

# 1Cr1Mo1/4V 터빈 로터강의 크리프 손상 모델에 관한 연구<sup>§</sup>

최우성<sup>\*†</sup> · 에릭플러리<sup>\*\*</sup> · 송기욱<sup>\*</sup> · 김범신<sup>\*</sup> · 장성호<sup>\*</sup>

\* 한전 전력연구원, \*\* 한국과학기술연구원

## Study on Creep Damage Model of 1Cr1Mo1/4V Steel for Turbine Rotor

Woo Sung Choi<sup>\*†</sup>, Eric Fleury<sup>\*\*</sup>, Gee Wook Song<sup>\*</sup>, Bum Shin Kim<sup>\*</sup> and Sung Ho Chang<sup>\*</sup>

\* Power generation laboratory, KEPCO Research Institute,

\*\* Materials and Devices Division, Korea Institute of Science and Technology

(Received December 10, 2010 ; Revised January 20, 2011 ; Accepted January 21, 2011)

**Key Words** : Creep Damage(크리프 손상), 1Cr1Mo1/4V Steel(크롬몰리브덴바나듐 강), Turbine Rotor(터빈로터)

**초록**: 일반적으로 화력발전 터빈 로터나 케이싱과 같이 고온 고압에서 운전되는 설비의 경우 크리프 및 피로 손상이 주된 손상기구로 알려져 있다. 터빈 설비의 수명을 정확하게 예측하기 위해서 크리프 및 피로 손상 기구를 복합적으로 고려해야 하지만 500MW 급 대용량 터빈 설비의 경우 기저 부하를 담당하기 때문에 기동횟수가 많지 않고 고온에서 장시간 동안 안정적인 운전을 하므로 잔여수명을 결정할 때 크리프 수명을 주로 사용한다. 국내에서 20 년 넘게 운전되고 있는 대용량 터빈의 경우 대부분 니켈, 크롬, 몰리브덴, 바나듐 성분이 포함된 재료로 되어 있다. 본 논문에서는 대용량 터빈의 크리프 수명을 예측하기 위하여 1Cr1Mo1/4V 터빈 로터강에 대한 크리프 손상 모델을 제안하고자 한다.

**Abstract**: It is well known that the dominant damage mechanisms in high-temperature steam turbine facilities such as rotor and casing are creep and fatigue damages. Even though coupling of creep and fatigue should be considered while predicting the life of turbine facilities, the remaining life of large steam turbine facilities is generally determined on the basis of creep damage because the turbines must generate stable base-load power and because they are operated at a high temperature and pressure for a long time. Almost every large steam turbine in Korea has been operated for more than 20 years and is made of steel containing various amounts of principal alloying elements nickel, chromium, molybdenum, and vanadium. In this study, creep damage model of 1Cr1Mo1/4V steel for turbine rotor is proposed and that can assess the high temperature creep life of large steam turbine facilities is proposed.

- 기호설명 -

$\dot{\epsilon}$  : 변형률 속도

$\sigma$  : 응력 (MPa)

$n$  : 재료 변수

$Q$  : 활성화 에너지 (kJ/mol)

$R$  : 가스 상수 (kg·m/kg·K)

$T$  : 절대온도 (°K)

$A_0$  : 재료상수

$k_0$  : 초기 항복강도 (MPa)

$\dot{\epsilon}_c$  : 크리프 변형률 속도

$D$  : 손상률

$A_i (i=1,2,3,D)$  : 온도, 응력함수

$m_i, n_i (i=1,2,D)$ : 온도, 응력함수

### 1. 서론

고온 고압 조건에서 운전되는 발전설비를 안전하고 경제적으로 운영하기 위해서는 전체 설비 뿐만 아니라 단일 설비의 현재 상태를 정확하게 평가하는 것과 신뢰할 수 있는 잔존 수명을 예측하는 것이 필요하다. 설비의 잔존 수명은 운전

§ 이 논문은 대한기계학회 2010년도 추계학술대회(2010. 11. 3.-5., ICC 제주) 발표논문임

† Corresponding Author, woosung@kepco.co.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

