

화력 발전용 로터강의 초기 변형율이 CYCLIC 크리프 특성에 미치는 영향에 관한 연구⁺

오 세 규* · 정 순 역** · 한 상 덕***
(1992년 3월 25일 접수)

A Study on the Effect of Initial Strain on Cyclic Creep Properties of Steam Turbine Rotor Steel

S. K. Oh, S. U. Jeong and S. D. Han

Key Words : Transition Creep Region(전이 크리프 영역), Steady State Creep Rate(정상 크리프 속도), Initial Strain(초기 변형율), Elastic Strain(탄성 변형율), Anelastic Strain(의탄성 변형율)

Abstract

The creep behaviors of 1%Cr-Mo-V and 12%Cr steam turbine rotor steels under static or cyclic load were examined at 600 and 700°C. The relationship between these two kinds of phenomena was studied and the experimental results were summarized as follows :

1) It is confirmed that the cyclic creep strain dependent on time is more available for creep behavior analysis according to frequency change than that dependent on number of cycles, and the static creep, the special case of cyclic creep with stress ratio of 1 can be also more effectively analyzed by time-dependence.

2) The steady cyclic creep rate vs. the steady static creep rate, increases according to the increase of stress ratio, and this phenomena may occur on occasion of the decrease of the internal stress.

3) The initial strain affects on all the creep properties of the transient region, the steady state region and the rupture time in cyclic creep as well as static creep, and the quantitative relationships among them exist.

+ 1992년 한국해양공학회 춘계 학술대회 발표(1992년 5월 30일)

* 정희원, 부산수산대학교 공대 기계공학과

** 정희원, 부산수산대학교 대학원 기계공학과

*** 통영수산전문대학 기관학과(강사)

1. 서 론

발전소 로터는 정상 상태에서의 정하중 손상 뿐만 아니라 기동과 정지의 반복으로 인한 cyclic 크리프 손상을 수반하며, cyclic 크리프 acceleration 및 deceleration에 대한 해석은 매우 중요하다.^{2,4)} 일정 하중 상태에서의 천이 크리프 현상은 시간 경화(time-hardening) 또는 변형을 경화설(strain-hardening theory)에 의해 설명되고, 정상 상태에서는 Norton의 power law 크리프에 의해 시간 의존형(time-dependent) 변형⁶⁾으로 해석되고 있으나, 응력·온도 및 strain의 변동에 의한 cyclic 크리프 현상은 해석이 난해하며, 고온 변형이 용이한 Al, Cu, Mg 등의 순금속의 경우 의탄성 변형(anelastic strain) 현상에 대한 실험 데이터는 보고^{2,4)}된 바 있으나, 로터강의 초기 변형율(initial strain)에 의한 cyclic 크리프 현상의 정량적인 해석은 본 연구가 처음이다.

따라서, 본 연구에서는 현재 화력 발전용 고압 로터강으로 사용되고 있는 1%Cr-Mo-V강 및 열효율 향상을 위해 최근 개발된 12%Cr강에 대한 cyclic 크리프 실험을 통하여 static 크리프와 cyclic 크리프의 상관성 규명과 초기 변형율(ϵ_0)이 천이, 정상 크리프 변형 및 파단 수명에 미치는 영향과 아울러 cyclic 주기가 크리프 속도에 미치는 영향 등을 연구하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 시험편은 ASTM E139-83의 규정에 따라 표점 거리 50mm, 직경 10mm인 환봉(round-bar)으로 가공하였으며, 시험편의 화학

Table 1 Chemical composition of 1%Cr-Mo-V and 12%Cr steel

Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
Wt. %	0.25	0.03	0.65	0.007	0.005	0.64	1.21	1.12	0.29	0.004	0.03

12%Cr

Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb
Wt. %	0.16	0.24	0.67	0.005	0.003	0.58	11.01	0.92	0.23	0.05

조성비 및 온도별 기계적 성질은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 실험 장치는 단식 레버형 cyclic 하중 크리프 시험기(ATS 社, 레버 비 : 1/20, 최대 하중 : 10klb)에 고온용 신장계(extensometer)를 부착하여 600℃ 및 700℃에서 $\pm 2^\circ\text{C}$ 온도를 유지하면서 수행하였다. 그리고, weight 하부 elevator를 상하 이동시켜 하중 변화가 사각 파형이 유지되도록 하였다(Fig. 2 참조). 주기(τ)는 0.3, 1, 4hr로 하였으며, 주기당 최대 응력 유지 시간비(μ)는 0.5, 0.67, 0.83으로 하였다. 최대 응력(σ_{\max}) 및 응력비($R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)의 변화는 Table 2에 나타내었다.

