsilon}_0 = A \cdot \sigma_0^{*n} \exp(-Q_0/RT)$$

(3) Ti의 온도별 정상 크리프 속도와 초기응력 σ_0 의 관계식

$$\begin{aligned} 873K에서 \quad \dot{\epsilon}_m &= 10^{-1.894} \sigma_0^{4.528} \\ 932K에서 \quad \dot{\epsilon}_m &= 10^{-1.636} \sigma_0^{5.015} \\ 973K에서 \quad \dot{\epsilon}_m &= 10^{-1.590} \sigma_0^{5.666} \end{aligned}$$

(4) Ti의 정상 크리프 속도와 크리프 파단시간과의 관계에는 다음과 같은 식이 성립 하였다.

$$\dot{\epsilon}_m = 10^{0.938} t_r^{-0.99}$$

후기

이 논문은 2004년 BK21사업에 의해서 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) 박인덕, 남기우, 2002, “오스테나이트계

- 25Cr-20Ni 스테인리스강의 Ω 법을 이용한 고온 크리프 거동해석”, 대한기계학회논문 집, 제 26권, 제2호, PP.349 ~ 356.
- (2) 김우곤, 김대환, 류우석, 2000, “316L(N) 스테인리스강의 Monkman-Grant 크리프 수명식의 적용성,” 대한기계학회논문집, 제 24권 제9호, pp.2326 ~ 2333.
- (3) 원보역, 정순역, “Monkman-Grant법에 의한 순수Ti의 크리프수명 예측,” 대한기계학회지 2003년 춘계학술대회 논문집
- (4) Endo T, and Masuyama F., 1997, “*クリップ挙動解釋法の最近の進法とへの實用合金商用*,” *Materia japan*, 36, pp.255 ~ 231.
- (5) Prager M., 1994, “Service and Reliability Improvement: Nuclear, Fossil and Petrochemical Plants,” ASME, PVP-vol. 288, pp.401 ~ 421.
- (6) Sherby O. D. and Burke P. M., 1966, “progress in Materials science,” 13, pp.340 ~ 369.
- (7) Endo T. and Shi J., 1994, “Factor Affecting Creep Rate and Creep Life of a 2.25Cr-1Mo Steel under Constant Load,” *strength of Material*, Ed. by Oikawa H., Maruyama K., Takeuchi S. and Yamaguchi M., JIM, pp.665 ~ 668.
- (8) Prager M, 1994, “The Omega Method-An Effective Method for Life and Damage Prediction in Creep Tests and Service,” *Proc. of 10th Int. Conf. on Strength of material*, Sendai, JIM, pp.571 ~ 575. Put reference text here. Put reference text here. Put reference text here. Put reference text here.