조건, 운전 이력, 장시간 고온 운전에 의한 재료 특성의 변화 등을 종합적으로 분석해서 계산할 수 있다. 터빈 로터나 케이싱과 같은 터빈 설비는 발전설비의 정비 주기나 수명을 결정하는 핵심 설비이기 때문에 터빈 설비의 수명을 정확하게 예측하는 것은 결국 발전소의 가용성과 신뢰성을 높이는 데 무엇보다 중요하다. 일반적으로 터빈 설비의 수명은 저주기 피로 및 크리프 손상기구를 고려하여 평가되는데 국내 500MW 급 표준석탄화력발전소와 같이 기동 정지 횟수가 연 10 회 내외인 발전소의 경우 고온에서의 장시간 운전에서 따른 크리프 손상을 설비의 수명을 결정짓는 주요 원인이라 할 수 있다. 현재 국내 외 대부분의 터빈 설비가 크롬, 몰리브덴, 바나듐이 포함된 저합금강으로 만들어졌기 때문에 보편적으로 많이 사용되고 있는 1Cr1Mo1/4V 재질에 대한 크리프 손상을 분석함으로써 설비의 수명을 정확하게 예측할 수 있다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 터빈 설비에 사용되는 1Cr1Mo1/4V 저합금강에 대해 크리프 실험을 수행하고 CrMoV 강 파이프를 대상으로 Weber 등이 2005 년에 제시한 Graham-Walles 크리프 모델을 기초로 국내 터빈 로터의 대표적인 재질로 사용되는 1Cr1Mo1/4V 저합금강의 크리프 손상모델에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 기존 크리프 손상 모델

크리프 수명의 대부분이 2 차 크리프와 관련이 있기 때문에 크리프 거동을 단순화해서 크리프 특성을 설명하기 위한 전위 이론을 개발하거나 적용하려는 많은 연구가 있었다. 1980 년대 수행된 대부분의 연구는 식 (1)과 같은 Norton-Bailey 관계식에 기반을 두었다.<sup>(2)</sup>

$$\dot{\epsilon} = \sigma^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

여기에서  $n$  은 재료변수,  $Q$  는 활성화 에너지이고,  $R$  은 가스상수 그리고  $T$  는 절대온도이다. 크리프 거동만 고려할 때에는  $n=10$ ,  $Q=520KJ/mol$  이며 소성 거동을 고려하면  $n=22$ ,  $Q=850KJ/mol$  이다. 1Cr1Mo1/4 시편에 대해 크리프 실험을 수행한 결과와 식 (1)을 이용하여 계산한 시뮬레이션 결과를 비교해 보면 Fig. 1 과 같고 서로 유사한 경향을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 한편 항복강도와 관련한 함수를 이용해서 변형률 속도를 모사하기 위한 Sellars-Tegart 관계식이 식 (2)와 같이 소

개되었다.<sup>(3)</sup>

$$\dot{\epsilon} = A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \sinh\left(1.09 \frac{\sigma}{k_0}\right)^n \quad (2)$$

여기에서  $A_0$  는 재료상수,  $Q$  는 활성화에너지,  $k_0$  는 초기 항복강도,  $n$  은 점소성 지수이다. Fig. 2 는 Fig. 1 과 마찬가지로 크리프 실험 결과와 식 (2)를 이용하여 계산한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로 응력에 따른 변형률 속도가 거의 유사하다.

식 (1) 및 식 (2)에서 소개된 관계식의 경우 제시된 몇 가지 변수들만 구하면 정상상태 크리프 특성을 어렵지 않게 구할 수 있다. 그러나 실제 크리프 곡선을 분석해 볼 때 일부 경우에는 3 차 크리프가 재료의 크리프 특성에 두드러진 영향을 주기 때문에 3 차 크리프를 배제하고 2 차 크리프만 고려하여 사용하는 것은 제약이 있다.

