

# 내열강 마찰용접재의 ISM에 의한 크리프 수명예측에 관한 연구

김현경\* · 김일석\* · 이연탁\* · 공유식\*\* · 오세규\*\*  
\*부경대학교 대학원 기계공학과, \*\*부경대학교 기계공학부

## Study on Creep Life Prediction by Initial Strain Method for Friction Welded Joints of Heat Resisting Steels

HUN-KYOUNG KIM\*, IL-SEOCK KIM\*, YEON-TAK LEE\*, YU-SIK KONG\*\* AND SAE-KYOO OH\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

**KEY WORDS:** Heat resisting steels 내열강, Friction welding (FRW) 마찰용접, Welded joints 용접재, Creep life prediction 크리프 수명예측, Larson miller parameter (LMP) 라슨밀러파라미터, Initial strain method (ISM) 초기연신률법, Acoustic emission (AE) 음향방출

**ABSTRACT:** In this paper, the real-time prediction of high temperature creep life was carried out for the friction welded joints of dissimilar heat resisting steels (SUH3-SUH35). Various life prediction methods such as LMP (Larson-Miller Parameter) and ISM (initial strain method) were applied. The creep behaviors of those steels and the welds under static load were examined by ISM combined with LMP at 500, 600 and 700 °C, and the relationship between these two methods was investigated. A real-time creep life ( $t_r$ , hr) prediction by initial strain ( $\epsilon_0$ , %) under any creep stress ( $\sigma$ , MPa) at any high temperature ( $T$ , K) was developed as follows :

$$t_r = a \epsilon_0^\beta \sigma^{-1} \text{ where, } \phi=16 : \alpha = 10^{51.412 - 0.104T + 5.375 \times 10^{-5} T^2}, \beta = -83.989 + 0.180T - 9.957 \times 10^{-5} T^2, \phi=20 : \alpha = 10^{69.910 - 0.146T + 7.744 \times 10^{-5} T^2}, \beta = -51.442 + 0.105T - 5.595 \times 10^{-5} T^2 \text{ for SUH3-SUH35 friction weld of } \phi=16\text{mm and } \phi=20\text{mm, respectively.}$$

### 1. 서 론

엔진용 배기밸브 헤드 재료(SUH3, SUH31, SUH35)는 내열강으로서 모재는 물론, 고강인성 및 내식내열강인 축 재료(SUH31, STS303, STS304)와의 마찰용접재에 대한 초기연신율법(ISM)에 의한 고온(500, 600, 700°C) 크리프(creep) 안전수명예측의 연구가 필요 하다(오, 1982; 마찰용접연구회, 1979; Tasako *et al.*, 1970; Oh, 1986).

이들의 역사적 배경을 간단히 살펴본다면, 고온 크리프에 대한 연구는 국내외적으로 현재까지 많은 연구가 보고되었고, Oh 등(Oh, 1986; Oh, Kunio, Hasui, 1989)과 정(1998)에 의해서도 특히 내열강의 고온 크리프 제 특성을 초기연신율법(ISM, initial strain method)에 의해 크리프 초기 실시시간 순간에 예측할 수 있는 기술개발의 연구를 수행한 결과를 발표한 바 있다.

그러나, 본 연구에 사용된 재료인 엔진용 배기밸브 헤드(head)용 초내열강과 그 축(stem)용 내식·내열·고인성 합금의 이중재 최적 마찰용접재에 대한 고온 크리프 특성 및 초기연신율법에 의한 크리프 안전수명예측식 도출 등은 매우 필요한 실정이나 국내외적으로 아직 그 연구가 미미한 실정이다(Oh,

1982; 정, 1998; Baily, 1929; Laflen, 1978). 따라서, 본 연구결과가 엔진 배기밸브 재료인 고온내식강재 및 그 마찰용접재에 대한 고온 크리프 설계 및 보수관리에 대한 좋은 자료가 될 것으로 기대된다.

### 2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 엔진 배기밸브용 강재가 가져야 할 내열성과 내산화성, 내마모성 및 인성에 중점을 둔 내열강재로서 head부는 내식성, 내산화성, 고온강도가 높은 오스테나이트(austenite)계의 내열강 SUH35(고 Ni-Cr)강이고, stem부는 소입경 화성 및 내마모성이 우수한 마르텐사이트(marten- site)계의 내열강 SUH3 (Si-Cr)강이다. 마찰용접 시험편의 형상과 치수가 Fig. 1에, 그리고 두 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, Table 2와 같다.

Fig. 1(b)는 모재 SUH3과 마찰용접재 SUH3- SUH35( $\phi$  16,  $\phi$  20mm)의 고온(500°C, 600°C, 700°C) 인장시험편과 크리프시험편의 형상 및 치수를 표시하였다.

