

〈論 文〉

# 화력발전용 로터강의 초기 변형률법에 의한 장시간 크리프 수명 및 강도 예측

오세규\* · 정순억\*\*

(1992년 5월 23일 접수)

## Long Time Creep Strength and Life Prediction of Steam Turbine Rotor Steel by Initial Strain Method

S. K. Oh and S. U. Jeong

**Key Words :** Creep Rupture Strength(크리프 파단강도), Life Prediction(수명예측), Creep Activation Energy(크리프 활성화에너지), Initial Strain Method(초기 변형률법, IS법)

### Abstract

Long time creep strength and life prediction of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr rotor steel were performed by using round-bar type specimens under static load at 500~700°C. TTP (time temperature parameter), MCM (minimum commitment method) and ISM (initial strain method newly devised) as life prediction methods were investigated, and the results could be summarized as follows. (1) The minimum parameter of SEE (standard error) by TTP was proved as LMP (laron-miller parameter), and the minimum parameter of RMS (root mean squares), by data less than 10<sup>3</sup>hrs was MHP (manson-haferd parameter). (2) The parameters of the minimum and the maximum strength values predicted in 10<sup>5</sup>hrs creep life of 1% Cr-Mo-V steel by TTP were LMP and MSP, respectively. In case of 12% Cr steel above 550°C, OSDP (orr-sherby-dorn parameter) was minimum and MSP (manson-succop parameter) was maximum, but below 550°C, the inverse phenomena was observed. On the other hand the creep strengths before 10<sup>3</sup>hrs life by MCM were similar to those by TTP, but the strengths after 10<sup>3</sup>hrs life were 10~25% lower than those by TTP. (3) Creep strengths by ISM were maximum 5% lower than those by TTP. Because 10<sup>5</sup>hrs strengths were similar to those of the lower band by TTP, the ISM was safer than the TTP.

### 1. 서 론

고온, 고압에서 사용되는 화력발전용 로터강의 장시간 크리프 특성을 정확히 파악하는 것은 로터

설계, 제조, 운전 및 보수에 있어서 가장 기본적인 요건 중의 하나이다. 그러나, 현실적으로 비교적 단시간의 크리프 파단시험에 의한 데이터를 외삽해서 실용상 필요한 장 시간(10<sup>5</sup>시간) 강도를 추정하는 것이 불가피하다.<sup>(1,2)</sup> 이와같은 목적으로 지금까지 사용되어 온 외삽법으로 화학반응 속도이론에 기초한 TTP법,<sup>(2,3,4)</sup> 즉 시간·온도 파라미터법 (time temperature parameter)이 다수 고안되어

\*정회원, 부산수산대학교 기계공학과

\*\*정회원, 통영수산전문대학 기관학과

있으나, 이들 TTP법의 적용을 위해서는 고유의 재료정수를 결정해야 함은 물론 응력의 고차함수로 표시하여야 한다. 또한, 최근 컴퓨터의 발달에 따라 TTP법을 근간으로 하는 프로그램에 의한 MCM법,<sup>(5)</sup> 즉 최소 커밋먼트법(minimum commitment method) 등이 개발되어 있으나 해석이 난해하여 실제 적용하기란 매우 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 이들보다 매우 간단한 IS법,<sup>(6,7)</sup> 즉 초기 변형률법(ISM: initial strain method)에 의한 크리프 수명예측식을 고안하여, 현재 화력발전용 고압 로터강에 사용되고 있는 1% Cr-Mo-V강과 발전소 효율향상을 위해 최근 국내 최초로 개발된 12% Cr강에 대하여 도출하였고, 이 도출식이 앞에서 언급한 여러 파라미터에 의한 결과와 비교 평가하여 장시간 강도 및 수명예측식으로 사용될 수 있음을 입증하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시험편 및 시험장치

시험편의 화학 조성비 및 온도별 기계적 성질은 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 탄성계수(E)의 측정에는 상온에서 정확도를 높이기 위해서 초음파를 이용한 파(wave)입사법 및 인장시험을 병행하여 E를 구하였으며, 고온에서는 다수의 인장시험으로 E를 구하였는데, 이들은 로터강에 대한 Briggs<sup>(8)</sup> 등의 보고와 잘 일치하였다. 크리프 시험편은 ASTM E139의 규정에 따라 표점거리 50 mm, 지름 10 mm인 환봉(round-bar)으로 가공하여 표면을 에머리페이퍼(emery paper) #1200까지 연마하였다.

