한국해양공학회지 제15권 제2호, pp 53~60, 2001 (ISSN 1225-0767)

열간 금형재의 이종재 마찰용접과 크리프 수명예측 (Ⅱ)-크리프 수명예측

박일동* · 공유식** · 오세규** · 전태언**
*부산기능대학 금형과, **부경대학교 기계공학부

Friction Welding of Dissimilar Hot Die Punch Materials and Its Creep Life Prediction(Ⅱ)-Creep Life Prediction by ISM

IL-DONG PARK*, YU-SIK KONG**, SAE-KYOO OH** AND TAE-EUN JEON**
*Dept. of Mechanical Engineering, Pusan Polytechnic College, Pusan 616-101, Korea
**School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Larson-Miller parameter LMP, Initial strain method 초기연신률법, Creep life prediction 크리프 수명예측

ABSTRACT: *It was confirmed that the life predictive equation by LMP and LMP-ISM are effective only up to 10^2 hours and can not be used for long times of $10^3 \sim 10^5$ hours, but that by ISM can be used for long times creep life prediction with more reliability. The predictive creep life equation of ISM has better reliability than those by LMP and LMP-ISM, and its realizably is getting better for long time creep prediction($10^3 \sim 10^5$ h).*

1. 서 론

금형은 고도의 기술과 숙련된 기능 및 중장기의 현장 경험을 동시에 필요로 하는 기술로서, 재료비 비중이 원가의 5~30%를 차지하는 고부가 가치 산업이다. 또한 연평균 53.3%의 증가를 보이고 있는 수출유망업종이기도 하다. 그러나 우리 나라 금형업계는 초정밀 금형의 설계능력이 부족하고 정밀가공기술, 금형부품의 내구화와 정밀화 및 국산화, 열처리 및 표면처리기술의 낙후로 징밀도 및 내구성 측면에서 많은 문제점을 안고 있다(한국금형정보센타, 5, 6, 7월호, 1992).

그래서 열간 금형펀치의 고온하 사용에 따른 고온 크리프손상, 수명예측의 필요성이 절실하여 이를 해결하기 위해 초기변형률법(ISM)에 의해 실시간에 크리프 수명 예측이 가능한 기술을 개발하고자 한다.

따라서 본 연구에서는 이러한 열간 금형재의 정적 크리프와 초기연신률(IS)과의 상관성 규명 및 초기연신률법(ISM)에 의한 크리프 수명예측식 도출, 타예측식인 LMP법과 LMP-ISM과의 비교 검토에 관한 연구를 수행 하였다(정 등, 1997; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998).

2. 시험편 및 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 시험편 재료는 내열성과 내마모성 및 내부식성이 비교적 강한 SCM440 구조용 합금강을 사용하였으며, 고온 내마모성과 충격성이 강한 고온 금형재료로서는 우수한 성능을 가지고 있는 STD61을 사용하였다. 본 실험에 사용한 재료의 화학 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1은 고온 인장 및 크리프 시험편의 형상을 나타내고 있으며, 마찰용접재를 선삭 후 연삭 가공으로 마무리하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 크리프 시험기는 미국 SATEC사의 Model DLF-10(용량 5ton)이며, 연신은 신장계를 통하여 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 기록계를 통하여 크리프 곡선을 그렸다. 시험편의 가열공정은 무부하 상태에서 일정온도(400, 500, 600, 700℃)까지 약 9.6℃/min으로 가열했으며, 부하를 걸기 전에 전기로의 온도분포가 균일하게 유지되도록 일정온도에서 30분간 온도를

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Materials	C	Si	Ni	Cr	Mn	P	S	Mo	W	V
STD61	0.37	1.00	-	5.00	0.50	0.02	0.02	1.25	-	1.00
SCM440	0.38	0.21	0.15	1.13	0.62	0.017	0.022	1.85	-	-

Table 2 Mechanical properties of base materials for dissimilar friction welding

Materials	Tensile strength σ_t (MPa)	Yield strength σ_y (MPa)	Elongation ε (%)	Hardness H_B
STD61	715	459	20.3	-
SCM440	1054	926	12.2	315

유지시킨 후, 하중을 작용시켜 실험을 수행하였다. 또한 시험 중 온도는 실험온도의 ±1℃범위 이내로 유지하였으며, 초기연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정하는 것으로 통일하였다.

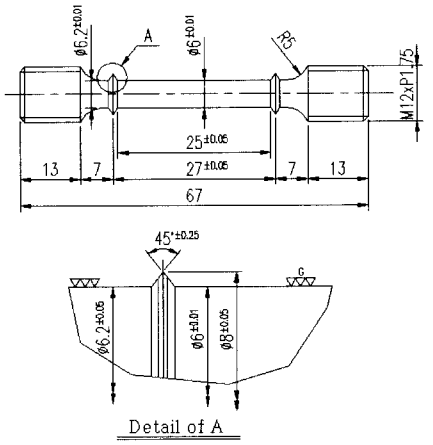

Fig. 1 Shape and dimension of creep test specimen (ASTM E139-83) (unit : mm)

3. 결과 및 고찰

3.1 고온 크리프 곡선

본 연구에 사용된 STD61-SCM440 최적조건(박 등, 1999)에서 마찰용접한 용접재의 고온 크리프 시험에서, STD61측 고온강도에 기인하여 파단은 SCM440측으로 나타났다. 따라서 SCM440의 고온인장 결과를 기준으로 용접재의 크리프 특성을 조사하고 수명예측을 하고자 하였다. 각각의 온도(400, 500, 600, 700℃) 하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 STD61-SCM440 용접재의 크리프 곡선을 Fig. 2(a), 2(b), 2(c), 2(d)에 나타내었다.

