

압력용기용 고온재료의 ISM에 의한 크리프 수명예측(II)

공유식* · 김현경** · 황성필** · 김일석** · 오세규*
*부경대학교 기계공학부, **부경대학교 대학원 기계공학과

Creep Life Prediction by ISM of Elevated Temperature Materials for Pressure Vessel(II)

YU-SIK KONG*, HUN-KYONG KIM**, SUNG-PHIL HWANG**, IL-SUG KIM** AND SAE-KYOO OH*

*Dept. of Mechanical Engineering, Dong-Eui University, Pusan 614-714, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS : Initial strain method 초기연신률법, Creep life prediction 크리프 수명예측, Larson-Miller parameter 라슨-밀러 파라미터, Friction welding 마찰용접

ABSTRACT : In this paper, friction welding optimization for 1Cr0.5Mo-ST304(φ14mm), AE applications for the weld quality evaluation and the applications of various life prediction methods such as LMP (Larson-Miller Parameter) and ISM(initial strain method) were investigated : The creep behaviors of those steels and the friction welded joints under static load were examined by ISM combined with LMP at 400, 500, 550 and 600°C, and the relationship between these two kinds of phenomena was studied.

The real-time predicting equations of elevated-temperature creep life(fracture time) under any creep stress at any elevated-temperature could be developed by LMP and LMP-ISM. It was confirmed that the life prediction equations by LMP and LMP-ISM are effective only up to 10²hrs and can not be used for long times of 10³-10⁶hrs, but by ISM it can be used for long times creep prediction of more than 10⁴hrs with most reliability.

1. 서 론

기계공업의 발달에 따라 자동차, 항공기 등의 엔진, 발전소의 보일러, 터빈, 원자로의 부품, 고압용기의 부품 등에 있어 고온재료에 대한 고온 분위기에서의 사용기회가 점차 증가되고 있으며, 효율면에서도 이들의 사용온도가 높아지고 있는 추세이다. 따라서 이러한 고온에서 사용할 수 있는 내열강, 내열합금의 개발과 함께 고온 크리프 특성과 그 수명 예측에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다(공 등, 1999; 오 등, 1993; 오 등, 1996). 한편, 내열강 및 내열 합금의 크리프 특성치를 초기 순간 연신으로 예측이 가능한 기준 파라미터(parameter)가 고응력, 단기간 파단시간에 대하여 얻어져 초기연신률이 고온 크리프의 제특성 즉, 크리프 응력, 파단수명, 정상 크리프 속도, 전 크리프 연신률 및 전 크리프 속도와 정량적인 상관관계가 존재함이 입증된 바 있다(오 등, 1993).

고압용기용 고온 재료는 고온(500~600°C)에서 장시간 사용되므로 정적크리프(pure creep or static creep) 및 사용반복에 따른 동적 크리프(cyclic creep or dynamic creep)에 의한 크리프 손상을 불시에 일으키게 되어, 고장수리에 의한 단전은 물론, 급기야 파손에 의한 사고로 인하여 보수내지 교체 등의 재산손실과 인명피해가 우려되는 것으로서 전력생산과 에너지 절약 및 전력의 합리적 관리면에서도 이루 말할 수 없는 치명적 손실이 아닐 수 없다. 그러므로 강재의 장시간(10⁵시간) 고온 크리프 특성을 단시간 실험을 통하여 파악하고 예측한다

는 것은 압력용기나 보일러용 고온재료의 설계, 제조, 운전 및 보수에 있어서 가장 기본적이고 필수적인 요건 중의 하나이다. 따라서 본 연구과제의 고온강재(1Cr0.5Mo강)가 내열강이므로 모재는 물론, 고강인성 내식내열강 재료(STS304)와의 마찰용접재에 대한 고온(400, 500, 550, 600°C) 크리프 특성과 초기연신률법(ISM)에 의한 크리프 안전수명예측에 관한 연구가 필요하다(오 등, 1993; 오 등, 1996).

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용된 재료는 S특수강에서 제작한 것으로서 압력용기 및 화력발전소의 보일러 고온 배관과 열교환기 등에 쓰이는 고온재료 1Cr0.5Mo강과 내열성과 내식성이 강한 스테인리스강인 STS304 강을 사용하였다. 사용재료의 화학성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 그리고 사용된 크리프 시험편 형상은 Fig. 1과 같고, 크리프 시험기는 미국 SATEC사(DLF-10-1029)의 크리프 시험기를 사용하였다.

