

# 원자력 발전소용 마찰용접재 (Cu합금/STS316L)의 크리프 수명예측

유인종\* · 공유식\*\* · 오새규\*\* · 김선진\*\*

\*동명대학 기계자동화시스템계열, \*\*부경대학교 기계공학부

## Creep Life Prediction of Friction Welded Joints (Cu-Alloy/STS316L) for Nuclear Power Plant

IN-JONG YOO \* · YU-SIK KONG\*\* · SAE-KYOO OH\*\* AND SEON-JIN KIM\*\*

\*Dept. of Machine and Automation System, Tongmyong College, Pusan 608-740, Korea

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

**KEY WORDS:** Friction welding (FRW) 마찰용접, Welded joints 용접재, Creep life prediction 크리프수명예측, Larson miller parameter (LMP) 라슨밀러파라미터, Initial strain method (ISM) 초기연신률법

**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 (Cu1Cr0.5Zr-STS316L). 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 300, 400 and 500 °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.

### 1. 서 론

Cu합금과 STS316L강은 원자로 용기의 부품재료써 용기의 외부에는 높은 강도와 전도율을 지닌 구리합금을 사용하며 (Harling *et al.*, 1981; Butterworth, 1985; Butterworth and forty, 1992) 내부에는 내식성을 고려한 스테인리스강을 사용한다. 이들 마찰용접재는 원자로 내의 고온 및 부식과 방사선의 분위기에 노출되므로 고온(300~500°C) 크리프 특성 및 라슨밀러 파라미터법(LMP)과 초기연신률법(ISM)에 의한 크리프 안전 수명 예측에 관한 연구가 필요하다. 이들의 역사적 배경을 간단히 살펴본다면, 고온 크리프에 대한 연구는 국내외적으로 현재까지 많은 연구가 보고되었으나 (Oh, 1986; Oh *et al.*, 1986) 특히 마찰용접재에 대한 고온 크리프 특성은 국내외적으로 그 연구가 거의 없는 실정이다. 그러므로 이들 고온(300, 400, 500°C) 크리프 특성과 수명을 예측할 수 있다면, 부품의 설계, 제작, 유지, 및 관리 보수를 위한 중요한 참고 자료가 될 것으로 기대된다. 따라서 본 연구에서는 원자로 부품용 재료인 Cu합금과 STS316L의 봉대봉 이종재 마찰용접재에 대

한 고온 크리프 시험을 수행하여 크리프 수명예측 가능성에 대하여 고찰하였다.

### 2. 재료 및 실험방법

본 연구에 사용된 Cu-alloy(Cu-1Cr-0.5Zr)는 약 1%의 Cr과 약 0.5%의 Zr을 함유하는 합금으로 높은 강도와 우수한 열적·전기적 전도성을 가지고 있다. 스테인리스강(STS316L)은 저탄소 스테인리스강으로 입계부식에 강하고, Mo 첨가로 비산화성 산에 강하고 공식에 강하다. 마찰용접 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1에 나타내었고 두 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

Fig. 1(a)는 마찰용접시험에 사용된 시험편이며, Fig. 1(b)는 모재 Cu-1Cr-0.5Zr과 STS316L 마찰용접재 (유 등, 2001) Cu1Cr0.5Zr-STS316L( $\phi 15$ ,  $\phi 15$ mm)의 상온(20°C)과 300, 400, 500°C 고온인장 시험편과 고온크리프 시험편의 형상 및 치수를 표시하였다.

본 연구 중 크리프 시험기는 정적 및 동적 하중하의 고

온 크리프 시험이 가능한 실험장치로써, 최고온도 1,093°C의 고온 크리프, 응력 및 완화시험(stress and relaxation test)과 인장 및 압축시험이 가능한 미국 SATEC사의 크리프 시험기(DLF-10, 5ton)를 사용하였다.