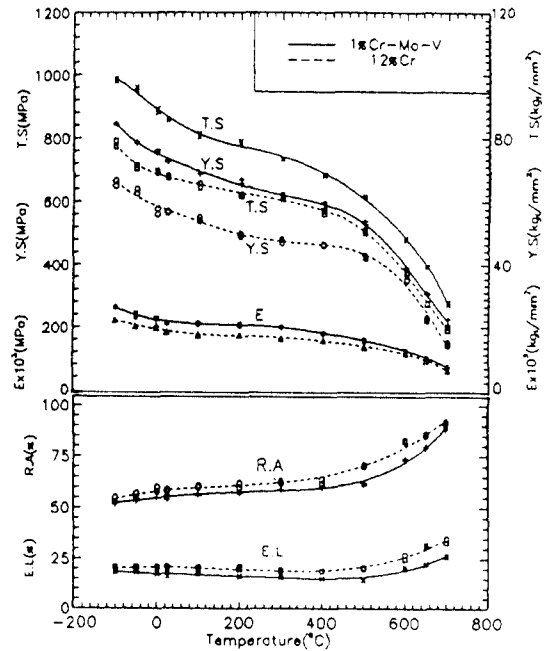


Fig. 1 Tensile test results of 1%Cr-Mo-V and 12%Cr steel (Y.S : Yield Strength, T.S : Tensile Strength, E : Elastic Modulus, R.A : Reduction of Area, E.L : Elongation)

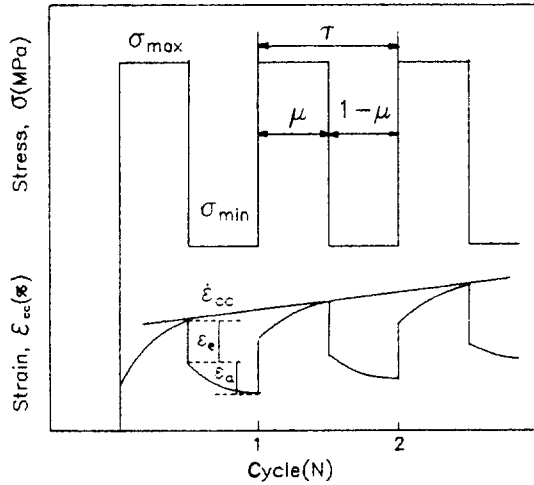


Fig. 2 Schematic diagram showing the cyclic history of stress and strain

Table 2 Cyclic creep test results for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at 600°C.

σ_{max} (MPa)	1% Cr-Mo-V			12% Cr		
	R	A	ϵ_c (%)	R	A	ϵ_c (%)
215	0.2	0.162	0.177	0.2	0.130	0.159
	0.4	0.172	0.195	0.6	0.144	0.172
	0.8	0.205	0.199	1.0	0.157	0.176
245	0.2	0.191	0.204			
	0.4	0.215	0.242	0.2	0.178	0.230
	0.6	0.235	0.233			
	0.8	0.260	0.238	1.0	0.215	0.182
	1.0	0.292	0.241			
275	0.2	0.242	0.287	0.2	0.214	0.250
	1.0	0.403	0.315	0.6	0.264	0.281
305	0.2	0.277	0.389	0.2	0.321	0.309
	0.6	0.400	0.352			
	1.0	0.552	0.379	1.0	0.440	0.346

3. 실험 결과

Fig. 3, 4는 12%Cr강의 $\tau=0.3, 1, 4$ hr일 경우에 변형률(ϵ_{cc})—cycle 수(N) 및 변형률(ϵ_{cc})—시간(t) 관계를 나타내고 있는데, 후자를 적용했을 경우 τ 의 영향이 적어져 상호 근접하여지는 것을 알 수

있으며, 따라서 본 cyclic 크리프는 사이클 의존형이 아닌 시간 의존형 변형으로 해석될 수 있음을 알 수 있다.

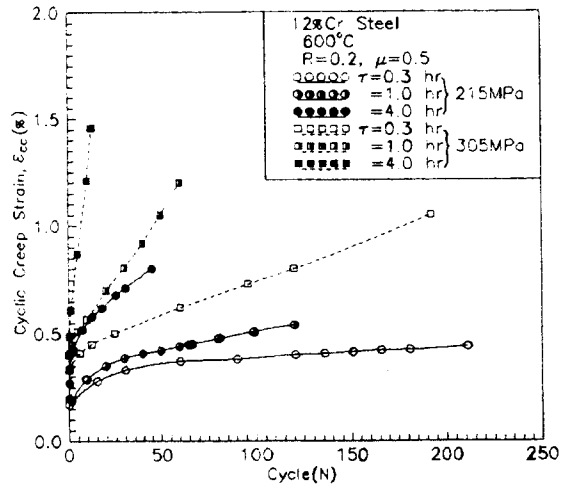


Fig. 3 Relationship between number of cycle(N) and cyclic creep strain(ϵ_{cc}) for 12% Cr steel