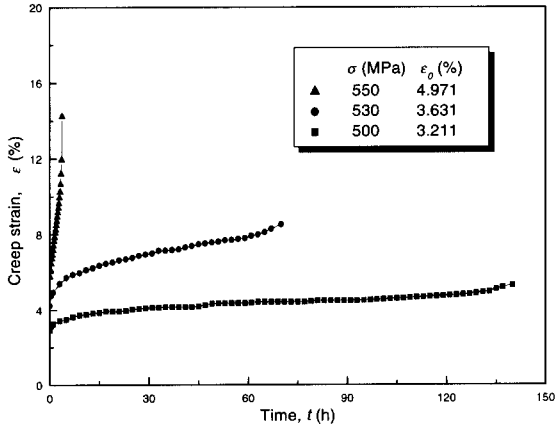

Fig. 2(a) Creep curves for friction welded joint (STD61-SCM440) at 400℃

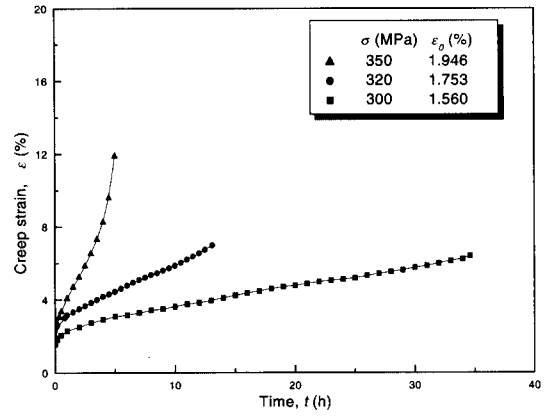

Fig. 2(b) Creep curves for friction welded joint (STD61-SCM440) at 500℃

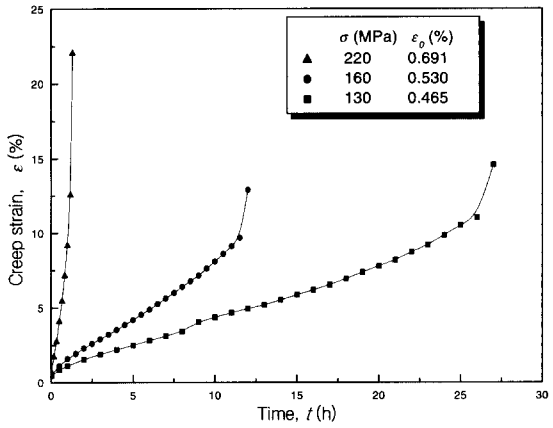

Fig. 2(c) Creep curves for friction welded joint (STD61-SCM440) at 600℃

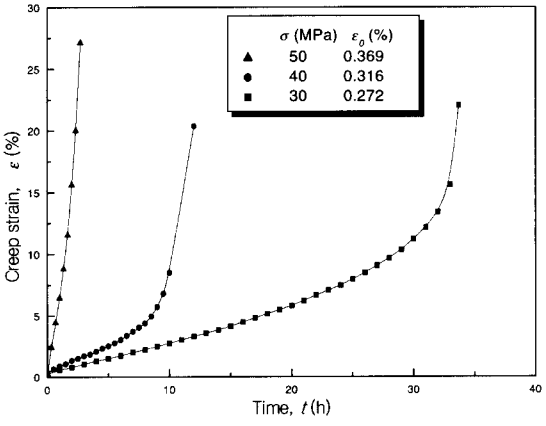

Fig. 2(d) Creep curves for friction welded joint (STD61-SCM440) at 700℃

그림에서 알 수 있듯이, 온도가 증가함에 따라 총 크리프 연신률(ε_T)이 대체로 증가하는 것을 알 수 있으며 초기연신률(ε_0)도 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 3은 용접재 STD61-SCM440에 대해 크리프 시험한 결과의 데이터를 정리한 것으로 응력(σ), 초기변형률(ε_0), 정상 크리프속도($\dot{\varepsilon}$), 파단시간(t_r), 총 연신률(ε_T), 총 크리프속도($\dot{\varepsilon}_T$)을 나타내고 있다.

Table 3에서 나타내고 있듯이, 초기연신률은 온도, 응력, 파단시간과 밀접한 상관이 있음을 알 수 있다.

