

## 내열강재 SUH3과 SUH35 마찰용접재의 ISM에 의한 크리프 수명예측에 관한 연구

양형태\* · 오세규\*\* · 김현경\* · 이연탁\* · 공유식\*

\*부경대학교 대학원, \*\*부경대학교 기계공학부

Study on Friction Welding Properties and Creep Life Prediction for Heat Resisting Steels of SUH3 and SUH35 - Creep Properties and ISM

Hyung-Tae Yang\*, Sae-Kyoo Oh\*\*, Hun-Kyoung Kim\* and Yeon-Tak Lee\*, Yu-Sik Kong\*

\*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, Friction Welding(FRW), Welded Joints, Creep Life Prediction, Larson Miller Parameter(LMP), Initial Strain Method(ISM), Acoustic Emission(AE)

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 equation by initial strain( $\epsilon_0$ , %) under any creep stress ( $\sigma$ , MPa) at any high temperature( $T$ , K) was developed as follows :  $t_r = a \epsilon_0^\beta \sigma^{-1}$

where,

$$\phi=16 : \begin{cases} \alpha = 10^{51.412 - 0.1047 \cdot 5.375 \times 10^{-4} T} \\ \beta = -83.989 + 0.180T - 9.957 \times 10^{-5} T^2 \end{cases}$$

$$\phi=20 : \begin{cases} \alpha = 10^{69.910 - 0.1467 \cdot 7.744 \times 10^{-4} T} \\ \beta = -51.442 + 0.105T - 5.595 \times 10^{-5} T^2 \end{cases}$$

for SUH3-SUH35 friction weld of  $\phi=16\text{mm}$  and  $\phi=20\text{mm}$ , respectively.

### 1. 序 論

엔진용 배기밸브 헤드 재료(SUH3, SUH31, SUH35)가 내열강이므로母材는 물론, 高强度 耐蝕耐熱鋼 軸 材料(SUH31, STS303, STS304)와의 摩擦熔接材에 대한 高温(500, 600, 700°C) creep 安全 壽命豫測의 初期延伸率法(ISM)에 의한 研究가 必要하다<sup>1, 4)</sup>.

이들의 歷史的 背景을 簡單히 살펴본다면, 高温 creep에 대한 研究는 國內外的으로 現在까지 많이 研究 報告되었고, Oh 等에 의해서도 특히 耐熱鋼의 高温 creep 諸 特性을 初期延伸率法(ISM, initial strain method)에 의해 creep 初期 實時間 瞬間에 豫

測할 수 있는 技術開發의 研究를 遂行한 結果를 發表한 바 있다<sup>4, 10)</sup>.

그러나, 本 研究課題인 엔진용 排氣밸브 헤드(head)의 超耐熱鋼과 그 軸(stem)의 耐蝕·耐熱·高强度 合金의 異種材 最適 摩擦熔接材에 대한 高温 creep 特性 및 初期延伸率法에 의한 creep 安全壽命 豫測式 導出 等은 매우 必要한 實情이나 國內外的으로 아직 그 研究가 없는 實情이다<sup>4, 10)</sup>. 따라서, 本 研究結果가 引擎 排氣밸브 재료의 高温耐蝕鋼材 및 그 摩擦熔接材의 高温 creep 設計 및 보수관리에 대한 좋은 자료가 될 것으로 기대된다.

## 2. 材料 및 實驗方法

本 研究에 使用된 實驗材料는 엔진 排氣밸브용 鋼材가 가져야 할 耐熱性과 耐酸化性, 耐磨耗性 및 靱性에 重點을 둔 耐熱鋼材로서 head部는 耐蝕性, 耐酸化性, 高溫強度가 높은 오스테나이트(austenite)系의 耐熱鋼 SUH35(高 Ni-Cr)鋼이고, stem部는 燒入硬化性 및 耐磨耗性이 優秀한 마르텐사이트(martensite)系의 耐熱鋼 SUH3 (Si-Cr)鋼이다. 摩擦熔接 試驗片의 形象과 치수가 Fig. 1에, 그리고 두 材料의 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1, Table 2와 같다.