최근 들어 2000 년도에는 Evans 가  $\theta$ -projection method 를 통해 응력  $\sigma$  과 온도  $T$  의 영향을 변수  $\theta_i (i=1\sim 4)$  의 조합으로부터 모사하였고 6- $\theta$  방법을 이용하여 77MPa 이하 응력 조건에서 낮은 변형률에 대한 크리프 수명을 정확하게 표현할 수 있다고 소개하였다.<sup>(4)</sup>

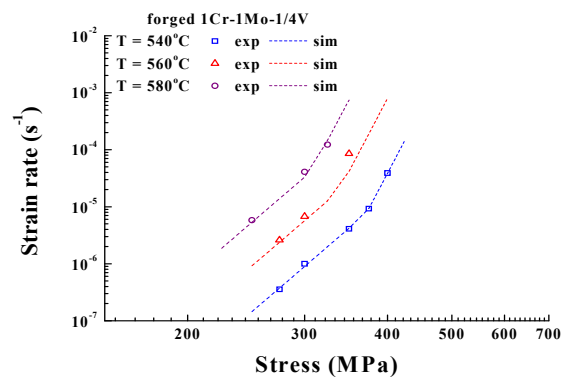


Fig. 1 Simulation of the strain vs. time creep curve using Norton-Bailey Equation

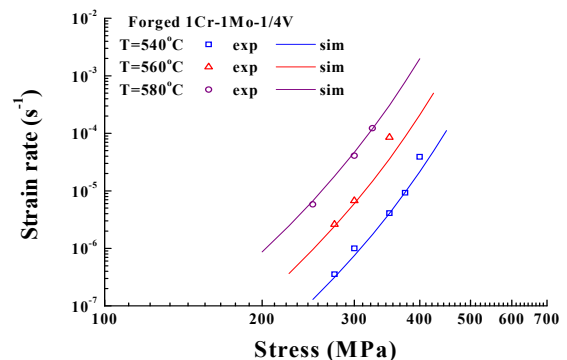


Fig. 2 Simulation of the strain vs. time creep curve using the Sellars-Tegart Equation

## 2.2 Graham-Walles 모델

크리프 거동을 모사하기 위해 다양한 크리프 모델들이 제시되었는데 1955 년대에는 Graham 과 Walles 에 의해 식 (3)과 같은 크리프 모델이 개발되었다.<sup>(5)</sup>

$$\dot{\epsilon}_c = A_1 e^{-K_1/T} \sigma^{n_1} \epsilon^{m_1} + A_2 e^{-K_2/T} \sigma^{n_2} \epsilon^{m_2} + A_3 e^{-K_3/T} \sigma^{n_3} \epsilon^{m_3} \quad (3)$$

여기에서  $A_i, K_i, n_i, m_i (i=1 \sim 3)$ 은 재료상수이다.

Graham-Walles 모델은 일종의 현상학적 모델로서 크리프 곡선을 모사하기 위해 시간과 온도에 의존한 함수 형태로 표현되며 식 (3)과 같이 3 개의 항으로 1 차, 2 차, 3 차 크리프 거동을 표현한다. 2005 년에는 Weber 가 Graham-Walles 모델을 이용하여 Cr-Mo-V 재질로 만들어진 다양한 종류의 파이프들을 대상으로 수명을 예측하였다.<sup>(6)</sup> 이후 독일 Stuttgart 에 위치한 MPA 그룹에 의해서 식 (4)와 같이 손상변수  $D$  를 포함한 Graham-Walles 수정 모델이 제시되었다.<sup>(7)</sup>

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_c = & 10^{A_\alpha} \left[ \frac{\sigma}{1-D} \right]^{n_\alpha} \epsilon_c^{m_\alpha} + 10^{A_\beta} \left[ \frac{\sigma}{1-D} \right]^{n_\beta} \epsilon_c^{m_\beta} \\ & + 10^{A_\gamma} \left[ \frac{\sigma}{1-D} \right]^{n_\gamma} \epsilon_c^{m_\gamma} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서

$$\frac{dD}{dt} = 10^{A_D} \sigma^{n_D} \epsilon^{m_D} \quad (5)$$

$A_D, n_D, m_D$ 는 손상에 관한 재료 상수이다.