Table 1 Chemical composition of materials (wt. %)

Mtls.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
1Cr0.5Mo	0.20	1.00	0.80	0.018	0.012	-	1.50	0.65
STS304	0.08	0.35	1.60	0.017	0.028	8.78	18.54	0.28

Table 2 Mechanical properties of materials

Mtls.	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ϵ (%)	Hardness (H _B)	Heat treat.
1Cr0.5Mo	745	637	11.7	185	*N, T
STS304	750	560	26.1	235	*N, T

*N, T : 920°C Normalizing → 620°C Tempering

Fig. 1은 마찰용접재(1Cr0.5Mo-ST304) 및 모재(1Cr0.5Mo)의 고온인장과 크리프 시험편의 형상 및 치수를 나타내고 있다. 시험편 가공은 최적조건에서 마찰용접 후 선삭가공 및 연삭가공으로 마무리 하였다.

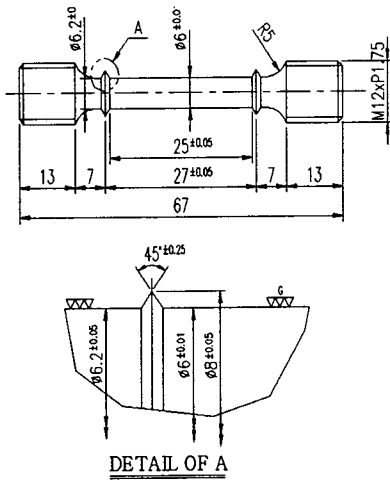


Fig. 1 Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139-83) (unit : mm)

2.2 실험 방법

온도 측정은 K형 열전대를 사용하여 직접 시험편에 부착하였고, 노(furnace)내의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않는 무부하 상태에서 설정온도까지 9.6°C/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노내의 온도분포가 균일하게 유지를 위하여 설정온도(400, 500, 600°C)에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켰으며, 실험중 온도를 일정온도에서 ±1°C 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 27mm되는 양단에 플랜지를 고정하여 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이들로부터 크리프 곡선을 작성하였다. 초기연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정하였고, 이는 모든 조건에서 1분으로 통일 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온 인장시험

Fig. 2는 마찰용접재(1Cr0.5Mo-ST304)와 모재(1Cr0.5Mo, STS304)에 대한 상온(20°C), 300, 400, 500 및 600°C에서 인장시험을 수행한 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 사용온도 범위(400~600°C)에서는

직선적 상관성이 존재하며, 고온인장강도(σ_t , MPa)와 온도(T , °C)의 상관관계 그래프가 해당 크리프 온도에서 크리프 응력을 고온 인장강도보다 20~30MPa씩 낮추어 고온 크리프 시험을 수행하는 데에 활용되었다.

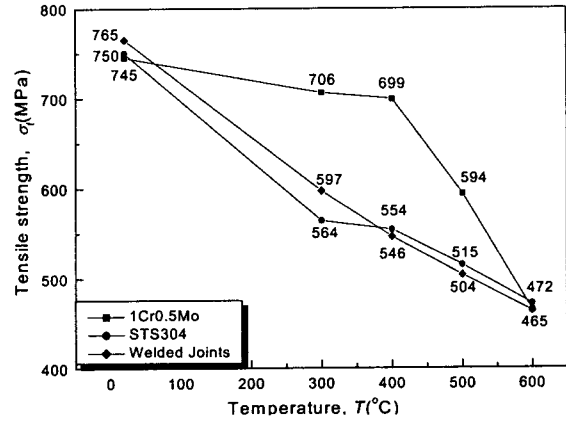


Fig. 2 Relationship of tensile strength vs. temperature for 1Cr0.5Mo, STS304 and welded joints(1Cr0.5Mo-ST304) at 20, 300, 400, 500 and 600°C

3.2 고온 크리프 시험

본 연구에서는 먼저 400, 500, 600°C 하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 1Cr0.5Mo-ST304 용접재 및 1Cr0.5Mo 모재의 대표적 크리프 곡선은 각각 Fig. 3(a), (b)에 표시한 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이, 용접재와 모재의 경우 온도가 증가함에 따라서 크리프속도(creep rate)와 총 크리프 변형률(total creep strain, ϵ_T)이 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 초기 변형률(ϵ_0)도 증가하는 반면에 크리프 수명은 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 온도, 응력 및 시간변화에 따른 연신률과 파단위치, 파단시간 등의 변화가 많으며, 400°C 고응력(510, 500MPa)만이 단시간 인장시험때와 마찬가지로 STS304측이었고, 그 이외의 400°C 저응력(480, 460MPa) 및 고온(500, 600°C)에서는 장기간, 고온 노출로 인한 열화 때문에 모두 1Cr0.5Mo의 열영향부(H.A.Z)와 모재(B.M)측임을 알 수 있었다.