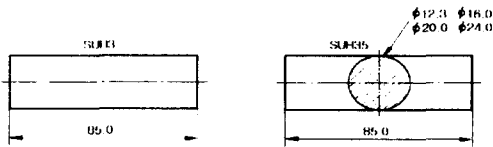
Table 1 Chemical composition of materials used(wt.%)

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

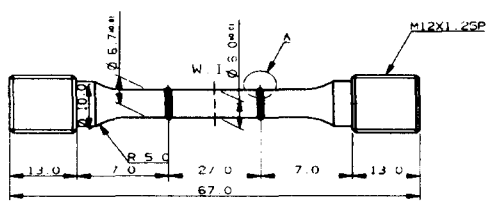
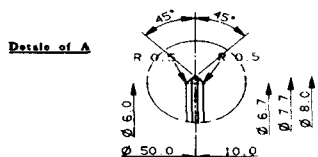
Table 2 Mechanical properties of base materials

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

Fig. 1(b)는 母材 SUH3과 摩擦熔接材 SUH3-SUH35( $\phi 16$ ,  $\phi 20$ ,  $\phi 24$ mm)의 高溫(500 $^{\circ}$ C, 600 $^{\circ}$ C, 700 $^{\circ}$ C) 引張試驗片과 creep試驗片의 形象 및 치수를 表示하였다.



(a) Friction welding and AE test specimens



(b) High temperature tensile and creep test specimens  
Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

本 研究中 摩擦熔接試驗에 쓰인 摩擦熔接機械는 TOHO TH-25 連續驅動 브레이크型(continuous drive brake type)이며, creep 시험기는 靜的 및 動的 荷重下의 高溫 creep 試驗이 可能한 實驗裝置로써, 最高溫度 1,093 $^{\circ}$ C의 高溫 creep, 應力 및 緩和試驗(stress and relaxation test)과 引張 및 壓縮試驗이 可能한 美國 SATEC社의 creep 試驗機(DLF-10, 5ton)이다.

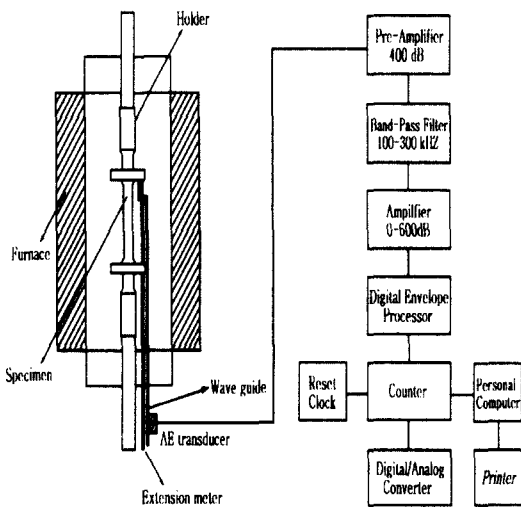
本 實驗에 使用된 SUH3과 SUH35에 대한 適定摩擦熔接 條件을 決定하기 위해 Fig. 1(a)와 같이 加工한 試驗片을 미리 求한 最適熔接條件下(回轉數 2,000 rpm, 摩擦加壓력  $P_1=160$ MPa, 壓縮단조가압력  $P_2=320$ MPa, 摩擦加壓시간  $t_1=5$ sec( $\phi 16$ ,  $\phi 20$ ), 壓縮단조시간  $t_2=3$ sec)에서 摩擦용접한 것을 Fig. 1(b)의 高온인장, 高온크리프시험편을 加工하였다.

Creep 試驗의 延伸은 伸張計(extensometer)와 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 測定하여 試驗機 自體에 連結되어 있는 記錄計를 通하여 creep 曲線을 그렸다. 試驗片의 加熱工程은 無負荷狀態에서 實驗溫度(400, 500, 600 $^{\circ}$ C)까지 約 9.6  $^{\circ}$ C/min으로 加熱했으며, 負荷를 걸기 前에 試驗爐(furnace)의 溫度分布가 均一하게 維持되도록 實驗溫度에서 30分間 溫度를 維持시킨 다음, 荷重을 作用시켜 實驗을 遂行하였다. 또한, 試驗 中에는 實驗溫度의  $\pm 1^{\circ}$ C範圍 以內로 維持하면서 實驗하였으며, 初期延伸率(initial strain)은 文獻<sup>11,14)</sup>에 依하여 荷重이 加해진 後 1分 동안의 初期 延伸率을 選擇하였다.