## 2.3 Modified Graham-Walles 모델

기존 연구에서 제시된 Graham-Walles 크리프 모델의 경우 고온에서 사용되는 파이프에 국한되어 적용되었다. 반면 1Cr1Mo1/4V 재질로 만들어진 터빈 로터강의 경우에는 일반적으로 크리프 변형률을 고려하지 않고 탄성응력과 크리프 파단시간만을 사용하여 크리프 수명을 예측하였다.<sup>(8)</sup> 발전소가 대용량화, 대형화가 됨에 따라 보일러 주증기 온도가 상승되고 기저부하를 담당하게 되었다. 결국 고온에서 장시간 운전되는 터빈 로터의 손상 기구로 크리프의 영향이 더욱 중요해졌고 크리프 거동 및 크리프 수명을 보다 정확하게 예측하는 것이 필요하다. 이에 따라 1Cr1Mo1/4V 재질 시편에 대해 실제 크리프 실험을 수행한 후 크리프 거동을 근사하게 모사하기 위하여 고온 파이프에서

만 사용되는 Graham-Walles 모델을 수정하여 사용하였고 실험결과를 모사할 수 있는 변수들은 curve fitting 을 이용해 구하였다. 한편 터빈 로터강의 경우 2 차 크리프 영역과 3 차 크리프 영역이 크리프 곡선에서 상대적으로 중요한 영역이기 때문에 Graham-Walles 모델을 다음과 같이 2 차 크리프항과 3 차 크리프항으로 단순화시켜 사용하였다.

$$\dot{\epsilon}_c = 10^{A_1} \left[ \frac{\sigma}{1-D} \right]^{n_1} \epsilon_c^{m_1} + 10^{A_2} \left[ \frac{\sigma}{1-D} \right]^{n_2} \epsilon_c^{m_2} \quad (6)$$

$$dD/dt = 10^{A_D} \sigma^{n_D} \epsilon^{m_D} \quad (7)$$

여기에서  $A_1, A_2, A_D$ 는 온도와 응력의 함수로 이루어져 있으며 Fig. 3 과 같이 표현된다.

$A_1$ 과  $A_2$ 는 식 (8)과 같이 온도와 압력에 의존하는 지수함수 형태로 표현된다.

$$A_1 = a_1 T^{b_1}, \quad A_2 = a_2 (T/273)^{b_2} \quad (8)$$

여기에서  $a_1, b_1, a_2, b_2$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_1 &= \exp(-257.7 + 0.01448\sigma) \\ b_1 &= 33.5 + (6.05 \times 10^{-5})\sigma \\ a_2 &= \exp(-214.3)\sigma^{12.3} \\ b_2 &= 120 \end{aligned} \quad (9)$$

한편  $A_D$ 는 온도와 압력에 대한 선형함수 형태로 식 (10)과 같이 표현된다.

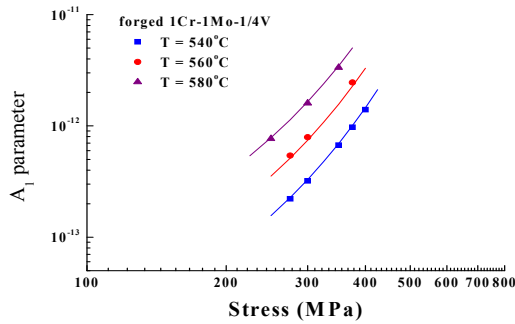
$$\begin{aligned} A_D &= a_D + b_D T \\ a_D &= 1.767 \times 10^{-5} - 1.9642 \times 10^{-7} \sigma \\ b_D &= 2.528 \times 10^{-10} - 2.456 \times 10^{-8} \sigma \end{aligned} \quad (10)$$

$m_i, n_i (i=1, 2, D)$ 는 온도 및 응력과는 독립적으로 재료에 따라 결정되는 변수로서 Table 1 과 같다.

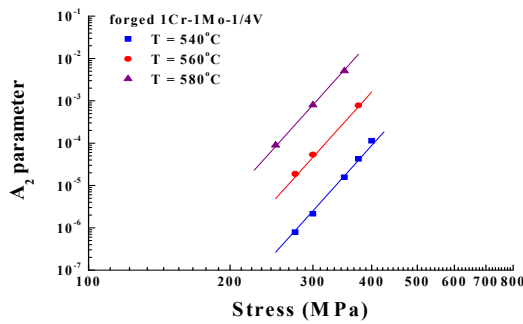
식 (6)과 식 (7)은 시간 증분을 고려한 수치해석을 이용해 풀 수 있고 실험치와 수치해석치를 시