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

Comp. Mtls.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
SUH3	0.42	2.00	0.23	0.026	0.010	10.34	0.25	0.75
SUH35	0.57	0.13	9.26	0.036	0.007	40.34	3.38	0.15

**Table 2** Mechanical properties of base materials

Prop. Mtls.	Tensile strength $\sigma_t$ (MPa)	Yield strength $\sigma_y$ (MPa)	Elongation $\epsilon$ (%)	Reduction of area $\psi$ (%)	Hardness (Hv)
SUH3	941	512	23.4	48.0	411
SUH35	1082	796	29.8	28.4	484

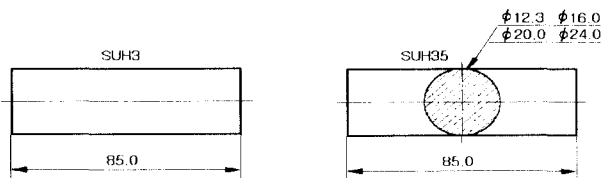
본 연구 중 마찰용접시험에 사용한 마찰용접기계는 TOHO TH-25 연속구동 브레이크형(continuous drive brake type)이며, 크리프 시험기는 정적 및 동적 하중하의 고온 크리프 시험이 가능한 실험장치로서, 최고온도 1,093℃의 고온 크리프, 응력 및 완화시험(stress and relaxation test)과 인장 및 압축시험이 가능한 미국 SATEC사의 크리프 시험기(DLF-10, 5ton)이다.

본 실험에 사용된 SUH3과 SUH35에 대한 최적마찰용접 조건을 결정하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 가공한 시험편을 미리 구한

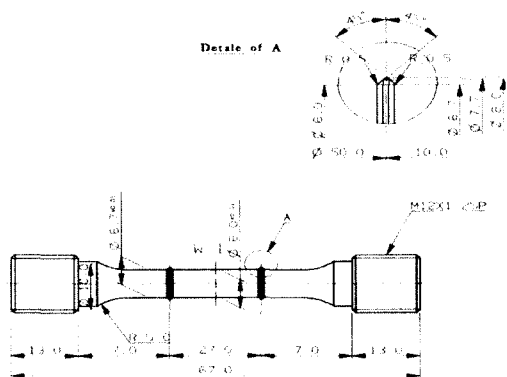
최적용접조건(회전수 2,000 rpm, 마찰가열압력  $P_1=160\text{MPa}$ , 압셋단조가압력  $P_2=320\text{MPa}$ , 마찰가열시간  $t_1=5\text{sec}$ ( $\phi 16, \phi 20$ ), 압셋단조시간  $t_2=3\text{sec}$ 에서 마찰용접한 것을 Fig. 1(b)와 같이 가공하여 고온인장, 고온크리프시험편으로 사용하였다.

크리프 시험의 연신은 신장계(extensometer)와 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 기록계를 통하여 크리프 곡선을 그렸다. 시험편의 가열공정은 무부하상태에서 실험온도(500, 600, 700℃)까지 약 9.6℃/min으로 가열했으며, 부하를 걸기 전에 시험로(furnace)의 온도분포가 균일하게 유지되도록 실험온도에서 30분간 온도를 유지시킨 다음, 하중을 작용시켜 실험을 수행하였다. 또한, 시험 중에는 실험온도의  $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험하였으며, 초기연신율(initial strain)은 문헌(Oh, et al., 1996, 1997)에 의하여 하중이 가해진 후 1분 동안의 초기 연신율을 선택하였다.

고온 크리프 특성의 AE에 의한 평가가능성을 조사할 목적으로 Fig. 2(a)와 같이 크리프 시험시에 발생하는 AE양을 측정하기 위하여 150kHz의 공진형 고감도 센서(Model : R15-C)를 사용하였다. 노 내부는 고온이라서 센서를 시험편에 직접 부착할 수 없으므로 강봉으로 제작한 웨이브 가이드(wave guide)를 사용하여 노 외부로 연결 후 웨이브 가이드 상의 판재 위에 AE 센서를 부착하였다. 넓은 주파수 범위의 스펙트럼을 커버하는 다양한 AE 발원(AE source)으로부터 AE가 발생하기 때문에 100kHz~300kHz 범위의 밴드-패스 필터(band-pass filter)를 포함하는 고감도 센서용 전치증폭기(pre-amplifier)를 사용하여 저주파와 고주파의 소음(noise)을 제거하였으며, 40dB( $\times 100$ )로 증폭하여 측정된 AE 신호가 시그널 케이블(signal cable)을 통과하여 장치에 원활히 전달되도록 하였다. 장치에 전달된 AE 신호는 신호처리