高溫 creep 特性의 AE에 의한 평가가능성의 조사 목적으로 Fig. 2(a)에서 creep 試驗時에 發生하는 AE를 測定하기 위하여 150kHz의 共振型 高感度 센서(Model : R15-C)를 使用하였다. 爐 内部는 高溫이므로 센서를 試驗片에 直接 附着할 수 없으므로 鋼棒으로 製作한 웨이브 가이드(wave guide)를 使用하여 爐 外部로 連結 後 웨이브 가이드 上의 版材 위에 AE 센서를 附着하였다. 넓은 周波數 範圍의 스펙트럼을 커버하는 多樣한 AE 發源(AE source)으로부터 AE가 發生하기 때문에 100kHz~300kHz 範圍의 밴드-패스 필터(band-pass filter)를 包含하는 高感度 센서용 前置增幅器(pre-amplifier)를 使用하여 低周波와 高周波의 騒音(noise)을 除去하였으며, 40dB( $\times 100$ )로 增幅하여 測定된 AE 信號가 시그널 케이블(signal cable)을 通過하여 裝置에 圓滑히 傳達되도록 하였다. 裝置에 傳達된 AE 信號는 信號處

를 爲하여 主增幅器(main-amplifier)에서 다시 35dB(×100)로 增幅하여 全體 시스템 利得(gain)을 75dB로 設定하였다. 또 外部 騒音を 除去하기 爲해 限界電壓(threshold voltage)을 1.0V로 設定하여 이 以上의 振幅을 가지는 AE 펄스(pulse)만을 信號處理 하였다.

Fig. 2(b)는 creep 試驗片에 連結된 웨이브 가이드를 通하여 爐 外部에 附着된 센서를 거쳐 連結된 AE 測定시스템의 概略圖를 나타낸다. 웨이브 가이드 上에 附着된 센서로부터 傳達된 AE 信號는 creep 試驗 中에 그 檢出時間에 따라 PC(personal computer)의 하드 디스크(hard disc)에 記錄하였다. 이 AE 데이터들은 主 프로세싱(post processing)에 따라 單位 時間當 AE量, AE의 累積 總量, AE 總에너지量 等の 形態로 表示될 수 있도록 構成되어 있다.



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

Fig. 2 AE transducer location and block diagram of AE monitoring equipment and computer control and data acquisition system

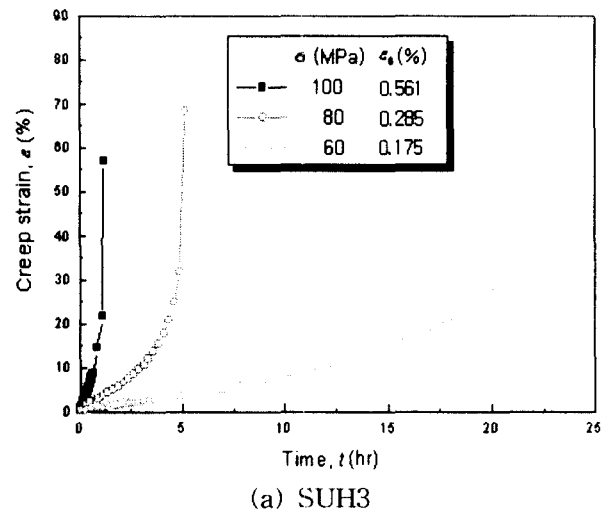
### 3. 結果 및 考察

#### 3.1 Creep 曲線

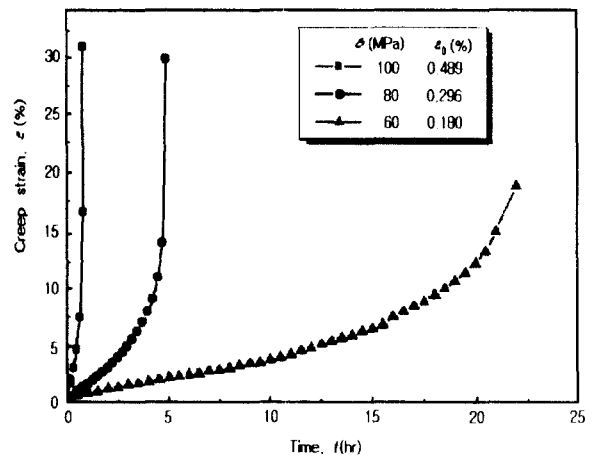
實驗溫度(500, 600, 700℃)下에서 應力을 變化시켰을 때 實驗的으로 求한 SUH3 母材와 SUH3-SUH35(φ 16, φ 20, φ 24mm) 摩擦熔接材의 creep 曲線을 Fig. 3 (a)와 (b)에 表示하였다. 그림에서 알

수 있듯이 creep 變形은 作用應力이 클수록 增加함을 알 수 있고, creep 變形舉動은 試驗條件, 즉, 溫度, 應力 뿐만 아니라 材料 等に 따라 變한다는 것을 알 수 있다. 그리고 母材 및 熔接材의 境遇, 同一 溫度下에서 應力이 增加함에 따라 初期延伸率은 모두 增加하나, 摩擦熔接材는 母材에 비해 破斷壽命은 減少하는 것을 볼 수 있다.

