

● 論 文

발전용 고온 배관재료 2.25Cr1Mo 강의 크리프 특성과 LMP에 의한 크리프 수명의 예측

이 상 국* · 정 민 화* · 오 세 규** · 송 정 근***

(98년 3월 27일 접수)

Creep Property Assessment and Creep Life Estimation for High-Temperature Tube Material(2.25Cr1Mo Steel) in Power Plants by LMP

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

Key Words : Creep Properties(크리프 특성), Creep Life Estimation(크리프 수명예측), Creep Stress(크리프 응력), Rupture Time(파단시간), LMP(Larson-Miller Parameter)

Abstract

In this report, the creep properties and creep life estimation by Larson-Miller Parameter(LMP) Method for 2.25Cr1Mo steel to be used as power plant tubes or other components were presented at the high temperatures of 500, 550, and 600°C. It was confirmed experimentally and quantitatively that a creep life estimation equation at such various high temperatures was well derived by LMP and could be used very effectively within the creep life of 10^3 hours, but very unreliable and even dangerous for design in a long term of creep life such as 10^4 or 10^5 hours.

1. 서 론

화력발전소의 가동효율 증가추세와 가동, 정지횟수 증가에 의한 과도운전 조건으로, 고온, 고압 설비부재의 열화도가 가속화되고 있음에 따라 이들 구조재료의 고온 크리프 특성, 크리프 수명예측 및 경년 열화 손상의 비파괴적 검출과 잔여수명 측정법의 확립이 시급한 실정이며, 이에 관한 연구도 활발하다^{1~8)}.

경년열화 손상의 형태로는 탄화물 등의 석출과 조대화, 석출물 주위의 공공(空孔)의 발생 및 그에 따른 경화 등 기계적 성질의 변화 등이 알려져 있다. 특히 고온, 고압설비 중 보일러 고온배관은 주로 고온, 고압증기에 의한 크리프, 크리프-피로, 열피로 등에 의해 재질 열화가 되고 있는 실정이며, 이들에 관한 연구가 절실하다.

본 연구에서는 발전소 고온배관 재료(1Cr0.5Mo,

* 정회원, 한국전력연구원

** 정회원, 부경대학교 공과대학 기계·자동차 공학부

*** 정회원, 부경대학교 대학원 기계공학과

2.25Cr1Mo, SB42)의 크리프 손상 특성평가를 위하여 2.25Cr1Mo강의 고온(500℃, 550℃, 600℃) 크리프 특성으로서 크리프 응력과 정상 크리프 속도, 정상 크리프 속도와 초기연신률, 초기연신률과 총 크리프속도, 크리프 응력과 크리프 수명 등의 상관성 조사를 수행하였으며, 일반적으로 현재 널리 쓰이고 있는 Larson-Miller Parameter(LMP)⁹⁾에 의하여 크리프 수명에측식을 도출하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편과 실험 기기

본 실험에 사용된 재료는 S사에서 제작한 것으로서 화력발전소의 고온 배관과 관헤드 및 열교환기 등에 쓰이는 Cr-Mo강(2.25%Cr1% Mo)(ASTM A182-F22 Grade)이다. 사용재료의 화학적성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 그리고 사용된 시험편 형상은 Fig. 1과 같고, 시험기는 미국 SATEC사의 DLP-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.	σ_t (MPa)	σ_y (MPa)	ϵ (%)	H _B	H.T.
2.25Cr1Mo	650	535	24.0	197	*N, T

σ_t : Tensile strength, σ_y : Yield strength,
 ϵ : Elongation, H_B : Brinell hardness,
 H.T. : Heat treatment
 *N, T : 920℃ Normalizing → 620℃ Tempering

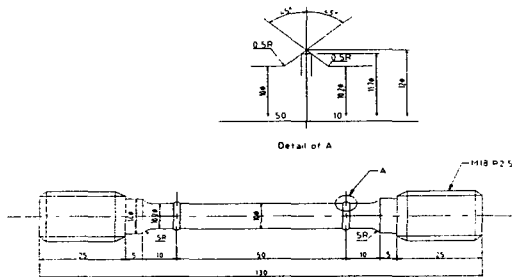


Fig. 1 Shape and dimension of creep specimen (ASTM E139-83)