**Table 1** Values of the Modified Graham-Walles parameters

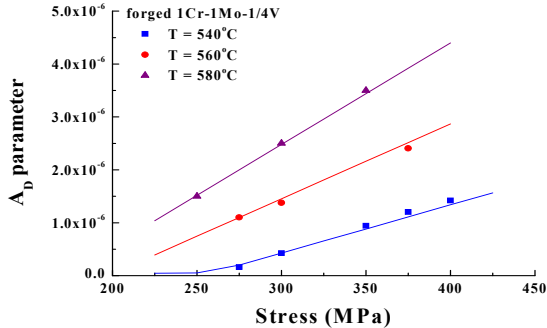
Parameters	$n_1$	$m_1$	$n_2$	$m_2$	$n_D$	$m_D$
Value	4	0.33	1.0	0.1	1.0	1.0



(a) Variation of the  $A_1$  parameters



(b) Variation of the  $A_2$  parameters



(c) Variation of the  $A_D$  parameters

Fig. 3 Variation of parameters with the stresses<sup>(1)</sup>

간에 따른 변형을 및 손상률로 나타내어 비교하면 Fig. 4-5 와 같다. Fig. 4 와 Fig. 5 와 같이 통상적인 터빈의 운전 온도인 540°C, 압력 275 ~ 400MPa 조건에서 응력에 따른 크리프 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하여 분석할 수 있다. 식 (8)~(10) 및 Table 1 에서 제시된 변수들을 사용하여 Modified Graham-Walles 모델에 대해 수치해석을 수행하고 실험으로부터 구한 크리프 거동과 비교하면 실험치와 수치해석치가 유사한 수준으로 나타난다.

Fig. 5 와 같이 Modified Graham-Walles 모델은 손상률  $D$  에 대해서 비선형적 거동을 보이는데 3 차 크리프 영역을 설명해 줄 수 있는 지수변수  $n_1$  으로 인한 것으로 보여진다.

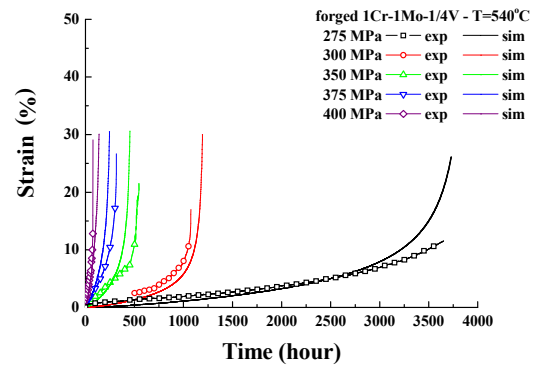


Fig. 4 Simulation of the strain vs. time creep curve at  $T=540^\circ C$ , and comparison with experimental creep data

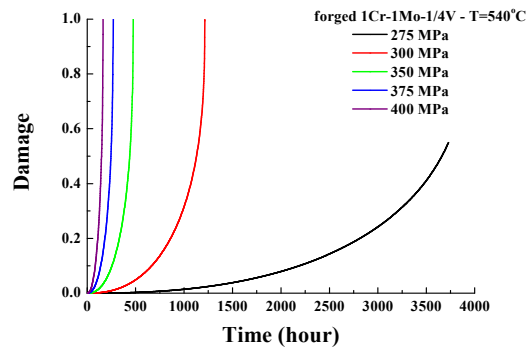


Fig. 5 Variation of the damage calculated from Modified Graham-Walles model as a function of time for forged steel under creep test at  $T=540^\circ C$

### 3. 크리프 수명예측

손상률  $D$  가 1 에 근접할 때 시편이 파손된다고 가정하면 크리프 수명은 식 (6)~(7)에서 제시된 Modified Graham-Walles 모델에 대해 포트란으로 수치해석 프로그래밍한 후 최종적으로 계산된 변형을 및 시간과의 관계로부터 예측할 수 있다.<sup>(1)</sup> 온도 540 ~ 580°C 영역에 대해 수행한 크리프 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하면 Fig. 6 과 같다. Fig. 6 을 통해 상대적으로 낮은 응력이 작용할 때에는 크리프 실험 결과와 Modified Graham-Walles 모델을 이용해 계산한 수치해석 결과가 근사한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다.

