

# ISM에 의한 摩擦熔接材(SUH3-SUH35)의 高溫 크리프 壽命豫測에 관한 연구

오 세 규\* · 이 원 석\*\*

High Temperature Creep Life Prediction of Friction Welded  
Joints by Initial Strain Method and the AE Evaluation

Sae-Kyoo Oh\* · Won-Suk Lee\*\*

**Key Words** : Initial Strain Method(초기변형률법), High Temperature Creep Life of Long Time  
(장시간 고온 크리프 수명), Initial Real-Time Prediction(초기 실시간 예측법)

## Abstract

There are many research results as individual uni-axial tension creep test of heat-resisting materials. However, there are very few about the study on the high temperature creep test for the Initial Strain Method, and especially any study on it about the friction welded joints of SUH3 to SUH35.

One of the important concerns is a reliable method of evaluating static creep properties. No reliable method seems available at present to evaluate or predict static creep properties. So, the reliable method to evaluate and predict them by the ISM and AE techniques was made.

## 1. 서 론

자동차 엔진배기밸브는 head부와 stem부가 이종재료로 마찰용접되어 있어, 고온, 고응력하에 사용할 때 예기치 못한 문제가 발생할 수 있고, 예측수명보다 수명이 짧아질 우려가 있다. 이에 정확한 수명예측을 위해 마찰용접재의 크리프 시험이 수행되어야 하고, 수명예측식이 도출되어야 한다<sup>1)~3)</sup>.

본 연구는 엔진배기밸브의 내열강인 Si-Cr계 SUH3 강(stem부)과 Ni-Cr계 SUH35 강(head 부)의 최적 이종재 마찰용접재를 이용하여 단시간 응력파단시험으로 장시간 크리프 수명예측을 하는 수명예측식 ISM(initial strain method)을 통해 도출하였다.

실험은 최적 용접품질(강도, 인성)의 마찰용접재에서 크리프시험을 하기위해 최적 마찰용접조건을 구하였고<sup>4)~6)</sup>, 그 최적조건으로 마찰용접한 시편을 가지고 각각의 온도(500, 600, 700℃)에서 크리프시

\* 부경대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 부경대학교 대학원 기계공학과

험을 행하였다.

첫 단계로 기존의 LMP(Larson-Miller parameter)를 이용한 수명예측식을 도출하였으나, 이는 장시간의 경우 실제 파단수명보다 수명이 길어지는 경우가 있어 자칫 잘못하면, 실제보다 긴 수명을 도출할 우려가 있다<sup>7)</sup>. 이를 보완하기 위해 두번째 단계로 LMP에 초기연신률법(ISM)<sup>8)</sup>을 추가하여 보완한 LMP-ISM을 도출하였다. 이것은 LMP보다 실제 파단수명에 가깝게 나타났다. 세번째 단계로 초기연신만으로 수명예측식을 도출하여, 세가지 수명식을 서로 비교하여 보고 신뢰성을 검사하여 보았다.

그리고, 재료의 크리프 거동시 발생하는 탄성파(elastic wave)를 감지하여 AE(음향방출)<sup>9),10)</sup>에 의한 고온크리프시험시의 재료의 거동을 평가하였다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

본 실험에 사용된 재료는 내충격성 및 내마모성이 강한 Si-Cr계 내열강 SUH3(stem 부)과 Ni-Cr계 내열강 SUH35(head 부)로서 그 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적인 성질은 Table 2와 같다.

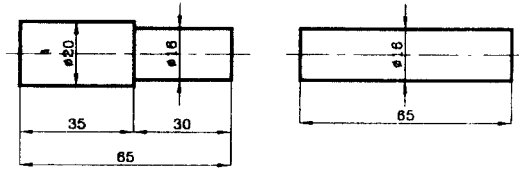
Table 1 Chemical composition of materials(wt. %)

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

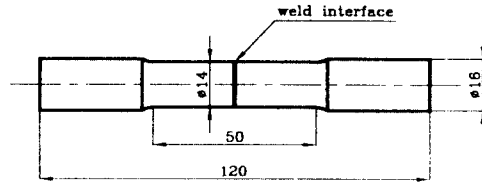
Table 2 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile strength	Yield strength	Elongation	Reduction of area
	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	$\Psi$ (%)
SUH3	741	512	23	48
SUH35	1020	660	12	11