Table 3 Data of creep test of friction welded joint STD61-SCM440 under uni-axial tension

Temp.	Stress	Initial strain	Steady state creep rate	Rupture time	Total strain	Total creep rate	$\sigma/\sigma_t \times 100$
℃	σ(MPa)	ε_0(%)	$\dot{\varepsilon}$ (%/h)	t_r(h)	ε_T(%)	$\dot{\varepsilon}_T$(%/h)	(%)
400	550	4.971	1.433	3.8	14.254	3.751	71.0
	540	4.301	0.179	18.0	11.365	0.579	69.7
	530	3.631	0.038	70.0	8.522	0.122	68.4
	500	3.211	0.009	140.0	5.321	0.038	64.5
500	350	1.946	1.321	5.0	11.884	2.377	56.5
	320	1.753	0.305	13.1	6.974	0.532	51.7
	300	1.560	0.109	34.6	6.398	0.185	48.5
	280	1.397	0.036	104.0	4.137	0.057	45.2
600	220	0.691	9.602	1.3	22.042	16.955	56.6
	160	0.530	0.756	12.0	12.899	1.075	41.1
	130	0.465	0.366	27.0	14.592	0.540	33.4
	100	0.395	0.109	120.0	10.279	0.161	25.7
700	50	0.369	6.433	2.7	27.121	10.045	26.5
	40	0.316	1.190	10.5	20.349	1.938	21.2
	30	0.272	0.350	33.7	22.042	0.654	15.9
	25	0.248	0.156	85.0	19.706	0.289	13.2

3.2 크리프 응력과 크리프 속도와의 상관성

Fig. 3과 Fig. 4는 크리프 응력(σ, MPa)과 정상 크리프 속도($\dot{\varepsilon}$, %/h), 총 크리프 속도($\dot{\varepsilon}_T$, %/h)와의 상관관계를 나타내고 있다. 응력이 증가함에 따라 정상 크리프 속도와 총 크리프 속도는 양대수 좌표에서 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 또한, 낮은 온도에서 보다 온도가 상승함에 따라 정상 크리프 속도($\dot{\varepsilon}$)와 총 크리프 속도($\dot{\varepsilon}_T$)의 기울기가 비슷한 경향으로 다소 커짐을 알 수 있다.

정상 크리프 속도식(σ-$\dot{\varepsilon}$)과 총 크리프 속도식(σ-$\dot{\varepsilon}_T$)이 최소자승법을 이용한 회귀분석법에 의해 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 3에서 σ-$\dot{\varepsilon}$ 관계식

$$400℃;\log\sigma = 2.742 + 0.018 \log\dot{\varepsilon} \quad (R^2=0.93) \tag{1}$$

$$500℃;\log\sigma = 2.537 + 0.062 \log\dot{\varepsilon} \quad (R^2=0.99) \tag{2}$$

$$600℃;\log\sigma = 2.188 + 0.173 \log\dot{\varepsilon} \quad (R^2=0.98) \tag{3}$$

$$700℃;\log\sigma = 1.562 + 0.188 \log\dot{\varepsilon} \quad (R^2=0.99) \tag{4}$$

Fig. 4에서 σ-$\dot{\varepsilon}_T$ 관계식

$$400℃;\log\sigma = 2.734 + 0.019 \log\dot{\varepsilon}_T \quad (R^2=0.92) \tag{5}$$

$$500℃;\log\sigma = 2.521 + 0.060 \log\dot{\varepsilon}_T \quad (R^2=0.99) \tag{6}$$

$$600℃;\log\sigma = 2.157 + 0.165 \log\dot{\varepsilon}_T \quad (R^2=0.98) \tag{7}$$

$$700℃;\log\sigma = 1.516 + 0.197 \log\dot{\varepsilon}_T \quad (R^2=0.99) \tag{8}$$

각각의 온도에서 구한 앞의 관계식(σ-$\dot{\varepsilon}$)인 식(1)~(4)로부터 다음과 같이 모델화 할 수 있다. 이는 Norton(Norton, 1910)에 의해 제안된 모델식과 일치한다.

$$\dot{\varepsilon} = m\sigma^n \tag{9}$$

여기서 m, n은 온도에 의존하는 재료 정수이다.

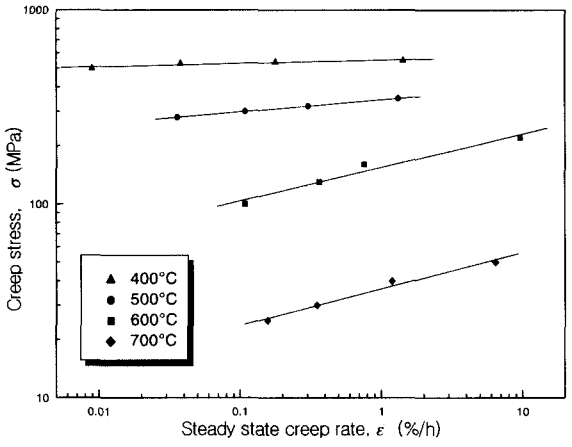

Fig. 3 Relationship between creep stress and steady state creep rate of STD61 to SCM440 at 400, 500, 600 and 700℃

