

## 초기 연신율법을 이용한 크리프 수명예측 평가

공유식<sup>†</sup> · 임만배<sup>\*</sup> · 이상필<sup>\*\*</sup> · 윤한기<sup>\*\*</sup> · 오세규<sup>\*\*\*</sup>  
(2001년 7월 20일 접수, 2002년 3월 2일 심사완료)

### Evaluation on the Creep Life Prediction Using Initial Strain Method

Yu-Sik Kong, Man-Bae Lim, Sang-Pill Lee, Han-Ki Yoon and Sae-Kyoo Oh

**Key Words:** Creep Life Prediction (크리프 수명예측), Initial Strain Method (ISM, 초기연신율법), Larson-Miller Parameter (LMP), Friction Welded Joints (마찰용접), Superalloy (초합금)

#### Abstract

The high temperature creep behavior of heat machine systems such as aircraft engines, boilers and turbines in power plants and nuclear reactor components have been considered as an important and needful fact. There are considerable research results available for the design of high temperature tube materials in power plants. However, few studies on the Initial Strain Method (ISM) capable of securing repair, maintenance, cost loss and life loss have been made. In this method, a long time prediction of high temperature creep characteristics can be dramatically induced through a short time experiment. The purpose of present study is to investigate the high temperature creep life of Udimet 720, SCM 440-STD61 and 1Cr-0.5Mo steel using the ISM. The creep test was performed at 400°C to 700°C under a pure loading. In the prediction of creep life for each materials, the equation of ISM was superior of Larson-Miller Parameter (LMP). Especially, the long time prediction of creep life was identified to improve the reliability.

#### 1. 서론

기계공업의 발달에 따라 자동차, 항공기 등의 엔진, 발전소의 보일러, 터빈, 원자로의 부품, 고압용기의 부품 등에 있어 고온재료의 사용기회가 점차 증가되고 있으며, 효율을 높이하고자 이들의 사용온도가 높아지고 있는 추세이다. 그러므로 이러한 고온에서 사용할 수 있는 내열강, 내열합금의 개발과 함께 고온 크리프 특성과 그 수명예측에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다.<sup>(1~3)</sup> 한편, 내열강 및 내열합금의 크리프 특성을 초기 연신율로 예측이 가능한 기준 파라미

터가 고응력, 단시간 파단시간에 대하여 얻어져 초기 연신율이 고온 크리프의 제 특성 즉 크리프 온도, 응력, 파단수명, 크리프 속도 및 크리프 연신율과 정량적인 상관관계가 존재함이 입증된 바 있다.<sup>(3~5)</sup> 고온재료는 고온(400~700°C)에서 장시간 사용되므로 정적 크리프 및 사용반복에 따른 동적 크리프에 의한 크리프 손상을 불시에 일으키게 되어 고장수리 및 파손에 의한 사고로 인하여 보수내지 교체 등의 재산손실과 인명피해가 우려된다. 그러므로 고온 강재의 장시간(10<sup>5</sup> h) 크리프 특성을 단시간 실험을 통하여 파악하고 예측한다는 것은 고온재료의 설계, 제조, 운전 및 보수에 있어서 가장 기본적이고 필수적인 요건 중의 하나로써 크리프 안전수명 예측에 관한 연구가 필요한 실정이다.<sup>(6,7)</sup>

따라서 본 연구에 사용된 재료는 항공기용 가스터빈 재료인 Udimet 720 (U720)과 열간금형용 마찰용접재 (SCM440-STD61) 및 고압용기용 재료 (1Cr0.5Mo)에 대한 크리프와 초기 연신율과의 상관성 및 초기 연신율법 (Initial Strain Method, ISM)에 의한 크리프 수명예측식을 도출하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 동의대학교 산업기술개발연구소