실험장치는 단식(single type) 및 복식(multiple type) 레버(lever)형 일정하중 크리프 시험기

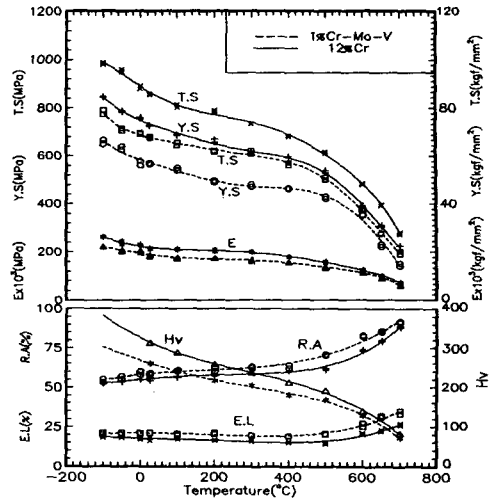


Fig. 1 Tensile test results of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel.(Y.S : Yield Strength, T.S : Tensile Strength, E : Elastic Modulus, R.A : Reduction of Area, E.L : Elongation, Hv : Vickers Hardness)

(ATS社, 레버비 : 1/20, 최대하중 : 10 klb)에서 고온용 신장기(extensometer)를 부착한 후 양 강종에 대하여 시험온도 500~700°C 범위에서 수행하였으며, 이 때 노(爐) 온도는 ±20°C 이내로 유지하였다.

1% Cr-Mo-V강은 38개의 시험편을 준비한 후, 10대(set)의 시험기에서 응력을 59~412 MPa까지 변화시키면서 행하였는데, 전체 시험시간은 126, 482.3 시간으로 나타났으며, 여기서 최장 파단시간은 550°C에서 응력을 167 MPa로 하였을 경우이었다.

한편, 12% Cr강의 경우도 1% Cr-Mo-V과 동

Table 1 Chemical composition of 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel

1% Cr-Mo-V											
Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	No	V	Al	Cu
Wt. %	0.25	0.03	0.65	0.007	0.005	0.64	1.21	1.12	0.29	0.004	0.03

12% Cr											
Comp.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	
Wt. %	0.16	0.24	0.67	0.005	0.003	0.58	11.01	0.92	0.23	0.05	

일하게 87개의 시험편을 준비한 후, 응력을 39~490 MPa까지 변화시키면서 행하였는데, 전체 시험시간은 44,581시간으로 나타났으며, 여기서 최장 파단시간은 600°C에서 157 MPa로 하였을 경우로 나타났다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 장시간 크리프 수명 및 강도 예측

(1) 최적 TTP법에 의한 외삽

현재 널리 사용되고 있는 TTP 모델식<sup>(2,3,4)</sup>은 다음과 같다.

(가) Larson-Miller(LM)

$$P = T(C + Y) \quad (1)$$

(나) Orr-Sherby-Dorn(OSD)

$$P = Y - Q/2.303RT \quad (2)$$

(다) Manson-Haferd(MH)

$$P = (Y - Ya)/(T - Ta) \quad (3)$$

(라) Manson-Succop(MS)

$$P = Y - BT \quad (4)$$

(마) Manson-Brown(MB)

$$P = (Y - Ya)/(T - Ta)^r \quad (5)$$

$$(LM : r = -1, Ta = 0, MH : r = 1)$$

그리고, TTP를 대수응력의 직교다항식<sup>(2)</sup>으로 회귀하면 다음과 같다.

$$TTP(Y, T) = B_0A_0(X) + B_1A_1(X) + \dots + B_kA_k(X) \quad (6)$$

여기서, P는 파라미터, C, Q, Ya, Ta, B, r, A는 파라미터 고유의 정수이며, R은 가스상수(1.986cal/mol·K)이다. 또한, Y=log(tr), T=t+273.15, X=log(σ), k=차수이고, tr은 파단시간(hr), t는 시험온도(°C), σ는 크리프응력(MPa)을 나타낸다.

각 파라미터의 최적정수는 横井,<sup>(2)</sup> 藤田利夫<sup>(3)</sup>의 보고에 따라 Y의 실험치(Yi)와 추정치(Yi-hat)의 잔차 평방제곱의 합이 최소가 되도록 하였으며, 최적인 차수(degree)의 결정은 위험율 5%의 F검정<sup>(9)</sup>에 의하여 식(6)의 k를 0에서 5까지 증가시켜, 각 단계에서 분산분석을 하여 유의(significance)로 되는 최고 차수로 하였다. 한편, 실험에 의한 파단시간과 식(6)의 회귀곡선(regression curve)에 의한 추정치와의 차이값 즉, 표준오차(standard error,

SEE)는 다음과 같다.<sup>(3)</sup>

$$SEE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 / (n - k - 1 - N_p)} \quad (7)$$

여기서, n=데이터의 수, Np=TTP 중에 포함된 정수의 개수(LMP, OSD, MSP: Np=1, MHP: Np=2)이다.