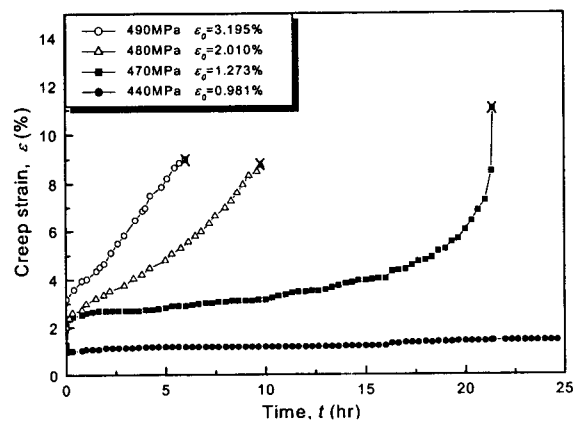


Fig. 3(a) Typical creep curves for frictional welded joint(1Cr0.5Mo-ST304) at 500°C

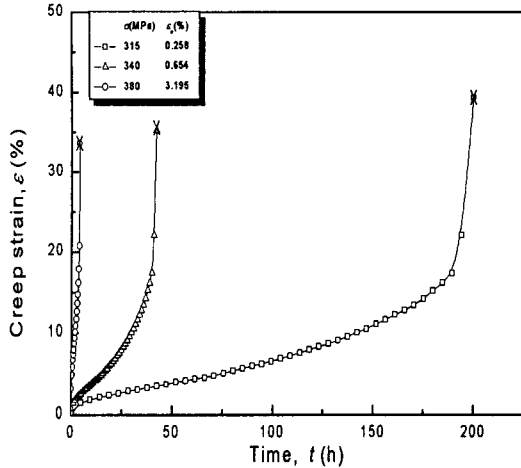


Fig. 3(b) Typical creep curves for base metal 1Cr0.5Mo steel at 500°C

Table 3 Data by creep test of friction welded joints(1Cr0.5Mo-ST304) and base metals

Temp.	Stress	Initial strain	Steady state creep rate	Rupture time
°C	σ (MPa)	ε₀ (%)	ε̇ (%/h)	t _r (h)
400	510	4.10	1.651	3.4
	500	2.950	0.535	7.8
	480	1.550	0.331	40
	460	0.420	0.135	222
500	490	3.195	2.452	6.1
	480	2.150	1.852	10
	470	1.273	0.980	23.4
	440	0.450	0.635	100.5
600	370	3.010	1.075	2.2
	340	1.285	0.681	6.1
	320	0.821	0.471	17
	310	0.420	0.305	31

Table 3은 Fig. 3(a), (b)를 통하여 고온 크리프 시험한 결과의 데이터를 정리한 것으로 응력(σ, MPa), 초기연신률(ε₀, %), 정상 크리프속도(ε̇, %/h) 및 파단시간(t_r, h)을 나타내고 있으며, 모두 실험에 의하여 구하여진 값들이다. Table 3에서 알 수 있듯이, 각 온도에 따라 응력이 증가할수록 초기연신률이 증가하며 파단수명은 감소함을 알 수 있다.

3.3 초기연신률과 크리프 응력과의 상관성

Fig. 4는 마찰용접재(1Cr0.5Mo-ST304)와 모재(1Cr0.5Mo)의 크리프 응력 σ(MPa)와 초기연신률 ε₀(%)와의 상관성을 나타내며, 양대수 좌표상에서 서로 선형적이다. 그림에서 초기연신률은 응력이 높아질수록 증가하고, 온도가 상승할수록 그 증가률도 더욱 상승함을 알 수 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

1Cr0.5Mo-ST304 weld :

$$400^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.045 \log \epsilon_0 + 2.678 \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

$$500^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.055 \log \epsilon_0 + 2.664 \quad (R^2=0.99) \quad (2)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.093 \log \epsilon_0 + 2.521 \quad (R^2=0.97) \quad (3)$$

1Cr0.5Mo steel :

$$400^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.062 \log \epsilon_0 + 2.547 \quad (R^2=0.99) \quad (4)$$

$$550^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.208 \log \epsilon_0 + 2.458 \quad (R^2=0.99) \quad (5)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.352 \log \epsilon_0 + 2.478 \quad (R^2=0.99) \quad (6)$$

여기서 R²은 데이터의 커브 피팅(curve fitting)에서 기여율(coefficient of determination)을 나타내며, 모두 1에 가깝게 나타나므로 신뢰성이 매우 높다.

식 (1)~(6)에서 초기연신률은 크리프 응력과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있다. 이는 여러 재료에 대한 Oh의 보고(오 등, 1993; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)에 대한 경우와 비교해서 모두 잘 일치한다.

$$\log \sigma = \log A + B \log \epsilon_0$$

$$= \log A \epsilon_0^B$$

$$\sigma = A \epsilon_0^B \quad (7)$$

위 식에서 A, B는 온도항이 포함되어 있는 재료상수이다.