E-mail : kyrys@hanmail.net

TEL : (051)890-2109 FAX : (051)890-2109

<sup>\*</sup> 동의대학교 기계시스템공학부

<sup>\*\*</sup> 회원, 동의대학교 기계시스템공학부

<sup>\*\*\*</sup> 회원, 부경대학교 기계공학부

**Table 1** Chemical composition of materials (wt. %)

Matl.	C	Si	Mn	P	Cr	Co	Mo	W	Ti	Al	B	Zr	Ni
U720	0.03	-	-	-	18	14.8	3	1.25	5	2.5	0.04	0.04	bal.
SCM440	0.38	0.21	0.62	0.017	1.13	-	1.85	-	-	-	-	-	0.15
STD61	0.37	1.0	0.5	0.02	5.0	-	1.25	-	-	-	-	-	-
1Cr0.5Mo	0.20	1.0	0.8	0.02	1.5	-	0.65	-	-	-	-	-	-

**Table 2** Mechanical properties of materials  
(a) Room temperature

Materials	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Vickers hardness Hv	Heat treatment
U720	1385	1025	10	466	Standard
SCM440	1054	926	12.2	332	*N·T
STD61	715	459	20.3	-	*N·T
1Cr0.5Mo	745	637	11.7	195	*N·T

Standard : Solution treatment (1105 °C × 4 h, Air cooling) → Aging (650 °C × 24 h, Air cooling) → Aging (760 °C × 16 h, Air cooling).

\*N·T : Normalizing (920 °C) → Tempering (620 °C).

(b) Tensile strength( $\sigma_t$ , MPa) of high temperatures

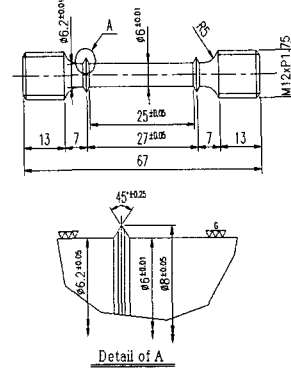
Matl.	Temp.(°C)							
	300	400	500	538	600	649	700	704
U720				1432		1359		1233
SCM440	884	775	619		389		189	
1Cr0.5Mo	706	699	594		465			

이 식을 LMP (Larson-Miller Parameter) 식과 비교하였으며, ISM에 의한 수명예측식이 어느 정도 신뢰성이 있는가를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. Table 2 (b)는 각 재료의 온도별 고온 인장강도를 나타내고 있으며, 이 결과를 기준으로 고온 크리프 시험을 수행하였다. Fig. 1은 고온인장 및 크리프 시험편의 형상을 나타내고 있으며, 선삭 후



**Fig. 1** Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139-96) (unit : mm)

연삭가공으로 마무리하였다. 또한 크리프 시험기는 미국 SATEC사(DLF-10-1029)의 시험기를 사용하였다.

### 2.2 실험 방법

온도 측정은 K형 열전대를 사용하여 직접 시험편에 부착하였고, 노내의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않는 무부하 상태에서 설정온도까지 10 °C/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노내 온도분포의 균일한 유지를 위하여 설정온도에서 30 분간 지속시킨 후 하중을 작용시켰으며, 실험 중 온도를 일정온도에서 ± 1 °C 범위로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험 중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 27 mm 되는 양단에 플랜지를 고정하여 선형차동변환기 (linear variable displacement transformer, LVDT)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 크리프 곡선을 작성하였다. 초기연신율 (initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정하였고, 이는 모든 조건에서 1분으로 통일하였다. 그리고 마찰용접재 (SCM440-STD61)는 최적조건<sup>(8)</sup>에서 마찰용접 후 고온인장 시험을 하였다. 이 결과, SCM440측에서 과단 되었으므로 SCM440 모재의 고온인장 강도를 기준으로 크리프 시험을 하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 초기연신율과 크리프 응력과의 상관성

Fig. 2, 3, 4는 크리프 응력( $\sigma$ , MPa)과 초기 연신율( $\epsilon_0$ , %)과의 관계를 나타낸 것이다. 그래프

에서와 같이, 응력이 증가함에 따라 초기 연신율은 선형적으로 증가함을 알 수 있었고, 이들의 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

U720 :

$$538\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 3.012 + 0.131\log\epsilon_0 \quad (1)$$

$$649\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 3.004 + 0.092\log\epsilon_0 \quad (2)$$

$$704\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.961 + 0.088\log\epsilon_0 \quad (3)$$