2.2 실험방법

온도 측정은 K형 열전대를 사용하였고, 시험편의 가열공정은 시험편에 부하를 주지 않은 무부하 상태에서 설정온도까지 10℃/min로 가열하였다. 그리고 부하 전에 노의 온도분포가 균일하게 유지되도록 설정온도에서 30분간 지속시킨 후 하중을 작용시켜 실험중 온도를 일정온도에서 ±1℃ 범위 이내로 유지하면서 실험을 수행하였다. 또한 크리프 시험중 발생하는 연신을 측정하기 위하여 표점거리 50mm되는 양단의 플랜지를 기준으로 하였고 LVDT(linear variable displacement transformer)로써 측정하였으며, 제어반에 부착된 레코더로 기록하여 이들로부터 크리프 곡선을 작성하였고, 초기연신률(initial strain)은 하중을 가한 후 1분이 될 때 측정된 것으로 통일하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 크리프 곡선

일정온도(500, 550, 600℃) 하에서 응력을 변화시켰을 때 실험적으로 구한 2.25Cr1Mo강의 대표적 크리프 곡선은 각각 Fig. 2 (a), (b), (c)에 나타내었다. 각각의 경우에 초기연신률(initial strain, IS)도 측정하여 표시하였다. 그림에서 초기연신률의 증가는 응력, 파단수명 및 온도에 민감하게 상관성이 있음을 알 수 있고, 여러 크리프 특성과도 상관성이 있음을 정량적으로 조사하고자 한다.

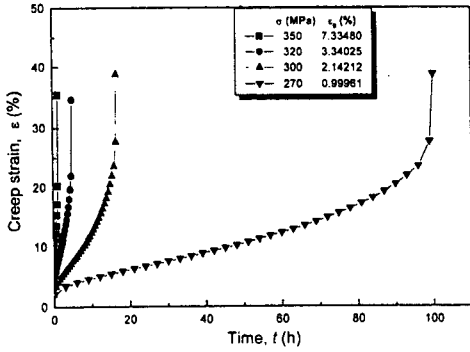
Table 3은 Fig.2 (a), (b), (c)의 크리프 실험 데이터를 정리한 것으로서, 온도 500, 550, 600℃에서 응력(σ , MPa), 파단시간(t_r , h), 초기연신률(ϵ_0 , %), 총크리프속도($\dot{\epsilon}_T$, %/h), 정상 크리프 속도($\dot{\epsilon}$, %/h), 총연신률(ϵ_T , %)을 나타내고 있다.

3.2 크리프 응력과 정상 크리프 속도와의 상관성

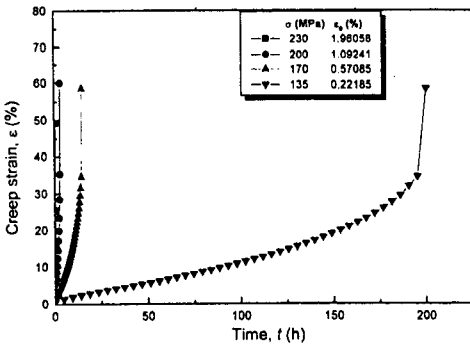
Fig. 3은 500, 550, 600℃에서의 크리프 시험결과에서 크리프 응력 σ (MPa)와 정상 크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h)와의 상관성을 나타내는 그림이다.

양대수 직교 좌표 평면에서 정상 크리프 속도는 응력이 높아질 수록 증가하며, 온도가 상승할 수록

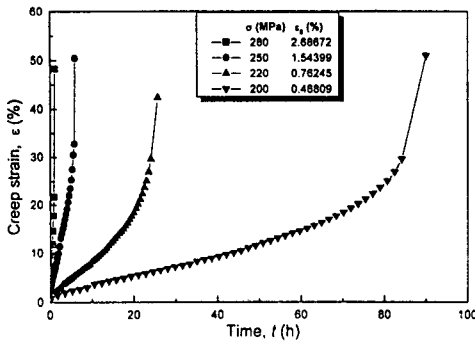
그 증가율이 높아지고 있음을 알 수 있고, 이는 Oh^{10} 의 보고와 일치한다.



