

● 論 文

증기 터빈축 강재의 장시간 크리프 수명 예측법 개선⁺

오 세 규* · 정 순 역** · 전 태 언*
(95년 12월 30일 접수)

Improvement of Long-Time Creep Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel

S.K. Oh* · S.U. Jeong** · T.E. Jeon*

Key Words : Creep Life Prediction(크리프 수명 예측), Initial Strain Method(초기변형률법), High Temperature Creep Properties(고온 크리프 특성), Creep Rupture Time(크리프 파단시간, 파단수명), Creep Rupture Strength(크리프 파단 강도)

Abstract

This paper deals with a study on improvement of long-time creep life prediction of steam turbine rotor steels by using initial strain method as a new approach at high temperatures of 500 to 700°C.

The main result shows that the initial strain method could be reliably utilized to predict and evaluate the long-time creep life as well as creep rupture strength and that the predicting equation for long-time creep life under a certain creep stress at a certain high temperature could be empirically derived out from each initial instantaneous strain measured.

1. 서 론

화력 발전용 증기 터빈의 로터강재(rotor steel)는 고온 고압하에서 사용되므로, 정적 크리프(static creep) 및 사용반복에 따른 사이클릭 크리프(cyclic creep)에 의한 크리프 손상이 불의에 발생된다. 이로 인하여 터빈의 고장은 물론 돌발적 파손에 의한 사고발생도 우려되므로, 터빈 로터강재

의 고온 크리프 수명을 미리 예측하여 사고를 미연에 방지할 필요가 있다. 그러나 실제로는 비교적 단시간의 크리프 파단시험에 의한 자료를 외삽해서 실용상 필요한 장시간(10^5 hr)의 수명을 추정하고 있는 실정이다.^{1, 2)} 종래의 예측식으로는 화학반응 속도이론에 기초한 TTP(time temperature parameter)법^{2, 3, 4)}이 다수 고안 되어있다. 그런데 이들 TTP법의 적용을 위해서는 고유의 재료정수

+ 이 논문은 1993년도 동원학술재단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

* 부산수산대학교 공대 기계공학과

** 경상대학교 수대 기관공학과

를 결정하여야 함은 물론 응력의 고차함수로 표시하여야 하는 어려움이 있다. 한편, 최근 컴퓨터의 발달에 따라 TTP법을 근간으로 하는 프로그램에 의한 MCM(minimum commitment method)⁵⁾이 개발되어 있으나, 이것 역시 해석이 난해하여 실제 적용이 곤란하다.

따라서, 본 연구에서는 Oh에 의해 처음 제안된 IS법(initial strain method, ISM)^{6, 7)}, 즉 초기변형률법에 의하여 어떤 일정온도에서 어느 응력이 작용하는 순간에 발생하는 초기 변형률(연신률)(IS)을 측정하므로써 장시간 후의 고온 크리프 특성 및 크리프 수명을 쉽게 평가·예측할 수 있도록 내열강 및 증기터빈의 로터강재에 적용시킨 것이다.

그리하여 본 연구 결과가 초기변형률법(ISM)에 의한 증기터빈축 강재의 장시간 크리프 수명 예측 시스템 개발 응용을 위한 중요한 기초 자료로 기여될 수 있도록 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

Table 1에는 내충격성 및 내마모성이 강한 Si-Cr계(마르텐사이트계) 내열강 SUH3, Ni-Cr계(오스테나이트계) 내열강 SUH31, 터빈로터강재 1% Cr-Mo-V강 및 12% Cr강의 화학조성을 나타내었다. Fig. 1에는 터빈로터강재의 온도별 기계적 성질을 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of materials(wt%)

Materials	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu	Nb
SUH3	0.42	2.38	0.33	0.019	0.013	-	11.30	0.73	-	-	-	-
SUH31	0.41	1.90	0.60	-	-	14.00	15.15	-	-	-	-	-
1% Cr-Mo-V	0.25	0.03	0.65	0.007	0.005	0.64	1.21	1.12	0.29	0.004	0.03	-
12% Cr	0.16	0.24	0.67	0.005	0.03	0.58	11.1	0.92	0.23	-	-	0.05

크리프 시험편은 ASTM E139의 규정에 따라, 표점거리 50mm, 지름 10mm인 환봉으로 가공하여 그 표면은 연삭 후 에머리페이퍼로 연마하였다.