SCM440-STD61 :

$$400\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.594 + 0.217\log\epsilon_0 \quad (4)$$

$$500\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.330 + 0.765\log\epsilon_0 \quad (5)$$

$$600\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.516 + 1.195\log\epsilon_0 \quad (6)$$

$$700\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.327 + 1.489\log\epsilon_0 \quad (7)$$

1Cr0.5Mo :

$$500\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.547 + 0.062\log\epsilon_0 \quad (8)$$

$$550\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.458 + 0.208\log\epsilon_0 \quad (9)$$

$$600\text{ }^{\circ}\text{C} ; \log\sigma = 2.478 + 0.352\log\epsilon_0 \quad (10)$$

식 (1)~(10)에서 초기 연신율은 크리프 응력과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 이는 타 실험재료<sup>(2-6)</sup>와 비교해서 잘 일치한다. 따라서 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \log\sigma &= \log A + B \log\epsilon_0 \\ &= \log A \epsilon_0^B \end{aligned}$$

$$\sigma = A \epsilon_0^B \quad (11)$$

여기서 A, B는 온도항이 포함되어 있는 재료상수이다. 그러므로 식 (1)~(10)에서 각 온도(절대온도)를 X축으로 두고, logA 항과 B 항을 Y축으로 하여 커버피팅 하면 다음과 같이 logA와 B를 도출할 수 있다.

U720 :

$$\log A = 0.012 + 0.007T - 4.1 \times 10^{-6}T^2$$

$$B = 1.568 - 0.003T + 1.541 \times 10^{-6}T^2$$

SCM440-STD61 :

$$\log A = 2.243 + 0.0015T - 1.415 \times 10^{-6}T^2$$

$$B = -6.788 + 0.015T - 6.332 \times 10^{-6}T^2$$

1Cr0.5Mo :

$$\log A = 8.981 - 0.024T + 2.384 \times 10^{-5}T^2$$

$$B = -2.260 + 0.006T + 0.029 \times 10^{-4}T^2$$

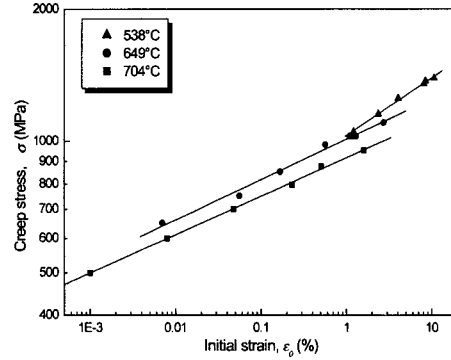


Fig. 2 Relationship between creep stress and initial strain of U720 at 538, 649 and 704 °C

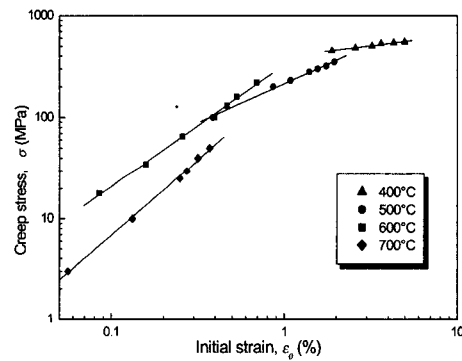


Fig. 3 Relationship between creep stress and initial strain of friction welded joints at 400, 500, 600 and 700 °C

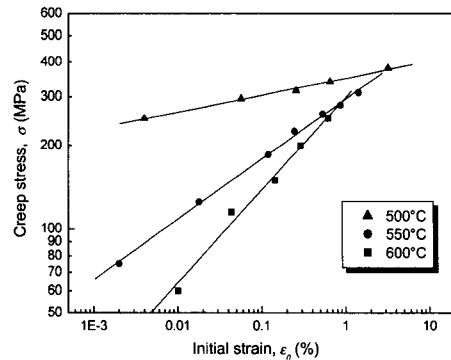


Fig. 4 Relationship between creep stress and initial strain of 1Cr0.5Mo steel at 500, 550 and 600 °C