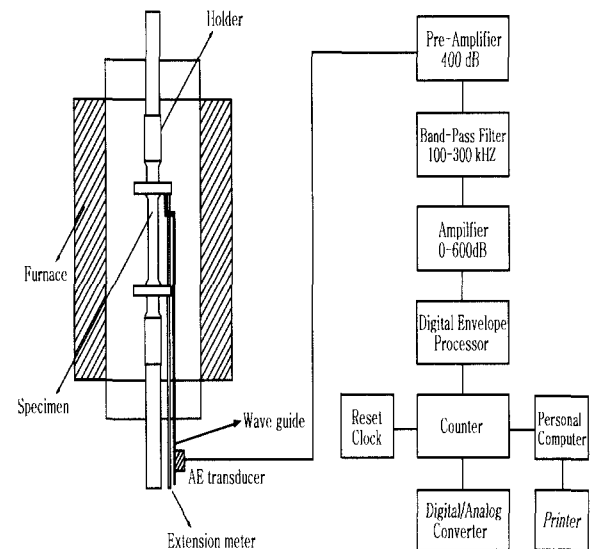


(a) Friction welding and AE test specimens



(b) High temperature tensile and creep test specimens

**Fig. 1** Shape and dimension of test specimens



(a) AE transducer location (b) Block diagram of AE monitoring equipment

**Fig. 2** Block diagram of AE measurement system

위하여 주증폭기(main-amplifier)에서 다시 35dB(×100)로 증폭하여 전체 시스템 이득(gain)을 75dB로 설정하였다. 또 외부 소음을 제거하기 위해 한계전압(threshold voltage)을 1.0V로 설정하여 이 이상의 진폭을 가지는 AE 펄스(pulse)만을 신호처리하였다.

Fig. 2(b)는 크리프 시험편에 연결된 웨이브 가이드를 통하여 노 외부에 부착된 센서를 거쳐 연결된 AE 측정시스템의 개략도를 나타낸다. 웨이브 가이드 상에 부착된 센서로부터 전달된 AE 신호는 크리프 시험 중에 그 검출시간에 따라 PC(personal computer)의 하드 디스크(hard disc)에 기록하였다. 이 AE 데이터들은 주 프로세싱(post processing)에 따라 단위 시간당 AE양, AE의 누적 총량, AE 총에너지양 등의 형태로 표시될 수 있도록 구성 되어 있다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 크리프 곡선

실험온도(500, 600, 700℃)하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 SUH3 모재와 SUH3- SUH35(φ16, φ20mm) 마찰용 접재의 크리프 곡선중에서 Fig. 3에 대표적으로 용접재 φ16의 경우를 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 대체로 크리프 변형은 작용응력이 클수록 증가함을 알 수 있고, 크리프 변형거동은 시험조건, 즉, 온도, 응력 뿐만 아니라 재료 등에 따라 변한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 모재 및 용접재의 경우, 동일 온도하에서 응력이 증가함에 따라 초기연신율은 모두 증가하며, 마찰용접재는 모재에 비해 파단수명은 감소하는 것을 볼 수 있었다.

Table 3(a) 및 (b)에는 500℃, 600℃, 700℃에서 크리프 시험을 실시한 결과의 데이터를 정리하여 응력( $\sigma$ , MPa), 초기변형률( $\epsilon_0$ , %), 정상 크리프 속도( $\dot{\epsilon}$ , %/s), 파단시간( $t_r$ , hr) 및 전 크리프 속도( $\dot{\epsilon}_T$ , %/s)를 나타낸다. 이 모든값들은 실험에 의하여 구하여진 값들이다.

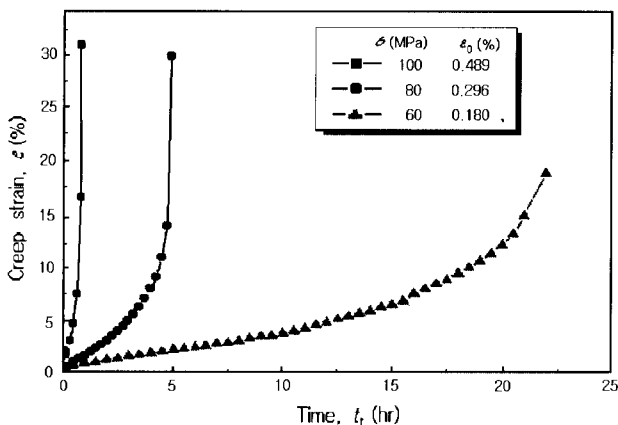


Fig. 3 Typical creep curves of SUH3-SUH35 weld (φ 16) at 700℃(Welding condition :  $n=2000$ rpm,  $P_1=160$ MPa,  $P_2=320$ MPa,  $t_1=5$ sec,  $t_2=3$ sec)

Table 3(a) Results by creep test of SUH3 under uni-axial tension

Temperature	Stress	Initial strain	Steady state creep rate	Rupture time	Total creep rate
℃	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s)	$t_r$ (hr)	$\dot{\epsilon}_T$ (%/s)
500	420	1.871	$8.11 \times 10^{-4}$	4.50	$2.33 \times 10^{-5}$
	400	1.548	$4.88 \times 10^{-4}$	7.05	$1.09 \times 10^{-5}$
	380	1.150	$2.15 \times 10^{-4}$	16.08	$5.39 \times 10^{-4}$
	290	-	-	(150.4)	-
	200	-	-	(1032.8)	-
600	250	1.283	$2.02 \times 10^{-2}$	0.32	$4.72 \times 10^{-2}$
	200	0.666	$2.54 \times 10^{-3}$	1.72	$8.82 \times 10^{-5}$
	120	0.160	$2.03 \times 10^{-3}$	75.0	$4.43 \times 10^{-4}$
	95	-	-	(262.8)	-
	65	-	-	(1001.4)	-
700	100	0.561	$3.90 \times 10^{-3}$	1.167	$1.36 \times 10^{-2}$
	80	0.285	$7.86 \times 10^{-4}$	5.167	$3.67 \times 10^{-3}$
	60	0.175	$1.76 \times 10^{-4}$	21.28	$1.08 \times 10^{-3}$
	35	-	-	(176.9)	-
	20	-	-	(597.4)	-