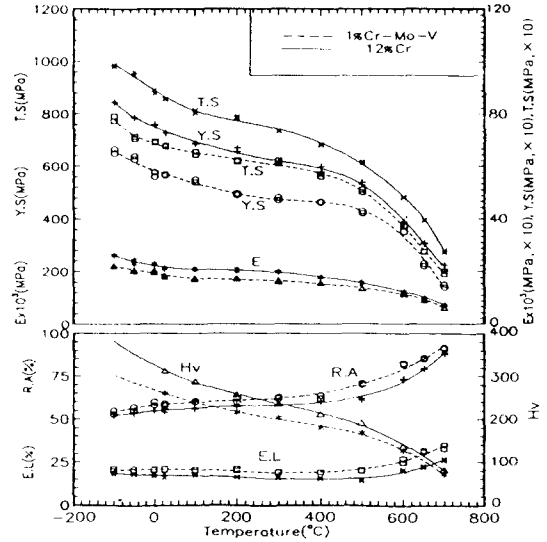


Fig. 1 Mechanical properties of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at various temperatures (Y.S : yield strength, T.S : tensile strength, E : elastic modulus, R.A : reduction of area, E.L : elongation, Hv : Vickers hardness)

크리프 시험용 시험기는 동적 만능시험기(Instron Model 1350) 및 레버형 일정하중 크리프 시험기(ATS, 10klb)를 사용하였고, 고온용 신장기(extensometer)와 다이얼 게이지를 부착한 후 시험온도 500~700°C 범위에서 노내 온도를 ±20°C 이내로 유지하면서 크리프 시험을 수행하였다. 이 때, 응력은 59~412MPa의 범위에서 변화시키면서 크리프 곡선에서 각 일정 응력(σ), 일정온도(t)하에서 실험하여, 초기 연신률(ϵ_0), 정상 크리프 속도(ϵ_s), 파단 시간(tr) 및 총 연신률(ϵ_t) 등을 구하였다.

3. 실험결과

3.1 초기연신률과 단시간 크리프특성과의 상관성

Si-Cr계 내열강 SUH3과 Ni-Cr계 내열강 SUH31 강에 대해 응력을 변화시켜서 일정온도 600°C의 크리프시험을 하였을 때 고온 크리프 특성에 초기

변형률(연신률)이 미치는 영향을 실험적으로 조사한 결과를 각각 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다.

초기연신률(ϵ_0)은 크리프응력(σ), 파단시간(수명)(t_r), 총 크리프연신률(ϵ_T), 정상 크리프속도($\dot{\epsilon}$) 및 총 크리프속도($\dot{\epsilon}_T$)와 정량적인 상관관계가 존재하며, 이들은 log-log좌표평면상에서 직선적으로 나타남을 알 수 있다. 이는 Oh^(6,7) 등의 발표와 일치한다. 그러나 여러 온도하에서 더욱 낮은 응력, 즉 이보다 더욱 긴 장시간 파단시간에 대한 크리프시험에 관해서 계속 연구되어야 할 것이다.

Fig. 2, Fig. 3에서 보면 초기연신률 ϵ_0 가 증가함에 따라 SUH3은 $\sigma - \epsilon_0$, $\dot{\epsilon} - \epsilon_0$ 및 $\dot{\epsilon}_T - \epsilon_0$ 곡선의 경우에 증가하고 $\epsilon_T - \epsilon_0$, $t_r - \epsilon_0$ 의 경우는 감소한다. 그러나 SUH3의 경우에 초기연신률 ϵ_0 가 증가함에 따라 $\sigma_c - \epsilon_0$, $\dot{\epsilon} - \epsilon_0$, $\dot{\epsilon}_T - \epsilon_0$ 및 $\epsilon_T - \epsilon_0$ 는 증가하고, $t_r - \epsilon_0$ 곡선은 상기와 마찬가지로 감소함을 알 수 있다.

따라서, 이상의 내열강에서 고온 크리프 특성의 초기연신률 의존성이 실험적으로 확인되었으며, 온도(t)와 응력(σ)이 증가하면 초기연신률(ϵ_0)이 증가하고, 초기연신률(ϵ_0)이 증가하면 크리프 파단수명(t_r)이 감소함을 알 수 있다.