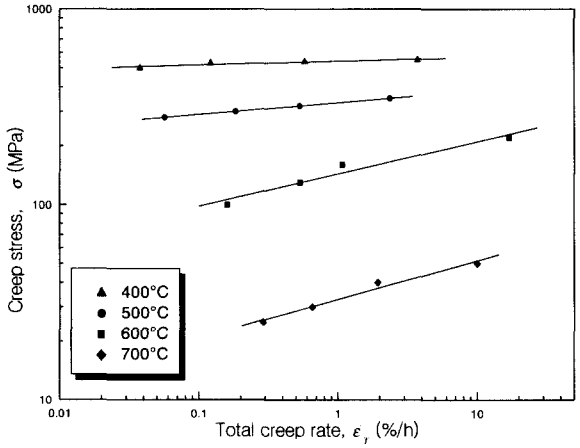

Fig. 4 Relationship between creep stress and total creep rate of STD61 to SCM440 at 400, 500, 600 and 700℃

3.3 초기연신률과 크리프 속도와의 상관성

Fig. 5와 Fig. 6은 크리프 초기연신률 ε_0(%)과 정상 크리프 속도 $\dot{\varepsilon}$(%/h) 및 총 크리프 속도 $\dot{\varepsilon}_T$(%/h)와의 상관성을 400, 500, 600, 700℃에서 각각 구한 실험 결과를 나타낸다. 초기연신률은 정상 크리프 속도 및 총 크리프 속도가 상승할 수록 선형적으로 증가하며, 이는 Oh의 연구보고(오 등, 1996; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)의 경우와 잘 일치한다. 그 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Fig. 5에서 $\dot{\varepsilon}$-ε_0 관계식

400℃;$\log\dot{\varepsilon}$ =-7.786+11.301$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (10)

500℃;$\log\dot{\varepsilon}$ =-3.016+10.634$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (11)

600℃;$\log\dot{\varepsilon}$ = 2.198+7.960$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (12)

700℃;$\log\dot{\varepsilon}$ = 4.778+9.263$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (13)

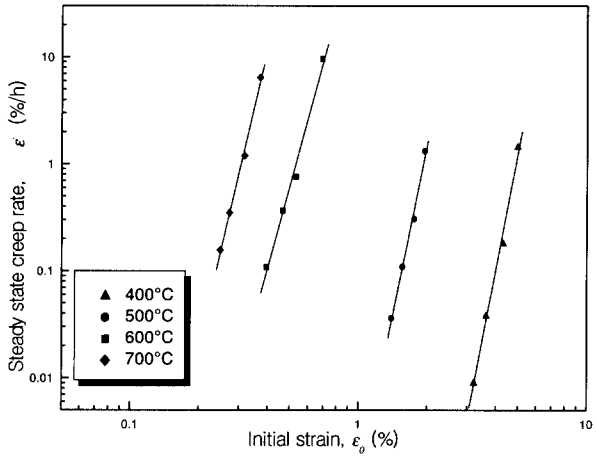

Fig. 5 Relationship between steady state creep rate and initial strain of STD61 to SCM440 at 400, 500, 600 and 700℃ .

Fig. 6에서 $\dot{\varepsilon}_T$-ε_0 관계식

400℃;$\log\dot{\varepsilon}_T$ =-6.707+10.360$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (14)

500℃;$\log\dot{\varepsilon}_T$ =-2.865+11.004$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (15)

600℃;$\log\dot{\varepsilon}_T$ = 2.475+8.277$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (16)

700℃;$\log\dot{\varepsilon}_T$ = 4.754+8.768$\log\varepsilon_0$ (R^2=0.99) (17)

식(10)~(17)에서 초기연신률을 크리프 초기에 측정하면 장시간의 크리프 특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다.

3.4 고온 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 7은 400, 500, 600, 700℃에서의 용접재와 모재에 대한 크리프 응력과 크리프 수명(파단시간)과의 상관성을 나타내는 실험결과로서 크리프 파단 곡선이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할 수록 감소하고, 온도가 상승할 수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있으며, 이는 Oh 등의 보고(오 등, 1996; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)와 잘 일치한다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

Welded joint (STD61-SCM440) :

400℃ ; $\log\sigma = 2.758 - 0.023\log tr$ (R^2=0.89) (18)

500℃ ; $\log\sigma = 2.591 - 0.073\log tr$ (R^2=0.99) (19)

600℃ ; $\log\sigma = 2.372 - 0.176\log tr$ (R^2=0.99) (20)

700℃ ; $\log\sigma = 1.799 - 0.206\log tr$ (R^2=0.99) (21)

SCM440 :

500℃ ; $\log\sigma = 2.778 - 0.091\log tr$ (R^2=0.99) (22)

600℃ ; $\log\sigma = 2.406 - 0.125\log tr$ (R^2=0.99) (23)

700℃ ; $\log\sigma = 1.953 - 0.209\log tr$ (R^2=0.99) (24)

식(18)~(24)는 양대수 좌표평면에서 직선으로 나타나며, 온도 400, 500, 600, 700℃에서 응력이 결정되면 단기간 실험을

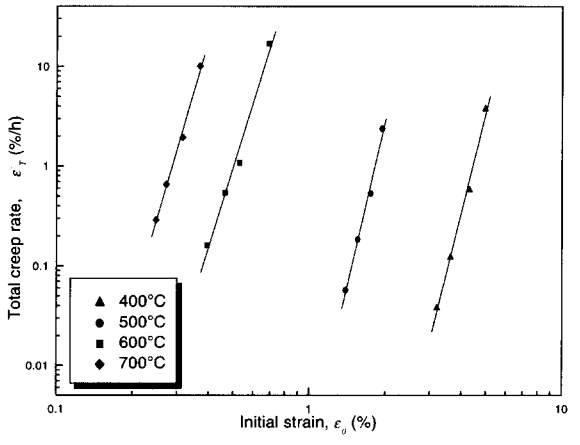

Fig. 6 Relationship between total creep rate and initial strain of STD61 to SCM440 at 400, 500, 600 and 700℃