Table 3(a) 및 (b)는 500℃, 600℃, 700℃에서 creep 試驗을 實施한 結果의 데이터를 整理하여 應力( $\sigma$ , MPa), 初期變形率( $\epsilon_0$ , %), 正常 creep 速度( $\dot{\epsilon}$ , %/s), 破斷時間( $t_r$ , hr) 및 全 creep 速度( $\dot{\epsilon}_T$ , %/s)를 나타내고 있다. 이 모든 값들은 實驗에 의하여 求하여진 값들이다.



(a) SUH3



(b) SUH3-SUH35 weld (φ 16)

Fig. 3 Typical creep curves 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
(°C)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	$t_r$ (hr)	$\dot{\epsilon}_T$ (1/s)
500	420	1.871	$8.11 \times 10^{-4}$	4.50	$2.33 \times 10^{-3}$
	400	1.548	$4.88 \times 10^{-4}$	7.05	$1.09 \times 10^{-3}$
	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	$2.02 \times 10^{-4}$	0.32	$4.72 \times 10^{-4}$
	200	0.686	$2.54 \times 10^{-4}$	1.72	$8.82 \times 10^{-4}$
	120	0.160	$2.03 \times 10^{-4}$	75.0	$4.43 \times 10^{-4}$
	95	-	-	(262.8)	-
	65	-	-	(1001.4)	-
700	100	0.561	$3.90 \times 10^{-4}$	1.167	$1.36 \times 10^{-3}$
	80	0.285	$7.86 \times 10^{-4}$	5.167	$3.67 \times 10^{-3}$
	60	0.175	$1.76 \times 10^{-3}$	21.28	$1.08 \times 10^{-2}$
	35	-	-	(176.9)	-
	20	-	-	(597.4)	-

( ) from Reference (15)

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

Temperature	Stress	Initial strain	Steady state creep rate	Rupture time	Total creep rate
(°C)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$\dot{\epsilon}$ (1/s)	$t_r$ (hr)	$\dot{\epsilon}_T$ (1/s)
500	380	1.250	$1.30 \times 10^{-3}$	1.45	$3.50 \times 10^{-3}$
	350	0.480	$0.20 \times 10^{-3}$	75	$5.20 \times 10^{-4}$
	330	0.345	$0.56 \times 10^{-3}$	300	$4.20 \times 10^{-4}$
	300	-	-	(550)	-
	250	-	-	(1568.7)	-
600	200	0.314	$5.32 \times 10^{-4}$	2.85	$1.98 \times 10^{-3}$
	170	0.212	$1.82 \times 10^{-3}$	9.7	$7.00 \times 10^{-4}$
	150	0.145	$6.01 \times 10^{-4}$	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	$4.17 \times 10^{-3}$	4.5	$1.92 \times 10^{-2}$
	60	0.180	$8.42 \times 10^{-3}$	22	$2.37 \times 10^{-2}$
	35	-	-	(164.4)	-
	15	-	-	(700)	-

( ) from Reference (15)

### 3.2 LMP-ISM에 의한 고온 Creep 壽命豫測式 導出

金屬의 組織 變化는 一般的으로 보다 높은 高溫에서는 보다 짧은 時間 內에 생기므로, 實際 要求되는 溫度보다 몇 百度 높은 溫度에서의 應力-破斷時間을 調査하여 이 曲線의 기울기 變化가 없다면 短時間의 데이터로 外插에 의해 長時間 壽命豫測이 可能하도록 Larson-Miller 파라미터(LMP)가 定義되어 있으며, 初期變形率法(ISM)<sup>4,9,10)</sup>에 의한 creep 破斷壽命豫測式과 LMP法<sup>16)</sup>을 利用한 creep 破斷壽命식을 聯立하여 creep 溫度, 應力, 壽命, 初期變形(延伸)率을 包含하는 式을 다음과 같이 導出하였다.

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

式(1)에서  $T$ 는 絶對溫度(K,  $^{\circ}\text{C} + 273$ )이고,  $C_1$ 은

材料定數로서 一般的으로 46이므로, 여기서, LMP는 應力( $\log \sigma$ )의 1次 函數로 表現된다. 따라서, 式(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$LMP = T(\log t_r + 46) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (2)$$

여기서  $K_1$ 과  $K_2$ 는 材料常數이다.

初期變形率에 대한 破斷壽命式<sup>11,14)</sup>  $t_r = A \epsilon_0^B$ 로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\log t_r = \log A + B \log \epsilon_0 \quad (3)$$

여기서,  $A, B$ 는 溫度項이 있는 材料常數이다.

式(2)와 式(3)에서 다음과 같이 導出할 수 있다.