(a) 500°C



(b) 550°C



(c) 600°C

Fig. 2 Creep curves for 2.25Cr1Mo steel at 500, 550, 600°C

Table 3 Data by creep test of 2.25Cr1Mo steel

Temp. (°C)	Stress σ (MPa)	Rupture time T_r (h)	Initial strain ϵ_0 (%)	Total creep rate $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)	Steady state creep rate $\dot{\epsilon}$ (%/h)	Total strain ϵ_T (%)
500	350	1.54	7.335	23.05	9.641	35.5
	320	6.48	3.340	5.34	2.683	34.6
	300	17.86	2.142	2.17	0.861	38.8
	270	10^2	0.889	0.41	0.143	41
	230	10^3	0.244	0.035	0.015	34.6
550	280	1.12	2.687	43.13	19.08	48.3
	250	4.8	1.544	10.50	4.41	50.4
	220	22.4	0.762	1.90	0.68	42.5
	200	90	0.468	0.56	0.2	51
	165	10^3	0.171	0.046	0.013	46.3
600	230	0.6	1.961	82	35.57	49.2
	200	2.65	1.092	22.63	7.65	60
	170	15.4	0.571	3.80	1.77	58.5
	135	200	0.222	0.38	0.172	60

σ - $\dot{\epsilon}$ 의 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

$$500^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.061 \log \dot{\epsilon} + 2.482, (R^2=1) \quad (1)$$

$$550^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.073 \log \dot{\epsilon} + 2.353, (R^2=1) \quad (2)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \sigma = 0.091 \log \dot{\epsilon} + 2.218, (R^2=1) \quad (3)$$

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

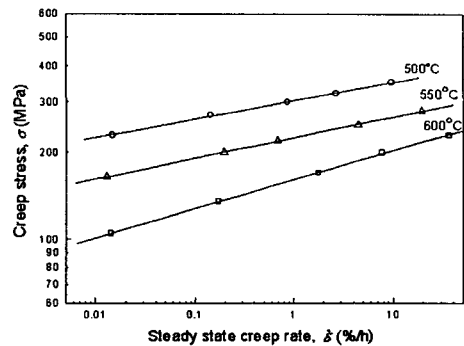


Fig. 3 Relationship of stress versus steady state creep rate of 2.25Cr1Mo steels at 500, 550 and 600°C.

3.3 초기연신률과 정상 크리프 속도 및 총크리프 속도와의 상관성

Fig. 4와 Fig. 5는 크리프 초기연신률 ϵ_0 (%)와

정상 크리프 속도 $\dot{\epsilon}$ (%/h) 및 총크리프 속도 $\dot{\epsilon}_T$ (%/h)와의 상관성을 500, 550, 600°C에서 각각 구한 실험 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 초기연신률은 정상 크리프 속도 및 총크리프 속도가 상승할수록 증가하며, 그 증가율도 온도가 상승할수록 더욱 높아진다. 이는 Oh의 보고^{7,11)}와 매우 일치한다. 그 정량적 상관관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

$$500^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon} = 1.924 \log \epsilon_0 - 0.654, (R^2 = 0.98) \quad (4)$$

$$550^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon} = 2.649 \log \epsilon_0 + 0.144, (R^2 = 1.0) \quad (5)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon} = 2.429 \log \epsilon_0 + 0.824, (R^2 = 0.99) \quad (6)$$

$$500^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon}_T = 1.913 \log \epsilon_0 - 0.288, (R^2 = 1.0) \quad (7)$$

$$550^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon}_T = 2.476 \log \epsilon_0 + 0.565, (R^2 = 1.0) \quad (8)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \dot{\epsilon}_T = 2.494 \log \epsilon_0 + 1.210, (R^2 = 1.0) \quad (9)$$

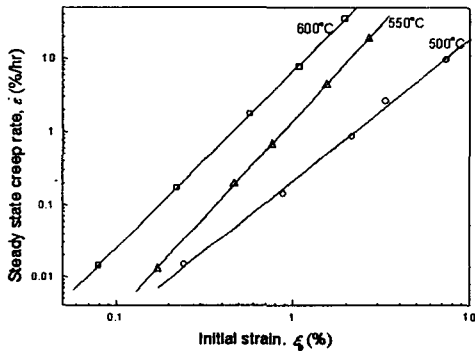


Fig. 4 Relationship of steady state creep rate versus initial strain of 2.25Cr1Mo steel at 500, 550 and 600°C