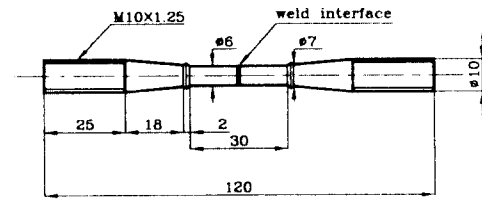
시험에 사용된  $\phi 16$ mm의 SUH3과 SUH35의 마찰용접, 인장시험, 크리프 시험편의 형상과 치수는 각각 Fig. 1 (a), (b), (c)와 같다.



(a) Workpieces for friction welding



(b) Tension test specimens



(c) Specimen for creep test

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens (mm)

### 2.2 실험방법

본 실험에 사용된 마찰용접기는 Toho Th-25 continuous drive brake type이며, 마찰용접을 위한 적정 가열압력  $P_1$ 과 가압력  $P_2$ 를 결정하고 가열시간  $t_1$ 을 1~9 sec로 변화하면서 가압시간  $t_2$ 를 고정하여 마찰용접을 행하였다.

용접재의 인장시험에 사용된 인장시험기는 Toyo Bawldwin UTH 25T이며, 이때 인장속도를 0.2 mm/min로 하였다.

온도측정은 K형의 열전대를 사용하였으며, 시험편의 가열공정은 무부하 상태에서 각각 500, 600, 700℃까지 약 10℃/min로 가열하였으며 노의 온도 분포가 균일하게 유지되도록 각 온도에서 30분간 지속시킨 다음 하중을 가하였다. 실험중의 온도 변화는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다.

또한 크리프시험 중 발생하는 연신은 표점거리 양단에 있는 flange를 기준으로 LVDT(linear variable displacement transformer)를 사용하여 측정하였다. 그리고 초기연신은 하중을 가한 후 1분이 지난 상태의 변형률을  $\epsilon_0(\%)$ 로 결정하였다. 크리프 시험기는 SATEC사의 DLF-10-1029형을 사용하였다.

음향방출시험에는 AE testing system (PAC, LOCAN-320, 4 channel)을 사용하였으며, 크리프 시험에서 AE의 측정은 크리프 시험기를 공회전시킨 상태에서 주위의 노이즈를 제거하기 위해 문턱값을 316mV로 설정하여 측정하였다. 그리고, 센서의 안전을 고려하여 노안에서 신호를 전달할 수 있는 wave guide를 설치하였으며, 신호를 민감하게 받아들이기 위해 센서는 150kHz의 공진센서를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 크리프 이론

##### 3.1.1 Larson Miller Parameter (LMP)의 이론

조직의 변화는 일반적으로 높은 온도에서 짧은 시간에 생기므로, 실제 요구되는 온도보다 높은 온도에서의 응력-파단시간과의 관계를 조사하여 이 곡선의 기울기가 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽법(extrapolation)에 의해 장시간 수명예측이 가능하다. 응력 파단 데이터의 외삽법으로 주로 사용되는 LMP는 식(1)과 같이 표시할 수 있다<sup>11)</sup>.

$$LMP = T(\log Tr + C_1) \quad (1)$$

여기서 LMP : Larson-Miller parameter

T : 절대온도 ( $^{\circ}C + 273, K$ )

Tr : 파단시간

C<sub>1</sub> : 46(재료정수)

##### 3.1.2 Initial Strain Method(ISM)의 이론

대부분의 재료들은 응력과 온도에 의해 파단수명이 결정되며, 초기변형률(initial strain)은 시간과는 독립된 변수이고, 응력과 온도에는 아주 민감한 변수이다. 온도가 증가할 수록, 그리고 일정온도에서 응력이 증가할 수록 초기변형률은 증가하며, 많은 변수들이 초기변형률과 직접적인 관련성이 있는 것으로 알려져 있다<sup>8)</sup>.

보통 크리프 파단수명식들은 응력, 온도, 정상 크

리프속도, 활성화에너지 외에도 많은 금속학적인 인자의 변수들을 고려한 상당히 복잡한 식이다. 따라서 그와 같은 많은 변수들과 직접적으로 관련된 초기변형률과 여러 변수들을 고려한 관계식으로 파단수명을 예측하려는 것이 ISM이다.