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

式(4)는 溫度·應力·壽命·初期變形率이 包含된 LMP-ISM에 의한 creep 壽命豫測式의 一般式이다.

Fig. 4는 SUH3과 SUH35 熔接材의 500, 600, 700 $^{\circ}\text{C}$ 에서 應力( $\sigma$ , MPa)과 LMP式(1)에서 求한 값과의 關係를 나타낸 그래프로 偏對數 座標平面에서 線形的인 關係를 나타내고 있다. Fig. 4에서 데이터를 通하여 最小自乘法을 利用한 回歸分析法에 依하여 求한 數式은 다음과 같다.

SUH3 :

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

SUH3-SUH35 weld :

$$\phi 16 : LMP = 69861 - 12954 \log \sigma \quad (R^2 = 0.98) \quad (6)$$

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

여기서, 母材 SUH3의 境遇,  $K_1 = 12334$ 이고  $K_2 = 68547$ 이며, SUH3-SUH35( $\phi$  16mm) 熔接材의 境遇,  $K_1 = 12954$ 이고  $K_2 = 69861$ 이며, SUH3-SUH35( $\phi$  20mm) 熔接材의 境遇,  $K_1 = 13050$ 이고  $K_2 = 70653$ 이다.

따라서, 本 實驗을 通하여 어느 應力( $\sigma$ , MPa)과 溫度( $T$ , K)下에서 初期變形率( $\epsilon_0$ , %)을 初期 實時間에 測定함으로써 creep 破斷時間( $t_r$ , hr)을 求하는 LMP-ISM에 의한 creep 破斷壽命豫測式은 式(4)로부터 다음과 같이 導出되었다.

SUH3 :  $\phi 16$  :

$$2 \log t_r = \frac{68547 - 12334 (\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46 \quad (8)$$

$$\text{여기서, } A = 10^{50.554 - 0.1077T + 5.608 \times 10^{-5} T^2}$$

$$B = 20.268 - 0.051T + 2.857 \times 10^{-5} T^2$$

SUH3-SUH35 weld :

$\phi 16$  :

$$2 \log t_r = \frac{69861 - 12954 (\log \sigma)}{T} + B \log \epsilon_0 + \log A - 46 \quad (9)$$

φ 20 :

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

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 유도된  $t_r - \epsilon_0$  그래프와 식(3)에서 구한 것이다.

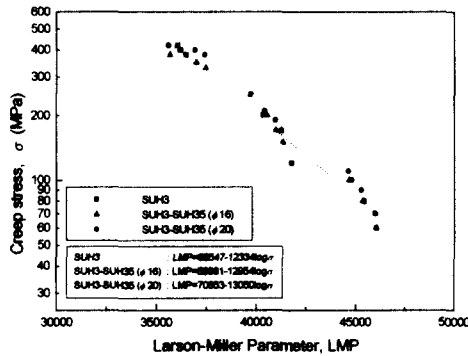


Fig. 4 Master creep curve of SUH3(φ 16) and SUH3-SUH35(φ 16, φ 20) weld

### 3.3 ISM에 의한 고온 Creep 壽命豫測式 導出

溫度, 應力, 壽命, 初期延伸率 이 包含되는 ISM에 의한 creep 壽命豫測式은 다음과 같이 導出된다.

Table 3에서 구한  $\sigma$ 와  $\epsilon_0$ 와의 관계식  $\sigma = A \epsilon_0^B$ 를  $\sigma = A' \epsilon_0^{B'}$ 로 表現하면,  $A'$ 와  $B'$ 는 溫度項이 包含되어 있는 材料常數로서 그 값은 實驗的으로 求한  $\sigma - \epsilon_0$ 의 그래프에서 求하여진다<sup>11-14)</sup>.  $A'$ ,  $B'$ 의 값은 다음과 같이 求해졌다.

SUH3 :

φ 16 :  $A' = 10^{2.846 - 0.0017T - 1.936 \times 10^{-6} T^2}$   
 $B' = -3.398 + 0.007T - 3.611 \times 10^{-6} T^2 \quad (11)$

SUH3-SUH35 weld :

φ 16 :  $A' = 10^{4.656 - 0.018T - 1.170 \times 10^{-6} T^2}$   
 $B' = -6.318 + 0.013T - 6.448 \times 10^{-6} T^2 \quad (12)$

φ 20 :  $A' = 10^{0.353 - 0.009T - 6.340 \times 10^{-6} T^2}$   
 $B' = -4.595 + 0.009T - 4.469 \times 10^{-6} T^2 \quad (13)$

Table 3에서 구한 初期變形(延伸)率( $\epsilon_0$ , %)과 應力( $\sigma$ , MPa)과의 關係式인  $\sigma = A' \epsilon_0^{B'}$ 와 初期變形率

( $\epsilon_0$ , %)과 破斷時間( $t_r$ , hr)과의 關係式인  $t_r = A \epsilon_0^B$ 에서 溫度( $T$ , K)와 應力( $\sigma$ , MPa)과 初期變形率( $\epsilon_0$ , %)을 包含하는 creep 破斷壽命豫測式은 다음과 같이 導出할 수 있다.