### 3.2 초기연신율과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 5, 6, 7은 크리프 수명( $t_r, h$ )과 초기 연신율( $\epsilon_0, \%$ )과의 상관관계를 나타내고 있다. 그래프

에서 알 수 있듯이, 양대수 좌표에서 단시간에서는 서로 선형적인 양상을 나타내지만 외삽<sup>(2,3,9)</sup>에 의한 장시간 파단수명을 적용시킨 결과는 2차 곡선을 나타내고 있다. 그리고 초기 연신율이 증가할수록 크리프 수명이 감소함을 알 수 있었으며, 이들의 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

U720 :

$$538^{\circ}\text{C}; \log t_r = 3.86 - 1.10 \log \epsilon_0 - 1.14 (\log \epsilon_0)^2 \quad (12)$$

$$649^{\circ}\text{C}; \log t_r = 1.6 - 1.8 \log \epsilon_0 - 0.4 (\log \epsilon_0)^2 \quad (13)$$

$$704^{\circ}\text{C}; \log t_r = 1.08 - 1.17 \log \epsilon_0 - 0.16 (\log \epsilon_0)^2 \quad (14)$$

SCM440-STD61 :

$$400^{\circ}\text{C}; \log t_r = 5.80 - 6.0 \log \epsilon_0 - 2.04 (\log \epsilon_0)^2 \quad (15)$$

$$500^{\circ}\text{C}; \log t_r = 3.01 - 6.63 \log \epsilon_0 - 4.50 (\log \epsilon_0)^2 \quad (16)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log t_r = -1.18 - 8.95 \log \epsilon_0 - 2.99 (\log \epsilon_0)^2 \quad (17)$$

$$700^{\circ}\text{C}; \log t_r = -3.68 - 11.6 \log \epsilon_0 - 4.42 (\log \epsilon_0)^2 \quad (18)$$

1Cr0.5Mo :

$$500^{\circ}\text{C}; \log t_r = 1.40 - 1.40 \log \epsilon_0 - 0.12 (\log \epsilon_0)^2 \quad (19)$$

$$550^{\circ}\text{C}; \log t_r = 0.64 - 2.65 \log \epsilon_0 - 0.39 (\log \epsilon_0)^2 \quad (20)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log t_r = -0.46 - 3.16 \log \epsilon_0 - 0.44 (\log \epsilon_0)^2 \quad (21)$$

이상에서 알 수 있는 바와 같이, 초기 연신율은 크리프 응력, 파단수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있다. 이는 타 문헌<sup>(2-6)</sup>의 발표와 잘 일치한다. 따라서 식 (12)~(21)은  $\log t_r - \log \epsilon_0$  가 2차 함수적 관계식이므로 다음과 같이 모델화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \log t_r &= \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 \\ &= \log A' + (B' + C' \log \epsilon_0) \log \epsilon_0 \\ &= \log A' \epsilon_0^{B' + C' \log \epsilon_0} \end{aligned} \quad (22)$$

여기서  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  는 재료와 온도의 함수이다. 그러므로 식 (12)~(21)에서 각 온도 (절대온도)를 X축으로 두고,  $\log A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  항을 Y축으로 하여 커비피팅 하면 다음과 같이  $\log A'$ ,  $B'$ ,  $C'$  를 도출할 수 있다.

U720 :

$$\log A' = 74.586 - 0.146T + 7.233 \times 10^{-5} T^2$$

$$B' = 84.111 - 0.192T + 1.071 \times 10^{-4} T^2$$

$$C' = -18.448 + 0.034T - 1.582 \times 10^{-5} T^2$$

SCM440-STD61 :

$$\log A' = 32.762 - 0.045T + 7.387 \times 10^{-6} T^2$$

$$B' = -28.866 + 0.071T - 5.428 \times 10^{-5} T^2$$

$$C' = 14.833 - 0.041T - 2.181 \times 10^{-5} T^2$$

1Cr0.5Mo :

$$\log A' = -8.979 + 0.054T - 6.554 \times 10^{-5} T^2$$

$$B' = 51.774 - 0.180T + 1.479 \times 10^{-4} T^2$$

$$C' = 14.845 - 0.052T + 4.452 \times 10^{-5} T^2$$

$$t_r = A' \epsilon_0^{B' + C' \log \epsilon_0} \quad (23)$$

따라서 식 (1)~(21)에서 시험온도와 초기 연신율을 포함하는 온도-응력-수명-초기 연신율에 의한 수명예측식을 ISM에 의해 도출할 수 있다.