1983년 Oh<sup>8)</sup> 등에 의해 내열강 및 이들의 마찰용접재에서 크리프하중이 작용한 직후 초기변형률( $\epsilon_0$ )이 이후 크리프 특성(파단시간 Tr, 응력  $\sigma$ , 정상 크리프속도  $\dot{\epsilon}$ , 총 크리프속도  $\dot{\epsilon}_T$ )에 영향을 미친다고 보고하였고 그 모델식은 식(2)와 같다.

$$Tr, \sigma, \dot{\epsilon} \text{ 및 } \dot{\epsilon}_T = A \epsilon_0^B \quad (2)$$

여기서, A, B는 재료상수로서 온도에 종속적이다.

#### 3.2 마찰용접의 최적조건 결정

마찰용접을 수행한 결과 그 최적조건은 Table 3과 같이 결정되었고, 강도를 고려한 최적조건을 Fig. 2에서 나타내었다.

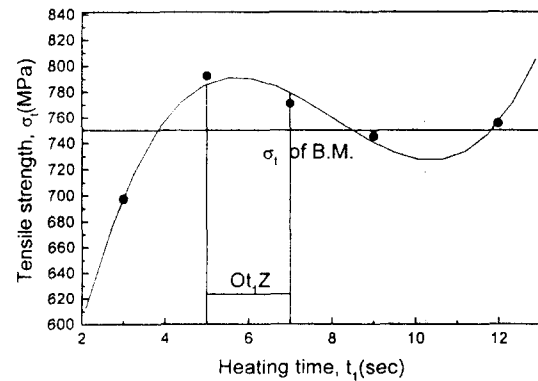


Fig. 2  $\sigma_t$  vs.  $t_1$  for friction welding of SUH3 to SUH35  
Welding cond. :  $n=2000\text{rpm}$ ,  $P_1=160\text{MPa}$ ,  
 $P_2=230\text{MPa}$ ,  $t_1=3\sim 12\text{sec}$ ,  
 $t_2=3\text{sec}$

Table 3 Optimum friction welding condition for SUH3-SUH35( $\phi 16$ )

Matching materials	FRW cond.	Rotating speed n(rpm)	Heating pressure P <sub>1</sub> (MPa)	Forging pressure P <sub>2</sub> (MPa)	Heating time(Ot <sub>1</sub> Z) t <sub>1</sub> (sec)	Forging time t <sub>2</sub> (sec)	Remarks
							$\sigma_t$ (MPa)
SUH3 - SUH35		2000	160	230	5~7	3	760 ~ 790

Fig. 3~Fig. 11의 SUH3-SUH35(φ16) 용접재의 마찰 용접조건은 모두 Table 3의 최적 마찰용접조건과 같다.

### 3.3 크리프 곡선

일정 온도(500, 600, 700℃)하에서 응력을 변화시켰을 때 SUH3-SUH35 마찰용접재를 실험적으로 구한 크리프 곡선은 각각 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에 표시한 바와 같다. 각각의 초기변형률(initial strain, IS)도 측정하여 표시하였다. 그림에서 초기 변형률의 증감은 응력, 파단수명 및 온도에 민감하게 상관성이 있음을 알 수 있다.

Table 4는 크리프 시험한 결과의 데이터를 정리한 것으로 모두 실험에 의하여 구하여진 값들이다.

이 실험결과에서 알 수 있듯이 SUH3 모재의 크리프시험과 SUH3-SUH35 용접재의 크리프시험 결과는 거의 같은 경향을 나타내고 있고, 용접재의 경우 주로 SUH3의 모재부쪽에서 크리프 파단이 일어나서 모재 크리프시험과 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

### 3.4 초기변형(연신)률과 고온 크리프 응력과의 상관성

Fig. 6에서 초기변형률( $\epsilon_0$ , %)과 크리프 응력( $\sigma$ , MPa)이 양대수 좌표에서 선형적인 증가 관계를 보여주고 있으며, 온도가 증가함에 따라 초기 변형률이 증가하고 응력이 높아질 수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이들의 정량적인 상관관계 실험식은 식(3), (4), (5)와 같다.