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

따라서, 어느 應力( $\sigma$ , MPa)과 溫度( $T$ , K)下에서 初期變形率( $\epsilon_0$ , %)을 初期 實時間에 測定함으로써 creep 破斷時間( $t_r$ , hr)을 求하는 ISM 式은 다음과 같이 表現할 수 있다.

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

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값은 材料와 溫度에 따라 決定되는 定數로서 다음과 같다.

SUH3 :

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

SUH3-SUH35 weld :

φ 16 :  $\alpha = AA' = 10^{51.421 - 0.104T + 5.375 \times 10^{-5} T^2}$   
 $\beta = B+B' = -83.989 + 0.180T - 9.957 \times 10^{-5} T^2 \quad (17)$

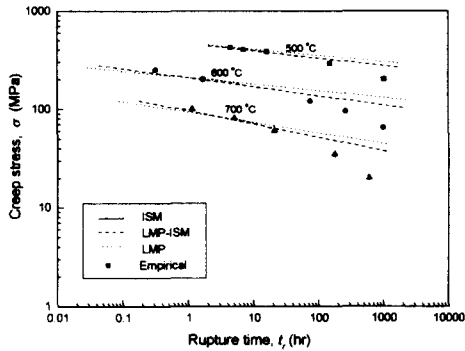
φ 20 :  $\alpha = AA' = 10^{69.910 - 0.146T + 7.744 \times 10^{-5} T^2}$   
 $\beta = B+B' = -51.442 + 0.105T - 5.595 \times 10^{-5} T^2 \quad (18)$

Fig. 5에서는 應力( $\sigma$ , MPa)과 破斷時間( $t_r$ , hr)과의 creep 破斷曲線에 關하여 LMP法에 의한 식(5)~(7)과 LMP-ISM에 의한 식(8)~(10)과 ISM에 의한 creep 壽命豫測式(15)~(18)을 比較하여 나타내고 있다.

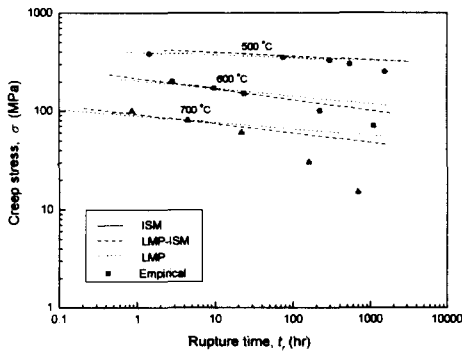
그림에서 明白히 證明될 수 있듯이, LMP式은 短時間에서는 큰 差異가 없지만, 長時間의 creep 壽命豫測에는 實驗값과 큰 誤差가 있으므로 이 式을 利用하면 매우 危險함을 알 수 있다. LMP-ISM式도 LMP式보다 多少 改良되었으나, 역시  $10^2$ 時間 以上の 長時間 creep 壽命豫測에는 利用될 수 없음이 確認되었다. 하지만, ISM式만이  $10^3$ 時間의 長時間 壽命豫測은 물론 모든 時間에서 實驗값과 매우 一致하여, 本 재료의 實驗條件에서는 ISM에 의한 creep 豫測式的 信賴性이 매우 높음이 確認되었다.

Fig. 6은 母材와 熔接材의 實際 破斷時間(實驗값)과 식(15)에서 求한 破斷時間과의 關係를 나타낸 것으로 그래프에서 알 수 있듯이, ISM에 의한 creep 壽命豫測式에서 計算된 creep 壽命과 實際 實驗에 의한 값이 거의 一致하고 있다. 그러므로 식(15)는 creep 溫度·應力·初期變形(延伸)率을 考慮한 creep 破斷 壽命豫測式으로서 信賴性이 매우 높음을 알 수 있다.<sup>11-14)</sup>

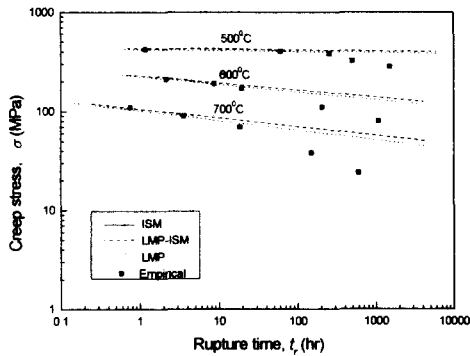
따라서, 본 研究에서 導出된 ISM에 의한 creep 壽命 豫測式은 그 利用價値가 매우 높다고 할 수 있다.