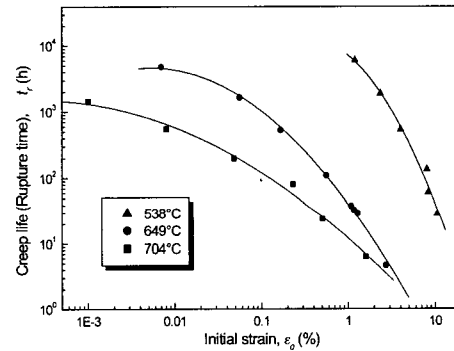


Fig. 5 Relationship between rupture time and initial strain of U720 at 538, 649 and 704 °C

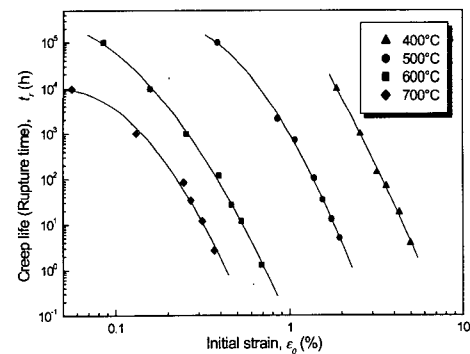


Fig. 6 Relationship between rupture time and initial strain of friction welded joints at 400, 500, 600 and 700 °C

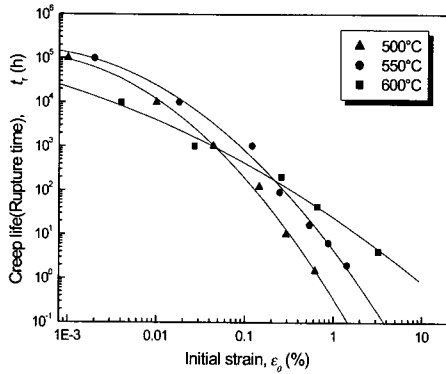


Fig. 7 Relationship between rupture time and initial strain of 1Cr0.5Mo steel at 500, 550 and 600 °C

3.3 LMP에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 높은 온도에서는 짧은 시간내에서 발생한다. 실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽<sup>(4)</sup>에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 LMP에 의해 다음과 같이 정의되어 있다.<sup>(10)</sup>

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \tag{24}$$

식 (24)에서 T는 절대온도 (K)이고, C<sub>1</sub>은 20이며, 재료정수이다. 그러므로 LMP는 응력의 2차 함수로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \sigma^2 + K_2 \sigma + K_3 \tag{25}$$

여기서 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>은 재료상수이다. 그러므로 Fig. 8, 9, 10의 그래프에서 K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub>, K<sub>3</sub>의 값과 LMP식은 각각 다음과 같이 도출되었다.

U720 : K<sub>1</sub> = 0.00136, K<sub>2</sub> = -9.574, K<sub>3</sub> = 28206  
 $T(\log t_r + 20) = 0.00136 \sigma^2 - 9.574 \sigma + 28206 \tag{26}$

SCM440-STD61 :  
 K<sub>1</sub> = 0.01224, K<sub>2</sub> = -19.4, K<sub>3</sub> = 21280  
 $T(\log t_r + 20) = 0.01224 \sigma^2 - 19.4 \sigma + 21280 \tag{27}$

1Cr0.5Mo :  
 K<sub>1</sub> = 0.01454, K<sub>2</sub> = -21.178, K<sub>3</sub> = 22057  
 $T(\log t_r + 20) = 0.01454 \sigma^2 - 21.178 \sigma + 22057 \tag{28}$