( ) Data from Reference (Japan Steel Ass., 1972)

Table 3(b) Results by creep test of SUH3-SUH35 weld(φ 16) under uni-axial tension

Temperature	Stress	Initial strain	Steady state creep rate	Rupture time	Total creep rate
(℃)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s)	$t_r$ (hr)	$\dot{\epsilon}_T$ (%/s)
500	380	1.250	$1.30 \times 10^{-3}$	1.45	$3.50 \times 10^{-3}$
	350	0.480	$0.20 \times 10^{-4}$	75	$5.20 \times 10^{-3}$
	330	0.345	$0.56 \times 10^{-3}$	300	$4.20 \times 10^{-3}$
	300	-	-	(550)	-
	250	-	-	(1568.7)	-
600	200	0.314	$5.32 \times 10^{-4}$	2.85	$1.98 \times 10^{-3}$
	170	0.212	$1.82 \times 10^{-4}$	9.7	$7.00 \times 10^{-4}$
	150	0.145	$6.01 \times 10^{-3}$	23.83	$3.29 \times 10^{-4}$
	100	-	-	(226.4)	-
	70	-	-	(1126.3)	-
700	100	0.489	$2.46 \times 10^{-3}$	0.867	$9.66 \times 10^{-3}$
	80	0.296	$4.17 \times 10^{-4}$	4.5	$1.92 \times 10^{-3}$
	60	0.180	$8.42 \times 10^{-3}$	22	$2.37 \times 10^{-4}$
	35	-	-	(164.4)	-
	15	-	-	(700)	-

( ) Data from Reference (Japan Steel Ass., 1972)

3.2 LMP-ISM에 의한 고온 크리프 수명예측식 도출

금속의 조직 변화는 일반적으로 온도가 고온일수록 더욱 짧은 시간 내에 생기므로, 실제 요구되는 온도보다 몇백도 높은 온도에서의 응력-파단시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson-Miller 파라미터(LMP)가 정의되어 있으며, 초기변형율법(ISM)(Oh, 1982; 정, 1998; Oh et al., 1986; Oh, 1989)에 의한 크리프 파단수명예측식과 LMP법(Larson et al., 1952)을 이용한 크리프 파단수명식을 연립하여 크리프 온도, 응력, 수명, 초기변형(연신)율을 포함하는 식을 다음과 같이 도출하였다.

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \tag{1}$$

식 (1)에서 T는 절대온도(K, °C +273)이고, C<sub>1</sub>은 재료정수로서 일반적으로 46이므로, 여기서, LMP는 응력(log σ)의 1차 함수로 표현된다. 따라서, 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log t_r + 46) = K_1 \log \sigma + K_2 \tag{2}$$

여기서 K<sub>1</sub>과 K<sub>2</sub>는 재료상수이다.

초기변형율에 대한 파단수명식(Oh et al., 1996, 1997)  $t_r = A \epsilon_0^B$ 로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = \log A + B \log \epsilon_0 \tag{3}$$

여기서, A, B는 온도항이 있는 재료상수이다.

식(2)와 식(3)에서 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$2 \log t_r = \frac{K_1 (\log \sigma) + K_2}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46 \tag{4}$$

식(4)는 온도 · 응력 · 수명 · 초기변형율이 포함된 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측식의 일반식이다.

Fig. 4는 SUH3과 SUH35 용접재의 500, 600, 700°C에서 응력(σ, MPa)과 LMP식(1)에서 구한 값과의 관계를 나타낸 그래프로 편대수 좌표평면에서 선형적인 관계를 나타내고 있다. Fig. 4에서 데이터를 통하여 최소자승법을 이용한 회귀분석법에 의하여 구한 수식은 다음과 같다.

SUH3 :  
 $\phi 16 : LMP = 68547 - 12334 \log \sigma \quad (R^2 = 0.97) \tag{5}$

SUH3-SUH35 weld :  
 $\phi 16 : LMP = 69861 - 12954 \log \sigma \quad (R^2 = 0.98) \tag{6}$

$\phi 20 : LMP = 70653 - 13050 \log \sigma \quad (R^2 = 0.99) \tag{7}$

여기서, 모재 SUH3의 경우, K<sub>1</sub> = 12334이고 K<sub>2</sub> = 68547이며, SUH3-SUH35(φ16mm) 용접재의 경우, K<sub>1</sub> = 12954이고 K<sub>2</sub> = 69861이며, SUH3-SUH35(φ20mm) 용접재의 경우, K<sub>1</sub> = 13050이고 K<sub>2</sub> = 70653이다. R은 기여율(coefficient of determination)을 나타내며, 모두 1에 가까우므로 실험식의 신뢰성이 매우 높다.