한편 1Cr1Mo1/4V 강으로 제작된 대용량 터빈 로터의 경우 실제 540°C 이하의 온도에서 10 만 시간 이상 운전되기 때문에 단시간 수행된 크리프 실험으로부터 예측할 수 없는 장시간의 크리프 수명을 예측할 필요가 있다. 이에 따라 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있도록 실제 운전조건과

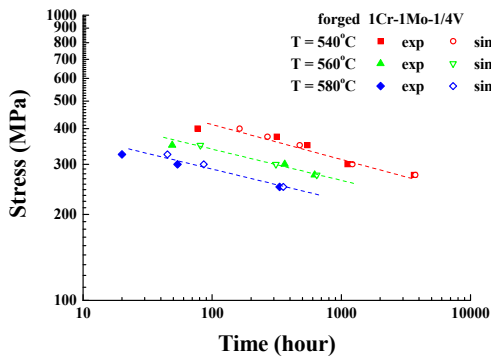


Fig. 6 Comparison between the calculated and experimental lifetime

유사한 온도와 응력 조건하에서 크리프 거동을 정확하게 묘사하는 관계식을 이용해야 한다. 식 (8)~식 (10)에서 curve fitting 을 통해 구한 변수들은 540 ~ 580°C 범위에서 유효하고 대부분의 변수들이 지수함수로 표현되기 때문에 외삽을 적용할 수 있다. 그러나  $A_D$  의 경우 응력과 온도의 선형함수로 표현되기 때문에 낮은 응력과 낮은 온도 조건에 대한 외삽이 가능하도록 변수를 수정해야 한다. 온도 533°C 이하, 응력 275MPa 이하 조건에서 수정된 변수  $A_D$  는 다음의 식 (11)과 같다.

$$A_D = \frac{5 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma}{157.5 + 8.412 \cdot 10^{14} \cdot e^{-(T-228.8)/10.27}} \quad (11)$$

식 (11)을 이용하여 크리프 파단시간에 대하여 온도 540~580 °C 에서의 실험한 응력값과 온도 450~600 °C에서의 수치해석으로 계산한 결과를 비교하면 Fig. 7 과 같다. 일반적으로 알려진 바와 같이 동일한 응력 하에서는 온도가 낮아짐에 따라 크리프 수명이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편 화력발전 보일러 및 터빈 설비의 크리프 수명을 결정하는데 가장 많이 사용되는 Larson-Miller Parameter 는 크리프 변형률 및 파단 시간에 의존한 온도, 압력으로부터 유도된다.<sup>(8)</sup> 터빈 로터강에 대해서 크리프 변형률과 관련한 Modified Graham-Walles 모델이 개발되었기 때문에 터빈 로터강의 크리프 수명을 평가하기 위해서 Larson-Miller Parameter 관계식 또한 수정하여 사용할 수 있다. Modified Graham-Walles 수정 모델을 이용하여 구한 Fig. 7 의 곡선들은 식 (12)와 같이 Larson-Miller Parameter 형태로 표현할 수 있다.

$$\log t_f = 1000 \left( \frac{66.23 - 6.61 \ln \sigma}{T} \right) - 20 \quad (12)$$

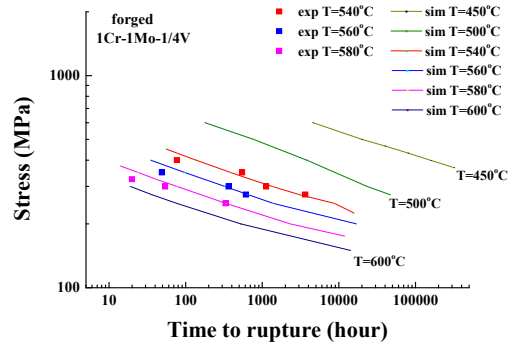


Fig. 7 Calculated and experimental lifetime with extrapolated curves at 450, 500 and 600 °C

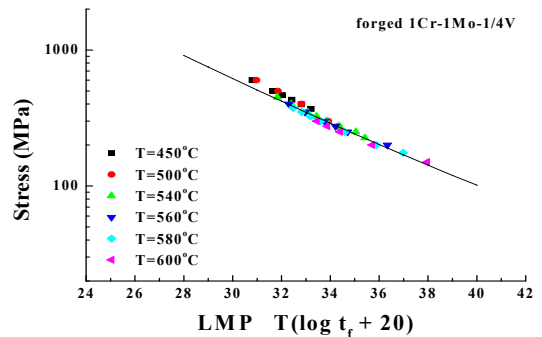


Fig. 8 The calculated and experimental life time using the Larson-Miller Parameter

여기에서  $t_f$  는 잔여수명,  $\sigma$  는 응력, 그리고  $T$  는 랭킨 온도이다.