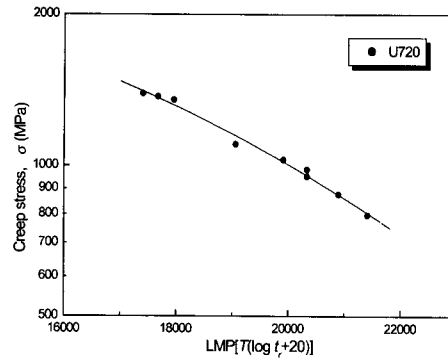


Fig. 8 Master creep curve of U720 at 538, 649 and 704 °C

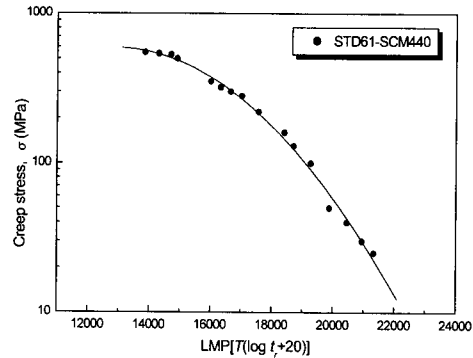


Fig. 9 Master creep curve of friction welded joints at 400, 500, 600 and 700 °C

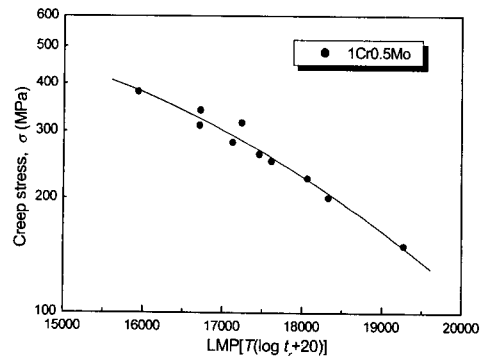


Fig. 10 Master creep curve of 1Cr0.5Mo steel at 500, 550 and 600 °C

3.4 ISM에 의한 크리프 수명예측

온도, 응력, 수명, 초기 연신율을 포함하는 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출된다. 식 (11)에서  $\sigma = A \epsilon_0^B$  과 식 (23)에서

$t_r = A'\epsilon_0^{B'+C'\log\epsilon_0}$  를 풀면 다음과 같다.

$$\sigma t_r = AA'\epsilon_0^{B+B'+C'\log\epsilon_0}$$

따라서 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출된다.

$$t_r = AA'\epsilon_0^{B+B'+C'\log\epsilon_0} \sigma^{-1} \quad (29)$$

$$\therefore t_r = a \epsilon_0^\beta \sigma^{-1} \quad (30)$$

여기서  $AA'$ 를  $a$ ,  $B+B'$ 를  $\beta$  '로 두고,  $\beta'+C'\log\epsilon_0$  를  $\beta$  라 하면,  $a$ ,  $\beta$  ',  $C'$  의 값은 각각 다음과 같다.

U720 :

$$a = AA' = 10^{74.598 - 0.139T + 6.823 \times 10^{-3}T^2}$$

$$\beta = \beta' + C'\log\epsilon_0$$

$$\beta' = B+B'$$

$$= 85.679 - 0.195T + 1.087 \times 10^{-4}T^2$$

$$C' = -18.448 + 0.034T - 1.582 \times 10^{-5}T^2$$

SCM440-STD61 :

$$a = AA' = 10^{3.5005 - 0.043T + 5.972 \times 10^{-6}T^2}$$

$$\beta = \beta' + C'\log\epsilon_0$$

$$\beta' = B+B'$$

$$= -35.653 + 0.085T - 6.061 \times 10^{-5}T^2$$

$$C' = 14.883 - 0.041T - 2.181 \times 10^{-5}T^2$$

1Cr0.5Mo :

$$a = AA' = 10^{0.00213 + 0.0305T - 4.178 \times 10^{-5}T^2}$$

$$\beta = \beta' + C'\log\epsilon_0$$

$$\beta' = B+B'$$

$$= 49.514 - 0.174T + 1.45 \times 10^{-4}T^2$$

$$C' = 14.845 - 0.0522T + 4.452 \times 10^{-5}T^2$$

식 (30)에서 보면, 어떤 응력( $\sigma$ )과 온도( $T$ )를 결정하고 초기 연신율( $\epsilon_0$ )을 알 때, 크리프 수명( $t_r$ )을 계산할 수 있다. Fig. 11, 12, 13은 LMP식(25)와 ISM에 의한 크리프 수명예측식(30)에서 구한 크리프 설계곡선(creep design curve)을 실제 실험치와 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, LMP식은 단시간에서는 큰 차이가 없지만, 장시간의 크리프 수명예측에는 실험값과 다소 오차가 있으므로 이 식을 이용하면 위험함