따라서, 본 실험을 통하여 어떤 응력(σ, MPa)과 온도(T, K)하에서 초기변형율(ε<sub>0</sub>, %)을 초기 실시간에 측정함으로써 크리프

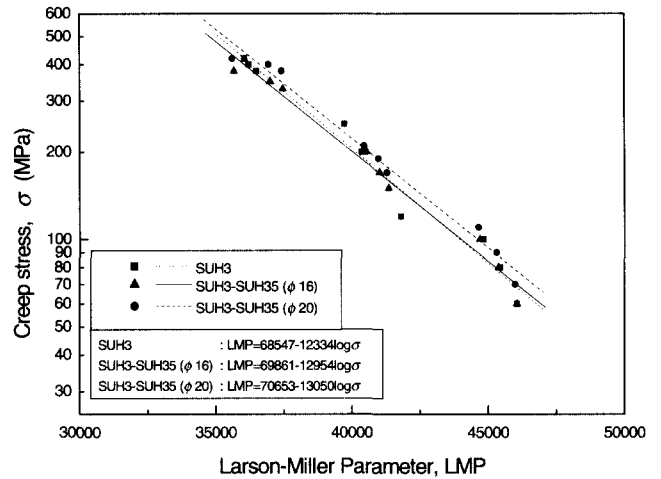


Fig. 4 Master creep curve of SUH3 (φ 16) and SUH3-SUH35 (φ 16, φ 20) weld

파단시간(t<sub>r</sub>, hr)을 구하는 LMP-ISM에 의한 크리프 파단수명예측식은 식(4)로부터 다음과 같이 도출되었다.

SUH3 : φ 16 :  
 $2 \log t_r = \frac{68547 - 12334 (\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46 \tag{8}$

여기서,  $A = 10^{50.554 - 0.107T + 5.608 \times 10^{-5} T^2}$   
 $B = 20.268 - 0.051T + 2.857 \times 10^{-5} T^2$

SUH3-SUH35 weld :  
 φ 16 :  
 $2 \log t_r = \frac{69861 - 12954 (\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46 \tag{9}$

φ 20 :  
 $2 \log t_r = \frac{70653 - 13050 (\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46 \tag{10}$

여기서,  
 φ 16 :  $A = 10^{56.071 - 0.122T + 6.545 \times 10^{-5} T^2}$   
 $B = -77.671 + 0.167T - 9.312 \times 10^{-5} T^2$   
 φ 20 :  $A = 10^{70.262 - 0.155T + 8.378 \times 10^{-5} T^2}$   
 $B = -46.847 + 0.0953T - 5.148 \times 10^{-5} T^2$

위에서 A와 B의 값은 Table 3의 여러 데이터로부터 도출된 t<sub>r</sub>-ε<sub>0</sub> 그래프와 식(3)에 의하여 구한 것이다.

3.3 ISM에 의한 고온 크리프 수명예측식 도출

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

Table 3에서 구한 σ와 ε<sub>0</sub>와의 관계식  $\sigma = A \epsilon_0^B$ 를  $\sigma = A' \epsilon_0^B$ 로 표현하면, A'와 B'는 온도항이 포함되어 있는 재료상수로서 그 값은 실험적으로 구한 σ-ε<sub>0</sub>의 그래프에서 구하여진다 (Oh, Kunio, Hasui, 1986; Oh, Kim, Jeon, 1996; Oh, Chang, Chung,

Lee, 1997).  $A'$ ,  $B'$ 의 값은 다음과 같이 구해졌다.

SUH3 :

$$\begin{aligned} \phi 16 : A' &= 10^{2.846+0.001T-1.936 \times 10^{-6}T^2} \\ B' &= -3.398+0.007T-3.611 \times 10^{-6}T^2 \end{aligned} \quad (11)$$

SUH3-SUH35 weld :

$$\begin{aligned} \phi 16 : A' &= 10^{-4.656+0.018T-1.170 \times 10^{-6}T^2} \\ B' &= -6.318+0.013T-6.448 \times 10^{-6}T^2 \quad (12) \\ \phi 20 : A' &= 10^{-0.353+0.009T-6.340 \times 10^{-6}T^2} \\ B' &= -4.595+0.009T-4.469 \times 10^{-6}T^2 \quad (13) \end{aligned}$$

Table 3에서 구한 초기변형(연신)을( $\epsilon_0$ , %)과 응력( $\sigma$ , MPa)과의 관계식인  $\sigma = A' \epsilon_0^{B'}$ 와 초기변형율( $\dot{\epsilon}_0$ , %)과 파단시간( $t_r$ , hr)과의 관계식(Oh, Chang, Chung, Lee, 1997)인  $t_r = A \epsilon_0^B$ 에서 온도( $T$ , K)와 응력( $\sigma$ , MPa)과 초기변형율( $\dot{\epsilon}_0$ , %)을 포함하는 크리프 파단수명예측식은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$t_r = AA' \epsilon_0^{B+B'} \sigma^{-1} \quad (14)$$

따라서, 어느 응력( $\sigma$ , MPa)과 온도( $T$ , K)하에서 초기변형율( $\dot{\epsilon}_0$ , %)을 초기 실시간에 측정함으로써 크리프 파단시간( $t_r$ , hr)을 구하는 ISM 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$t_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1} \quad (15)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값은 재료와 온도에 따라 결정되는 정수로서 다음과 같다.