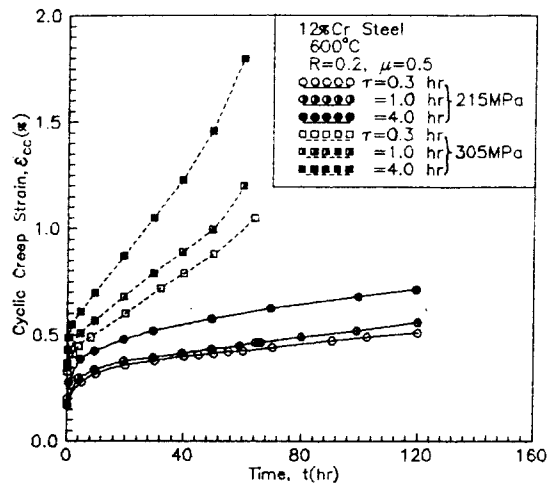


Fig. 4 Relationship between number of time(hr) and cyclic creep strain(ϵ_{cc}) for 12% Cr steel

3.1 초기 변형 및 천이 영역 cyclic 크리프에 대한 해석

양 강종에 대한 초기 변형률(ϵ_0)과 최대 크리프 응력(σ_{max})의 상관 관계는 500~700°C에서 탄성 계

수(E)로 무차원화(normalized)하여 Oh 등⁵⁾에 의하여 다음과 같이 보고 되었다.

$$\epsilon_0 = d(\sigma_{max}/E)^e \dots\dots\dots (1)$$

그리고, Ishikawa 등¹⁾에 의한 천이 크리프 변형량(ϵ_{ic})과 t/t_0 의 상관 관계는 다음과 같다.

$$\epsilon_c = \epsilon_{ic} - \epsilon_0 = A \ln(1+t/t_0) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, A : 기울기(slope), t_0 : reference 시간이 다.

Fig. 5, 6은 양 강종에 대하여 $\tau=1hr$, $\mu=0.5$ 일 경우의 실험 결과를 나타내고 있는데, 식 (2)가 잘 적용되었으며, Table 2의 $\epsilon_0 - A$ 의 관계를 Fig. 7, 8에 나타냈다. 즉, 다음과 같이 모델화할 수 있다.

$$A = a(\epsilon_0)^b \dots\dots\dots (3)$$

여기서, a 및 b는 R의 함수로 표시 가능하고, 600°C에서 양 강종에 대한 적용 결과는 다음과 같다.

1% Cr-Mo-V :

$$a = 1.092R + 0.852, \quad b = 0.287R + 1.137 \dots (4)$$

12% Cr :

$$a = 1.617R + 0.232, \quad b = 0.604R + 0.705 \dots (5)$$

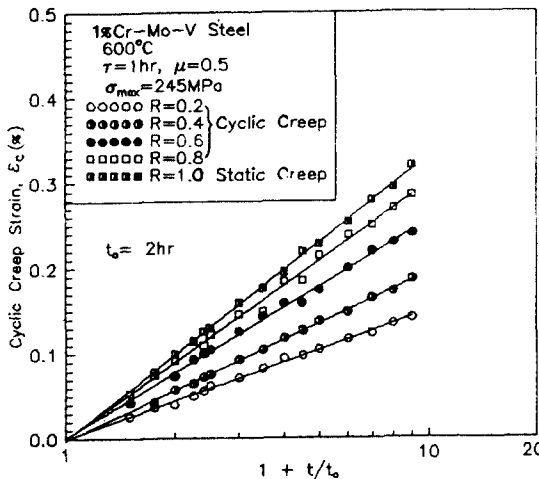


Fig. 5 Relationship between cyclic creep strain(ϵ_c) and $\log(1+t/t_0)$ for 1% Cr-Mo-V steel at transient stage

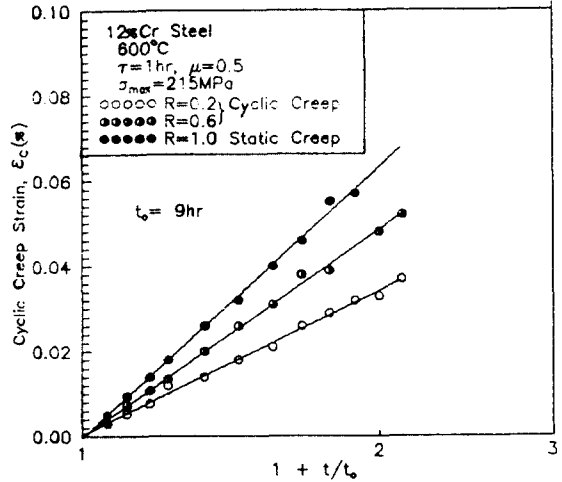


Fig. 6 Relationship between cyclic creep strain(ϵ_c) and $\log(1+t/t_0)$ for 12% Cr steel at transient stage