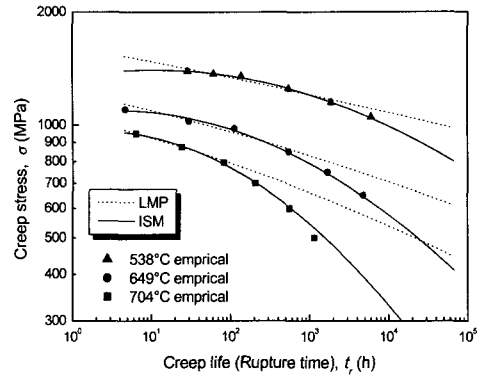


Fig. 11 Comparison of creep design curves for U720 by ISM with by LMP method and the empirical data at 538, 649 and 704 °C

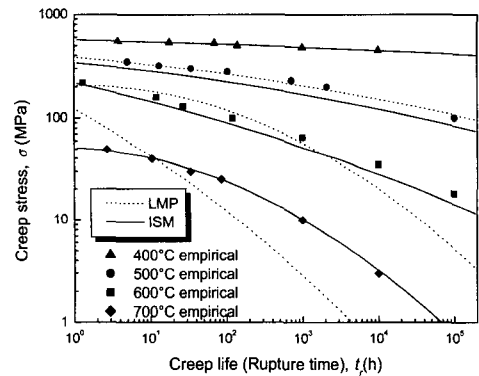


Fig. 12 Comparison of creep design curves for friction welded joints by ISM with by LMP method and the empirical data at 400, 500, 600 and 700 °C

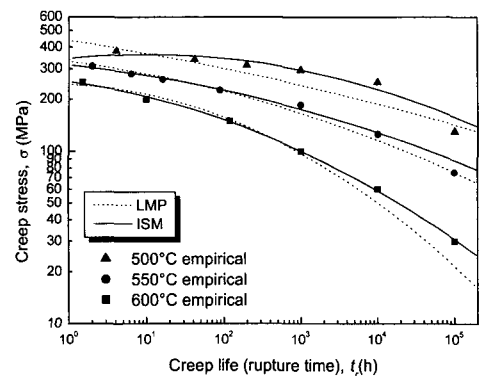


Fig. 13 Comparison of creep design curves for 1Cr0.5Mo steel by ISM with by LMP method and the empirical data at 500, 550 and 600 °C

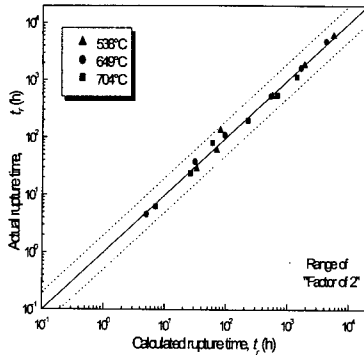


Fig. 14 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for U720 by ISM at 538, 649 and 704 °C

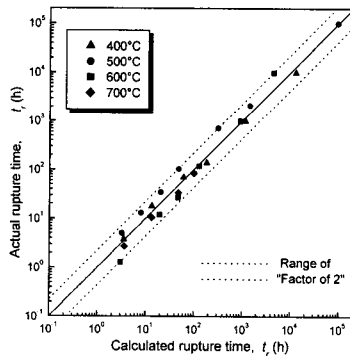


Fig. 15 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for friction welded joints by ISM at 400, 500, 600 and 700 °C

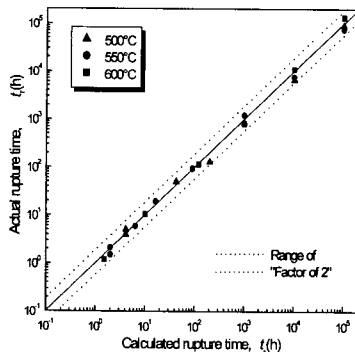


Fig. 16 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for 1Cr0.5Mo steel by ISM at 500, 550 and 600 °C

을 알 수 있다. 하지만, ISM식은 장시간 수명예측에서도 실험값과 일치하기 때문에 초기 연신율법에 의한 크리프 예측식의 신뢰성이 높다는 것을 확인하였다.