SUH3 :

$$\begin{aligned} \phi 16 : \alpha = AA' &= 10^{53.401-0.106T+5.415 \times 10^{-5}T^2} \\ \beta = B+B' &= 16.869-0.044T+2.496 \times 10^{-5}T^2 \quad (16) \end{aligned}$$

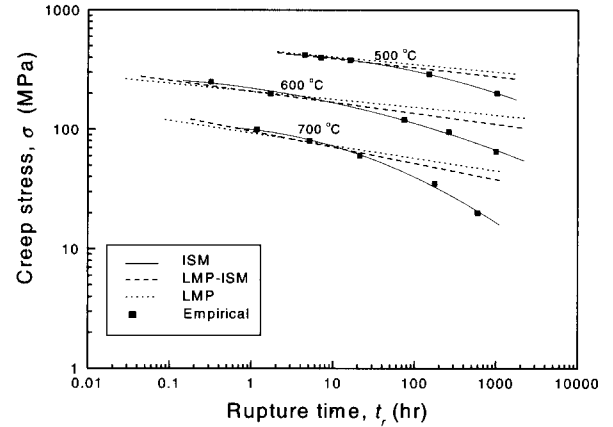
SUH3-SUH35 weld :

$$\begin{aligned} \phi 16 : \alpha = AA' &= 10^{51.421-0.104T+5.375 \times 10^{-5}T^2} \\ \beta = B+B' &= -83.989+0.180T-9.957 \times 10^{-5}T^2 \quad (17) \\ \phi 20 : \alpha = AA' &= 10^{69.910-0.146T+7.744 \times 10^{-5}T^2} \\ \beta = B+B' &= -51.442+0.105T-5.595 \times 10^{-5}T^2 \quad (18) \end{aligned}$$

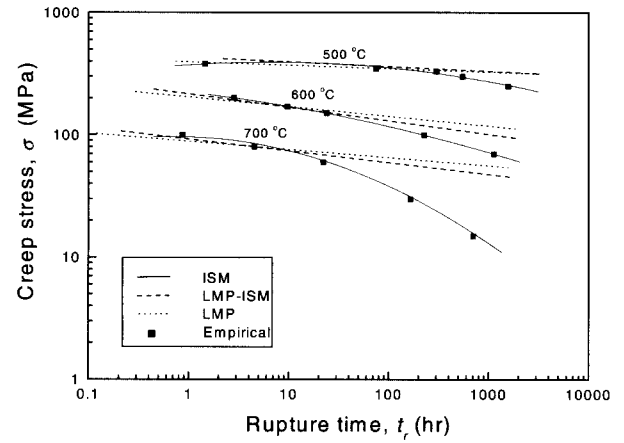
Fig. 5에서는 응력( $\sigma$ , MPa)과 파단시간( $t_r$ , hr)과의 크리프 파단곡선에 관하여 LMP법에 의한 식(5)~(7)과 LMP-ISM에 의한 식(8)~(10)과 ISM에 의한 크리프 수명예측식(15)~(18)을 비교하여 나타내고 있다.

그림에서 명백히 증명될 수 있듯이, LMP식은 단시간에서는 큰 차이가 없지만, 장시간의 크리프 수명예측에는 실험값과 큰 오차가 있으므로 이 식을 이용하면 매우 위험함을 알 수 있다. LMP-ISM식도 LMP식보다 다소 개량되었으나, 역시  $10^2$ 시간 이상의 장시간 크리프 수명예측에는 이용될 수 없음이 확인되었다. 하지만, ISM식만이  $10^3$ 시간의 장시간 수명예측은 물론 모든 시간에서 실험값과 매우 일치하여, 본 연구의 실험조건에서는 ISM에 의한 크리프 예측식의 신뢰성이 매우 높음이 확인되었다.

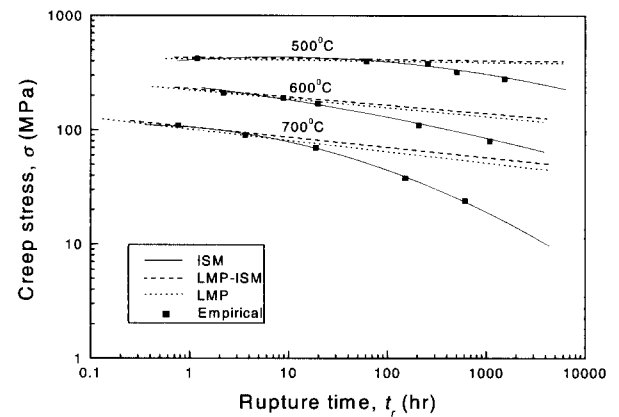
Fig. 6은 모재와 용접재의 실제 파단시간(실험값)과 식(15)에서 구한 파단시간과의 관계를 나타낸 것으로 그래프에서 알 수 있듯이, ISM에 의한 크리프 수명예측식에서 계산된 크리프 수명