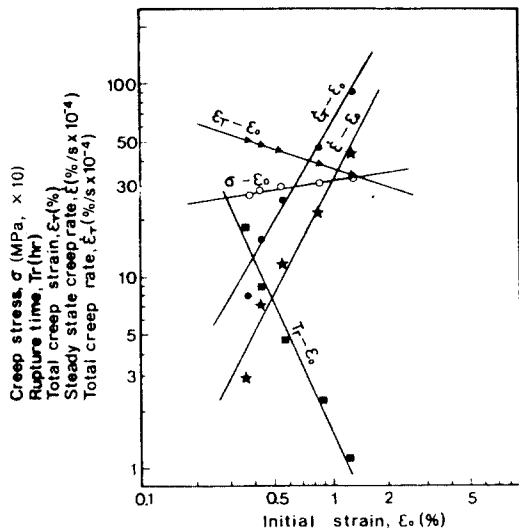


Fig. 2 Relationship of initial strain versus various creep properties of SUH3 at 600°C

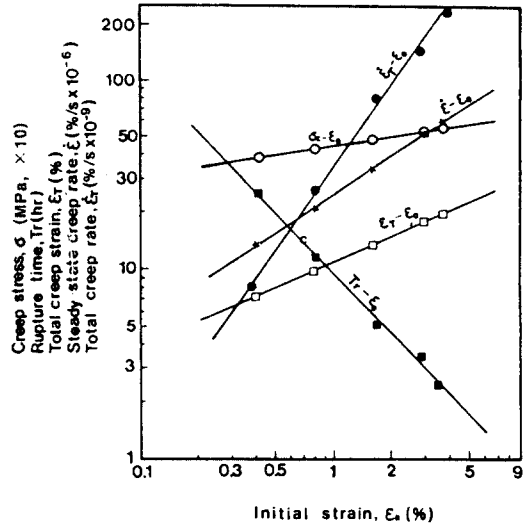


Fig. 3 Relationship of initial strain versus various creep properties of SUH31 at 600°C

3.2 초기변형률법에 의한 장시간 크리프수명과 강도의 예측 및 평가

Fig. 4, Fig. 5는 1% Cr-Mo-V강의 크리프 파단수명(t_r , hr)과 정상 크리프속도($\dot{\epsilon}_s$, % hr⁻¹)의 상관관계를 온도 500, 600, 700°C에서 실험적으로 구하여 나타낸 것이며, 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산 되었다.

$$t_r = 1.917 \times 10^{-1} \dot{\epsilon}_s^{-0.706} \dots\dots\dots (1)$$

$$(R^2 = 0.969, S = 0.077)$$

여기서 R^2 은 기여도(coefficient of determination)이고 S는 표준편차(standard deviation)를 나타낸다.

식(1)은 크리프 변형 및 파괴과정이 일정한 활성화 에너지지를 가지는 단일과정이라고 보고 크리프파단시간(t_r)과 크리프 속도($\dot{\epsilon}_s$)사이의 광범위한 재료에 대하여 구한 Monkman과 Grant의 식⁽⁸⁾과 일치한다.

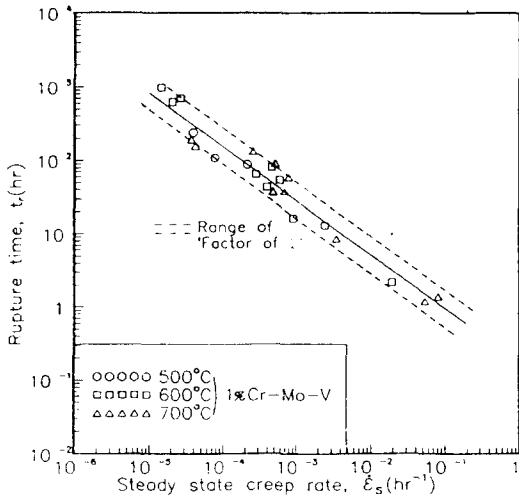


Fig. 4 Creep rupture time versus steady state creep rate of 1% Cr-Mo-V steel at various temperatures
 (R² : coefficient of determination, S : standard deviation)

Fig. 4와 식(1)에서 알 수 있듯이 정상 크리프 속도($\dot{\epsilon}_s$)를 알면 크리프 파단시간(t_r)을 예측할 수 있다.