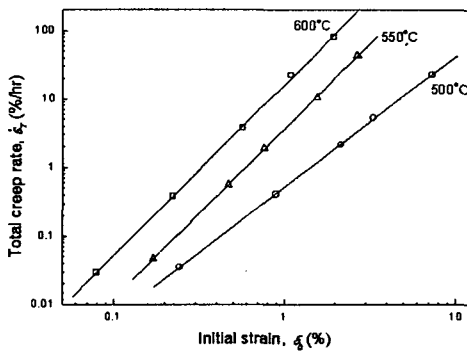


Fig. 5 Relationship of total creep rate versus initial strain of 2.25Cr1Mo steel at 500, 550 and 600°C

식(4)~(9)에서 초기연신률을 크리프 초기순간에 측정하면 장기간의 크리프특성을 정량적으로 예측할 수 있음을 보여준다.

3.4 크리프 응력과 크리프 수명과의 상관성

Fig. 6은 500, 550, 600°C에서의 크리프 응력 σ (MPa)와 크리프 수명(파단시간) t_r (h)과의 상관성을 나타내는 실험결과로서, 크리프 설계 곡선 (creep design curve)이다. 그림에서 크리프 수명은 응력이 증가할수록 감소하며, 온도가 상승할수록 그 감소율이 더욱 심각함을 알 수 있으며, 이는 Oh 등의 보고^{10, 11)}와 유사하다. 이들의 정량적 상관 관계 실험식은 다음과 같이 계산된다.

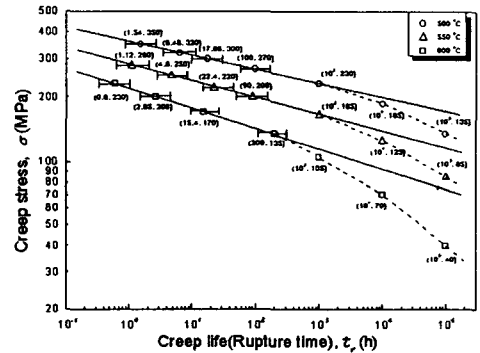


Fig. 6 Creep stress vs. creep life(rupture time) for 2.25Cr1Mo steel at 500, 550 and 600°C

$$500^\circ\text{C} ; \log \sigma = -6.457 \times 10^{-2} \log t_r + 2.558, (R^2 = 1.0) \quad (10)$$

$$550^\circ\text{C} ; \log \sigma = -7.761 \times 10^{-2} \log t_r + 2.451, (R^2 = 1.0) \quad (11)$$

$$600^\circ\text{C} ; \log \sigma = -9.279 \times 10^{-2} \log t_r + 2.341, (R^2 = 1.0) \quad (12)$$

식(10)~(12)는 양대수 좌표평면에서 직선으로 나타나며, 온도 500, 550, 600°C에서 응력이 결정되면 단기간 실험을 통하여 외삽에 의해 장기간의 크리프 수명을 예측할 수 있으나(10^3 h까지는 대체로 안전) 고온일수록 장기간($10^3 \sim 10^5$ h)에서는 실제 수명이 계산 예측치 보다 훨씬 단축되므로 설계상 매우 위험함을 보여주고 있다.

3.5 LMP에 의한 크리프수명의 예측

금속의 조직 변화는 일반적으로 보다 높은 고온에서는 보다 짧은 시간 안에 생기므로, 실제 요구되는 온도보다 몇 백도 높은 온도에서의 응력-파단 시간을 조사하여 이 곡선의 기울기 변화가 없다면 단시간의 데이터로 외삽에 의해 장시간 수명예측이 가능하도록 Larson-Miller 파라미터(LMP)가 다음과 같이 정의되어 있다⁹⁾.

$$LMP = T(\log t_r + C_1) \quad (13)$$

식 (13)에서 T 는 절대온도(K)이고, C_1 은 46으로 정하며, LMP는 응력($\log \sigma$)의 1차함수이므로

$$LMP = T(\log t_r + 46) = K_1 \log \sigma + K_2 \quad (14)$$

이다. 여기서 K_1 과 K_2 는 재료상수이다.