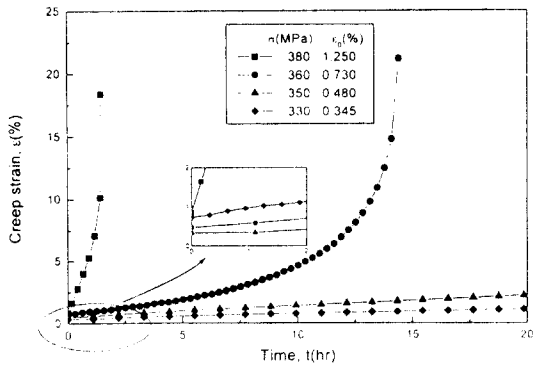


Fig. 3 Creep curve of SUH3-SUH35 weld at 500℃

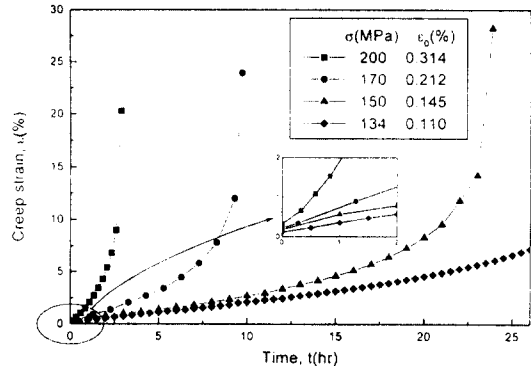


Fig. 4 Creep curve of SUH3-SUH35 weld at 600℃

Table 4 Data by creep test of SUH3 and SUH3-SUH35 weld under uni-axial tension

Temp.	Stress	Initial strain	Steady state creep rate	Rup. time	Total creep rate
T (℃)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (%/s) $\times 10^{-4}$	Tr (hr)	$\dot{\epsilon}_T$ (%/s) $\times 10^{-4}$
500 (base)	380	1.250	13.0	1.45	35.0
	350	0.480	0.20	75	0.52
	330	0.345	0.056	300	0.42
500 (weld)	380	1.250	13.0	1.45	35.0
	360	0.73	1.40	14.41	3.40
	350	0.480	0.20	75	0.52
	330	0.345	0.056	300	0.42
600 (base)	200	0.314	5.32	2.85	19.8
	170	0.212	1.82	9.7	7.00
	150	0.145	0.601	23.83	3.29
600 (weld)	200	0.314	5.32	2.85	19.8
	170	0.212	1.82	9.7	7.00
	150	0.145	0.601	23.83	3.29
	134	0.110	0.275	53.2	1.58
700 (base)	100	0.489	24.6	0.867	0.966
	80	0.296	4.17	4.5	19.2
	60	0.180	0.842	22	2.37
700 (weld)	100	0.489	24.6	0.867	0.966
	80	0.296	4.17	4.5	19.2
	60	0.180	0.842	22	2.37
	55	0.135	0.228	57.2	0.90

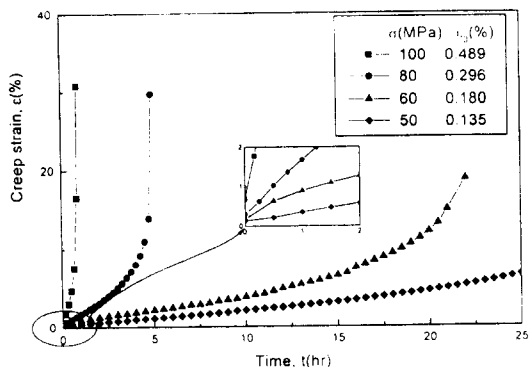


Fig. 5 Creep curve of SUH3-SUH35 weld at 700°C

$$500^\circ\text{C} : \log \sigma = 2.57 + 0.10 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

$$600^\circ\text{C} : \log \sigma = 2.49 + 0.37 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 1.00) \quad (4)$$

$$700^\circ\text{C} : \log \sigma = 2.16 + 0.51 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 0.99) \quad (5)$$

여기서  $R^2$ 은 데이터의 커브 피팅(curve fitting)에서 기여율(coefficient of determination)을 나타내며 모두 1에 가까워 신뢰성이 매우 높다.