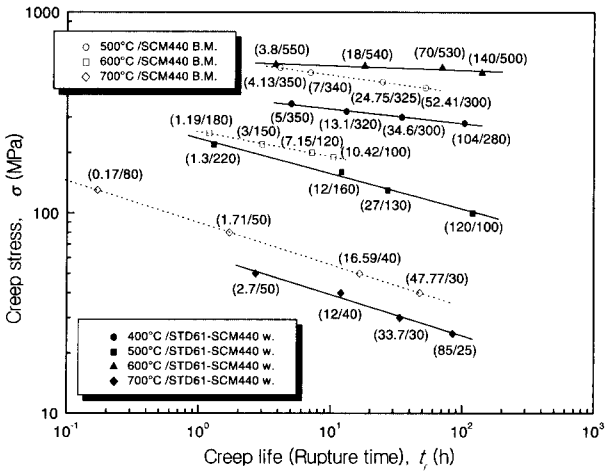

Fig. 7 Relationship between creep stress and creep life for friction welded joints and SCM440 base metals at 400, 500, 600 and 700℃

통하여 외삽에 의해 장기간의 크리프 수명을 예측할 수 있다. 그림에서 마찰용접재의 경우가 모재의 경우보다 같은 온도와 응력 하에서 크리프 수명이 더욱 짧은 것은 용접재 계면에서 모재(SCM440)의 열영향부(HAZ) 경계에서 경도 저하로 인한 연화작용이 주요 원인으로 사료되며 장시간 예측은 다소 위험할 것으로 생각된다.

여기서 식(18)~(24)에 의하여 시험온도(T)와 초기연신률(ε_0)을 포함하는 온도-응력-수명-초기연신률의 수명예측식을 ISM에 의해 도출할 필요가 있다.

3.5 고온 크리프 응력과 초기연신률과의 상관성

Fig. 8은 크리프 응력과 초기연신률과의 상관성을 나타내며, 양대수 좌표평면상에서 서로 선형적이다. 그림에서 초기연신률은 응력이 높아질 수록 증가하고, 온도가 상승할 수록 그 증가율도 더욱 커짐을 알 수 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

Welded joint (STD61-SCM440) :

$$400℃ \quad ; \log\sigma = 2.594 + 0.217 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (25)$$

$$500℃ \quad ; \log\sigma = 2.330 + 0.765 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (26)$$

$$600℃ \quad ; \log\sigma = 2.516 + 1.195 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (27)$$

$$700℃ \quad ; \log\sigma = 2.327 + 1.489 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (28)$$

SCM440 :

$$500℃ \quad ; \log\sigma = 2.720 + 0.176 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (29)$$

$$600℃ \quad ; \log\sigma = 2.382 + 0.253 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (30)$$

$$700℃ \quad ; \log\sigma = 2.060 + 0.431 \log \varepsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (31)$$

여기서 R^2은 데이터의 커브 피팅(curve fitting)에서 기여율(coefficient of determination)을 나타내며, 모두 1에 가까워 신뢰성이 높게 나타남을 알 수 있다.

식(25)~(31)에서 초기연신률(ε_0)은 크리프 응력(σ)과 선형적인 정량적 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 식(32)와 같이 모델화 시킬 수 있으며, 이는 여러 재료에 대한 Oh 등의 보고(오 등, 1996; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)와 모두 잘 일치하였다.

$$\sigma = A\,\varepsilon_0^{\,B} \quad (32)$$

여기서, A, B는 재료와 온도의 함수이다.

3.6 고온 크리프 수명과 초기연신률과의 상관성

Fig. 9는 마찰용접재와 모재에 대한 400, 500, 600, 700℃에서의 크리프 수명(파단시간)과 초기연신률과의 관계를 나타낸 것이다. 양대수 좌표평면상에서 선형적 관계임을 알 수 있으며, 용접재는 외삽에 의한 장시간(10^5)을 적용했으므로 2차 함수적 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

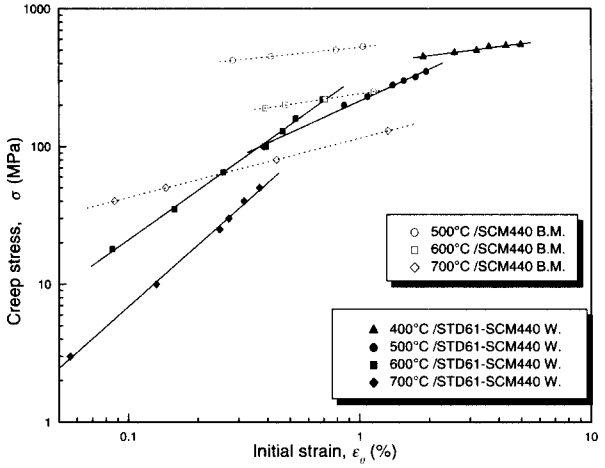

Fig. 8 Relationship between creep stress and initial strain for friction weldeds joints and SCM440 base metals at 400, 500, 600 and 700℃

그림에서 초기연신률이 증가할 수록 크리프 수명이 감소하며, 그 감소율도 마찰용접재의 경우가 더욱 급격함을 알 수 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출되었다.