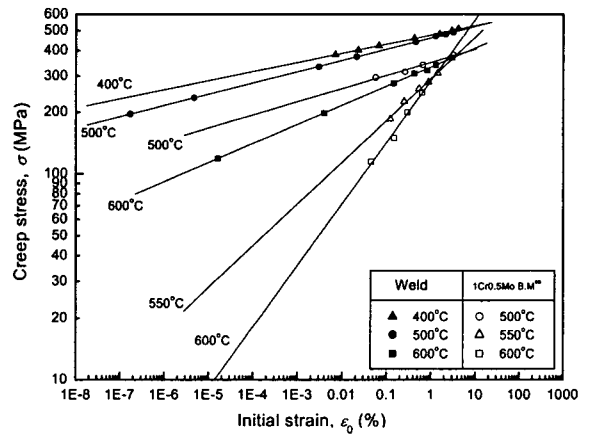


Fig. 4 Relationship of creep stress versus initial strain of friction welded joint 1Cr0.5Mo-ST304 and base metal 1Cr0.5Mo steel at various elevated temperatures

3.4 초기연신률과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 5는 크리프 수명(파단시간) t_r(h)과 초기연신률 ε₀(%)와의 상관관계를 나타낸다. 그림에서 초기연신률이 증가할수록 크리프 수명이 감소하며, 그 감소률도 온도가 상승할수록 더욱 급격함을 알 수 있다. 또한 양대수 좌표상에서 단시간에서는 서로 선형적인 양상을 나타내지만 외삽(NRIM, 1990)에 의한 장시간 파단수명을 적용시킨 결과는 2차 곡선을 나타내고 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

1Cr0.5Mo-ST304 weld :

$$400^\circ\text{C} ; \log t_r = 1.964 - 2.179 \log \epsilon_0 - 0.371 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.98) \quad (8)$$

$$500^\circ\text{C} ; \log t_r = 1.464 - 1.092 \log \epsilon_0 - 0.094 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (9)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log t_r = 1.043 - 1.249 \log \epsilon_0 - 0.145 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.98) \quad (10)$$

1Cr0.5Mo steel :

$$400^{\circ}\text{C}; \log t_r = 1.402 - 1.396 \log \epsilon_0 - 0.118 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (11)$$

$$550^{\circ}\text{C}; \log t_r = 0.640 - 2.649 \log \epsilon_0 - 0.391 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (12)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log t_r = -0.455 - 3.158 \log \epsilon_0 - 0.440 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (13)$$

식 (8)~(13)에서와 같이, 초기연신률은 고온 크리프의 여러 가지 특성, 즉 크리프 응력, 파단수명, 정상 크리프 속도 및 총 크리프 속도와 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있다. 이는 Oh(오 등, 1993; 오 등, 1996)의 문헌과 거의 일치한다.

식 (8)~(13)은 $\log t_r - \log \epsilon_0$ 가 2차 함수적 관계식이므로 다음과 같이 모델화시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \log t_r &= \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 \quad (14) \\ &= \log A' + \log \epsilon_0 (B' + C' \log \epsilon_0) \\ &= \log (A' \epsilon_0^{B'+C' \log \epsilon_0}) \end{aligned}$$

$$\text{즉, } t_r = A' \epsilon_0^{B'+C' \log \epsilon_0} \quad (15)$$

여기서 A', B', C' 는 재료와 온도의 함수이다.

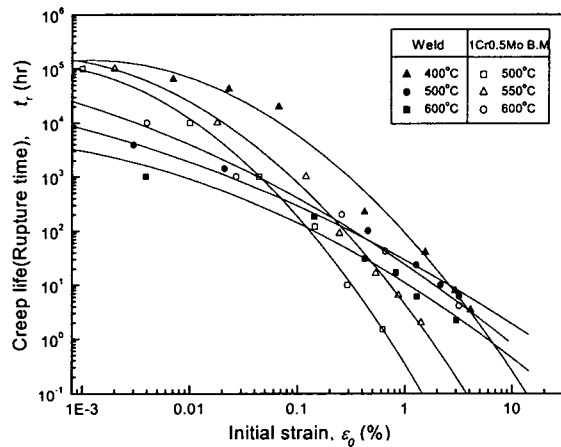


Fig. 5 Relationship of rupture time versus initial strain of 1Cr0.5Mo-STs304 weld and 1Cr0.5Mo steel at various elevated temperatures

3.5 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 6(a), (b)는 400, 500, 550 및 600°C에서의 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할수록 감소하며, 온도가 상승할수록 그 감소율이 더욱 증가함을 알 수 있으며, 이는 Oh 등의 보고(오 등, 1993; 오 등, 1996; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)와 매우 일치한다. 이들의 정량적 상관 관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

