

ISM에 의한 발전용 고온 배관재료 2.25Cr1Mo강의 고온 크리프 수명 예측에 관한 연구

이상국* · 정민화* · 오세규** · 송정근***
(98년 3월 27일 접수)

Study on Creep Life Estimation for High-Temperature Tube Materials(2.25Cr1Mo Steel) in Power Plants by ISM

Sang Guk Lee* · Min Hwa Chung* · Sae Kyoo Oh** · Jeong Keun Song***

Key Words : Creep Stress(크리프 응력), Creep Life Prediction(크리프 수명 예측), Rupture Time (파단시간), ISM(Initial Strain Method, 초기연신율법), LMP(Larson-Miller Parameter, 라슨밀러 파라미터)

Abstract

In this report for the assessment of creep properties of high-temperature tube materials in power plants, the long-time($10^4 \sim 10^5$ h) creep life prediction by ISM for 2.25Cr1Mo steel was studied. It was clarified experimentally and quantitatively that the newly developed long-time creep life prediction equation was very coincident with the actual experimental data with high confidence, and the model was $t_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1}$.

1. 서 론

화력발전소의 고온배관과 관헤드, 증기드럼 등의 압력용기, 보일러 열교환기 등 내압, 내식, 내열 강재는 최근 가동효율 증가와 가동-정지 횟수의 증가 등과 같은 과도 운전조건으로 인한 열화도가 가속화되고 있으며, 이로 인하여 발생하는 경년열화 손상 및 파단으로 인한 가혹한 재산과 인명피

해를 막기위하여 이들 재료의 고온 크리프 수명에 측 및 경년열화 손상의 비파괴적 검출과 잔여수명 측정법의 확립이 시급하여 이들에 관한 연구가 많이 추진되고 있다¹⁻¹⁰⁾.

본 연구에 앞선 연구에서는 화력발전소의 고온 배관과 관헤드 등에 쓰이는 2.25%Cr1%Mo (ASTM-A182 -F11 Grade)에 관한 고온 (500, 550, 600°C) 크리프 특성 조사와 LMP(Larson Miller Parameter)¹¹⁾에

* 정회원, 한국전력연구원

** 정회원, 부경대학교 공과대학 기계·자동차 공학부

*** 정회원, 부경대학교 대학원 기계공학과

의한 크리프 수명(파단시간) 예측식 개발이었다. 그런데 이 예측식은 수명 10^3 시간까지는 신뢰성이 있었으나, 장시간 수명인 10^4 , 10^5 시간에서는 신뢰성이 없고, 오히려 크리프 설계에 매우 위험한 것이었음이 확인되어, 이의 해결이 절실한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 그러한 단점을 보완 및 해결하여 10^4 , 10^5 시간에 이르는 장시간 크리프수명 예측식을 ISM(초기연신률법)¹²⁻¹⁵⁾에 의하여 개발하여 LMP법 및 LMP-ISM 접목식에 의한 것과 그 신뢰성을 비교하여 실제 현실에 적용할 수 있는 유용하고 신뢰성있는 장시간 크리프 수명예측식을 완성하고자 하였다. 그리하여 발전소 고온배관재료의 크리프 손상과 파단 이전에 크리프수명의 초기 실시간 예측평가가 가능토록하였다.

2. 시험편과 실험방법

2.1 시험편과 실험기기

본 실험에 사용된 재료는 국내 S사에서 제작한 것으로서 화력발전소의 고온배관과 관헤드 및 열교환기 등에 쓰이는 Cr-Mo강(2.25%Cr1%Mo)(ASTM -A182-F22 Grade)이다. 사용재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 그리고 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같고, 시험기는 미국 SATEC사의 DLF-10-1029 크리프 시험기이다.