Welded joint (STD61-SCM440) :

$$400℃;\ \log tr = 5.800 - 6.002 \log \varepsilon_0 - 2.041(\log \varepsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (33)$$

$$500℃;\ \log tr = 3.012 - 6.629 \log \varepsilon_0 - 4.503(\log \varepsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (34)$$

$$600℃;\ \log tr = -1.188 - 8.954 \log \varepsilon_0 - 2.995(\log \varepsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (35)$$

$$700℃;\ \log tr = -3.681 - 11.639 \log \varepsilon_0 - 4.417(\log \varepsilon_0)^2 \quad (R^2=0.99) \quad (36)$$

SCM440 :

$$500℃;\ \log tr = 0.646 - 1.965 \log \varepsilon_0 (R^2=0.99) \quad (37)$$

$$600℃;\ \log tr = 0.191 - 2.028 \log \varepsilon_0 (R^2=0.99) \quad (38)$$

$$700℃;\ \log tr = -0.513 - 2.068 \log \varepsilon_0 (R^2=0.99) \quad (39)$$

식(33)~(39)에서 초기연신률은 본 실험의 범위에서 크리프 수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 식(40), (41)과 같이 모델화 시킬 수 있다(오 등, 1996; 정 등, 1997; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998).

$$\log t_r = \log A' + B' \log \varepsilon_0 + C' (\log \varepsilon_0)^2 \quad (40)$$

$$t_r = A'\,\varepsilon_0^{\,B' + C' \log \varepsilon_0} \quad (41)$$

여기서, A', B', C'는 재료와 온도의 함수이다.

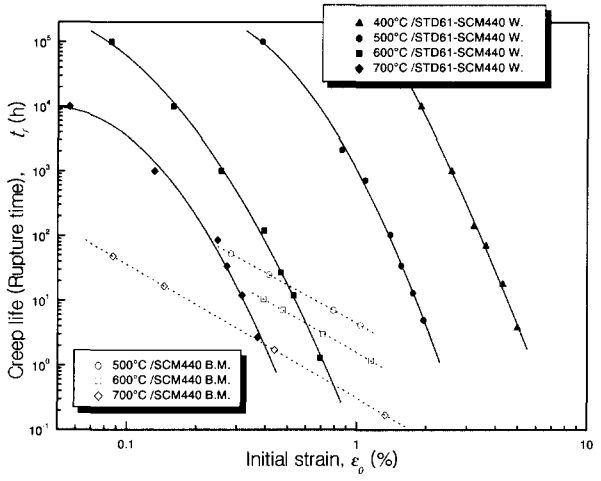

Fig. 9 Relationship between rupture time and initial strain for friction welded joints and SCM440 base metals at 400, 500, 600 and 700℃

3.7 LMP에 의한 크리프 수명예측

금속의 조직변화는 일반적으로 높은 온도에서는 짧은 시간 내에서 생긴다. 실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 LMP에 의해 다음과 같이 정의되어 있다(Larson and Miller, 1952).

$$\text{LMP} = T(\log t_r + C_1) \tag{42}$$

식(42)에서 T는 절대온도(K)이고, C_1은 내열합금에서는 20으로 재료정수를 적용하고 있다. LMP는 응력($\log\sigma$)의 1차 함수이므로 그 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{LMP} = T(\log t_r + 20) = K_1 \log\sigma + K_2 \tag{43}$$

여기서 K_1과 K_2는 재료상수이다.

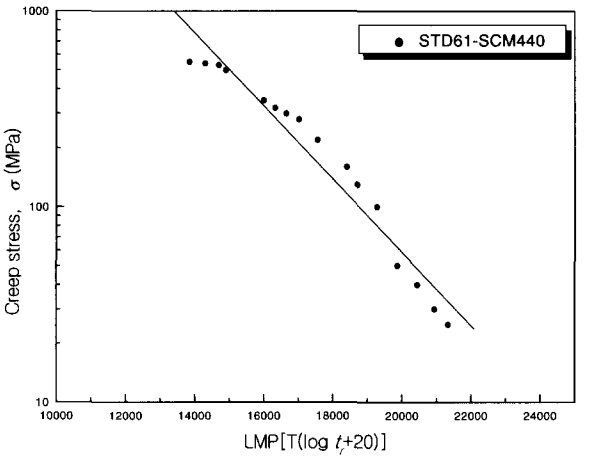

Fig. 10 Master creep curve of friction welded joints STD61 to SCM440 at 400, 500, 600 and 700℃

식 (43)은 온도 400, 500, 600, 700℃에서의 $\log\sigma$와 LMP[$T(\log t_r+20)$]의 Fig. 10에서 K_1, K_2의 값은 다음과 같다. K_1 =−5084.1, K_2 = 28865.3 이므로 LMP에 의한 관계식은 다음과 같이 된다.

$$\text{LMP}=T(\log t_r+20)=-5084.1\log\sigma+28865.3 \quad (R^2=0.97) \tag{44}$$

3.8 LMP-ISM에 의한 고온 크리프 수명 예측식 도출

초기연신률법(ISM)(정 등, 1997; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)에 의한 크리프 수명 예측식과 LMP법을 이용한 크리프 파단수명식을 접목시켜서 서로 연립하여 구한 크리프 온도, 응력, 수명, 초기연신률을 포함하는 식을 LMP-ISM 크리프 수명 예측식이라 하여 다음과 같이 도출하였다.