식(3), (4), (5)에서 초기변형률( $\epsilon_0$ )은 크리프 응력( $\sigma$ )과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 식(6)과 같이 표현할 수 있으며, 이는 식(2) 및 Oh<sup>(7)(8),12)</sup>의 발표와 일치한다.

$$\sigma = A' \epsilon_0^{B'} \quad (6)$$

여기서,  $A'$ ,  $B'$ 는 재료와 온도의 함수이다.

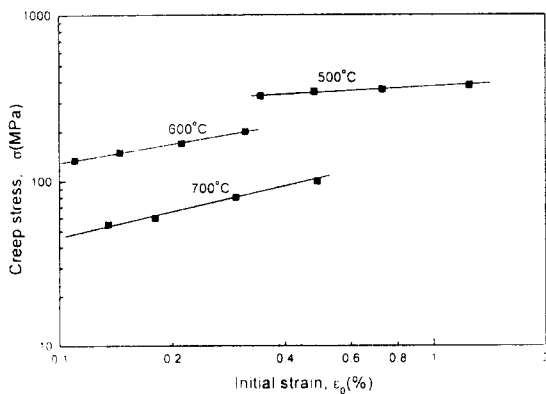


Fig. 6 Relationship of creep stress versus initial strain of SUH3-SUH35 weld

### 3.5 초기변형(연신)률과 고온 크리프 수명과의 상관성

Fig. 7에서는 초기변형률( $\epsilon_0$ , %)과 크리프 파단 시간( $T_r$ , hr)과의 양대수 좌표에서 선형적인 감소 경향을 보여주고 있다. 또, 온도의 증가에 따라 초기변형률이 증가되고, 융점의 1/2이상의 온도에서 열에 의한 소성변형이 커지게 되어 초기변형률이 급격히 증가하게 됨을 알 수 있었다.

그 실험식은 각각 식(7), (8), (9)와 같다.

$$500^\circ\text{C} : \log T_r = 0.56 - 4.38 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 1.00) \quad (7)$$

$$600^\circ\text{C} : \log T_r = -0.91 - 2.75 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 0.99) \quad (8)$$

$$700^\circ\text{C} : \log T_r = -1.06 - 3.24 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 1.00) \quad (9)$$

식(7), (8), (9)에서 초기변형률( $\epsilon_0$ )은 크리프 파단시간( $T_r$ )과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 식(2)와 일치한다.

$$T_r = A \epsilon_0^B \quad (10)$$

여기서,  $A$ ,  $B$ 는 재료와 온도의 함수이다.

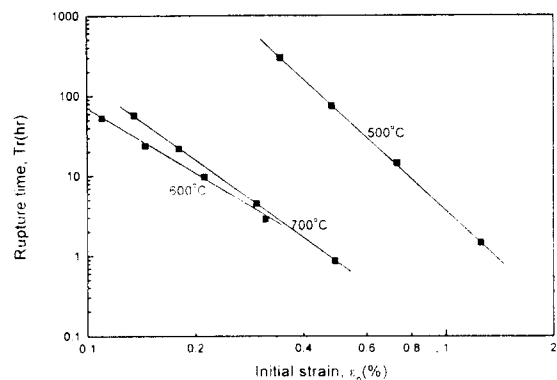


Fig. 7 Relationship of rupture time versus initial strain of SUH3-SUH35 weld

### 3.6 크리프 수명예측

#### 3.6.1 LMP에 의한 수명예측식

LMP를 이용한 크리프 파단수명식은 식(1)에서 일반적으로  $C_1=46$ 이므로, LMP는 다음과 같다.

$$LMP = T(\log Tr + 46) = f(\sigma) \quad (11)$$

여기서,  $f(\sigma)$ 는  $\log \sigma$ 의 1차함수로 표현된다. 따라서, 식(11)은 식(12)과 같이 쓸 수 있다.

$$LMP = T(\log Tr + 46) = K_1(\log \sigma) + K_2 \quad (12)$$

여기서,  $K_1$ 와  $K_2$ 는 재료상수이다.