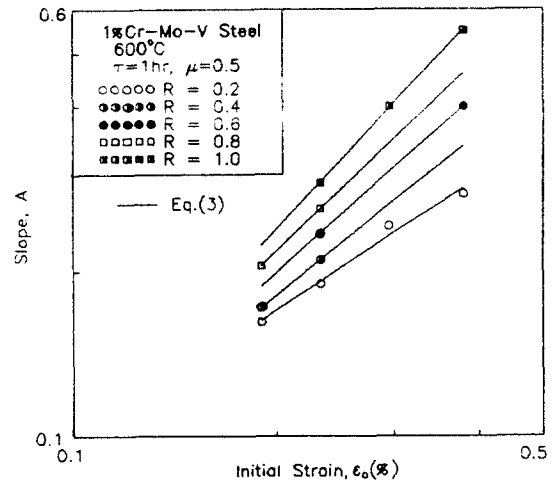


Fig. 7 Relationship between slope(A) and initial strain(ϵ_0) for 1% Cr-Mo-V steel 600°C

그러므로, 천이 영역에서의 전체 크리프 변형량은

$$\epsilon_{ic} = \epsilon_0 + a(\epsilon_0)^b \ln(1+t/t_0) \dots\dots\dots (6)$$

이며, 따라서 ϵ_0 는 σ_{max} 에 의존하며, ϵ_{ic} 는 ϵ_0 , t 및 R 에 의존함을 알 수 있다.

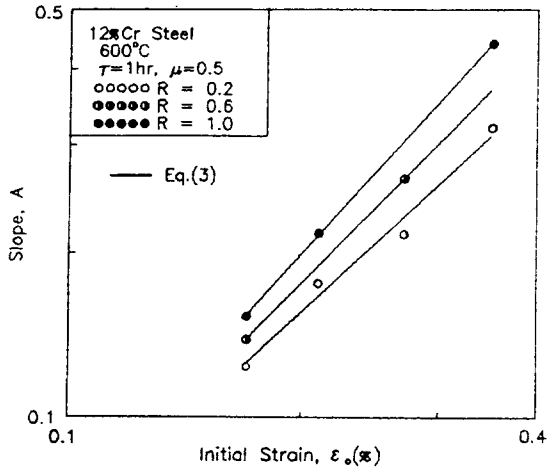


Fig. 8 Relationship between steady(A) and initial strain(ϵ_0) for 12%Cr steel 600°C

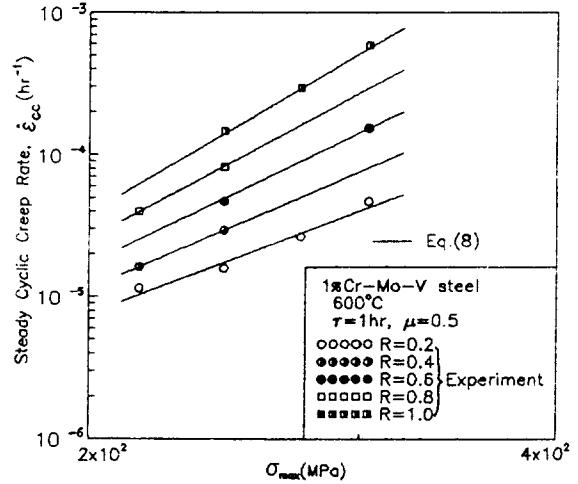


Fig. 9 Relationship between steady cyclic creep rate($\dot{\epsilon}_{cc}$) and maximum stress(σ_{max}) for 1% Cr-Mo-V steel at 600°C

3. 2 정상 상태 cyclic 크리프 및 파단 수명에 대한 해석

3. 2. 1 최대 응력이 크리프 속도 및 수명에 미치는 영향

Davies등⁷⁾에 의하면 정상 크리프 속도($\dot{\epsilon}_{cc}$)는 σ_{max} 및 $\Delta\sigma$ ($=\sigma_{max}-\sigma_{min}$)에 의존한다고 하여

$$\dot{\epsilon}_{cc} = C_1 \exp(C_2 \sigma_{max}) \dots\dots\dots (7)$$

로 나타내었으며, 여기서 C_1 : $\Delta\sigma$ 의 함수, C_2 : 재료 정수이다. 그리고, 식 (7)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{cc} = C(\sigma_{max})^n \dots\dots\dots (8)$$

여기서, C: 주어진 $\Delta\sigma$ (R)에서의 재료 정수이며, n: R에 따른 재료 정수이다. 양 강종에 대한 실험 결과는 Fig. 9, 10에 나타냈으며, 이 경우 재료 정수는

600°C
1% Cr-Mo-V :
 $C = \exp(-12.979R - 31.191)$, $n = 2.834R + 3.584$ (9)

12% Cr :
 $C = \exp(-20.721R - 23.153)$, $n = 4.180R + 2.174$ (10)