(a) SUH3



(b) SUH3-SUH35 weld ( $\phi 16$ )



(c) SUH3-SUH35 weld ( $\phi 20$ )

Fig. 5 Comparison of creep rupture curves by ISM with those by LMP-ISM, LMP method and the empirical data

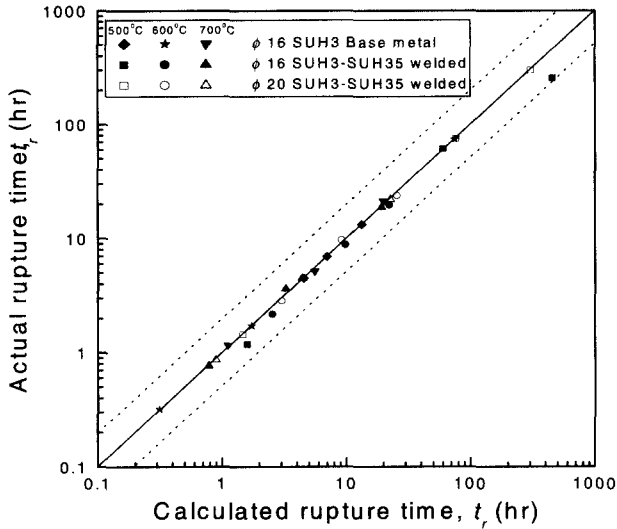


Fig. 6 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time by ISM for SUH3 ( $\phi$  16) and SUH3-SUH35 weld ( $\phi$  16,  $\phi$  20)

과 실제 실험에 의한 값이 거의 일치하고 있다. 그러므로 식(15)는 크리프 온도·응력·초기변형(연신)을 고려한 크리프 파단 수명예측식으로서 신뢰성이 매우 높음을 알 수 있다(Oh *et al.*, 1996; 1997).

따라서, 본 연구에서 도출된 ISM에 의한 크리프 수명예측식은 그 이용가치가 매우 높다고 할 수 있다.

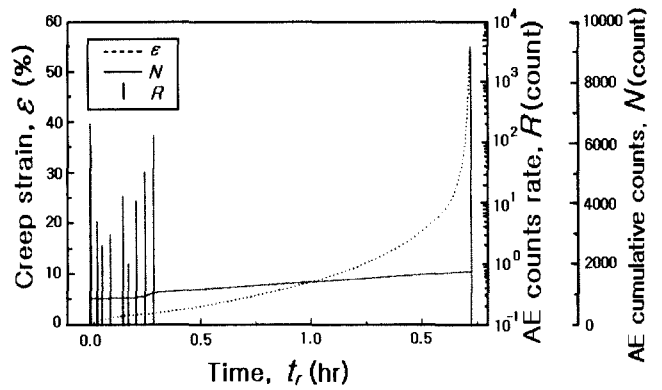
### 3.4 AE에 의한 고온 크리프 특성 조사

SUH3과 SUH3-SUH35 마찰용접재에 대한 고온 크리프 시험시 AE양은 온도와 응력을 일정하게 한 조건하에서 조사하였다.

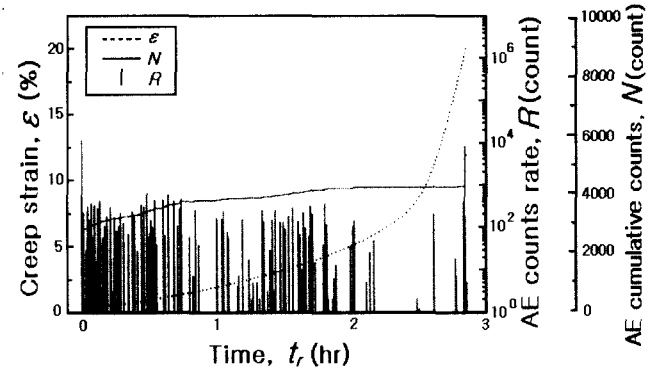
크리프 시험시작에서 AE 양이 발생하고, 그 이후 정상 크리프 상태에서는 거의 발생하지 않거나, 간헐적으로 발생하였고, 마지막 파단시에 큰 AE양의 히트(hit)가 발생하였다. 그리고 1차(천이) 크리프 단계에서 AE 양이 어느 정도 발생하지만 정상 크리프 단계에서 발생하지 않으므로 정상단계와 1차(천이)단계를 구별할 수 있다. 그러나 3차(가속) 크리프 단계에서는 AE의 발생이 거의 발견되지 않으므로 구별이 어렵다.