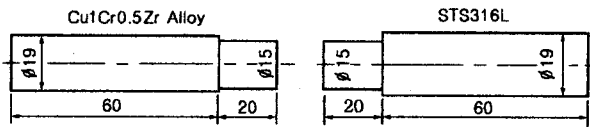
크리프 시험의 연신은 신장계(extensometer)와 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하여 시험기 자체에 연결되어 있는 기록계를 통하여 크리프 곡선을 그렸다. 시험편의 가열공정은 무 부하상태에서 실험온도(300, 400, 500°C)까지 약 9.6°C/min으로 가열했으며, 부하를 걸기 전에 시험로(furnace)의 온도분포가 균일하게 유지되도록 실험온도에서 30분간 온도를 유지시킨 다음,

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

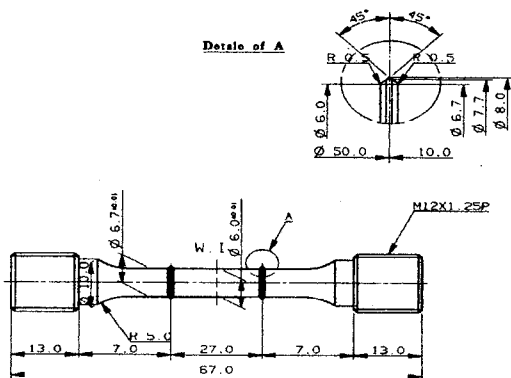
Comp. Mtls.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N	Zr	Pb
Cu1Cr0.5Zr	-	-	-	0.002	-	-	0.92	-	Rem.	-	0.45	0.011
STS316L	0.015	0.49	1.46	0.028	0.025	12.1	16.2	2.12	0.190	0.008	-	-

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)
Cu1Cr0.5Zr	430	240	24.1	35	160
STS316L	675	344	49.0	73	230



(a) Friction welding specimens



(b) High temperature tensile and creep test specimen

Fig. 1 Shape and dimension of test specimens

하중을 작용시켜 실험을 수행하였다. 또한, 시험 중에는 실험온도의  $\pm 1^\circ\text{C}$  범위 이내로 유지하면서 실험하였으며, 초기연신률(initial strain)은 문헌(Oh *et al.*, 1996; 1997)에 의하여 하중을 가한후 1분이 될 때 측정 하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 고온 인장특성

마찰용접재 Cu1Cr0.5Zr-ST316L, 모재 Cu1Cr0.5Zr, STS316L강에 대하여 상온(20), 300, 400, 500°C에서 인장 시험을 수행한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 사용온도 300~500°C의 범위에서는 거의 선형적 상관성이 존재한다. 상온에서는 용접재가 모재 Cu1Cr0.5Zr 합금의 경우보다 인장강도가 높으나, 고온에서는 오히려 더 낮게 나타났다. 이것은 파단이 Cu1Cr0.5Zr에서 일어나며, 고온 강도면에서 Cu1Cr0.5Zr측이 STS316L강보다 더 취약하기 때문인 것으로 생각된다.

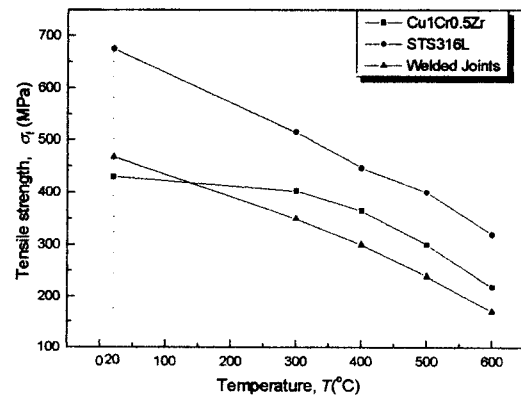


Fig. 2 Relationship of tensile strength vs. temperature for Cu1Cr0.5Zr, STS316L and welded joint (Cu1Cr0.5Zr-ST316L) at 20°C, 300°C, 400°C, 500°C and 600°C

#### 3.2 크리프 특성

실험온도(300, 400, 500°C)하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 Cu1Cr0.5Zr-ST316L 마찰용접재의 크리프 곡선을 Fig. 3에 대표적으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 대체로 크리프 변형은 작용응력이 클수록 증가함을 알 수 있고, 크리프 변형거동은 시험조건, 즉, 온도, 응력 등에 따라 변한다는 것을 알 수 있었다. 그리고 동일 온도하에서 응력이 증가함에 따라 초기연신률은 모두 증가하는 것을 볼 수 있었다.

Table 3은 300°C, 400°C, 500°C에서 크리프 시험을 실시한 결과의 데이터를 정리하여 응력( $\sigma$ , MPa), 초기변형률( $\epsilon_0$ , %), 파단시간  $t_r$ (h)를 나타낸다.