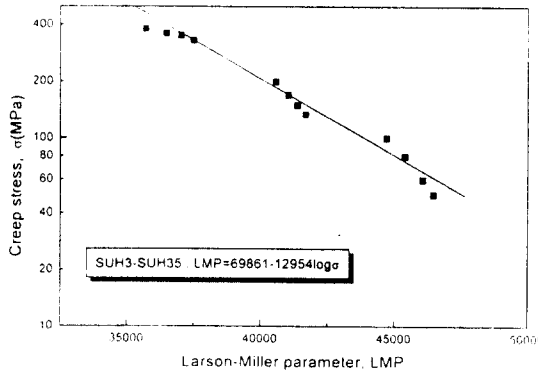


Fig. 8 Master creep curve of SUH3-SUH35 weld

Fig.8은 각각의 온도(500, 600, 700℃)에서 SUH3-SUH35 용접재의 응력( $\sigma$ , MPa)과 LMP (식(12)에서 구한 값)와의 관계를 나타낸 그래프로 편대수 좌표평면에서 선형적인 관계를 나타내고 있다. 여기서 최소자승법을 이용한 회귀분석법에 의하여 구한 식은 식(13)과 같다.

$$LMP = 69861 - 12954 \log \sigma \quad (R^2=0.98) \quad (13)$$

여기서, SUH3-SUH35 용접재의 경우  $K_1=12954$ 이고  $K_2=69861$ 이다.

### 3.6.2 LMP-ISM 크리프 수명예측식

초기변형률법(ISM)<sup>7),8),12)</sup>에 의한 크리프 파단수명예측식과 LMP<sup>17)</sup>를 이용한 크리프 파단수명식을 연립하여 크리프 온도, 응력, 수명, 초기변형(연신)률을 포함하는 식을 다음과 같이 도출하였다.

초기변형률법에 대한 파단수명식은 식(7)~식(9)에서 구한 식(10)인  $Tr = A \epsilon_c^B$ 로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log Tr = \log A + B \log \epsilon_c \quad (14)$$

여기서, A, B는 온도항이 있는 재료상수이다. 식(12)과 식(14)에서 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$2 \log Tr = \frac{K_1(\log \sigma) + K_2}{T} + B \log \epsilon_c + \log A - 46 \quad (15)$$

식(15)는 온도, 응력, 수명, 초기변형률이 포함된 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측식의 일반식이다.

따라서, 본 실험을 통하여 어느 응력( $\sigma$ , MPa)과 온도(T, K)하에서 초기변형률( $\epsilon_c$ , %)을 초기 실시간에 측정하므로써 크리프 파단수명( $Tr$ , hr)을 구할 수 있는 LMP-ISM에 의한 크리프 파단수명 예측식은 식(13)과 식(15)에서 다음과 같이 도출되었다.

$$2 \log Tr = \frac{69861 - 12954(\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_c + \log A - 46 \quad (16)$$

$$A = 10^{56.82 - 0.124T + 6.65 \times 10^{-5}T^2}$$

$$B = -78.52 + 0.169T - 9.43 \times 10^{-5}T^2$$

위에서 A와 B의 값은 Fig. 7과 식(14)에서 구한 것이다.

### 3.6.3 ISM 크리프 수명예측식

식(6)을  $\sigma = A' \epsilon_c^{B'}$ 로 표현하면, A'와 B'는 온도항이 포함되어 있는 재료상수로서 그 값은 Fig. 6에서 다음과 같이 구하여진다.

$$A' = 10^{-4.67 + 1.48 \times 10^{-2}T - 1.17 \times 10^{-5}T^2}$$

$$B' = -6.55 + 1.38 \times 10^{-2}T + 6.76 \times 10^{-6}T^2 \quad (17)$$

식(6)에서의 초기변형(연신)률( $\epsilon_c$ , %)과 응력( $\sigma$ , MPa)과의 관계식인  $\sigma = A' \epsilon_c^{B'}$ 와 식(10)에서 초기변형률( $\epsilon_c$ , %)과 파단시간( $Tr$ , hr)과의 관계식인  $Tr = A \epsilon_c^B$ 에서 온도(T, K)와 응력( $\sigma$ , MPa)과 초기변형률( $\epsilon_c$ , %)을 포함하는 크리프 파단수명예측식은 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$Tr = AA' \epsilon_c^{B'B'} \sigma^{-1} \quad (18)$$

따라서, 어느 응력( $\sigma$ , MPa)과 온도(T, K)하에서

초기변형률( $\epsilon_0$ , %)을 초기 실시간에 측정하므로써 크리프 파단수명( $T_r$ , hr)을 구하는 ISM식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1} \quad (19)$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 재료와 온도에 따라 결정되는 정수로서 다음과 같다.