1Cr0.5Mo-STs304 weld :

$$400^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.721 - 2.475 \times 10^{-2} \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (16)$$

$$500^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.720 - 3.777 \times 10^{-2} \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (17)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.588 - 6.652 \times 10^{-2} \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (18)$$

1Cr0.5Mo steel :

$$400^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.607 - 1.464 \times 10^{-2} \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (19)$$

$$550^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.515 - 8.290 \times 10^{-2} \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (20)$$

$$600^{\circ}\text{C}; \log \sigma = 2.420 - 1.190 \times 10^{-1} \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (21)$$

Fig. 6(a), (b)는 양대수 좌표에서 선형적으로 나타나며, 온도 500, 550 및 600°C에서 응력이 결정되면 단기간 실험을 통하여 외삽에 의해 장기간의 크리프 수명을 예측할 수 있으나(10^3 h까지는 대체로 안전) 고온일수록 장기간($10^3 \sim 10^5$ h)에서는 실제 수명(Fig. 6(a), (b)에서 점선의 경우)이 계산 예측치 보다 훨씬 단축되므로, 장시간 예측은 다소 위험할 것으로 생각된다. 따라서 시험온도와 초기연신률을 포함(온도-응력-수명-초기연신률)하는 수명예측식을 ISM에 의해 도출할 필요가 있겠다.

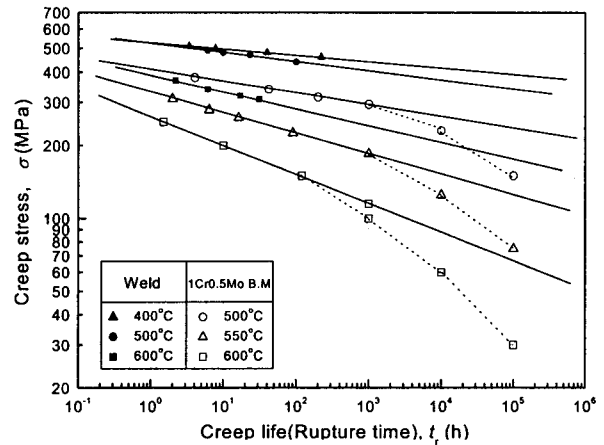


Fig. 6(a) Creep stress vs. creep life(rupture time) for 1Cr0.5Mo-STs304 weld and 1Cr0.5Mo base metal at 400, 500, 550 and 600°C

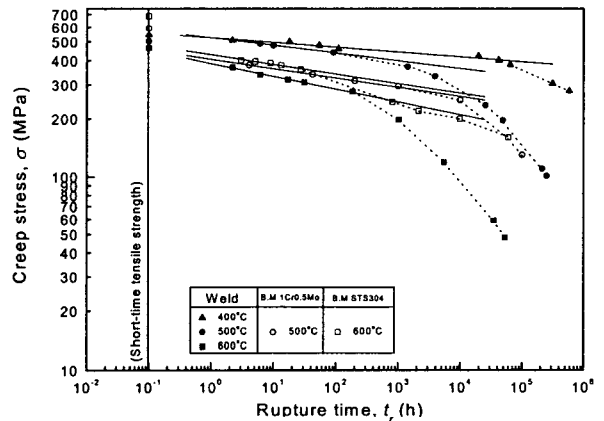


Fig. 6(b) Creep stress vs. creep rupture time for short-time creep(empirical) and creep long-time creep data for 1Cr0.5Mo-STs304 weld, 1Cr0.5Mo and STs304 base metals at 400°C, 500°C and 600°C

3.6 LMP에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 높은 고온에서는 보다 짧은 시간 안에 생기므로, 실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽

에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson-Miller Parameter(LMP)가 다음과 같이 정의되어 있다(Larson and Miller, 1952).

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \quad (22)$$

식 (22)에서 T 는 절대온도(K)이고, C_1 은 46으로 재료 정수이며, LMP는 응력($\log \sigma$)의 1차함수이므로 다음과 같다.

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (23)$$

여기서 K_1 과 K_2 는 재료상수이다.

식 (23)은 온도 400, 500, 550 및 600°C에서의 $\log \sigma$ 와 LMP[$T(\log t_r + 46)$]의 그래프(Fig. 7)에서 K_1 , K_2 및 LMP 식은 다음과 같이 된다.