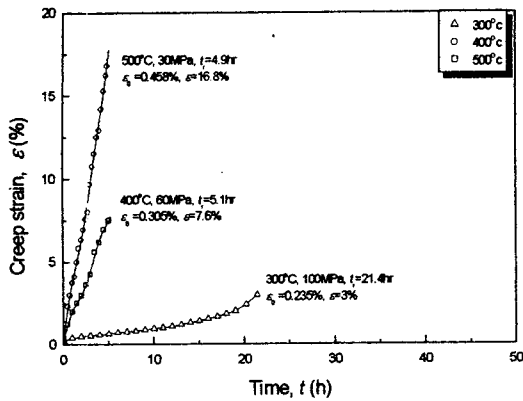


Fig. 3 Typical creep curves for friction welded joint (Cu1Cr0.5Zr-ST316L) at 300, 400 and 500°C under various creep stress

Table 3 Data of creep test of friction welded joint Cu1Cr0.5Zr-ST316L under uni-axial tension

Materials	Cu1Cr0.5Zr-ST316L			$\sigma/\sigma_t$ $\times 100$	Fracture position
	Temperature	Stress	Initial strain		
T (°C)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon_0$ (%)	$t_r$ (h)	(%)	
300 ( $\sigma_t=350$ )	140	0.387	1.3	40	Cu alloy HAZ
	120	0.286	6.2	34.3	"
	100	0.208	21.4	28.6	"
	90	0.155	72.2	25.7	"
400 ( $\sigma_t=300$ )	80	0.466	1.7	26.7	Cu alloy HAZ
	60	0.324	5.1	20	"
	50	0.243	16.6	16.7	"
	40	0.174	47.8	13.3	"
500 ( $\sigma_t=240$ )	40	0.803	1.8	16.7	Cu alloy HAZ
	30	0.545	4.9	12.5	"
	20	0.281	18.1	8.3	"
	15	0.184	40.1	6.3	"

### 3.3 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 4는 300, 400, 500°C에서의 용접재와 모재에 대한 크리프 응력  $\sigma$  (MPa)와 크리프 수명(파단시간)  $t_r$ (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과로서 크리프 파단 곡선(creep rupture curve)이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할수록 감소하고, 온도가 상승할수록 그 감소율이 더욱 커짐을 알 수 있으며, 이는 오 등의 보고(오 등, 1993; Oh, et al., 1996)와 유사하며 정 등의 발표(정 등, 1997)와 매

우 일치한다. 이들의 상관 관계 실험식은 다음과 같이 도출 된다.

$$300^\circ\text{C}:\log \sigma = 2.161 - 0.113 \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

$$400^\circ\text{C}:\log \sigma = 1.939 - 0.202 \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (2)$$

$$500^\circ\text{C}:\log \sigma = 1.688 - 0.315 \log t_r \quad (R^2=0.99) \quad (3)$$

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

식(1)~(3)은 양대수 좌표평면에서 선형적으로 나타나며, 온도 300, 400, 500°C에서 응력이 결정되면 단시간 실험을 통하여 외삽에 의해 장시간의 크리프 수명을 예측할 수 있으나( $10^3$ h까지는 대체로 안전), 고온일수록 장시간( $10^3 \sim 10^5$ h)에서는 실제 수명이 계산 예측치 보다 훨씬 단축된다면 장시간 예측은 매우 위험할 것으로 생각된다. 여기서 식(1)~(3)에 의하여 시험온도(T)와 초기 연신률( $\epsilon_0$ )을 포함하는 온도-응력-수명-초기 연신률( $T-\sigma-t_r-\epsilon_0$ )의 수명 예측식을 ISM에 의해 도출할 필요가 있다.