Fig. 5는 크리프 초기연신률(ϵ_o , %)과 크리프 응력(σ , MPa)을 탄성계수 E로 무차원화(normalized)시킨 σ/E 와의 상관관계를 여러 온도(500, 550, 600, 700°C)에서 1% Cr-Mo-V 강과 12% Cr 강에 대해 실험적으로 구하여 도시한 것이며, 이 때 그 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$\sigma = 5.2 \times 10^{-3} \epsilon_o^{0.605} E \dots\dots\dots (2)$$

(R² = 0.991, S = 0.066)

Fig. 5와 식 (2)에서 알 수 있듯이 크리프 초기 변형률(연신률) ϵ_o 만 측정되면 크리프 파단강도 σ 를 예측할 수 있다. 그림에서 양 강종이 동일한 직선상에 군집하는 형태를 갖고 있음을 알 수 있으며, 식 (2)는 Maruyama⁹⁾의 σ 와 ϵ_o 와의 상관관계식과 일치하고, Oh^{6,7)}와 Jeong¹⁰⁾의 보고와 마찬가지로, 크리프 초기의 탄소성 순간변형, 즉 초기 변

형률(ϵ_o)과 크리프응력(파단강도)(σ) 사이에는 양 대수좌표평면상에서 대부분의 고온재료에서 선형 관계가 잘 성립됨을 나타내고 있다.

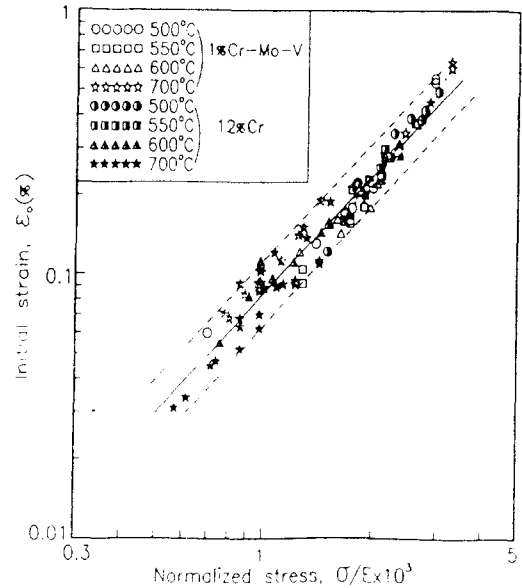


Fig. 5 Initial strain versus normalized creep stress of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel at various temperatures

온도(t) 500~700°C에서 1% Cr-Mo-V 강에 대해 실험을 통하여 구한 ϵ_o-t_r , $\epsilon_o-\sigma$ 의 관계로부터 $\epsilon_o-t_r-\sigma$ 의 상관관계식은 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$t_r = \frac{6.50 \times 10^{-6} t^2 - 6.54 \times 10^{-3} t + 1.83}{-6.68 \times 10^{-3} t^2 + 5.94 t - 574.3} \sigma \epsilon_o^n \quad (3)$$

($n = -5.50 \times 10^{-5} t^2 + 8.80 \times 10^{-2} t - 38.1$)

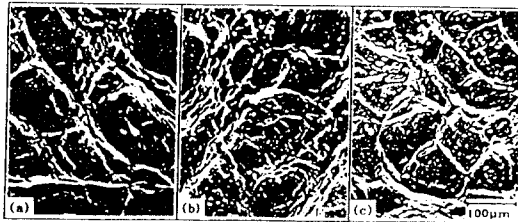
식 (3)에서 알 수 있듯이, 어떤 일정온도 t (°C)에서 어떤 크리프응력 σ (MPa)하에 장시간 크리프 수명 t_r (hr)은 초기순간변형률 ϵ_o (%)의 측정으로 예측가능함을 보여주고 있다.

식 (3)은 종래의 Oh^{6, 7, 10)} 및 Jeong¹⁰⁾ 등의 보고에서 보다 더욱 개정된 예측식이라 할 수 있다.

3.3 크리프 균열 파단면 특성

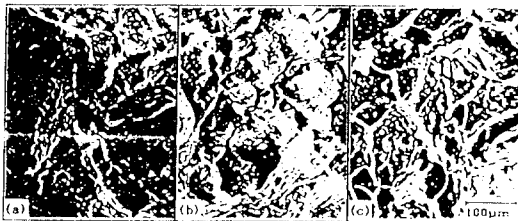
Fig. 6, Fig. 7은 1% Cr-Mo-V, 12% Cr 강에 대해 500, 600 및 700℃에서 크리프 시험한 시험편표면을 예비균열선단 3~5mm 지점에서 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과이다. 그림에서, 양강종 모두 공동(cavity) 성장에 의한 입계 크리프파면을 보이며, 공동 생성 기구로서는 공극(vacancy) 응집, 입계활주, 전위집적 등을 생각할 수 있다.