1% Cr-Mo-V강 및 12% Cr강에 대한 TTP적용 결과는 Table 2와 같고, SEE가 최소일 때의 차수 및 그 값을 동시에 나타내었다. SEE값이 1% Cr-Mo-V강의 경우 0.1~0.3, 12% Cr강의 경우 0.1~0.2로 나타나서 실용상 충분한 정도를 가졌으며, 양강종 모두 LMP가 잘 적용되는 것으로 나타났다. 한편, 파라미터의 외삽성(predictability)에 대한 유효성 척도로서 RMS(root mean squares)는<sup>(3)</sup>

$$RMS = \sqrt{\sum_{j=1}^{n_L} (Y_j - \hat{Y}_j)^2 / (n_L - 1)} \quad (8)$$

이며, 여기서, nL=장시간 파단 데이터의 수이다.

**Table 2** Results of optimized parameter constants and regression analysis for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel

TTP Method	Material	1% Cr-Mo-V	12% Cr
	Data Size	38	87
LMP	Degree	3	4
	C	20.523	21.156
	SEE	0.1761	0.1363
OSDP	Degree	2	5
	Q	106913	98875
	SEE	0.2068	0.1448
MHP	Degree	5	4
	Ta	682.5	210.0
	Ya	8.089	21.255
	SEE	0.2320	0.1999
MSP	Degree	3	4
	B	0.0328	0.0282
	SEE	0.2618	0.1517

**Table 3** Results of actual rupture time and extrapolation for the stress rupture data less than  $10^3$ hrs of 1% Cr-Mo-V steel

TTP Method	SEE	RMS	Extrapolated $\log_{10}$ (rupture time)				
			550°C 167MPa	550°C 225Mpa	550°C 245Mpa	600°C 147MPa	600°C 175MPa
[Actual $\log_{10}$ (rupture time)] →			4.3142	3.9296	3.4778	3.3600	3.1361
LMP-4, opt	0.1539	0.2520	4.5757	3.5941	3.1654	3.5896	3.0994
OSDP-2, opt	0.1875	0.2790	4.7690	3.7991	3.3560	3.6685	3.1757
MHP-5, opt	0.2489	0.1322	4.4920	3.8158	3.4193	3.5481	3.1763
MSP-4, opt	0.2135	0.4490	5.0186	3.8393	3.3434	3.9828	3.3817
Average	0.2010	0.2781	4.7138	3.7620	3.3210	3.6973	3.2083
Std. dev.	0.0399	0.1305	0.2346	0.1165	0.1099	0.1956	0.1202
Minimum	0.1539	0.1322	4.4920	3.5941	3.1654	3.5481	3.0994
Maximum	0.2489	0.4490	5.0186	3.8393	3.4193	3.9828	3.3817

**Table 4** Results of actual rupture time and extrapolation for the stress rupture data less than  $10^3$ hrs of 12% Cr steel

TTP Method	SEE	RMS	Extrapolated $\log_{10}$ (rupture time)				
			570°C 255MPa	600°C 157Mpa	600°C 186Mpa	620°C 137MPa	620°C 157MPa
[Actual $\log_{10}$ (rupture time)] →			3.0746	3.5316	3.2940	3.4390	3.0461
LMP-4, opt	0.1368	0.1535	2.9043	3.6144	3.1354	3.4104	3.0597
OSDP-4, opt	0.1473	0.1238	2.9662	3.6049	3.1544	3.3805	3.0505
MHP-5, opt	0.1470	0.1195	2.9637	3.6477	3.1854	3.4568	3.1167
MSP-4, opt	0.1536	0.1428	2.9553	3.7450	3.2446	3.5474	3.1810
Average	0.1462	0.1349	2.9474	3.6530	3.18000	3.4488	3.1020
Std. dev.	0.0062	0.0160	0.0255	0.0640	0.0431	0.0713	0.0585
Minimum	0.1368	0.1195	2.9043	3.6049	3.1354	3.3805	3.0505
Maximum	0.1536	0.1535	2.9662	3.7450	3.2446	3.5474	3.1810

본 시험에서  $10^3$ 시간 이하의 비교적 단시간 수명 데이터만을 이용하여 외삽(extrapolation)한 결과의 실측치를 동시에 나타낸 것이 Table 3 및 Table 4이다. 양 강종 모두 RMS가 최소인 파라미터는 MHP(manson-haferd parameter)인 것으로 나타났으며, MSP(manson-succop parameter)가

대체로 높게 나타났다. 양강종에 대하여 각 파라미터의 RMS가 최소인 경우를 실제 실험 데이터와 비교한 것이 Fig. 2 및 Fig. 3으로서 1% Cr-Mo-V 강종 경우는 저응력부 장시간 영역에서 수명의 급격한 단축이 예측되고, 12% Cr강에서는 파라미터에 의한 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

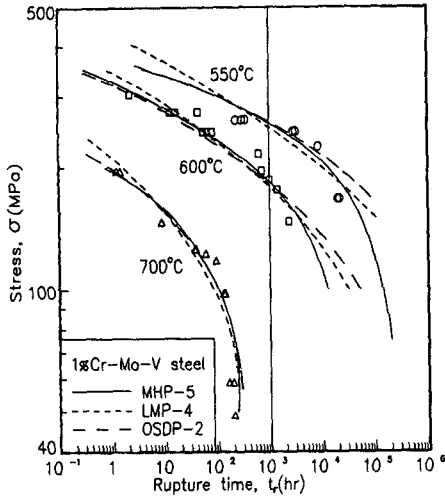


Fig. 2 Comparison of data with predicted curves by MHP, LMP and OSDP for 1% Cr-Mo-V steel