Table 1 Chemical composition of material (wt %)

Mtl.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
2.25Cr1Mo	0.12	0.2	0.46	0.02	0.014	-	2.19	0.98	-

Table 2 Mechanical properties of material

Mtl.	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H _B)	Heat treat.
2.25Cr1Mo	650	535	24	197	*N, T

*N, T : 920°C Normalizing → 620°C Tempering

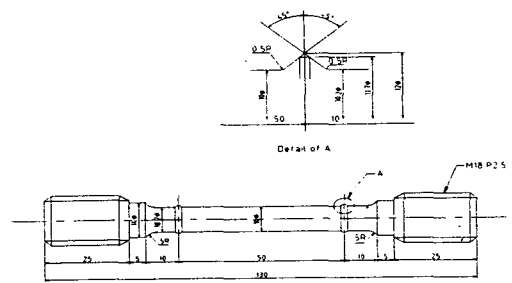


Fig. 1 Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139-83)

2.2 실험방법

온도측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지않는 무부하상태에서 설정온도까지 약 10°C/min로 가열하였다. 그리고 부하전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험중 온도를 일정온도에서 $\pm 1^\circ\text{C}$ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험중 발생하는 연신을 측정하기위하여 표점거리 50mm되는 양단의 플래지를 기준으로 하였고 LVDT (linear variable displacement transformer) 로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이들로부터 크리프곡선을 작성하였고, 초기연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정된 것으로 통일하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 ISM(initial strain method)의 이론

대부분의 재료들은 응력과 온도에 의해 파단수명이 결정되며, 온도에 따라 그 변형률이 크게 다르게 나타난다. 그리고 온도가 일정할지라도 응력에 따라 각 시험편의 변형량도 서로 다르다. 그러므로, 응력과 온도의 변수인 변형률로써 그 파단수명을 예측할 수 있다. Fig. 2는 전형적인 creep 거동을 나타낸 곡선이다. 그림에서 초기연신률 ϵ_0 는 시간과는 독립적인 변수이다. 하지만, 응력과 온도

에는 아주 민감한 변수임에 틀림없다. 즉, 온도가 증가할 수록 초기연신률은 증가하며, 일정 고온하에서 응력의 변화에 따라서도 초기연신률은 약간씩 다른 값을 가진다. 크리프 파단 수명식들은 응력, 온도, 정상크리프 속도, 활성화 에너지 외에도 많은 금속학적 인자들의 변수 등을 고려한 상당히 복잡한 식이다. 따라서 그와 같은 많은 변수들과 직접적으로 관련된 초기연신과 여러 변수들을 고려한 관계식으로 파단수명을 예측하려는 것이다.

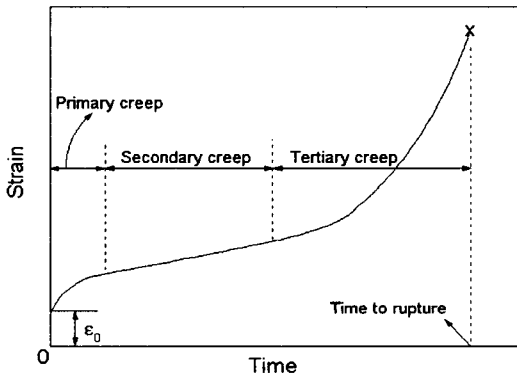


Fig. 2 Schematic representation of classical creep behavior

1910년 Andrade¹⁶⁾에 의해서 제안된 초기 연신률을 고려한 식은 다음과 같다.

$$\epsilon = \epsilon_0 \left(1 + \beta t^{\frac{1}{3}} \right) e^{kt} \quad (1)$$

여기서, ϵ 은 시간 t 에 따른 변형이고, β 와 k 는 상수이다. 이 식은 제한된 재료에서만 실증이 되어 그 후 여러 학자들에 의해 수정 보완되었다. 그러나, 보완된 수식들은 단계별로 그 변형량과 creep 속도를 고려해야 하고, 여러 온도의 범위에서는 오차가 크다고 보고되었다.