식 (12)를 이용하면 Fig. 8 과 같이 Larson-Miller Parameter 와 응력에 대한 단일 마스터 곡선을 구할 수 있다. 1Cr1Mo1/V 강에 대한 기존의 Larson-Miller Parameter 의 경우 온도에 따른 불확실성이 상당히 크기 때문에 사용에 제약이 있었다. 그러나 Modified Graham-Walles 모델을 이용하여 유도된 식 (12)나 Fig. 8 을 이용하면 온도나 응력 범위의 제한없이 해당 재료의 크리프 수명을 어렵지 않게 계산할 수 있다.<sup>(9-12)</sup>

#### 4. 결 론

대부분의 터빈 로터에 사용되는 1Cr1Mo1/4V 저합금강의 크리프 거동을 묘사하고 수명을 예측하기 위해서 Modified Graham-Walles 모델을 개발하였다. 정확한 예측을 위해서 재료에 따라 결정되는 9 개의 변수를 결정하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 Modified Graham-Walles 모델을 이용해 2 차 크리프와 3 차 크리프를 모두 고려할 수 있다. 또한 Larson-Miller Parameter 형태로의 변환을 통해

크리프 수명을 예측할 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Choi, W.S., Fleury, E. and Song, G.W., 2006, "Development of Life Prediction System for Steam Turbine Based on Viscoplastic Analysis," *KEPRI report*, pp.164~216.
- (2) Bailey, R.W., 1935, "The Utilisation of Creep Test Data in Engineering Design," *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineering*, Vol. 131, pp.131~349.
- (3) Dieter, G.E., 1988, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill C., Third Ed.
- (4) Evans, M., 2000, "Predicting Times to Low Strain for a 1Cr1MoV Rotor Steel Using a 6- $\theta$  Projection Technique," *Journal of Materials Science*, Vol. 35, pp.2937~2948.
- (5) Graham, A. and Walles, K.F.A., 1955, "Relationships Between Long and Short Time Creep and Tensile Properties of a Commercial Alloy," *Journal of Iron steel Institue*.
- (6) Bendick, W. and Weber, H., 1989, "Analysis of Creep Damage and Material Exhaustion on a Pipe Bend of 1/2Cr1/2Mo1/4V Steel," *VGB KRAFT-WERKSTECHNKI* 69, Num 9, pp.817~825.
- (7) Ringel, M., Roos, E., Maile, K. and Klenk, A., 2005, "Constitutive Equations of Adapted Complexity for High Temperature Loading," *Proceedings of Creep & Fracture in High Temperature Components*, pp. 638~647.
- (8) Viswanathan, R., 1989, *Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components*, ASM International.
- (9) Gandy, D., 2004, "Metallurgical Guidebook for Steam Turbine Rotors and Discs, Volume 2 : Materials Property Database for HP-IP and LP Rotors," *EPRI technical report*, 1009766.
- (10) Choi, W.S., Song, G.W., Kim, B.S., Hyun, J.S. and Heo, J.S., 2010, "Development and Application of Life Assessment Guidelines for Fossil Fuel power plant facilities in Korea," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 34, No. 9, pp.1265~1272.
- (11) Jung, W.T., Kong, Y.S. and Kim, S.J., 2009, "New Consideration on Variability of Creep Rupture Data and Life Prediction," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 33, No. 10, pp.991~1186.
- (12) Yin, S.N., Kim, W.G., Ryu, W.S. and Yi, W., 2007, "Creep Life Prediction and Its Error Analysis by the Time Temperature Parameters and the Minimum Commitment Method," *Transactions of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 2, pp.145~289.