$$\alpha = AA' = 10^{50.28 - 0.106T + 5.47 \times 10^{-5}T^2}$$

$$\beta = B+B' = 85.07 + 0.183T + 10.11 \times 10^{-5}T^2$$

### 3.7 ISM 크리프 수명예측식의 신뢰성 평가

Fig. 9에서는 응력( $\sigma$ , MPa)과 파단수명( $T_r$ , hr)과의 크리프 파단곡선에 관하여 LMP법에 의한 식(12)와 LMP-ISM에 의한 식(16)과 ISM에 의한 식(19)를 비교하여 나타내고 있다.

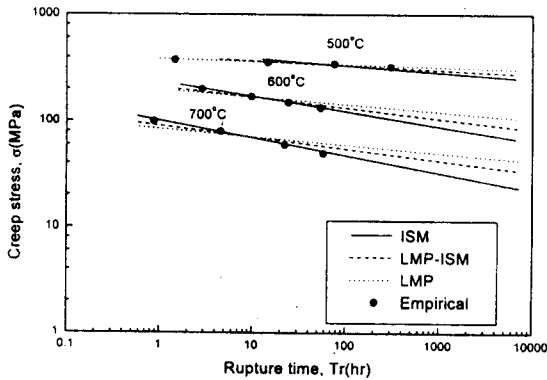


Fig. 9 Comparison of creep rupture curves of SUH3-SUH35 weld by ISM with those by LMP-ISM, LMP methods and the empirical data

ISM은 LMP법이나 LMP-ISM보다 실험결과에 가깝게 나타났으며, 장시간의 파단수명예측에서도 ISM에 의한 식이 LMP법이나 LMP-ISM에 의한 식보다 수명이 짧게 나와 신뢰성이 더욱 높은 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 모재와 용접재의 실제 파단시간(실험치)과 식(19)에서 구한 계산 파단시간과의 관계를

나타낸 것으로 거의 서로 일치함을 알 수 있으므로, 식(19)는 크리프 온도, 응력, 초기변형(연신)률을 고려한 크리프 파단수명예측식으로서 신뢰성이 높다고 생각된다.

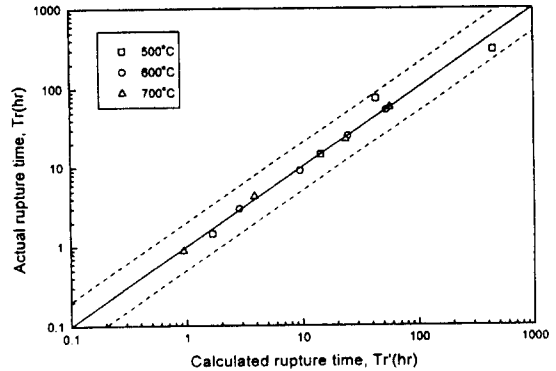


Fig. 10 Comparison of actual rupture time( $T_r$ ) and calculated rupture time( $T_r'$ ) by ISM for SUH3-SUH35 weld

### 3.8 AE에 의한 고온 크리프 특성 조사

Fig. 11은 크리프 시험시의 AE counts 발생량을 크리프 전 구간에 대하여 나타내고 있다.

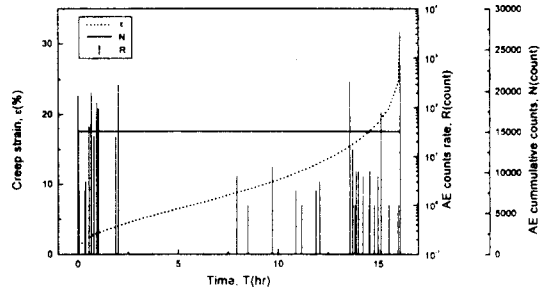


Fig. 11 AE counts rate and cumulative counts of SUH3-SUH35 weld under static creep test

고온 크리프 시험시 AE량은 온도와 응력을 일정하게 한 조건에서 조사하였다. 크리프 시험시작에서부터 AE counts가 발생하였고, 그 이후 정상

크리프상태에서는 거의 발생하지 않았으며, 마지막 파단시에 큰 count량의 hit가 발생하였다. 그리고, 1차(천이)크리프단계에서 AE counts가 어느정도 발생하지만 정상크리프단계에서 발생하지 않으므로 정상단계와 1차(천이)단계를 구별할 수 있다. 그리고, 3차(가속)크리프 단계에서는 AE의 발생이 증가하여 파단에 이른다.