1983년 Oh¹²⁾에 의해 내열강(SUS303, SUH3) 및 이들의 마찰 용접재에 대하여 크리프하중 작용 직후의 초기연신률(ϵ_0)은 이후 크리프 특성에 영향을 미친다고 보고하였으며, 그 후 내열강(SUS304, SUS303, SUH31, SCM4 등)에서도 대수 좌표상에서 다음과 같은 선형 모델식을 제안하였다^{13, 14)}.

$$t_r = K_1(\epsilon_0)^b \quad (2)$$

$$\epsilon_0 = m(\sigma)^n \quad (3)$$

여기서, t_r , ϵ_0 , σ 는 각각 크리프 파단시간, 초기연신률, 응력이며, K_1 , b , m , n 은 재료정수이다. 그러나, 이들 실험식은 일정온도, 고응력하에서 극히 짧은 파단시간의 실험결과로서, 여러 온도와 응력하에서의 (온도-응력-파단수명-초기변형) 식의 도출이 필요하다.

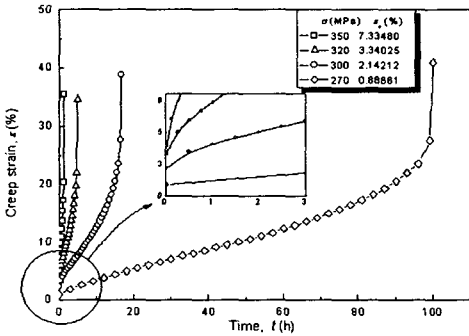
3.2 크리프 곡선

일정온도(500, 550, 600°C)하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 2.25Cr1Mo강의 대표적 크리프 곡선으로 각각 Fig. 3(a), (b), (c)에 나타내었다. 각각의 경우에 초기연신률(ϵ_0)도 측정하여 표시하였다. 그림에서 초기연신률의 증감은 응력, 파단수명 및 온도에 민감하게 상관성이 있음을 알 수 있고, 여러 크리프 특성파도 상관성이 있다.

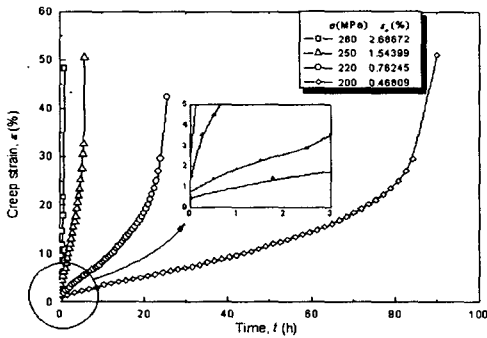
Table 3 Data by creep test of 2.25Cr1Mo steel

Temp. (°C)	Stress σ (MPa)	Rupture time t_r (h)	Initial strain ϵ_{01} (%)
500	350	1.54	7.335
	320	6.48	3.340
	300	17.86	2.142
	270	10^2	0.886
	230	10^3	0.244
	185	10^4	4.21×10^{-2}
	135	10^5	3.31×10^{-3}
550	280	1.12	2.686
	250	4.8	1.544
	220	22.4	0.763
	200	90	0.468
	165	10^3	0.171
	125	10^4	3.997×10^{-2}
	85	10^5	5.31×10^{-3}
600	230	0.6	1.961
	200	2.65	1.092
	170	15.4	0.571
	135	200	0.222
	105	10^3	7.957×10^{-2}
	70	10^4	1.521×10^{-2}
	40	10^5	1.550×10^{-3}

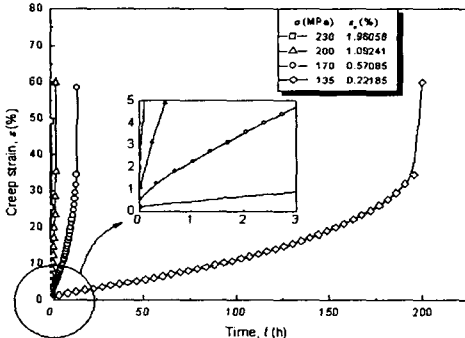
Table 3은 각각 Fig. 3(a), (b), (c)에서와 같이 크리프 실험한 결과의 데이터를 정리한 것으로서, 온도 500, 550, 600°C에서 응력(σ , MPa), 파단시간(t_r , h), 초기연신률(ϵ_0 , %)을 나타내고 있다.