LMP의 식은 내열강의 경우 C_1 = 20이므로

$$\text{LMP}[T_K(\log t_r+20)] = K_1(\log\sigma)+K_2 \tag{45}$$

여기서 K_1, K_2는 재료 정수이고, T_K는 절대온도(K)이다. 그러므로 식(40)과 식(45)에서 LMP-ISM 크리프 수명 예측식은 다음과 같다.

$$2\log t_r = \frac{K_1(\log\sigma)+K_2}{T_K} + \log A' + B'\log\varepsilon_0 + C'(\log\varepsilon_0)^2 - 20 \tag{46}$$

STD61-SCM440 용접재 :

K_1 = -5084.1, K_2 = 28865.3

$$\log A' = 32.762 - 0.045\,T_K + 7.387\times10^{-6}\,T_K^2 \tag{47}$$

$$B' = -28.866 + 0.071\,T_K - 5.428\times10^{-5}\,T_K^2 \tag{48}$$

$$C' = 14.883 - 0.041\,T_K - 2.181\times10^{-5}\,T_K^2 \tag{49}$$

3.9 ISM에 의한 고온 크리프 수명 예측식 도출

온도, 응력, 수명, 초기연신률이 포함되는 ISM 크리프 수명 예측식은 식(32)과 식(41)에서 다음과 같이 도출된다.

$$t_r = AA'\,\varepsilon_0^{\,B+B'+C'\log\varepsilon_0}\,\sigma^{-1} \tag{50}$$

$$\therefore\ t_r = \alpha\ \varepsilon_0^{\,\beta}\,\sigma^{-1} \tag{51}$$

여기서 STD61-SCM440 마찰용접재 :

$$\alpha = A\cdot A' = 10^{3.5005-0.043T_K+5.972\times10^{-6}\,T_K^2} \tag{52}$$

$$\beta = \beta + C'\log\varepsilon_0 \tag{53}$$

$$\beta' = B + B' = -35.653 + 0.085\,T_K - 6.061\times10^{-5}\,T_K^2 \tag{54}$$

$$C' = 14.883 - 0.041\,T_K - 2.181\times10^{-5}\,T_K^2 \tag{55}$$

Fig. 11은 ISM 크리프 수명 예측식 (51)에 의해 구한 크리프 설계곡선을 식(47)~(49)의 LMP-ISM식과 LMP 식(46)에 의한 경우와 실제 장시간 크리프 수명인 10^3~10^4시간까지 400, 500, 600, 700℃에서 서로 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 잘 증명될 수 있듯이, LMP식은 500, 600℃에서는 10^3~10^4시간의 장시간 크리프 예측에서는 실험치와 큰 오차가 있으므로 장시간에 이용하면 매우 위험하다는 연구보고(오 등, 1996; Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)와 일치한다.

LMP-ISM식도 LMP식 보다 다소 개량되었으나 역시 $10^3 \sim 10^4$ 시간대의 장시간 크리프 수명예측에 이용할 때에는 위험이 있음이 확인되었다. 하지만, ISM식은 $10^3 \sim 10^4$시간의 장시간 수명예측식은 물론 모든 시간에서 실험치에 잘 접근한다는 보고(Oh *et al.*, 1996; Oh, 1998)와 잘 일치한다. 따라서 본 연구의 ISM에 의한 크리프 수명 예측식의 이용가치가 크며, 신뢰성도 높음이 확인되었다. 그 이유는 Fig. 12에서도 알 수 있듯이, ISM 크리프 수명 예측식(51)에서 계산된 크리프 수명과 실제 파단시간이 거의 서로 일치하고 있기 때문이다.

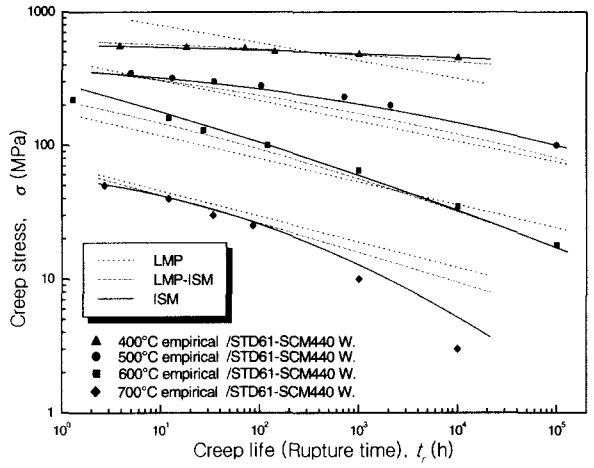

Fig. 11 Comparison of creep design curves for friction welded joints (STD61-SCM440) by ISM with those by LMP-ISM, LMP methods and the empirical data at 400, 500, 600 and 700℃