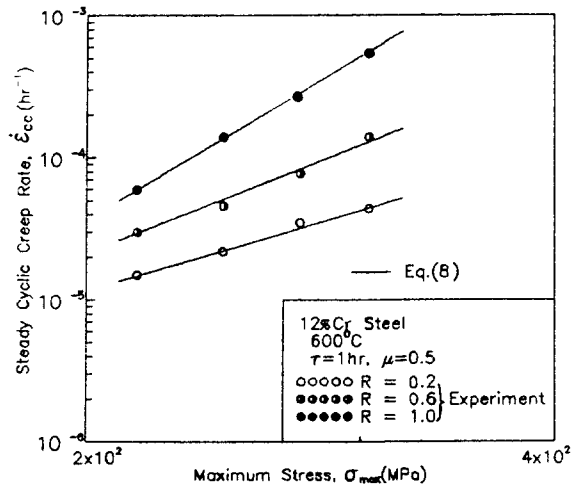


Fig. 10 Relationship between steady cyclic creep rate($\dot{\epsilon}$) and maximum stress(σ_{max}) for 12% Cr steel at 600°C

700°C
1% Cr-Mo-V :
 $C = \exp(-2.385R - 22.472)$, $n = 0.703R + 3.076$ (11)

12% Cr :
 $C = \exp(-0.720R - 24.123)$, $n = 0.263R + 3.371$ (12)

로 되었다. 그리고, 식 (1)의 σ_{max} 를 식 (8)에 대입

하여 $\dot{\epsilon}_{cc} - \epsilon_0$ 관계식으로 정리하면

$$\dot{\epsilon}_{cc} = CE^n(\epsilon_0/d)^{n/e} \dots\dots\dots (13)$$

여기서, C, n, d, e는 재료 정수이며, E는 탄성 계수이다. 따라서, 정상 크리프 변형 속도도 ϵ_0 와 상관 관계가 있음을 알 수 있으며, σ_{max} 및 R에 의존함을 알 수 있다. Fig. 11, 12는 양 강종에 대해 식 (6), (13)에 의한 ϵ_{cc} 와 $\dot{\epsilon}_{cc}$ 를 실험 데이터와 비

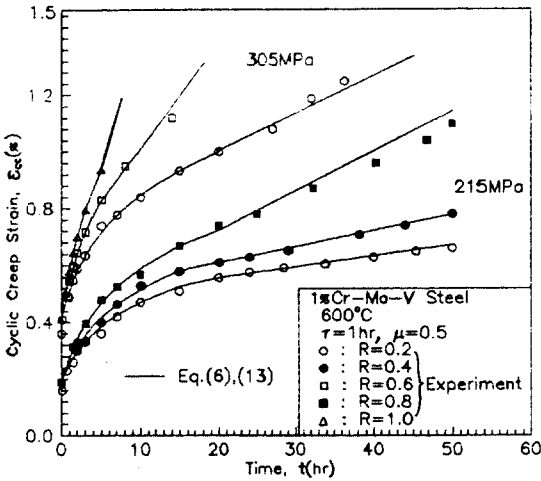


Fig. 11 Comparison between calculated results and experiments for 1%Cr-Mo-V steel at 600°C

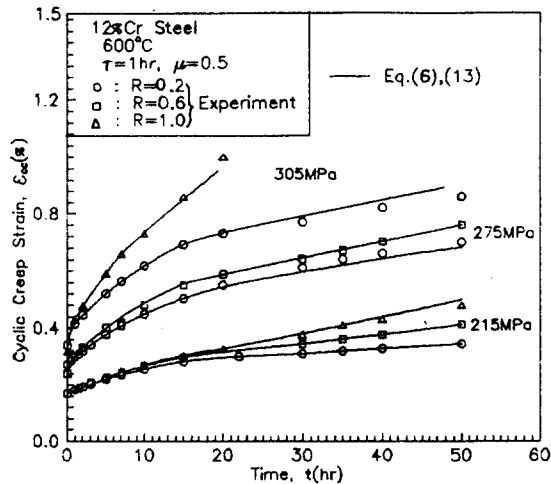


Fig. 12 Comparison between calculated results and experiments for 12%Cr steel at 600°C

교한 것으로서 잘 일치함을 알 수 있다.