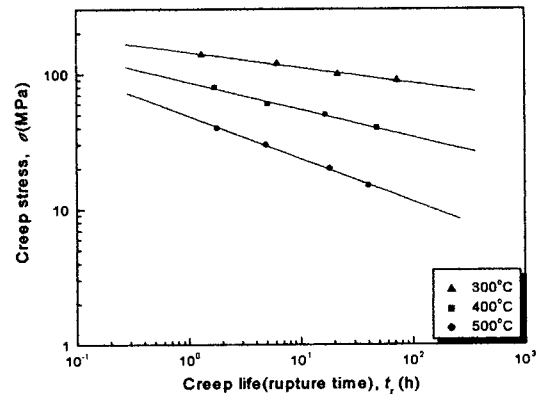


Fig. 4 Creep stress vs. creep life (rupture time) for friction welded joints (Cu1Cr0.5Zr-ST316L) at 300, 400 and 500°C

### 3.4 크리프 응력과 초기 연신율과의 상관성

Fig. 5는 크리프 응력과 초기 연신율과의 상관성을 나타내며, 양대수 좌표평면상에서 서로 선형적이다. 그림에서 초기 연신율은 응력이 높아질수록 증가하고, 온도가 상승할수록 그 증가율도 더욱 커짐을 알 수 있다.

이들의 상관관계 실험식은 다음과 같이 도출 된다.

$$300^\circ\text{C}:\log \sigma = 2.346 + 0.493 \log \epsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (4)$$

$$400^\circ\text{C}:\log \sigma = 2.129 + 0.699 \log \epsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (5)$$

$$500^\circ\text{C}:\log \sigma = 1.659 + 0.657 \log \epsilon_0 \quad (R^2=0.99) \quad (6)$$

식(4)~(6)에서 초기 연신률( $\epsilon_0$ )은 크리프 응력( $\sigma$ )과 선형적인 정량적 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있으며, 이는 여러 재료에

대한 정 등, Oh 등의 보고(정 등, 1997; Oh *et al.*, 1996)와 모두 잘 일치한다.

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

여기서,  $A$ ,  $B$ 는 재료와 온도의 함수이다.

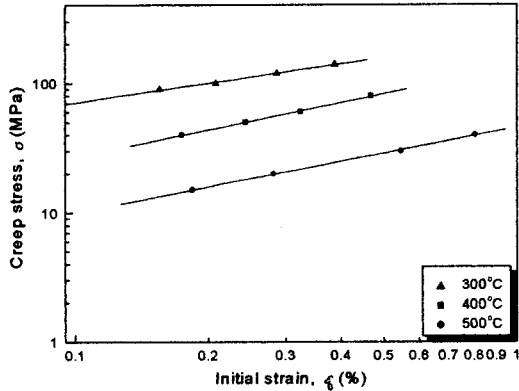


Fig. 5 Creep stress vs. initial strain for friction welded joint (Cu1Cr0.5Zr-ST316L) at 300, 400 and 500 °C

### 3.5 크리프 수명과 초기 연신율과의 상관성

Fig. 6은 Cu1Cr0.5Zr-ST316L 용접재의 300, 400, 500 °C에서의 크리프 수명(파단시간)  $t_r$ (h)과 초기 연신율  $\epsilon_0$ (%)과의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 같은 온도에서는 초기 연신율이 증가할수록 크리프 수명이 감소하며, 동일 초기연신율이 약 100hr 미만일 때는 고온일수록 수명이 더욱 길게 나타나지만, 100hr 이상 일 때는 그 반대이다.

이들의 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

$$300^\circ\text{C}; \log t_r = -1.572 - 4.785 \log \epsilon_0 - 0.873 (\log \epsilon_0)^2 \quad (8)$$

( $R=0.99$ )

$$400^\circ\text{C}; \log t_r = -1.013 - 4.186 \log \epsilon_0 - 0.849 (\log \epsilon_0)^2 \quad (9)$$

( $R^2=0.98$ )

$$500^\circ\text{C}; \log t_r = 0.121 - 2.314 \log \epsilon_0 - 0.459 (\log \epsilon_0)^2 \quad (10)$$

( $R^2=0.98$ )

식(8)~(10)에서 초기 연신율은 본 실험의 범위에서 크리프 수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화시킬 수 있으며, 이것은(오 등, 1996; 정 등, 1997)의 연구보고와 매우 일치한다.

식(8)~(10)은  $\log t_r - \log \epsilon_0$ 가 2차 함수적 관계식이므로 다음과 같이 모델화시킬 수 있다.

$$\log t_r = \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 \quad (11)$$

$$\text{즉, } t_r = A' \epsilon_0^{B'+C' \log \epsilon_0} \quad (12)$$

여기서,  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ 는 재료와 온도의 함수이다.