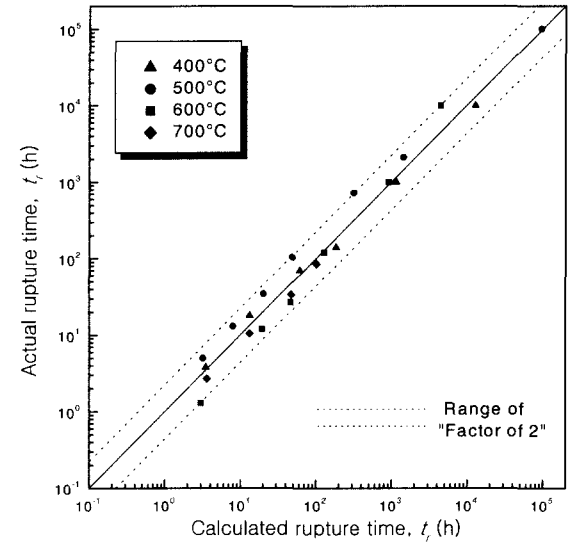

Fig. 12 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time for friction welded joints (STD61-SCM440) by ISM at 400, 500, 600 and 700℃

4. 결 론

열간 금형재 STD61과 SCM440을 사용하여 초기연신률법(ISM)에 의한 400, 500, 600, 700℃의 고온 크리프 수명 예측식 도출과 타 예측법(LMP, LMP-ISM)에 의해 구한 고온 크리프 수명 예측식을 비교한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) LMP에 의한 고온 크리프 수명예측식은 다음과 같이 도출되었다. 10^2시간까지는 유효하지만, 장시간($10^3 \sim 10^5$) 예측에는 위험함을 예상할 수 있다.

STD61-SCM440 용접재 :

$$LMP = T(\log t_r + 20) = K_1 \log\sigma + K_2$$
$$= -5084.1 \log\sigma + 28865.3$$

(2) 온도 $T_K(K)$, 응력 σ(MPa), 초기연신률 ε_0(%)일 때 용접재의 ISM에 의한 고온크리프 수명 t_r의 예측식은 다음과 같이 도출되었고, 타 예측식보다 신뢰성이 높으며, 장시간($10^3 \sim 10^5$) 크리프 수명 예측에서 신뢰성이 높음이 확인되었다.

$$t_r = \alpha\ \varepsilon_0{}^{\beta}\ \sigma^{-1}$$
$$\alpha = 10^{3.5005 - 0.043 T_K + 5.972 \times 10^{-6}\ T_K{}^2}$$
$$\beta = \beta' + C' \log\ \varepsilon_0$$
$$\beta' = -35.653 + 0.085 T_K - 6.061 \times 10^{-5} T_K{}^2$$
$$C' = 14.883 - 0.041\ T_K - 2.181 \times 10^{-5} T_K{}^2$$

(3) LMP-ISM식과 LMP식은 장시간($10^3 \sim 10^5$)의 크리프 수명예측에 이용할 때에는 위험함이 판명되었다. 다만 $10^3 \sim 10^5$시간의 장시간 수명 예측식은 ISM에 의한 크리프 수명 예측식의 이용가치가 크며, 신뢰성도 높음이 확인되었다.

참 고 문 헌

박일동, 오세규, 김지수(1999). "열간 금형펀치 제작을 위한 이종재 마찰용접과 고온 크리프 실시간 예측 및 AE에 의한 품질평가(Ⅰ)-마찰용접과 AE", 한국해양공학회지, 제13권 제3호, pp 77~82.

오세규 외 3인(1993). "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법 (1), (2), (3)", 대한기계학회 논문집 제17권 제3호, pp 512~519, pp 520~526, 제17권 제4호 pp 746~754.

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

정민화, 이상국, 허광범, 오세규, 이원석(1997). "발전소 고온 배관재료의 크리프 수명 손상 특성평가(4)-ISM에 의한 2.25Cr1Mo강의 크리프 수명예측," 한국해양공학회 '97년도 춘계학술대회 강연논문집, pp 84~89.

정민화, 이상국, 윤병식, 오세규, 송정근(1997). "화력발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성평가(1) - 1Cr0.5Mo강의 크리프특성과 LMP에 의한 크리프 수명의 예측", 대한기계학

회 1997년도 춘계학술대회 논문집 A, pp 63~67.

한국금형정보센타(1992). "월간 금형저널", 92년 5월호, pp 111~113.

한국금형정보센타(1992). "월간 금형저널", 92년 6월호, pp 90. 92. 100. 102~104, 106, 140~146.

한국금형정보센타(1992). "월간 금형저널", 92년 7월호, pp 102.

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

Norton, F. H.(1910). "The Creep of Steel at High Temperatures", McGraw Bill, New York, pp 67.

Oh, S. K., Kim, S. J., Jeon, T. E.(1996) "Developement 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 Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. 4, No. 1, 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.

2000년 11월 7일 원고 접수
2001년 1월 8일 수정본 채택