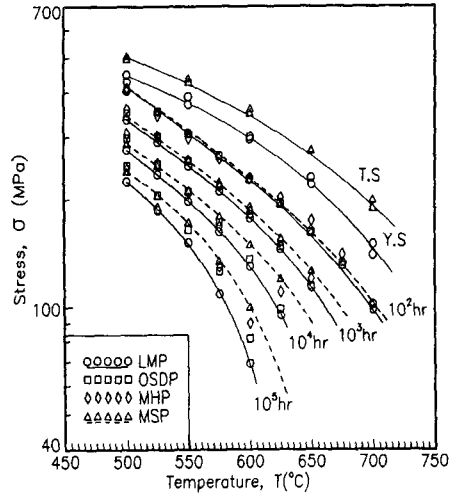


Fig. 4 Temperature dependence of creep rupture strength for 1% Cr-Mo-V steel(T.S : tensile strength, Y.S : yield strength)

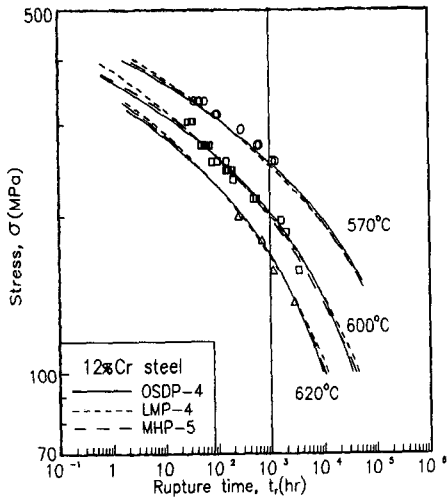


Fig. 3 Comparison of data with predicted curves by OSDP, LMP and MHP for 12% Cr steel

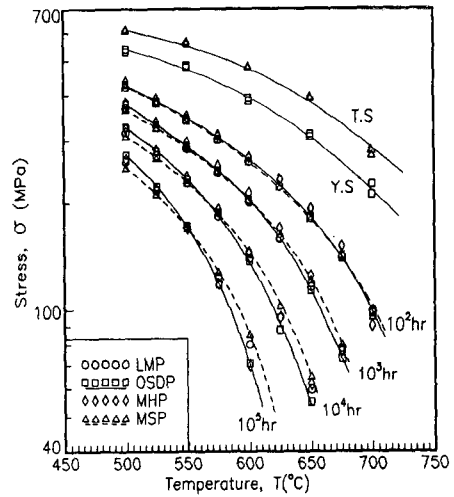


Fig. 5 Temperature dependence of creep rupture strength for 12% Cr steel(T.S : tensile strength, Y.S : yield strength)

각 파라미터에 의한  $10^2 \sim 10^5$ 시간 크리프 파단강도(rupture strength) 및 인장강도(T.S), 항복강도(Y.S)를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었는데, 1% Cr-Mo-V강에서는 LMP(Larson-Miller parameter)가 최저 강도값, MSP가 최고값을 나타내었다. 한편, 12% Cr강의 경우는  $550^\circ\text{C}$  이상에서는 OSDP(Orr-Sherby-Dorn parameter)가 최저, MSP가 대

체로 최고 강도값을 나타내었으며,  $550^\circ\text{C}$  이하에서는 역으로 나타났다.

(2) MCM법에 의한 외삽

재료의 허용 설계응력의 설정, 즉 신뢰성 공학적 입장에서 보다 객관적인 평가를 행하기 위해서 컴퓨터에 의한 중회귀(multiple regression) 분석법으로서 Manson<sup>(5)</sup>등에 의한 MCM(minimum com-

mitment method)은 다음과 같다.

$$Y + AR(T)Y + P(T) = G(\sigma) \quad (9)$$

여기서,  $Y = \log(t_r)$ ,  $A =$  재료의 안정성계수,  $P(T)$  = 온도함수,  $G(\sigma)$  = 응력함수이다.