Fig. 14, 15, 16은 ISM 수명예측식 (30)에서 계산된 크리프 파단시간과 실제 실험값의 파단시간과의 관계를 나타내고 있다. 그래프에서 알 수 있듯이, ISM에 의한 크리프 수명예측식에서 계산된 크리프 수명과 실제 실험에 의한 값이 거의 일치하고 있다. 그러므로 크리프 온도, 응력, 초기 연신율을 포함한 크리프 수명예측식으로써 신뢰성이 높음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서도 출된 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 그 이용가치가 크리라고 생각된다.

#### 4. 결론

본 연구에 적용된 세 종류 재료의 초기 연신율법 (ISM)을 이용한 크리프 수명예측식 도출과 LMP식을 비교 한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LMP에 의한 크리프 수명예측식은 단시간 ( $10^2$  h)에는 유효하지만, 장시간 ( $10^3 \sim 10^5$  h)의 예측에는 실제 파단시간에 비해 차이가 나므로 위험함을 알 수 있었다.

(2) ISM의 크리프 수명예측식에서 응력과 온도를 결정하고 단시간 초기 연신율을 측정하면 장시간 크리프 수명을 예측할 수 있었다.

(3) 결과적으로 ISM에 의한 크리프 수명예측식이 LMP식에 비해 신뢰성이 우수함을 알 수 있었고, 특히 장시간 수명예측에서도 신뢰성이 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- (1) Cane, B. J. and Aplin, P. F., 1993, "Creep Life Assessment Methods," *Proceeding of the 1993 Pressure Vessels and Piping Conference*, pp. 25~29.
- (2) 오세규, 정순억, 오정환, 1993, "내열강의 마찰 용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법(2)-SCM4와 SUS304 및 그 용접재의 고응력 고온 크리프 특성과 초기 변형률의 상관성," *대한기계학회 논문집*, 제17권, 제3호, pp. 520~526.

- (3) 오세규, 김선진, 정순억, 오정환, 1993, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법(3)-고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법," 대한기계학회 논문집, 제 17권, 제4호, pp. 746~754.
- (4) 정민화, 이상국, 윤병식, 오세규, 송정근, 1997, "화력발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성평가(1)-1Cr0.5Mo강의 크리프특성과 LMP에 의한 크리프 수명의 예측," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 63~67.
- (5) 정민화, 이상국, 허광범, 오세규, 이원석, 1997, "발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성평가(2)-ISM에 의한 1Cr0.5Mo강의 크리프 수명 예측," 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 A, pp. 80~85.
- (6) 공유식, 오세규, 박노광, 1999, "항공기용 가스 터빈 재료의 열처리 조건에 따른 크리프 특성," 한국해양공학회지, 제13권, 제4호 pp. 112~117.
- (7) Oh, S. K., Kim, S. J. and Jeon, T. E., 1996, "Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation(1st Report)-Possibility of Creep Prediction by Initial Strain Method," *Proc. of 6th International Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Los Angeles*, pp. 275~279.
- (8) 박일동, 오세규, 김지수, 1999, "열간 금형편치 제작을 위한 이중재 마찰용접과 고온크리프 실시간 예측 및 AE에 의한 품질평가(I)-마찰용접과 AE," 한국해양공학회지, 제13권, 제3호 pp. 77~82.
- (9) NRIM, 1990, "Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of Normalized and Tempered 1Cr-0.5Mo Steel Plates for Pressure Vessels," *National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan, NRIM Creep Data Sheet, No. 35A.*
- (10) Larson, F. R. and Miller, J., 1952, "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," *Transaction of the ASME*, pp. 765~775.