(a) SUH3



(b) SUH3-SUH35 weld (φ 16)



(c) SUH3-SUH35 weld (φ 20)

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

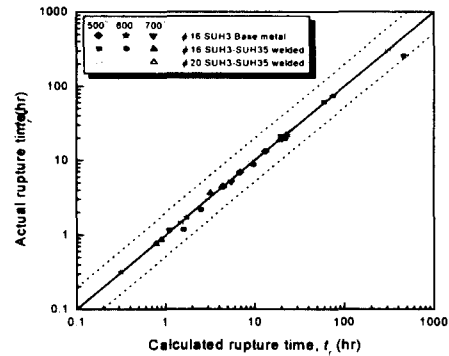


Fig. 6 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time by ISM for SUH3 (φ 16) and SUH3-SUH35 weld(φ 16, (φ 20))

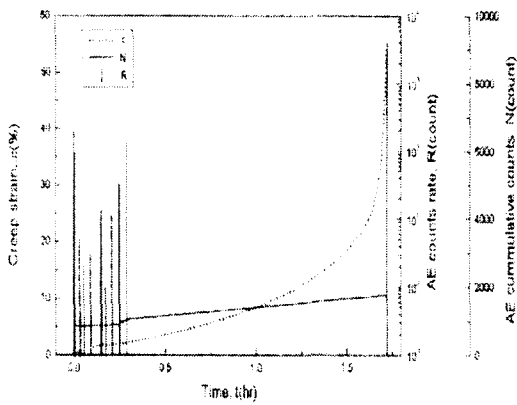
### 3.4 AE에 의한 高溫 Creep 特性 調査

SUH3과 SUH3-SUH35 摩擦熔接材에 대한 高溫 creep 試驗時 AE量은 溫度와 應力을 一定하게 한 條件에서 調査하였다.

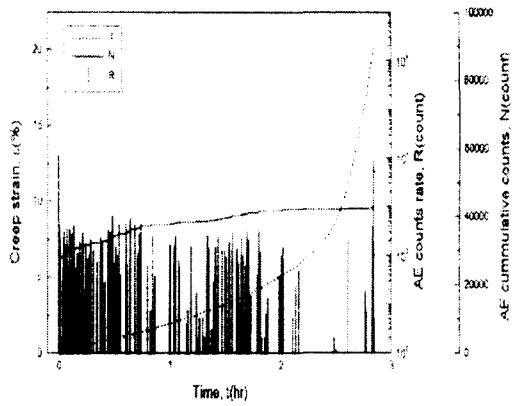
creep 試驗始作에서 AE counts가 發生하고, 그 以後 正常 creep 狀態에서는 거의 發生하지 않으며 間歇的으로 發生하였고, 마지막 破斷時에 큰 count量의 히트(hit)가 發生하였다. 그리고 1次(遷移) creep 段階에서 AE counts가 어느 程度 發生하지만 正常 creep 段階에서 發生하지 않으므로 正常段階와 1次(遷移)段階를 區別할 수 있다. 그러나 3次(加速) creep 段階에서는 AE의 發生이 거의 發見되지 않으므로 區別이 어렵다.

母材 SUH3과 熔接材 SUH3-SUH35의 AE 發生 舉動을 比較하였다. 즉, 母材의 境遇 初期와 1次(遷移) creep 그리고 破斷時의 境遇 뚜렷이 區別이 되지만, 熔接材의 境遇는 wave guide의 位置가 SUH35側에 있고, 주로 creep를 일으키는 쪽은 SUH3쪽이어서 材料 內의 變化에 의한 彈性波가 熔接面을 거쳐오는 동안 減衰가 많이 일어나 AE 信號가 아주 微弱하거나 나타나지 않는 것으로 여겨진다. 熔接材에서 600°C 境遇는 wave guide의 位置를 SUH3側의 位置로 變更시켰기 때문에 信號가 많이 들어오고, 그리스의 두께 差로 因해 낮은 振幅의 AE가 들어온 것으로 여겨진다.

Fig. 7은 creep 試驗時의 AE 發生量으로 creep 全 區間에 대하여 나타나고 있으며, 現在로서 定性的 解析에 不過하지만, 앞으로 定量的 解析을 위하여 資料蓄積과 繼續된 研究가 必要하다고 생각된다<sup>12) 14)</sup>.