1Cr0.5Mo-ST304 weld :

$$\begin{aligned} K_1 &= -55056.7, K_2 = 181150.2 \\ LMP &= T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2 \\ &= -55056.7 \log \sigma + 181150.2 \quad (R^2=0.80) \end{aligned} \quad (24)$$

1Cr0.5Mo steel :

$$\begin{aligned} K_1 &= -16421.9, K_2 = 78576.8 \\ LMP &= T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2 \\ &= -16421.9 \log \sigma + 78576.8 \quad (R^2=0.92) \end{aligned} \quad (25)$$

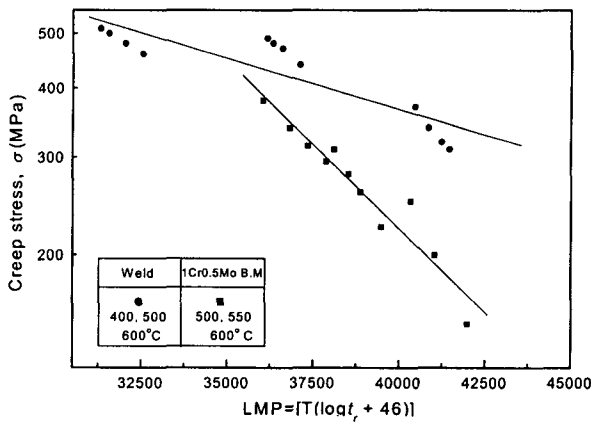


Fig. 7 Master creep curve of 1Cr0.5Mo-ST304 weld and 1Cr0.5Mo base metal at 400, 500, 550 and 600°C

3.7 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측

초기연신률법(ISM)(오 등, 1993; 오 등, 1996)에 의한 크리프 수명예측식과 앞장에서 구한 LMP법을 이용한 크리프 파단수명식을 접목시켜 서로 연립하여 구한 크리프 온도, 응력, 수명, 초기연신률을 포함하는 식을 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측식이라 하여 다음과 같이 도출하였다.

앞장에서 LMP의 식은 $C_1=46$ 이다.

$$T(\log t_r + 46) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (26)$$

$$\log t_r = \frac{K_1 \log \sigma + K_2}{T} - 46 \quad (27)$$

여기서 K_1 , K_2 는 재료 상수이고, T 는 절대온도($K=^{\circ}C + 273$)이다.

초기연신률법에 의한 파단수명식은 식 (8)~(13)에서 도출된 바와 같이, 그 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 \quad (28)$$

따라서 식(27)과 식(28)을 연립해서 풀면, LMP-ISM 크리프 수명예측식은 다음과 같다.

$$2 \log t_r = \frac{K_1 \log \sigma + K_2}{T} + \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 - 46 \quad (29)$$

여기서 K_1 , K_2 , $\log A'$, B' 및 C' 의 값은 다음과 같다.

1Cr0.5Mo-ST304 weld :

$$\begin{aligned} K_1 &= -55056.7, K_2 = 181150.2 \\ \log A' &= 7.384 - 0.011T + 3.95 \times 10^{-6}T^2 \quad (R^2=0.99) \\ B' &= -41.853 + 0.101T - 6.22 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99) \\ C' &= -10.767 + 0.026T - 1.64 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99) \end{aligned}$$

1Cr0.5Mo steel :

$$\begin{aligned} K_1 &= -16421.9, K_2 = 78576.8 \\ \log A' &= -8.979 + 0.054T - 6.554 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99) \\ B' &= 51.774 - 0.180T + 1.479 \times 10^{-4}T^2 \quad (R^2=0.99) \\ C' &= 14.845 - 0.052T + 4.452 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99) \end{aligned}$$

이와 같이 $\log A'$, B' 및 C' 의 값은 Fig. 5에서 도출된 일반식(28)에서 구한 것이다.

3.8 ISM에 의한 크리프 수명예측

온도, 응력, 수명, 초기연신률이 포함되는 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출된다.

식 (7)에서 $\sigma = A \epsilon_0^B$ 와 식 (15)에서 $t_r = A' \epsilon_0^{B'+C'} \log \epsilon_0$ 를 풀면,

$$\sigma t_r = AA' \epsilon_0^{B+B'+C'} \log \epsilon_0 \quad \text{가 된다.}$$

따라서 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출된다.

$$t_r = AA' \epsilon_0^{B+B'+C'} \log \epsilon_0 \sigma^{-1} \quad (30)$$

$$\therefore t_r = \alpha \epsilon_0^{\beta} \sigma^{-1} \quad (31)$$

여기서 α , β 의 값은 다음과 같다.