식(9)는 TTP법의 광범위한 일반성을 가지는 것으로서  $LM : A > 0$ ,  $OSD$  및  $MS : A = 0$ ,  $MH : A < 0$ 인 것으로 결정된다. MCM의 특징은  $P(T)$  및  $G(\sigma)$ 를 특정의 온도 및 응력의 조합, 즉 스테이션 함수(station function)으로서 컴퓨터 없이는 해석이 거의 불가능하다. 식(9)에서

$$A = A_o[1 - A_k((T - T_m)/T_m)^2] \quad (10)$$

$$P = R_1(T - T_m) + R_2(1/T - 1/T_m) \quad (11)$$

$$G = B + C \log \sigma + D\sigma + F\sigma^2 \quad (12)$$

으로 정의되며,  $T_m$ 은 실험온도의 중간값이고, 계수  $R_1, R_2, B, C, D, F$ 를 결정하면 된다. 본 재료의 경우 Manson<sup>(5)</sup> 등의 보고에 따라  $A_o = -0.05$ ,  $A_k = 30$ 으로 해서 양강종에 대하여 컴퓨터 프로그램에 의하여 구한 결과는 다음과 같다.

1% Cr-Mo-V :  $R_1 = -5.643 \times 10^{-2}$ ,  
 $R_2 = -6.690 \times 10^4$ ,  
 $B = 0.1273$ ,  
 $C = 3.8809$ ,  
 $D = -3.032 \times 10^{-2}$ ,  
 $F = 1.000 \times 10^{-5}$

12% Cr :  $R_1 = 2.901 \times 10^{-2}$ ,  
 $R_2 = -4.620 \times 10^4$ ,  
 $B = 11.4048$ ,  
 $C = -4.1951$ ,  
 $D = 1.441 \times 10^{-2}$ ,  
 $F = -4.307 \times 10^{-5}$

(3) 초기 변형률법(ISM)에 의한 외삽

재료의 크리프 특성은 고온 응력에서 장시간 가열에 의해 조직변화, 즉, 탄화물의 석출·응집, 서브그레인(subgrain)의 형성 및 기공(cavity) 발생 등에 의해 많이 좌우된다. TTP는 반응속도 이론에 기준한 조직변화의 매크로(macro)적인 입장에서 유도되었다.<sup>(2,3,4)</sup> Hitzel 등<sup>(10)</sup>에 의하면 OSDP의 정수  $Q$ 는 크리프 활성화에너지(creep activation energy), 즉 자기확산 활성화에너지와 동일하다고 하였다. 따라서, 크리프 변형 및 파괴 과정이 일정한 활성화에너지를 가지는 단일 과정이라고 보면 크리프 파단시간( $t_r$ )과 크리프 속도( $\dot{\epsilon}_s$ ) 사이에

는 광범위한 재료에 대하여 다음과 같음이 Monkman과 Grant<sup>(11)</sup>에 의해 보고 되었다.

$$(\dot{\epsilon}_s)^m t_r = K \quad (13)$$

여기서,  $m$  및  $K$ 는 재료 정수이며, 양 강종에 대한  $\dot{\epsilon}_s - t_r$  관계를 Fig. 6, Fig. 7에 나타내었다. 그리고, Norton<sup>(12)</sup> 등에 의한 정상 크리프 속도식( $\dot{\epsilon}_s = B\sigma^n$ )의 온도에 따른 탄성계수를 고려한 식은

$$\dot{\epsilon}_s = C(\sigma/E)^n \quad (14)$$

이며, 여기서,  $C, n$ 은 실험온도에서의 재료정수이다.

그리고, 크리프 초기의 탄소성 순간변형, 즉 초기 변형률( $\epsilon_o$ )과  $\sigma$ 사이에는 대수 그래프 상에서 대

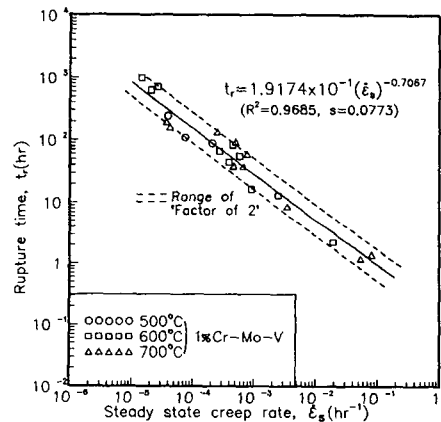


Fig. 6 Monkman-Grant relation for 1% Cr-Mo-V steel ( $R^2$ : coefficient of determination,  $s$ : standard deviation)