그리고, 양 강종의 경우 $\tau=1$ hr, $\mu=0.5$ 일 때, $\dot{\epsilon}_{cc} - t_{rc}$ 관계를 Fig. 13, 14에 나타냈는데, σ_{max} , R 및 시험 온도에 관계없이 동일 직선상에 군집하여 다음식으로 모델화되었으며, Davies등⁷⁾의 보고와 일치하였다.

$$(\dot{\epsilon}_{cc})^m t_{rc} = K \dots\dots\dots (14)$$

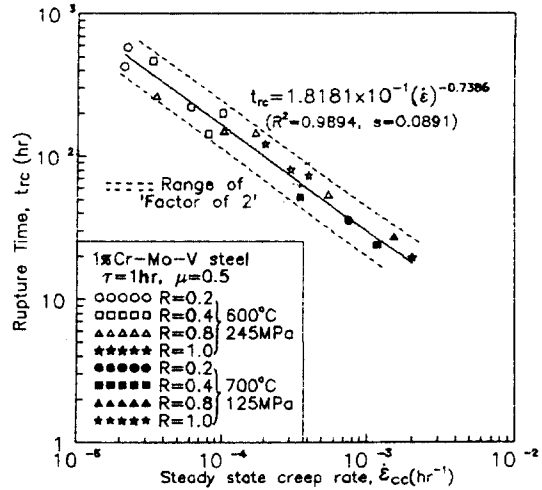


Fig. 13 Relationship between steady cyclic creep rate($\dot{\epsilon}_{cc}$) and rupture time(t_{rc}) for 1%Cr-Mo-V steel at 600°C and 700°C

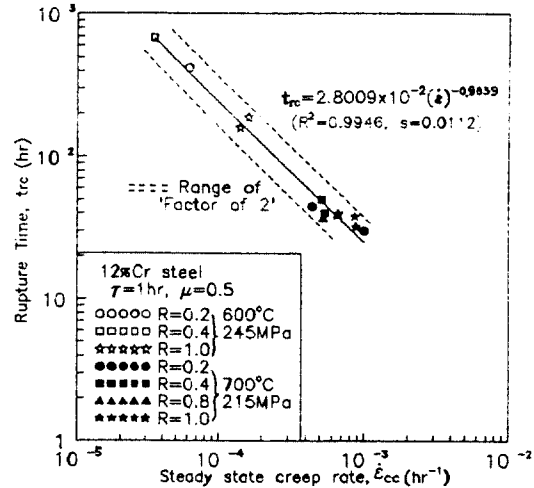


Fig. 14 Relationship between steady cyclic creep rate($\dot{\epsilon}_{cc}$) and rupture time(t_{rc}) for 12%Cr steel at 600°C and 700°C

여기서, m, K 는 재료 상수이다. 따라서, 식(8)과 (14)에서 $t_{rc} - \sigma_{max}$ 관계식은

$$t_{rc} = KC^{-m}(\sigma_{max})^{-mn} \dots\dots\dots (15)$$

그리고, 식 (1)과 (15)에서 $\epsilon_o - t_{rc} - \sigma_{max}$ 관계식은

$$\frac{\epsilon_o}{t_{rc}} = \frac{d C^m}{K E^e} (\sigma_{max})^{e+mn} \dots\dots\dots (16)$$

로 되며, Fig. 15는 식 (16)에 의한 예상 수명(t_{rc}')과 실험에 의한 실제 수명(t_{rc})을 비교한 것으로서 상호 잘 일치하였다. 따라서, 식 (16)으로부터 크리프 온도 및 응력비(R)에서 작용 응력과 초기 변형만으로 수명을 간단히 예측할 수 있음을 알 수 있다.

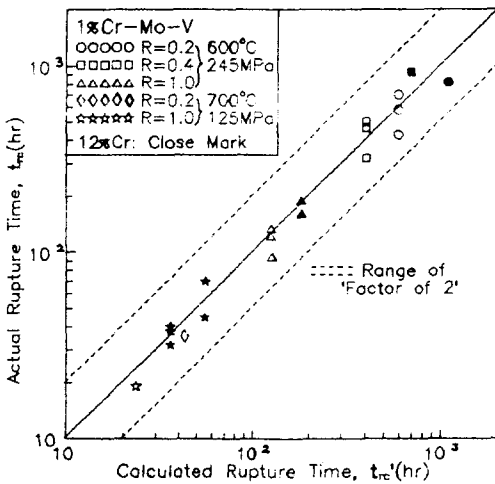


Fig. 15 Comparison at actual rupture time(t_{rc}) and calculated rupture time(t_{rc}') for 1% Cr-Mo-V and 12%Cr steel

3.2.2 주기 및 최대 응력 유지 시간이 크리프 속도에 미치는 영향

Fig. 16, 17은 양 강종의 경우 $\tau=1$ hr로 일정하게 하고, $\mu=0.5, 0.67, 0.83$ 으로 변화 시켰을 때, static 크리프($R=1$)에 대한 cyclic 크리프의 속도 비($\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$)를 보이고 있는데, 양 강종 모두 μ 가 증가할수록 $\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$ 값이 증가하였다. 또한, 온도가 낮을수록 최저 하중 작용 직후 탄성 변형량(ϵ_e) 및

의탄성 변형량(ϵ_{e0})의 증가로 인하여 그 영향이 뚜렷하며(Fig. 2 참조), 1%Cr-Mo-V강에서 영향이 크게 나타났다.