식 (14)는 온도 500, 550, 600°C에서의 $\log \sigma$ 와 LMP [$T(\log t_r + 46)$]의 그래프인 Fig.7에서 K_1 , K_2 의 값이

$K_1 = -17873.7$, $K_2 = 81078.9$ 로 계산되었으므로, LMP는 다음과 같이 된다.

$$LMP = T(\log t_r + 46) = 81078.9 - 17873.7 \log \sigma \quad (R^2 = 0.94) \quad (15)$$

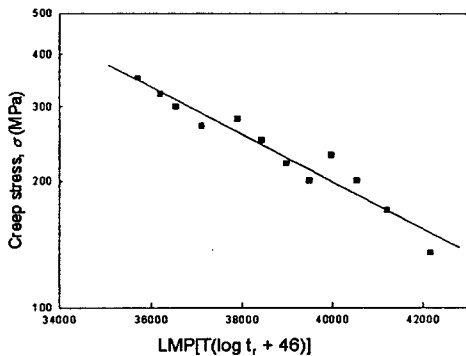


Fig. 7 Master creep curve of 2.25Cr1Mo steel at 500, 550, 600°C

Fig. 7과 식(15)는 마스터 크리프 커브(master

creep curve)와 식이지만, Fig. 6에서 알 수 있듯이 파단시간이 10^3 h까지는 외삽과 내삽에 의해 온도 600°C이하에서는 크리프 수명 예측의 신뢰성이 있으나, 10^4 , 10^5 h에서는 신뢰성이 매우 떨어지므로 장시간 예측에는 매우 위험하여 앞으로 10^4 , 10^5 h의 장시간 크리프 수명 예측법이 개발되어야 한다.

4. 결 론

화력발전소 고온 배관재료의 크리프 손상 특성 평가기술을 개발하기 위하여 2.25Cr1Mo강의 500, 550, 600°C 고온 크리프 특성을 조사하였고, LMP에 의한 크리프 수명의 예측식을 도출한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 정상 크리프 속도는 응력에 대해 양대수 좌표 평면에서 선형적이며, 응력과 온도가 상승할 수록 그 증가율이 높아진다.
- 2) 정상 크리프 속도나 총 크리프 속도 등 장시간 크리프 특성이 초기 연신률과 정량적 선형관계가 성립하여 초기 연신률에 의한 장기간 예측이 가능하다.
- 3) 크리프 수명은 응력과 온도가 상승할 수록 그 감소율이 심각하며, 수명과 응력이 양대수 좌표평면에서 10^3 h이내는 직선적이지만, 그 이상의 장시간에서는 실제 수명은 단축됨이 확인되었다.
- 4) LMP에 의한 크리프 수명예측식은 다음과 같으며, 10^3 h시간까지는 매우 유효하지만, 장기간(10^4 , 10^5 h)예측식에는 위험함이 확인되었다.

$$LMP [T(\log t_r + C_1)] = K_1 \log \sigma + K_2$$

$$C_1 = 46, K_1 = -17873.7, K_2 = 81078.9$$

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
- 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, 255-264, 1979
 - 4) Dyson, B. F. and D. McLean, "A New Method of Predicting Creep Life," Met. Sci. J., 220-223, 1972
 - 5) Cane, B. J., "Remaining Creep Life Estimation by Strain Assessment on Plant," Int. J. Pressure Vessels Piping, p. 11-30, 1982
 - 6) Cane, B., J and R. D. Townsend, "Prediction of Rremaining Life in Low-Alloy Steels," ASM Materials Science Seminar on Flow and Fracture at Elevated Temperatures, pp. 279-316, 1983
 - 7) Oh, S. K., S. J. Kim and 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, p. 275-279, 1996
 - 8) Oh, S. K., T. E. Jeon, Y. S. Song and 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, p.639-646, 1996
 - 9) Larson, F. R. and J. Miller, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, pp.756-775, 1952
 - 10) 오세규, "내열강의 마찰용접 최적화와 장시간 고온 크리프 수명의 초기 실시간 예측법 (1), (2), (3)", 대한기계학회 논문집 17권 3호, p.512-519, p.520-526, 17권 4호 p.746-754, 1993
 - 11) 오세규, 이원석, 송정근, 이상국, 정민화, "엔진 배기밸브의 내열강 이중재 마찰용접의 최적화와 고온크리프의 실시간 예측 및 AE에 의한 실시간 평가 (!), (2)", 한국해양공학회 강연논문집, p.249-254, p.281-287, 1996