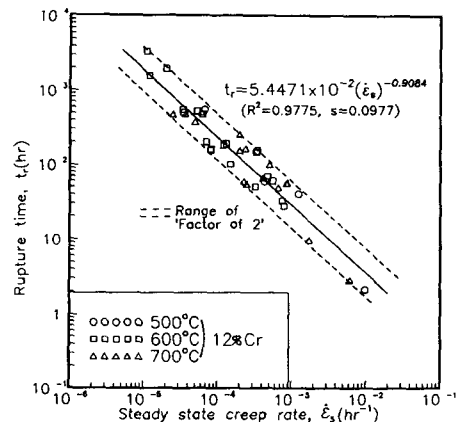


Fig. 7 Monkman-Grant relation for 12% Cr steel

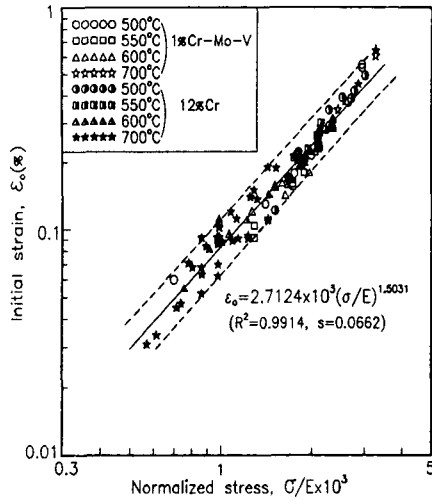


Fig. 8 Initial strain( $\epsilon_0$ ) measured with 12% Cr and 1% Cr-Mo-V steel

부분의 고온 재료에서 선형 관계가 잘 성립됨은 Oh<sup>(6,7)</sup> 등 및 Jeong<sup>(13)</sup>에 의해서 보고된 바 있다. 여기서,  $\epsilon_0$ 에 미치는 온도 및 재료의 영향을 줄이기 위하여  $E$ 로 무차원화(normalized)된  $\sigma/E$ 와  $\epsilon_0$ 의 관계를 도식해 본 결과를 Fig. 8에 나타난 것처럼 양 강종이 동일한 식선상에 군집하는 형태를 취하고 있음을 알 수 있으며, Maruyama<sup>(14)</sup> 등도  $\sigma$

와  $\epsilon_0$ 는 상관관계가 있음을 보고한 바 있으나, 온도변화를 고려한  $\epsilon_0-t_r$ 의 정량적인 상관 관계식의 도출과정은 다음과 같다.

$$\epsilon_0 = d(\sigma/E)^e \tag{15}$$

여기서,  $d, e$ 는 재료정수이며, 식(14)와 (15)에서  $\epsilon_0 - \dot{\epsilon}_s$  관계식은

$$\epsilon_0 = d(\dot{\epsilon}_s/C)^{e/n} \tag{16}$$

여기서,  $d, e, n, C$ 는 재료정수이다.

한편, 식(13), (16)에서  $\epsilon_0 - t_r$  관계식은 다음과 같다.

$$\epsilon_0 = d \left( \frac{K}{C^m \cdot t_r} \right)^{e/mn} \tag{17}$$

$10^2 \sim 10^5$ 시간 파단강도를 구하기 위해서 식(17)에 의해 각 온도 및 파단시간에서  $\epsilon_0$ 를 구하고, Fig. 1에서  $E$ 를 구한 후, 식(15)로써  $\sigma$ 를 구한 결과는 Table 5와 같다.

그리고, Table 5의 각 온도변화(500~700°C)에 따른  $\epsilon_0 - t_r$  및  $\epsilon_0 - \sigma$  관계로부터  $\epsilon_0 - t_r - \sigma$  상관 관계식은 온도항을 포함하여 다음과 같이 모델화되었다.

$$\frac{t_r}{\sigma} = a(\epsilon_0)^b \tag{18}$$

Table 5 Rupture strength data calculated from the results of ISM for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel

Temp. (°C)	Material											
	1% Cr-Mo-V						12% Cr					
	E (MPa)	C	n	tr (hr)	$\epsilon_0$ (%)	$\sigma$ (MPa)	E (MPa)	C	n	tr (hr)	$\epsilon_0$ (%)	$\sigma$ (MPa)
500	1.4014E5	6.7639E34	15.2371	10 <sup>2</sup>	0.415	405.8	1.6268E5	4.5223E38	16.2138	10 <sup>2</sup>	0.329	403.3
				10 <sup>3</sup>	0.301	327.7				10 <sup>3</sup>	0.260	344.9
				10 <sup>4</sup>	0.218	264.6				10 <sup>4</sup>	0.205	295.0
				10 <sup>5</sup>	0.158	213.7				10 <sup>5</sup>	0.162	252.3
600	1.1662E5	1.5407E21	9.3421	10 <sup>2</sup>	0.255	235.2	1.2936E5	1.9472E14	6.6716	10 <sup>2</sup>	0.254	270.0
				10 <sup>3</sup>	0.151	165.6				10 <sup>3</sup>	0.143	184.7
				10 <sup>4</sup>	0.089	116.6				10 <sup>4</sup>	0.081	126.3
				10 <sup>5</sup>	0.053	82.1				10 <sup>5</sup>	0.046	86.4
700	6.0074E4	4.2038E12	5.7618	10 <sup>2</sup>	0.137	83.3	6.8580E4	8.0711E05	3.3454	10 <sup>2</sup>	0.146	86.4
				10 <sup>3</sup>	0.059	47.5				10 <sup>3</sup>	0.047	46.6

1% Cr-Mo-V :

$$\alpha = \frac{(1.833 - 6.543 \times 10^{-3}t + 6.499 \times 10^{-6}t^2)}{(-574.3 + 5.942t - 6.677 \times 10^{-3}t^2)}$$

$$\beta = (-38.1 + 8.804 \times 10^{-2}t - 5.495 \times 10^{-5}t^2) \quad (19)$$

12% Cr :

$$\alpha = \frac{(16.54 - 6.387 \times 10^{-2}t + 6.157 \times 10^{-5}t^2)}{(-576.6 + 6.589t - 7.506 \times 10^{-3}t^2)}$$

$$\beta = (-94.2 + 2.599 \times 10^{-1}t - 1.844 \times 10^{-4}t^2) \quad (20)$$

여기서,  $t$ 는 시험온도(°C)이며,  $\alpha, \beta$ 는  $t$ 의 2차함수로 표시 가능하였다.