모재 SUH3과 용접재 SUH3-SUH35의 AE 발생 거동을 비교하였다. 즉, 모재의 경우 초기와 1차(천이) 크리프 그리고 파단시의 경우 뚜렷이 구별이 되지만, 용접재의 경우는 wave guide의 위치가 SUH3측에 있고, 주로 크리프를 일으키는 쪽은 SUH3쪽 이어서 재료 내의 변화에 의한 탄성파가 용접면을 거쳐오는 동안 감쇠가 많이 일어나 AE 신호가 아주 미약하거나 나타나지 않는 것으로 여겨진다. 용접재에서 600°C 경우는 wave guide의 위치를 SUH3측의 위치로 변경시켰기 때문에 신호가 많이 들어 오고, 그리스의 두께 차로 인해 낮은 진폭의 AE가 들어온 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 크리프 시험시의 AE 발생량으로 크리프 전 구간에 대하여 나타나고 있으며, 현재로서 정성적 해석에 불과하지만, 앞으로 정량적 해석을 위하여 자료축적과 계속된 연구가 필요하다고 생각된다(Oh *et al.*, 1996; 1997).



(a) SUH3



(b) SUH3-SUH35 weld

Fig. 7 Typical AE counts rate and cumulative counts vs. time of SUH3 and SUH3-SUH35 weld under static creep test ( $T=600^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma=200\text{MPa}$ )

## 4. 결 론

모재 SUH3과 마찰용접재 SUH3-SUH35( $\phi$  16,  $\phi$  20)에 관하여 여러 온도(500, 600, 700°C)와 여러 응력하에서 고온 크리프 실험을 수행하여 초기연신율법(ISM)에 의한 고온 크리프 파단수명을 예측 평가할 수 있는 연구와 크리프의 AE에 의한 평가 가능성에 관하여 연구한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) LMP와 ISM을 이용하여 초기변형률-온도-응력의 변수로 구성된 장시간 크리프 파단수명예측식을 도출하였다. 그러나 LMP-ISMP는 LMP보다 우수하나, 장시간의 경우 실제 파단시간보다 또한 ISM의 경우보다 더 긴 파단시간을 예상하므로 장시간의 경우 적합하지 않다.
- (2) ISM에 의한 초기변형률-온도-응력의 변수로 구성된 장시간 크리프 파단수명예측식을 마찰용접재(SUH3-SUH35,  $\phi$  16,  $\phi$  20)에 대하여 다음과 같이 도출하였다.

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

여기서  $a$ ,  $\beta$ 의 값은 다음과 같다.

SUH3-SUH35 weld :

$$\phi 16 : a = 10^{51.421 - 0.104T + 5.375 \cdot 10^{-5} T^2}$$

$$\beta = -83.989 + 0.180T - 9.957 \times 10^{-5}T^2$$

$$\phi 20 : \alpha = 10^{69.910 - 0.146T + 7.744 \times 10^{-5}T^2}$$

$$\beta = -51.442 + 0.105T - 5.595 \times 10^{-5}T^2$$

(3) 고온 크리프 특성과 크리프 중에 발생한 AE양과의 사이에는 정성적 상관성이 존재하며, 앞으로 크리프 수명예측을 위해 정량적 상관성 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구논문은 1999년도 부경대학교 대학원생 연구지원비에 의하여 연구된 논문임.

## 참 고 문 헌

- 마찰압접연구회(1979). "마찰압접," 코로나사, p 46, pp 145~150, p. 184.
- 오세규(1989). "국산 내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 Creep 수명의 초기 실시간 예측법 개발", 학술진흥재단 지원 연구결과 보고서(87-89), pp 11~153.
- 日本鐵鋼協會 クリ-ブ 委員會編(1972). "金屬材料 高温強度 データ集 第1編 低合金鋼編", 日本鐵鋼協會 pp 29~63, 198~213, 263~277.
- 정민화(1998). "발전소 고온 배관재료의 크리프 수명 예측과 AE평가에 관한 연구", 부경대학교 대학원 공학박사논문, pp 98~107.
- Lafren, J. H., Stouffer, D. C.(1978). "An Analysis of High Temperature Metal Creep, Part 1, J. Eng. Mat. and Tech., 100, pp.363.
- Larson, F. R and Miller, J.(1952). "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the American Society of Mechanical Engineers (ASME), pp 765~775.
- Oh, S. K.(1986). "Application of Friction Welding to Parts of Industrial Machinery", 한국박용기관학회지, 제10권, pp 32~34.
- Oh, S. K.(1982). "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and Inprocess Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques", Ph. D. thesis, Keio University, Japan, pp 98~146.
- Oh, S. K., S. J. Kim, 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 Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. 4, No. 1, pp 275~279.
- Oh, S. K., S. J. Kim, T. E. Jeon(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., T. Kunio and Hasui, A.(1986). "Effects of Initial Strain on Evaluation of High Temperature Creep Properties of Friction Welded Joints.", Conf. of Asian-Pacific Congress on Strength Evaluation. APCS-86, pp 549~554.
- Oh, Sae-Kyoo, Hong-Keun Chang, Min-Hwa Chung and Sang-Guk Lee(1997). "Development of Long-Time Creep Safety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation," Proc. The 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE, Vol. 4-S19, pp 21~28.
- Tasako, Y. & N. Nakayama(1970). "Friction Welding of Ni-Based Super Alloyed Nitriding Steel", J. Prec. Mech. Mar., 36, pp 707~711.

2000년 11월 29일 원고 접수

2001년 1월 27일 수정본 채택