Fig. 18은 양 강종의 경우, 600°C에서 $\mu=0.5$ 로 일정할 때 τ 의 영향을 보이고 있는데, τ 가 증가할수록 $\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$ 값이 증가하며, 작용 응력이 높을수록 τ 의 영향이 뚜렷하였다(Fig. 3, 4 참조). 그리고, $\tau=4$

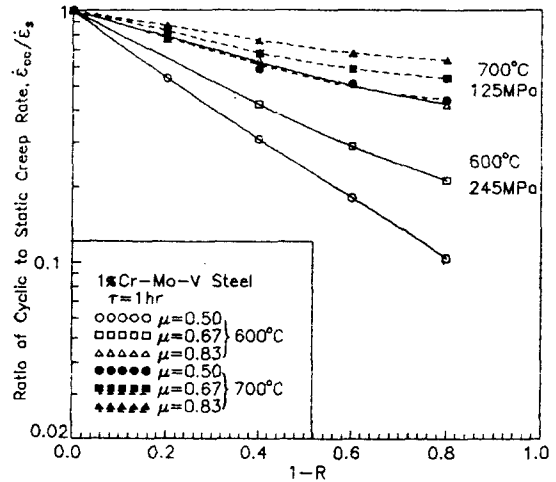


Fig. 16 Relationship between the ratio of cyclic to static creep rate($\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$) vs. $1-R$ for 1% Cr-Mo-V steel at 600°C and 700°C

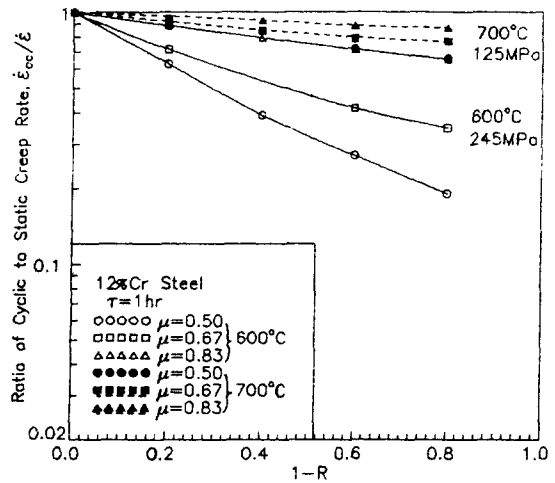


Fig. 17 Relationship between the ratio of cyclic to static creep rate($\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$) vs. $1-R$ for 12% Cr steel at 600°C and 700°C

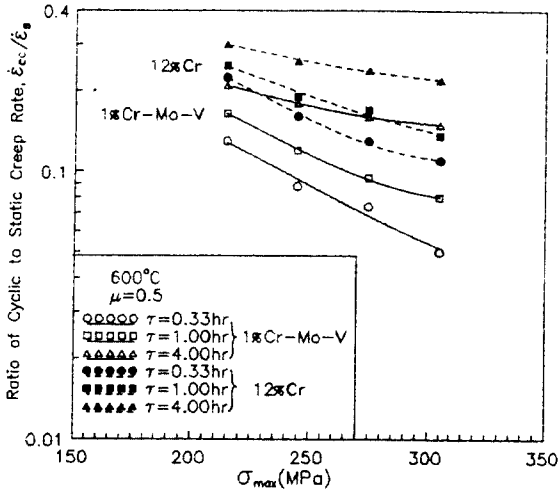


Fig. 18 Relationship between the ratio of cyclic to static creep rate ($\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$) vs. maximum stress (σ_{max}) for 1%Cr-Mo-V and 12%Cr steel at 600°C

hr에서는 σ_{max} 의 영향이 적어져서 $\dot{\epsilon}_{cc}/\dot{\epsilon}_s$ 의 값이 대체로 비슷하여졌다. 따라서, cyclic 크리프의 μ 및 τ 가 증가할수록 static 크리프에 접근함을 알 수 있다.

4. 고찰

Fig. 9, 10의 동일 응력하에서 R값의 증가에 따른 $\dot{\epsilon}_{cc}$ 의 증가는 내부 응력(σ_i)의 변화로서 해석 가능한데, 부가 응력(σ_a)과 유효 응력(σ_e)의 상관 관계는 다음과 같다.

$$\sigma_i = \sigma_a - \sigma_e \quad \dots\dots\dots (17)$$

재료에 응력이 작용되면 부가 응력에 대한 대응 응력으로서 내부 응력(마찰 응력)이 작용되며, 실제적인 변형 응력은 σ_e 가 된다. σ_i 의 측정은 응력 이완 및 변형율 이완²⁾의 2가지 방법이 있으나 본 연구에서는 전자를 사용하였는데, 정상 상태 크리프(본 시험의 경우 하중작용 10시간 경과 후)에서 하중의 점진적인 감소를 행하여 $d\epsilon/dt$ 가 0인 하중을 구하였다.