### 4. 고찰

MCM(minimum commitment method) 및 ISM(initial strain method)에 의한  $10^2 \sim 10^5$ 시간 크리프 강도를 앞에서 언급한 TTP(time temperature parameter)와 비교한 것이 Fig. 9 및 Fig. 10인데, 1% Cr-Mo-V강의 경우 MCM은  $10^3$ 시간까지는 TTP결과와 거의 유사하나,  $10^4$ 시간 이상에서의 크리프 강도값은 TTP의 최저 강도값보다 10~15% 낮은 것을 알 수 있다. 또한, 12% Cr강의 경우에도  $10^3$ 시간까지는 TTP결과와 비슷하나,  $10^4$ 시간 이상의 강도값은 TTP의 최저값보다 15~25%정도 낮게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 MCM에서는 크리프에 따른 재료의 안정계수(A)를 고려한 때문으로 사료된다.

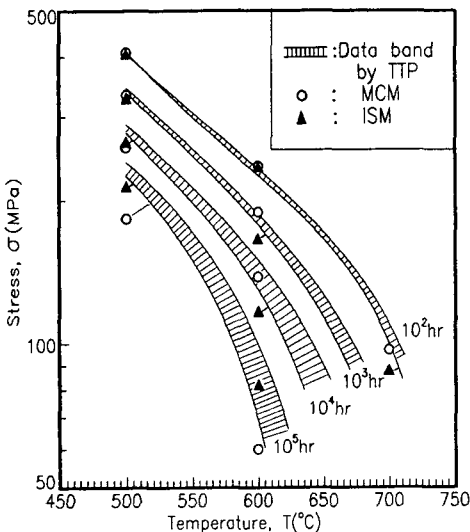


Fig. 9 Creep rupture strength comparison by TTP, MCM and ISM for 1% Cr-Mo-V steel

그리고, ISM에 의한  $10^2$ 시간 크리프 강도값은 TTP 및 MCM과 거의 비슷하였으며,  $10^3 \sim 10^4$ 시간에서는 TTP 데이터의 하부밴드(lower band)보다 최대 5%정도 낮은 강도값을 보였다. 한편,  $10^5$ 시간 파단강도는 TTP의 하부밴드와 대체로 비슷하게 나타났다.

그리고, Fig. 11은 양 강종에 대하여 식(18)에 의한 파단수명( $t_r$ )과 실제 수명( $t_r$ )을 비교한 것으로서 잘 일치함을 알 수 있다.

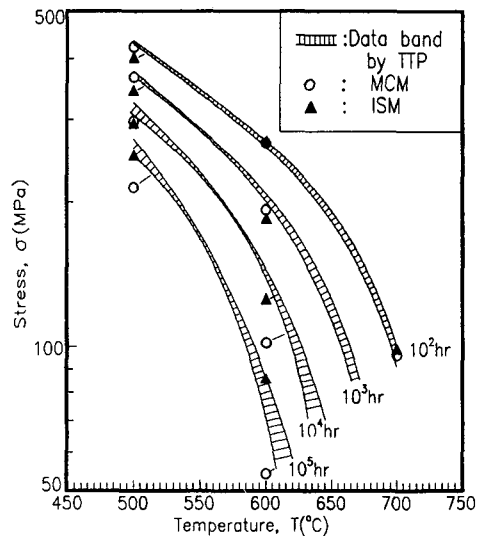


Fig. 10 Creep rupture strength comparison by TTP, MCM and ISM for 12% Cr steel

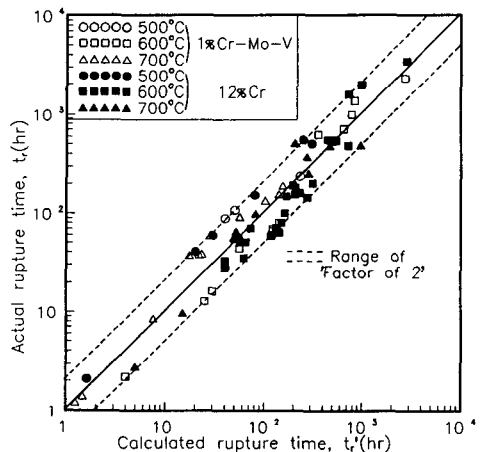


Fig. 11 Comparison of actual rupture time( $t_r$ ) and calculated rupture time( $t_r'$ ) by ISM for 1% Cr-Mo-V and 12% Cr steel