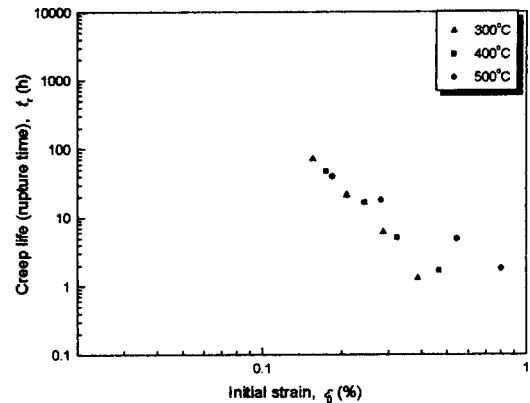


Fig. 6 Relationship of rupture time vs. initial strain for friction welded joint (Cu1Cr0.5Zr-ST316L) at 300, 400 and 500 °C

### 3.6 LMP 및 LMP-ISM에 의한 크리프 수명예측식 도출

초기 연신률법(ISM) (Oh, et al, 1996)에 의한 크리프 수명예측식과 LMP법을 이용한 크리프 파단수명식을 접목시켜서 서로 연립하여 구한 크리프 온도, 응력, 수명, 초기 연신률을 포함하는 식을 LMP-ISM 크리프 수명 예측식이라 하여 다음과 같이 도출하였다.

LMP의 식은 식(11)에서 내열강의 경우  $C_1=20$ 이므로 (Larson and Miller, 1952)

$$\text{LMP} = [T_K(\log t_r + 20)] = K_1(\log \sigma) + K_2 \quad (13)$$

이다.

여기서  $K_1$ ,  $K_2$ 는 재료 정수이고,  $T_K$ 는 절대온도(K)이다 ( $K_1=-6052.9$ ,  $K_2=24566.5$ )(Larson and Miller, 1952).

식(12)과 식(13)에서 LMP-ISM 크리프 수명 예측식은 다음과 같다.

$$2 \log t_r = \frac{K_1(\log \sigma) + K_2}{T_K} + \log A' + B' \log \epsilon_0 + C' (\log \epsilon_0)^2 - 20 \quad (14)$$

여기서,

$$K_1 = -6052.9, K_2 = 24566.5$$

$$\log A' = 6.329 - 0.030 T_K + 2.878 \times 10^{-5} T_K^2$$

$$B' = 16.327 - 0.073 T_K + 6.3648 \times 10^{-5} T_K^2$$

$$C' = 6.021 - 0.022 T_K + 1.824 \times 10^{-5} T_K^2$$

### 3.7 ISM에 의한 크리프 수명예측식 도출

온도, 응력, 수명, 초기 연신율이 포함되는 ISM 크리프 수명 예측식은 식(7)과 식(12)에서 다음과 같이 도출된다.

$$t_r = A A' \epsilon_0^{B'+C' \log \epsilon_0} \sigma^{-1} \quad (15)$$

$$\therefore t_r = \alpha \epsilon_0^B \sigma^{-1} \quad (16)$$

여기서,

$$\alpha = A \cdot A' = 10^{5.054 - 0.017 T_K + 1.616 \times 10^{-5} T_K^2}$$

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

$$\beta' = B + B' = 10.853 - 0.056 T_K + 5.124 \times 10^{-5} T_K^2$$

$$C = 6.021 - 0.022 T_K + 1.824 \times 10^{-5} T_K^2$$

Fig. 7은 ISM 크리프 수명 예측식 (16)에 의해 구한 크리프 설계곡선(creep design curve)을 식(14)의 LMP-ISM식과 LMP 식(13)에 의한 경우와 실제 크리프 수명을 300, 400, 500°C에서 서로 비교한 결과를 나타낸다.

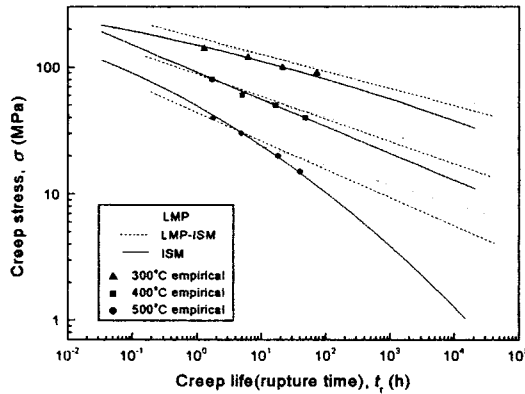


Fig. 7 Comparison of creep design curves for friction welded joints (CuIG0.5Zr-STs316L) by ISM with those by LMP and LMP-ISM methods and the empirical data at 300,400 and 500°C

#### 4. 결론

원자로 부품용 재료인 Cu1Cr0.5Zr과 STS316L의 이종재 마찰용접재에 대한 고온 크리프시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 마찰용접재에 대한 LMP, LMP-ISM 및 ISM의 크리프 수명예측식의 도출가능성이 확인되었으며, LMP와 LMP-ISM의 수명예측식은 다음과 같이 도출되었다.