$\sigma_{max} = 245$ MPa, $R = 0.2 \sim 1.0$ 인 경우에 σ_i 를 구한 결과는 Fig. 19와 같이 나타났다. 즉 R가 증가할수

록 σ_i 는 점차 감소하고, σ_e 는 증가함을 알 수 있다. 따라서, $\dot{\epsilon}_{cc}$ 가 증가하며, 1%Cr-Mo-V강의 $\dot{\epsilon}_{cc}$ 가 높게 나타난 것으로 사료된다. 한편, 동일 주기($\tau = 1$ hr)하에서 μ 의 증가는 단위 주기당 최저 응력 작용 시간이 감소하며, 이에 따라 의탄성 변형량(ϵ_a)이 감소하여 $\dot{\epsilon}_{cc}$ 가 증가된 것으로 판단된다. 이상을 종합할 때 static 크리프는 cyclic 크리프의 극단적인 경우임을 알 수 있고, 양 강종 모두 ϵ_e 및 ϵ_a 로 인하여 cyclic creep deceleration 현상이 나타났으며, ϵ_a 는 cyclic 크리프에 있어서 천이는 물론 정상 상태와 파단 수명에 연속적으로 영향을 미치며, 정량적인 상관 관계가 있음을 알 수 있다.

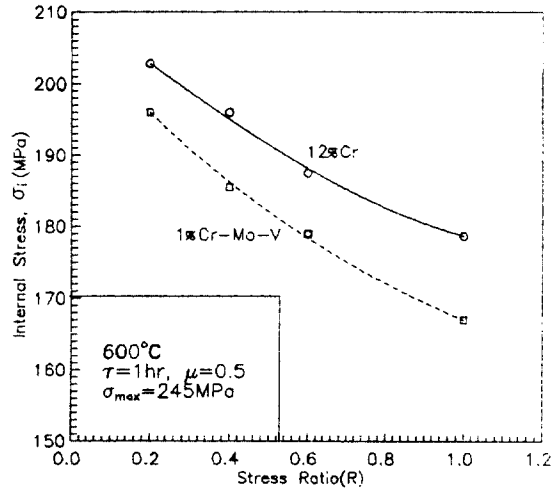


Fig. 19 Relationship between internal stress(σ_i) and stress ratio(R) for 1%Cr-Mo-V and 12%Cr steel at 600°C
Comparison at actual rupture time(t_{rc}) and calculated rupture time(t_{cc}) for 1%Cr-Mo-V and 12%Cr steel

5. 결론

화력 발전용 로터강(1%Cr-Mo-V 및 12%Cr)에 대한 cyclic 크리프 실험결과는 다음과 같다.

- 1) cyclic 크리프는 시간 의존형 변형으로 해석될 수 있으며, static 크리프는 cyclic 크리프의 극단적인 경우(응력비=1)라 할 수 있다.
- 2) 양 강종 모두 응력비가 증가함에 따라 정상 상태에 있어서 static 크리프 속도에 대한 cyclic

크리프 속도의 비가 증가하였으며, 이 현상은 내부 응력의 감소로서 해석 가능하였다.

3) cyclic 크리프의 초기 변형은 천이 및 정상 크리프 변형과 파단 수명에 연속적으로 영향을 미치며, 정량적인 상관 관계가 존재하였다.

참 고 문 헌

- 1) Ishikawa H., "Relation Between Cyclic Creep and Pure Creep on Copper", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 109, pp. 221~225, 1987
- 2) Meshii M., Ueki M. and Chiou H.D., "Cyclic Creep Behavior and Internal Stress", 5th Int. Conf. on the Strength of Metal and Alloy, Vol. 1, pp. 245~248, 1979
- 3) Ryoichi Koterazawa, "A Static-to-Dynamic Transition in Creep of Metallic Materials Under Cyclic Stress Conditions", The Fourteenth Japan Congress on Materials Research—Metallic Materials, pp. 73~75
- 4) Coutinho C.B., Matlock D.K. and Bradley W. L., "Cyclic Creep of Al-4.6% Mg at Moderate Temperatures", Materials Science and Engineering, 21, pp. 239~237, 1975
- 5) 오 세규, 정 순억, "화력 발전용 로터강의 초기 변형율법에 의한 장기 수명 및 강도 예측에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술대회 발표 논문집, pp. 254~257, 1992
- 6) 平 修二, 大谷隆一, "材料の 高温強度論", オーム社, pp. 111~124, 1980
- 7) Davies P.W. and Wilshire B., "The Effect of Stress Cycling on Creep and Fracture of Copper-7% Al Alloy", Metallurgia, Vol. 76, No. 455, pp. 93~97, 1967.