(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. 結論

母材 SUH3과 摩擦熔接材 SUH3-SUH35( $\phi 16$ ,  $\phi 20$ )에 관하여 여러 溫度( $500, 600, 700^{\circ}\text{C}$ )와 여러 應力下에서 高溫 creep 實驗을 遂行하여 初期延伸率法(ISM)에 의한 高溫 creep 破斷壽命을 豫測 評價할 수 있는 研究와 creep의 AE에 의한 評價 可能性에 관하여 研究한 結果는 다음과 같이 要約할 수 있다.

1) LMP와 ISM을 利用하여 初期變形率-溫度-應力의 變數로 構成된 長時間 creep 破斷壽命豫測式을 導出하였다. 그러나 LMP-ISM은 LMP보다 優秀하나, 長時間의 境遇 實際 破斷時間보다 또한 ISM의 境遇보다 더 긴 破斷時間을 豫想하므로 長時間의 境遇 適合하지 않다.

2) ISM에 의한 初期變形率-溫度-應力의 變數로 構成된 長時間 creep 破斷壽命豫測式을 摩擦熔接材(SUH3-SUH35,  $\phi 16$ ,  $\phi 20$ )에 대하여 다음과 같이 導出하였다.

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

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 의 값은 다음과 같다.

SUH3-SUH35 weld :

$$\begin{aligned} \phi 16 : \alpha &= 10^{51.421 - 0.1047T + 5.375 \times 10^{-7}T^2} \\ \beta &= -83.989 + 0.1807T - 9.957 \times 10^{-5}T^2 \\ \phi 20 : \alpha &= 10^{69.910 - 0.1467T + 7.744 \times 10^{-7}T^2} \\ \beta &= -51.442 + 0.1057T - 5.595 \times 10^{-5}T^2 \end{aligned}$$

3) 고온 creep 특성과 creep 중에 발생한 AE量과의 사이에는 定性的 相關性이 존재하며, 앞으로 creep 수명예측을 위해 定量的 相關性 연구가 필요하다.

參考文獻

- 1) Oh, S. K., "Application of Friction Welding to parts of industrial machinery," 韓國船舶機關學會誌, 第 10卷, pp. 32-34, 1986.
- 2) 摩擦熔接研究會, "摩擦熔接," コロナ社, p.46, pp. 145-150, p.184, 1979.
- 3) Tasako, Y.& N. Nakayama, "Friction Welding of Ni-Based Super Alloyed Nitriding Steel," J.prec. Mech. Mar., 36, pp.707-711, 1970.
- 4) Oh, S. K., "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, 1982.
- 5) 정민화, "발전소 고온 배관재료의 Creep 수명 예측과 AE평가에 관한 연구", 부경대학교 대학원 공학박사논문, pp.98-107, 1998.
- 6) Bailey. R. W, "Creep of Steel under Simple and Compound Stresses and the Use of High Temperature in Steam Power Plant", Trans World Power conference, 3, p.1089, 1929.
- 7) Laflen, J. H., D. C. Stouffer. "An Analysis of High Temperature Metal Creep, Part 1, J. Eng. Mat. and Tech., 100, pp.363, 1978.

- 8) Coutinho, C.B., D.K. Matlock, and W. L. Bradley, "Cyclic Creep of Al-4.6%Mg at Moderate Temperatures." *Materials Science and Engineering*. 21, pp.237-239, 1975.
- 9) Oh, S. K., T. Kunio and A. Hasui, "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.
- 10) 오세규, "국산 내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 Creep 수명의 초기 실시간 예측법 개발", *학술진흥재단 지원 연구결과 보고서*(87-89), pp.11-153, 1989.
- 11) Oh, Sae-Kyoo, Hong-Keun Chang, Min-Hwa Chung and Sang-Guk Lee, "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, 1997.
- 12) Oh, S. K., S. J. Kim, T.E. Jeon, "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, 1996.
- 13) Oh, S. K., T. E. Jeon, Y. S. Song, S. W. Oh, "Relationship between Cyclic Creep Properties and Initial Strain of Cr-Mo Alloy Steels at High Temperatures and AE Evaluation (1st Report) : Effects of Initial Strain on Cyclic Creep Properties", *Proc. of Asian-Pacific Conference for Fracture and Strength*, pp.639-646, 1996.
- 14) Oh, S. K., S.J. Kim, T.E. Jeon, "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, 1996.
- 15) 日本鐵鋼協會 クリープ 委員會編, "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, 1972.
- 16) Larson, F. R and Miller, J., "A Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", *Transaction of the American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, pp. 765-775, 1952.