LMP:

$$T_K(\log t_r + 20) = -6052.939 \log \sigma + 24566.4$$

LMP-ISM

$$2 \log t_r = \frac{K_1(\log \sigma) + K_2}{T_K} + \log A' + B' \log \epsilon_0 + C(\log \epsilon_0)^2 - 20$$

여기서,  $K_1 = -6052.9$ ,  $K_2 = 24566.5$

$$\log A' = 6.329 - 0.030 T_K + 2.878 \times 10^{-5} T_K^2$$

$$B' = 16.327 - 0.073 T_K + 6.3648 \times 10^{-5} T_K^2$$

$$C = 6.021 - 0.022 T_K + 1.824 \times 10^{-5} T_K^2$$

(2) ISM에 의한 크리프 수명예측식은 온도( $T_K$ , K), 응력

( $\sigma$ , MPa)하에서 초기연신률( $\epsilon_0$ , %)의 측정에 의해 크리프 수명( $t_r$ , hr)을 예측할 수 있음이 확인되었으며, 다음과 같이 도출되었다.

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

여기서

$$\alpha = 10^{5.054 - 0.017 T_K + 1.616 \times 10^{-5} T_K^2}$$

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

$$\beta' = 10.853 - 0.056 T_K + 5.124 \times 10^{-5} T_K^2$$

$$C = 6.021 - 0.022 T_K + 1.824 \times 10^{-5} T_K^2$$

#### 참고문헌

- 오세규 외 3인(1993). "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온크리프 수명의 초기 실시간 예측법 (1), (2), (3)", 대한기계학회 논문집 17권 3호, pp 512-519, pp 520, 526, 17권 4호, pp 746-754.
- 오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화(1996). "엔진배기밸브의 내열강 이종재 마찰용접의 최적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가(1), (2)", 한국해양공학회 장년논문집, pp 249-254, pp 281-287.
- 유인종, 권상우, 황성필, 공유식, 오세규(2001). "원자력 발전소용 이종재(Cu합금/STS316) 마찰용접의 최적화와 AE에 의한 실시간 평가에 관한연구", 한국해양공학회지, 제15권, 제2호, pp 88-93.
- 정민화, 이상국, 윤병식, 오세규, 송정근, 심문식(1997). "발전소 고온배관재료의 크리프 손상 특성평가(3) - 2.25Cr1Mo강의 크리프특성과 LMP에 의한 크리프 수명의 예측", 한국해양공학회 1997년도 춘계학술대회 장년논문집, pp 73~77.
- 정민화, 이상국, 허광범, 오세규, 이원석(1997). "발전소 고온 배관재료의 크리프 수명 손상 특성평가(4) - ISM에 의한 2.25Cr1Mo강의 크리프 수명예측", 한국해양공학회 '97년도 춘계학술대회 장년논문집, pp 84-89.
- Butterworth, G. J.(1985). Journal of Nuclear Materials 135, pp 160.
- Butterworth, G. J. and C.B.A. Forty(1992). Journal of Nuclear Materials 189, pp 237.
- Harling, O. K., Yu, G. P., Grand, N. J. and Meyer, J. E.(1981). Journal of Nuclear Materials pp 103~104, pp 127,
- 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.(1986). "Application of Friction Welding for Parts of Industrial Machinery", 한국박용기관학회지,

- 10권, pp 32-34.
- Oh, S.K., Kunio, T., 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, S. K., Chang, H. K., Park, H. D. and Lee, B. S.(1997). "Development of Real-Time Quality Evaluation of Friction Welding by Acoustic Emission ; 3rd Report. Effects of Initial AE Counts during Plastic Deformation in FRW", Proc. The 7th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., ISOPE. Vol.4-S37, pp 11-17.
- 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 Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol. 4, No. 1, pp 275-279.