(a) 500°C



(b) 550°C



(c) 600°C

Fig. 3 Typical creep curves for 2.25Cr1Mo steel at 500, 550 and 600°C

3.3 크리프 응력과 초기 연신률과의 상관성

Fig. 4는 크리프 응력 σ (MPa)와 초기 연신률 ϵ_0 (%)와의 상관성을 나타내며, 양대수 좌표평면상에서 서로 선형적이다. 그림에서 초기연신률은 응력이 높아질 수록 증가하고, 온도가 상승할 수록 그 증가률도 더욱 상승함을 알 수 있다.

이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산 되었다.

$$500^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.438 + 0.124 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 1.0) \quad (4)$$

$$550^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.364 + 0.191 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 1.0) \quad (5)$$

$$600^\circ\text{C}; \log \sigma = 2.291 + 0.245 \log \epsilon_0 \quad (R^2 = 1.0) \quad (6)$$

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

식 (4), (5), (6)에서 초기 연신률은 크리프 응력과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수 있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있으며, 이는 여러 재료에 대한 Oh등의 보고^{9, 10, 13, 14}와 일치한다.

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

여기서, A, B는 재료와 온도의 함수이다.

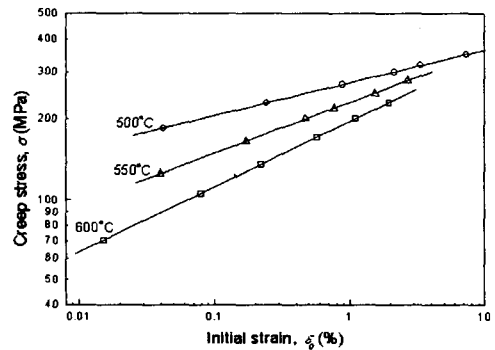


Fig. 4 Relationship of creep stress versus initial strain of 2.25Cr1Mo steel at 500, 550, and 600°C

3.4 크리프 수명과 초기연신률과의 상관성

Fig. 5는 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과 초기 연

신률 $\epsilon_0(\%)$ 와의 상관관계를 나타내며, 양대수 좌표평면상에서 2차 함수적 관계가 있다. 그림에서 초기 연신률이 증가할 수록 크리프 수명이 감소하며, 그 감소율도 온도가 상승할 수록 더욱 급격함을 알 수 있다. 이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산되었다.

$$500^\circ\text{C}; \log t_r = 1.914 - 1.852 \log \epsilon_0 - 0.244 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=1.0) \quad (8)$$

$$550^\circ\text{C}; \log t_r = 1.170 - 2.562 \log \epsilon_0 - 0.384 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=1.0) \quad (9)$$

$$600^\circ\text{C}; \log t_r = 0.583 - 2.265 \log \epsilon_0 - 0.383 (\log \epsilon_0)^2 \quad (R^2=1.0) \quad (10)$$

식 (8), (9), (10)에서 초기 연신률은 크리프 수명과 정량적인 상관성이 존재함을 알 수있고, 그 일반식은 다음과 같이 모델화 시킬 수 있으며, 여러재료에 대한 Oh등의 보고¹²⁻¹⁵⁾에서는 $\log t_r$ 이 $\log \epsilon_0$ 의 1차식으로 표시되었으나 여기서는 2차식으로 표시된 것이 서로 다르다.

식 (8), (9), (10)은 $\log t_r - \log \epsilon_0$ 가 2차함수적 관계식이므로

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

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

여기서, A', B', C'는 재료와 온도의 함수이다.

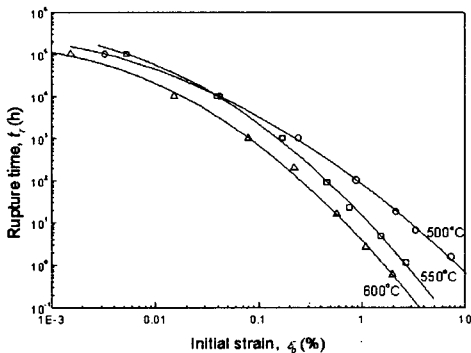


Fig. 5 Relationship of rupture time versus initial strain of 2.25Cr1Mo steel at 500, 550 and 600°C

3.5 크리프응력과 크리프수명(파단시간)과의 상관성

Fig. 6은 크리프응력 σ (MPa)와 크리프수명(파단시간) t_r (h)과의 정량적 상관성을 나타내며, 이들은 양대수 좌표평면 상에서 2차함수적 관계가 있음을 알 수 있다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할수록 감소하며, 그 감소율은 온도가 높을 수록 더욱 심하다.