#### 4. 결 론

엔진배기밸브재의 고온 크리프시험에서 초기변형률인 IS(initial strain)에 의하여 여러 온도(500, 600, 700℃)와 여러 응력하에서 크리프시험을 수행하여 얻은 수명예측식과 AE 특성 평가에 관한 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 고온 크리프 파단시험을 한 경우 모재 SUH3과 용접재 SUH3-SUH35의 크리프파단강도는 거의 같은 경향을 나타내었으며, 용접재의 경우 크리프 파단이 모재부인 SUH3에서 발생하였다.
- 2) LMP와 ISM을 이용하여 초기변형률-온도-응력의 변수로 구성된 장시간 크리프 파단수명 예측식을 다음과 같이 도출하였다. 그러나 LMP-ISM은 LMP보다 우수하나 장시간의 경우 실제 판단시간보다 더 긴 파단시간을 예상할 경우가 있어 장시간의 경우 적합하지 않다.

$$2 \log Tr = \frac{69861 - 12954(\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46$$

$$\text{여기서, } A = 10^{56.82 - 0.124T + 6.65 \times 10^{-5}T^2}$$

$$B = -78.52 + 0.169T - 9.43 \times 10^{-5}T^2$$

- 3) ISM에 의한 초기변형률-온도-응력의 변수로 구성된 장시간 크리프 파단수명 예측식을 다음과 같이 도출하였다. 이 예측식은 실제파단시간과 거의 같으며, 장시간 수명예측시 LMP나 LMP-ISM보다 매우 신뢰성이 높은 것으로 나타났다.

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

여기서

$$\alpha = 10^{50.28 - 0.106T + 5.47 \times 10^{-5}T^2}$$

$$\beta = 85.07 + 0.183T + 10.11 \times 10^{-5}T^2$$

- 4) 고온 크리프 시험에서 AE는 크리프 초기인 천이크리프 단계에서 많이 발생하고 정상크리프 상태에서는 AE가 거의 발생하지 않았고, 가속크리프 단계에서는 많은 양의 AE가 발생하였다.

#### 참고문헌

- 1) Andrade, E. N., "On the Viscous Flow of Metals and Allied Phenomena", Proc. Royal Soc. London, Ser. A., 84, 1, 1910
- 2) Norton, F. H., "The Creep of Steel at High temperature", Mc Graw-Hill, New York, p. 67, 1929
- 3) Bailey, R. W., "Creep of Steel under Simple and Compound Stresses and the Use of High Initial Temperature in Steam Power Plant", Trans. World Power Conference, 3, p. 1089, 1929
- 4) Vill, V. I., "Friction Welding of Metals", Svarochnoe Proizvodstov, 3, pp. 19-23, 1962
- 5) Tasako, Y. and Nakayama, N., "Friction Welding of Ni-based Super Alloyed Nitriding Steel", J. Prec. Mech. Mar., 36, pp. 707-711, 1970
- 6) Oh, S. K., "Study on Friction Welding of Valve Materials SUH3-SUH31. J. Korean. Soc. Mech. Eng., 14, p. 221-232, 1974
- 7) Oh, S. K., Jeong, S. U. and Jeon, T. E., "Improvement of Long-Time Creep Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel", J. of Ocean Engineering and Technology, KCORE, Vol.10, No. 1, pp. 47-52, 1996
- 8) Oh, S. K., Kunio, T., Hasui, A., "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, 1986
- 9) ASTM-E610, "Standard Definition and Terms Relating to Acoustic Emission", ASTM, Philadelphia, PA., 1982



- 10) ASNT, "Nondestructive Test Handbook",  
Vol. 5, 1987 pp. 301-307, 1985
- 11) Whittenberger, J.D., "Mechanical Testing",  
Metal Handbook, 9th Edition, ASM, Vol. 8,
- 12) 오세규, 정순억, 전태연, "증기터빈축 강재의  
장시간 크리프 수명 예측법 개선", 한국해양공  
학회지 제10호 제1호, pp. 47-52, 1996