1Cr0.5Mo-ST304 weld :

$$\begin{aligned} \alpha &= \log(AA') = 10^{6.801 - 0.002T - 2.5 \times 10^{-6}T^2} \\ \beta &= \beta' + C' \log \epsilon_0 \\ \beta' &= B + B' \\ &= -41.146 + 0.099T - 6.08 \times 10^{-5}T^2 \\ C' &= -10.767 + 0.026T - 1.64 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

1Cr0.5Mo steel :

$$\begin{aligned} \alpha &= \log(AA') = 10^{0.00213 + 0.0305T - 4.178 \times 10^{-5}T^2} \\ \beta &= \beta' + C' \log \epsilon_0 \end{aligned}$$

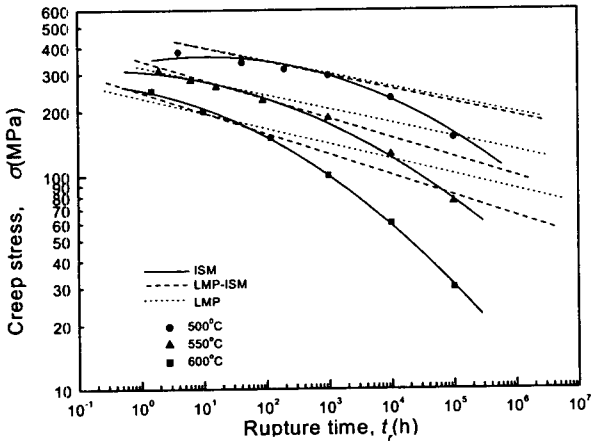
$$\beta' = B+B'$$

$$= -5.944 + 0.170T + 1.365 \times 10^{-5}T^2$$

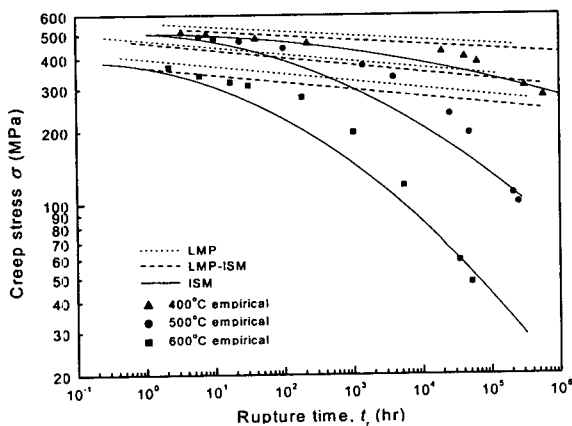
$$C' = 14.845 - 0.0522T + 4.452 \times 10^{-5}T^2$$

위 식 (31)에서 어떤 응력(σ), 온도(T)와 초기연신률(ϵ_0)을 알 때, 크리프 수명(t_r)을 계산할 수 있다.

Fig. 8(a), (b)는 ISM 크리프 수명 예측식(31)에 의해 구한 크리프 설계곡선을 LMP-ISM식과 LMP식에 의한 경우의 비교를 장시간 크리프 수명인 $10^3 \sim 10^5$ 시간까지의 실제 실험치와 400, 500, 550 및 600°C에서 서로 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, LMP식은 400, 500 및 550°C에서 $10^3 \sim 10^5$ 시간의 장시간 크리프 예측의 경우 실험치와 큰 오차가 있으므로 사용불가하며, 600°C 경우 10^2 시간 이상에서 이용하면 매우 위험함을 알 수 있다. LMP-ISM식도 LMP식 보다 다소 개량되었으나, 역시 $10^3 \sim 10^5$ 시간대의 장시간 크리프 수명 예측에는 적용될 수 없음이 확인되었다. 하지만, ISM식만은 $10^3 \sim 10^5$ 시간의 장시간 수명예측식에서 실험치와 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) 1Cr0.5Mo base metal



(b) 1Cr0.5Mo-STSS304 weld

Fig. 8 Comparison of creep design curves for 1Cr0.5Mo-STSS304 weld and 1Cr0.5Mo base metal by LMP & LMP-ISM methods and the empirical data at 400, 500, 550 and 600°C

Fig. 9에서도 알 수 있듯이, ISM식만이 모재(1Cr0.5Mo)의 경우 계산치와 실험치는 잘 일치하나, 용접재(1Cr0.5Mo-STSS304)의 경우는 10^4 까지는 모재보다 파단 수명이 다소 짧게 예측되므로 더욱 안전하며, 장기 수명 이상에서는 계산치와 실험치가 잘 일치하고 있다. 그러므로 온도, 응력, 초기연신률을 고려한 크리프 파단 수명 예측식으로써 신뢰성이 높음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 도출된 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 그 이용가치가 크리라고 생각된다.