이들의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 전산되었다.

$$500^\circ\text{C}; \log t_r = -56.234 + 62.657 \log \sigma - 15.918 (\log \sigma)^2 \quad (R^2=1.0) \quad (13)$$

$$550^\circ\text{C}; \log t_r = -25.800 + 36.216 \log \sigma - 10.494 (\log \sigma)^2 \quad (R^2=1.0) \quad (14)$$

$$600^\circ\text{C}; \log t_r = -8.275 + 18.487 \log \sigma - 6.383 (\log \sigma)^2 \quad (R^2=1.0) \quad (15)$$

식 (13), (14), (15)를 시험온도와 초기연신률이 포함하는 (온도-응력-수명-초기연신률)의 수명에 측식을 ISM에 의해 도출할 필요가 있다.

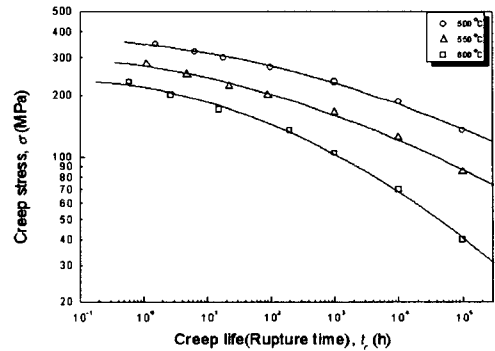


Fig. 6 Relationship of creep stress versus creep life of 2.25Cr1Mo steel at 500, 550 and 600°C

3.6 ISM에 의한 크리프 수명 예측식 도출

3.6.1 LMP-ISM에 의한 크리프 수명 예측식 초기연신률법(ISM)¹²⁻¹⁵⁾에 의한 크리프 수명예측

식과 앞의 연구에서 구한 LMP법¹¹⁾을 이용한 크리프 파단수명식을 접목시켜 서로 연립하여 구한 크리프 온도, 응력, 수명, 초기연신률을 포함하는 식을 LMP-ISM 크리프 수명 예측식이라 하여 다음과 같이 도출하였다.

LMP의 식은 $C_1=46$ 이므로

$$LMP[T(\log t_r + 46)] = K_1(\log \sigma) + K_2 \quad (16)$$

이다. 여기서 K_1, K_2 는 재료 정수이고, T 는 절대온도(K)이다($K_1=-17873.7, K_2=81078.9$).

식(11)과 식(16)에서 LMP-ISM 크리프 수명 예측식은 다음과 같다.

$$2 \log t_r = \frac{K_1(\log \sigma) + K_2}{T} + \log A' + B' \log \varepsilon_0 + C'(\log \varepsilon_0)^2 - 46 \quad (17)$$

여기서, $K_1=-17873.7, K_2=81078.9$

$$\log A' = 34.663 - 0.067T + 3.269 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=1.0)$$

$$B' = 89.025 - 0.215T + 1.257 \times 10^{-4}T^2 \quad (R^2=1.0)$$

$$C' = 17.611 - 0.042T + 2.486 \times 10^{-5}T^2 \quad (R^2=0.99)$$

3.6.2 ISM에 의한 크리프 수명 예측식

온도, 응력, 수명, 초기연신률이 포함되는 ISM 크리프 수명 예측식은 다음과 같이 도출된다.