온도가 낮고 하중이 높은 그림 (a)의 경우는 파면상에 요철이 심하고, 입계의 윤곽이 뚜렷한 점으로 보아서 장시간 크리프 하중으로 입계 3중점(tripple point)에서의 응력집중에 의한 공동 발생 및 이들의 성장에 의한 파괴인 것으로 생각된다.



(a) 500℃ (b) 600℃ (c) 700℃
12.68 kN 4.82 kN 3.85 kN

Fig. 6 Fractographs of creep fracture surface for 1% Cr-Mo-V steel by SEM



(a) 500℃ (b) 600℃ (c) 700℃
12.68 kN 4.82 kN 3.85 kN

Fig. 7 Fractographs of creep fracture surface for 12% Cr steel by SEM

비교적 고온 저하중인 그림 (b)와 (c)의 경우는 그림 (a)에 비하여 요철이 적고 입계면에 소수의 덤플(dimple)상이 존재하는 것을 알 수 있다. 이 경우 크리프 파괴기구는 고온에 의한 계면의 탄화물

석출과 입계슬립에 의한 공극 생성 및 확산등으로 인해 500℃의 경우보다 고온 600, 700℃의 경우가 균열전파가 더욱 촉진된 것으로 판단된다.

4. 결 론

내열강(SUH3, SUH31)의 초기 크리프변형률 특성 및 증기터빈축 강재(1% Cr-Mo-V, 12% Cr 강)의 장시간 고온(500~700℃) 크리프수명 예측법개선에 관한 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 내열강(SUH3, SUH31)의 600℃에서의 여러 응력하에서 고온크리프특성(크리프 파단응력, 파단시간, 총 크리프연신률, 정상크리프속도, 총 크리프속도)이 초기연신률에 의존한다.
- 2) 증기터빈축 강재의 고온크리프 파단수명은 일정 온도, 일정응력하에서 초기변형률에 정량적으로 의존함이 확인되었고, 따라서 초기변형률 측정에 의해 고온 크리프 수명 예측이 가능하다.
- 3) 고온크리프 파단면 조사 결과는 고온 저하중일 수록 요철이 적고 입계면에 덤플상이 존재하며, 장시간 크리프하중으로 인하여, 입계 3중점에서의 응력집중에 의해 공동 발생과 성장에 의한 크리프 파괴가 일어난다.

참 고 문 헌

- 1) 横井 信, 池田定雄, 伊藤 弘, 馬場榮次, “金屬材料技術研究所におけるクリープデータシート作成の現状”, 鐵と鋼, 第14號, pp.94~105, 1979
- 2) 横井 信, 門馬義雄, “クリープ破斷強さの推定”, 鐵と鋼, 第7號, pp.109~120, 1979
- 3) 藤田利夫, 門馬義雄, “クリープ破斷強度外挿法の精度と標準化”, 鐵と鋼, 第3號, pp.29~37, 1984
- 4) Araki, Toru, “Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Forgings for Turbine Rotors and Shafts (ASTM A470-8)”, NIRM Creep Data sheet, No.9A, pp.1~14, 1979
- 5) Mansons, S.S. and Ensign, C.R., “Interpolation

- and Extrapolation of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method-Part I Focal-Point Convergence”, pp.299~398, 1971
- 6) Oh, S.K., “Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joint and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques”, Ph.D. Thesis, Keio University, Japan, pp.85~146, 302, 1982
 - 7) Oh, S.K., Kunio, T. and Hasui, A., “Effect of Initial Strain on Evaluation of High Temperature Creep Properties of Friction Welded Joints”, Proc. of Asian-Pacific Congress on Materials Strength Evaluation-86, pp.549~554, 1986
 - 8) Monkman, F.C. and Grant, N.J., “Proc. ASTM”, Vol.56, pp.600~602, 1956
 - 9) Maruyama, K., Tamaka, C. and Oikawa, H., “Long-Term Creep Curve Prediction Based on the Modified θ Projection Concept”, ASME, pp.92~97, 1990
 - 10) 정순억, “SUS303와 SCM4의 마찰용접 및 용접부의 고온 크리이프 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, pp.1~38, 1987