이상을 종합하여 ISM에 의한 크리프 파단 강도 값은 TTP에 의한 데이터 밴드(data band) 및 신뢰성 공학적 측면에서의 크리프 안전계수를 고려할 때 단시간은 물론 장시간( $10^5$ 시간) 크리프 설계 데이터로 활용가능함을 알 수 있으며, 또한 이 방법은 사용 온도( $t$ )에서 초기변형률( $\epsilon_0$ ) 및 응력( $\sigma$ )의 측정으로 크리프 수명( $t_r$ )을 초기에 예측할 수 있으므로 기존의 방법(TTP 및 MCM) 보다 훨씬 유리하며 간편함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

화력발전용 고압 로터강(1% Cr-Mo-V, 12% Cr)에 대한 장시간 크리프 수명 및 강도예측 결과는 다음과 같다.

(1) 최적 TTP법에 의한 크리프 수명 예측 결과로서 표준오차(SEE)가 최저인 파라미터는 양강종 모두 LMP로 나타났으며,  $10^3$ 시간 이하 데이터만에 의한 장시간 수명예측 결과로서는 RMS가 최저인 것은 MHP로 나타났다.

(2) TTP법에 의한  $10^6$ 시간 크리프 강도를 예측한 결과 1% Cr-Mo-V강에서는 전체 온도 구간에서 LMP 및 MSP가 각각 최저, 최고 강도값을 보였다. 한편, 12% Cr강의 경우는  $550^\circ\text{C}$  이상에서는 OSDP가 최저, MSP가 최고강도값을 나타냈으며,  $550^\circ\text{C}$  이하에서는 역으로 나타났다. MCM법에 의한 크리프 강도값은 양 강종 모두  $10^3$ 시간까지는 TTP의 결과와 유사하나 그 이상에서는 10~25%정도 낮게 나타났다.

(3) ISM에 의한 크리프 강도는 TTP의 하부밴드(lower band)보다 최대 5%정도 낮게 나타났으며,  $10^5$ 시간 파단강도는 TTP의 하부밴드와 비슷하여 안전성 관점에서 ISM식은 장시간 크리프 강도 및 수명 예측식으로 사용 가능함을 입증하였다.

### 참고문헌

(1) 横井 信, 池田定雄, 伊藤 弘, 馬場榮次, 1979, "金属材料技術研究所におけるクリープデータシート作成の現状," 鐵と鋼, 第14號, pp. 94~105.  
 (2) 横井 信, 門馬義雄, 1979, "長時間クリープ破断強さの推定," 鐵と鋼, 第7號, pp. 109~120.  
 (3) 藤田利夫, 門馬義雄, 1984, "クリープ破断強度

外挿法の精度と標準化," 鐵と鋼, 第3號, pp. 29~37.

(4) Araki, Toru, 1979, "Data Sheets on the Elevated-Temperature Properties of 1Cr-1Mo-0.25V Steel Forgings for Turbine Rotors and Shafts (ASTM A470-8)," NRIM Creep Data Sheet, No. 9A, pp. 1~14.

(5) Manson, S.S. and Ensign, C.R., 1971, "Interpolation and Extrapolation of Creep Rupture Data by the Minimum Commitment Method-Part I Focal-Point Convergence," pp. 299~398.

(6) Oh, S.K., 1982, "Studies on Strength Analysis of Friction Welded Joints and In-Process Monitoring of the Welding Using Acoustic Emission Techniques," Ph. D. Thesis, Keio University, Japan, pp. 85~146, 302.

(7) Oh, S.K., Kunio, T. and Hasui, A., 1986, "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.

(8) Briggs, J.Z. and Parker, T.D., 1965, "The Super 12% Cr Steel," Climax Molybdenum Company, pp. 50~55.

(9) 김우철, 1991, "통계학개론," 영지문화사, pp. 262~270.

(10) Hitzel, L.C. and Sherby, O.D., 1968, "Time-Temperature Parameters for Creep-Rupture Analysis," ASM Pub. No. D8-100, pp. 115.

(11) Monkman, F.C. and Grant, N.J., 1956, "Proc. ASTM," Vol. 56, pp. 600~602.

(12) Norton, F.H., 1929, "The Creep of Steel at High Temperature," McGraw-Hill, New York, pp. 67.

(13) 정순억, 1987, "SUS 303와 SCM4의 마찰용접 및 용접부의 고온 크리이프 특성에 관한 연구," 석사학위논문, pp. 1~38.

(14) Maruyama, K., Tamaka, C. and Oikawa, H., 1990, "Long-Term Creep Curve Prediction Based on the Modified  $\theta$  Projection Concept," ASME, pp. 92~97.