식(7)과 식(12)에서 ISM 크리프 수명 예측식은 다음과 같이 도출된다.

$$t_r = AA' \varepsilon_0^{B+B'+C' \log \varepsilon_0} \sigma^{-1} \quad (18)$$

$$\therefore t_r = \alpha \varepsilon_0^\beta \sigma^{-1} \quad (19)$$

여기서, $\alpha = AA' = 10^{37.010 - 0.067T + 3.146 \times 10^{-5}T^2}$

$$\beta = \beta' + C' \log \varepsilon_0$$

$$\beta' = B + B' = 86.485 - 0.209T + 1.231 \times 10^{-4}T^2$$

$$C' = 17.611 - 0.042T + 2.486 \times 10^{-5}T^2$$

Fig. 7은 ISM 크리프 수명 예측식 (19)에 의해 구한 크리프 설계곡선(creep design curve)을 LMP-ISM식 (17)과 LMP식 (16)에 의한 경우의 비교를 실제 장시간 크리프 수명인 $10^4 \sim 10^5$ 시간까

지의 실제 실험치들과 500, 550, 600°C에서 서로 비교한 결과를 나타낸다.

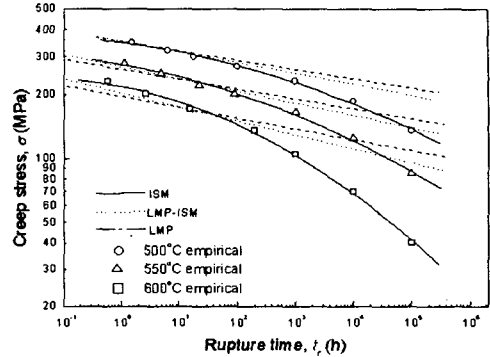


Fig. 7 Comparison of creep design curves for 2.25Cr1Mo steel by ISM with those by LMP-ISM, LMP methods and the empirical data at 500, 550 and 600°C

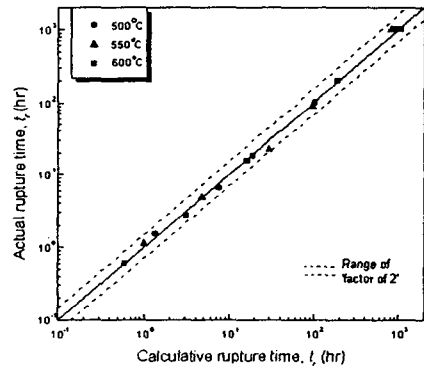


Fig. 8 Comparison of actual rupture time and calculated rupture time by ISM at 500, 550 and 600°C

그림에서 명백히 확인, 증명될 수 있듯이, LMP 식은 500, 550°C에서는 $10^4 \sim 10^5$ 시간의 장시간 크리프 예측에서는 실험치와 너무 큰 오차가 있으므로 사용불가하며, 600°C에서는 10^2 시간 이상에서 이용하면 매우 위험함을 알 수 있다. LMP-ISM식도 LMP식 보다 다소 개량되었으나 역시 $10^4 \sim 10^5$ 시간대의 장시간 크리프 수명예측에는 이용될 수 없음이 판명되었다. 다만 ISM식만이 $10^4 \sim 10^5$ 시간의 장시간 수명예측식은 물론 모든 시간에서 실험

치와 매우 일치하여, 본 ISM 크리프 예측식의 이용가치가 매우 크며 신뢰성도 매우 높음이 확인되었다. 그 이유는 Fig. 8에서도 알 수 있듯이 ISM 크리프 수명 예측식 (19)에서 계산된 크리프 수명(파단시간)과 실제 파단시간(실험치)이 거의 서로 일치하고 있기 때문이다.

4. 결 론

화력발전소 고온배관 재료의 크리프 손상 및 파단 수명을 평가 예측하기 위한 연구개발에서, 2.25Cr1Mo강의 장시간($10^4 \sim 10^5$ h) 크리프 수명을 초기연신률법(ISM)에 의하여 초기 실시간에 예측할 수 있는 수명예측식 개발을 위한 연구결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 초기연신률은 응력이 높아질 수록 증가하고, 온도가 상승할 수록 그 증가률도 더욱 상승하며, 응력(σ)과 초기연신률(ϵ_0)은 다음과 같이 모델화 될 수 있다.

$$\sigma = A \epsilon_0^B$$

- 2) 크리프 수명(t_r)은 초기연신률(ϵ_0)이 증가할 수록 감소하며, 그 감소률은 온도가 상승할 수록 더욱 급격하게 되며, 이들의 상관 관계는 다음과 같이 모델화 할 수 있다.