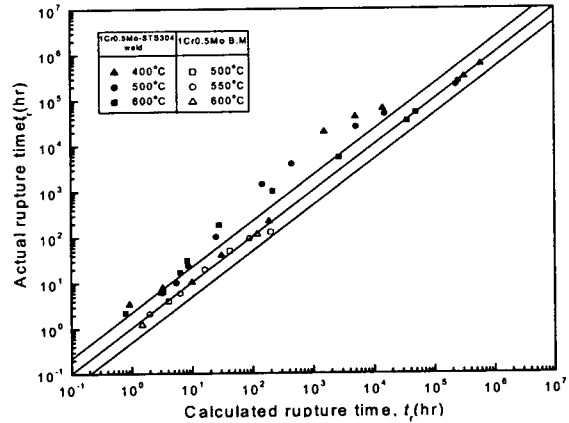


Fig. 9 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for 1Cr0.5Mo-STSS304 weld and 1Cr0.5Mo base metal by ISM at 400, 500, 550 and 600°C

4. 결론

압력용기용 고온재의 마찰용접재(1Cr0.5Mo-STSS304)와 모재(1Cr0.5Mo)에 관하여 초기연신률(ISM)에 의한 고온(400, 500, 600°C)의 여러 응력하에서 고온 크리프 실험을 수행하였으며, 고온 크리프 파단수명과 크리프 제 특성을 타 예측법인 LMP, LMP-ISM과 비교 후 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) LMP에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같으며, 10^2 시간까지는 매우 유효하지만, 장시간 ($10^3 \sim 10^5$ h) 예측에는 실제 파단시간보다 더욱 길게 예측되므로 위험함을 알 수 있었다.

1Cr0.5Mo-STSS304 weld :

$$C_1 = 46, K_1 = -55056.7, K_2 = 181150.2$$

$$\text{LMP} = T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2$$

$$= -55056.7 \log \sigma + 181150.2$$

1Cr0.5Mo steel :

$$C_1 = 46, K_1 = -16421.9, K_2 = 78576.8$$

$$\text{LMP} = T(\log t_r + 20) = K_1 \log \sigma + K_2$$

$$= -16421.9 \log \sigma + 78576.8$$

(2) LMP와 ISM을 이용하여 초기연신률-온도-응력의 변수로 구성된 장시간 크리프 파단수명예측식을 도출하였다. 그러나 LMP-ISM은 LMP보다 다소 개량되었으나, 실제 파단시간과 ISM의 경우보다 더 긴 파단시간을 예상하므로 장시간의 경우에 적합하지 않다.

(3) 초기연신률법(ISM)에 의한 크리프 수명예측식이 다음과 같이 도출되었으며, LMP와 LMP-ISM의 예측식에 비해 장시간($10^3 \sim 10^5$ h) 크리프 수명예측에서 그 신뢰성

이 높게 나타남이 확인되었다.

$$t_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1}$$

여기서 α , β 의 값은 다음과 같다.

1Cr0.5Mo-ST304 weld :

$$\alpha = \log(AA') = 10^{6.801 - 0.002T - 2.5 \times 10^{-6}T^2}$$

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

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

$$= -41.146 + 0.099T - 6.08 \times 10^{-5}T^2$$

$$C' = -10.767 + 0.026T - 1.64 \times 10^{-5}T^2$$

1Cr0.5Mo steel :

$$\alpha = \log(AA') = 10^{0.00213 + 0.0305T - 4.178 \times 10^{-5}T^2}$$

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

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

$$= -5.944 + 0.170T + 1.365 \times 10^{-5}T^2$$

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

참 고 문 헌

- 공유식, 오세규, 박노광(1999). "항공기용 가스터빈 재료의 열처리 조건에 따른 크리프 특성", 한국해양공학회지, 제13권, 제4호 pp 112-117.
- 오세규, 김선진, 정순억, 오정환(1993). "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법-(3), 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법", 대한 기계학회 논문집, 제17권 제4호, pp 746-754.
- 오세규, 윤명환, 정순억, 오정환(1993). "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온크리프 수명의 초기 실시간 예측법-(1), SUH3과 SUS303의 마찰용접 최적화와 용접재의 고온력 고온크리프 특성", 대한 기계학회 논문집, 제17권 제3호, pp 512-519.

오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화(1996). "엔진배기밸브의 내열강 이종재 마찰용접의 최적화와 고온 크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가 (1), (2)", 한국해양공학회 강연논문집, pp 249-254, pp 281-287.

오세규, 정순억, 오정환(1993). "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법-(2), SCM4와 SUS304 및 그 용접재의 고온력 고온 크리프 특성과 초기 변형률의 상관성", 대한 기계학회 논문집, 제17권 제3호, pp 520-526.

Larson, F. R. and Miller, J.(1952). "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, pp 765-775.

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 Angels, pp 275-279.

Oh, S. K.(1998). "Relationship between Cyclic Creep Properties and Initial Strain of Cr-Mo Alloy Steels at High Temperatures and AE Evaluation," Int. J. of Ocean Engineering and Technology, Vol.1, No.1, pp 78~86.

NRIM(1990). "Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of Normalized and Tempered 1Cr-.5Mo Steel Plates for Pressure Vessels", National Research Institute for Metals, Tokyo, Japan, NRIM Creep Data Sheet, No.35A.