$$t_r = A' \epsilon_0^{B'+C' \log \epsilon_0}$$

(A' , B' , C' 는 온도의 2차함수)

- 3) 크리프 수명(t_r)은 응력(σ)이 증가할 수록 감소하며, 그 감소률은 온도가 높을 수록 더욱 심하며, 이들사이에는 양대수 좌표평면상에서 2차함수적 상관성이 존재한다.
- 4) ISM 크리프 수명예측식이 다음과 같이 개발되었으며, 장시간($10^4 \sim 10^5$ h) 크리프 예측에서 실험치와 일치하여 그 신뢰성이 매우 높아 매우 실용적임이 확인되었다.

$$t_r = \alpha \epsilon_0^\beta \sigma^{-1} \quad (\alpha, \beta \text{ 는 온도의 2차 함수})$$

참고문헌

- 1) Cane, B. J. and P. F. Aplin, "Creep Life

Assessment Methods," Proceeding of the 1993 Pressure Vessels and Piping Conference, pp. 25-29, 1993

- 2) Cane, B. J., "Estimating the Remained Creep Life of Power Plant Components", High Temp. Technol., p. 215, 1983, 1.
- 3) Cane, B. J. and K. R. Williams, "Creep Damage Accumulation and Life Assessment of a 0.5Cr0.25V Steel," Conference on Mechanical Behaviour of Materials, ICM 3, p.255-264, 1979
- 4) Dyson, B. F. and D. A. McLean., "New Method of Predicting Creep Life," Met. Sci. J., p.220-223, 1972, 6
- 5) Barraclough. D. F and B. J. Cane, "Assessment of Structural Components after Being Subjected to Operating Stresses in the Creep Range," Vgb Conference, Essen, Germany, Feb. 1984
- 6) Cane, B. J., "Remaining Creep Life Estimation by Strain Assessment on Plant," Int. J. Pressure Vessels Piping, p.11-30, 1982, 10
- 7) Cane, B. J. and R. D. Townsend, "Prediction of Remaining Life in Low-alloy Steels," ASM Materials Science Seminar on Flow and Fracture at Elevated Temperatures, pp. 279-316, 1983
- 8) Ishizaki, S., K. Konno, K. Murayama, et al., "Non-destructive Residual Life Evaluation Techniques or Boiler Materials," International Conference on Life Assessment and Life Extension, 1988
- 9) Oh, S.K., S.J. Kim and T.E. Jeon, "Development of Long-Time Creep Asfety Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel and AE Evaluation : 1st Report-Possibility of Creep Prediction by Initial Strain Method," Proc. of Int. Offshore and Polar Eng. Conf. vol.4, No.1, p.275-279, 1996
- 10) Oh, S.K., T.E. Jeon, Y.S. Song, S.W. Oh and J.S. Oh, "Relationship between Cyclic Creep

- Properties and Initial Strain of Cr-Mn 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, p.639-648, 1996
- 11) Larson, F. R and J. Miller, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses," Transaction of the ASME, pp.765-775, 1952
 - 12) Oh, S. K., "Study on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using AE Technique," Ph.D. Thesis, Keio Univ., Japan, pp.85-146, 302, 1983
 - 13) 오세규외 3인, "내열강의 마찰용접최적화와 장시간 고온크리프 수명의 초기 실시간 예측법 (1), (2), (3)" 대한기계학회 논문집 17권 3호, p.512-519; p.520-526; 17권 4호 p.746-754, 199
 - 14) 오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화, "엔진 배기밸브의 내열강 이중재 마찰용접의 최적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가(1), (2)," 한국해양공학회 강연논문집, p.249-254 ; p.281-287, 1996
 - 15) Oh, S.K., T. Kunio, and A. Hasui, "Effect of Initial Strain on Evaluation of High Temperature Creep Properties of Friction Welded Joints," Proc. of Asian-Pacific Congress on Materials Strength Evaluation-86, pp.549-554, 1986
 - 16) Andrade, E. N., Proc. Roy. Soc., I, p.84f, 1910; Dieter, Geoge E., "Creep and Stress Rupture", Mechanical Metallurgy, pp.432-470, 1986