고온 폐열회수장치 튜브의 크리프 파단특성 평가

김우중 · 김재훈^{*} · 장중철^{*} · 김범수^{*} · 이기천^{**}

충남대학교 기계설계공학과 · ^{*}전력연구원 · ^{**}한국기계연구원
(2012. 6. 18. 접수 / 2013. 5. 24. 채택)

Creep Rupture Life Prediction of High Temperature HRSG Tubes

Woo Joong Kim · Jae Hoon Kim^{*} · Jung Cheol Jang^{*} · Beom Soo Kim^{*} · Gi-Chun Lee^{**}

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University

^{*}Korea Electric Power Research Institute · ^{**}Reliability Assessment Center, Korea Institute of Machinery and Materials

(Received June 18, 2012 / Accepted May 24, 2013)

Abstract : The Heat Recovery Steam Generator(HRSG) is a device recycling the exhaust gas of gas turbine in combined power and chemical plants. Since service temperatures was very high, the damage of HRSG tubes intensively occurred in superheater and reheater. The aim of this paper is to determine life and hardness relationship that addresses creep-rupture test and creep-interrupt test in modified 9Cr-1Mo steel. The measured life that consists of function of hardness was found to constant tendency.

Key Words : creep rupture test, creep interrupt test, heat recovery steam generator, hardness

기호설명

C : 라스-밀러 파라미터 상수
 H_0 : 초기 경도값(HV)
LMP : 라스-밀러 파라미터
LCR : 수명 소모율(Life consumption rate)
 Ω : 변형률 가속 인자
T : 온도(°C)
 t_r : 파단 시간(hr)
 W_0 : 초기 라스폭(μm)
 W_s : 최종 라스폭(μm)

1. 서론

HRSG 설비는 국내에서 열병합 발전 및 지역 난방용 보일러의 용도로 약 50여기 정도 운행되고 있다. 국내의 복합화력 설비는 기저부하용으로 사용하는 외국과 달리 첨두부하용으로 운용되어 잦은 기동·정지를 반복한다. 정상 운전 시에는 설비의 온도와 압력이 고온 및 고압에 노출되고, 정지 시에는 상대적으로 저온 및 저압 상태에 노출된다. 정상운전 중에 발생하는 주요 손상 원인으로 크리프에 의한 변형이 발생하고 기동 및 정지 시에 발생하는 주요 손상 원인으로 저주기 피로에 의한 열화가 발생한다. 이러한 첨두부하용의 특징으로 인해 보일러 설비의 열화는 기저부하용 보다 첨두부하용에서 더 중요하게 취급된다.

EPRI의 분석 자료에 의하면 HRSG 손상의 대부분은 단열재에서 가장 많이 발생하고 다음으로 튜브와 용접 부위

에서 발생한다. 튜브의 손상은 사용 온도가 가장 높은 재열기와 과열기에서 가장 많이 발생하며 손상은 크게 과도한 열응력에 의한 과열, 부식, 피로 등에 의해 발생된다. 과도한 열응력에 의한 손상은 예측하기가 매우 어렵기 때문에 보수 유지상 주기운전시의 손상 정도와 잔류수명을 정량적으로 평가하는 것은 HRSG 설비의 산업재해를 근원적으로 예방하는데 중요한 자료가 된다.

그러나 종래의 잔류수명평가 방법은 조직의 열화정도에 따라 수명을 평가하는 열화시험(Degradation test)과 파단 시간, 응력, 온도와의 관계를 수식화한 크리프 시험 결과를 저온·저 응력으로 외삽(Extra-polation)하는 2가지 방법으로 크게 나뉜다. 전자의 방법은 시편이 파단 되지 않아도 수명을 예측할 수 있어 수명 평가 기간과 비용이 단축되는 장점이 있으나 조직의 열화도를 시험조건마다 분리하여 수명을 예측하는 것은 정량적이지 못하기 때문에 신뢰성 공학 분야와 같이 연구되어야 효과적인 수명 해석이 가능하다. 크리프 시험을 통한 수명 평가는 시험조건에 사용되는 시험 변수를 충분히 활용하고 있지만 크리프 선도와 관련된 정보를 수명평가에 활용하지 못하고 얇고 작은 보일러 튜브의 경우 크리프 시편을 제작하기 어렵다는 단점이 있다.

이 논문의 목표는 HRSG에서 사용하는 과열기 및 재열기 재료인 Modified 9Cr-1Mo(T91)의 잔존수명을 경도의 함수로 나타내어 경도 측정으로 수명예측을 효율적으로 수행하는데 있다. 이를 위해 크리프 파단 시험 및 크리프 중단 시험을 수행하고 크리프 중단 시험 전후의 경도를 측정하여 크리프 수명과 경도와의 관계를 확인하였다. 또한 크리프 파단 시험 후의 열화도를 평가하기 위해 SEM 장비를 사용하

^{*}Corresponding Author: Jae Hoon Kim, Tel : +82-42-821-6645, E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr

Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 305-764, Korea

여 파단 시편을 관찰하였고 TEM 장비를 사용하여 열화에 의한 마르텐사이트의 라스(lath)의 거동을 살펴보았다.

2. 관련 이론

2.1. 크리프 수명 평가

크리프 수명 평가 법으로 초기에 개발된 Larson- Miller parameter는 온도와 수명, 응력의 관계를 나타내고 있다. 사용이 간편하고 비교적 수명평가를 잘 예측한다는 장점으로 현재까지 가장 많이 활용되고 있으며 아래의 식으로 표현된다¹⁾.

$$LMP = T(C + \log t_r) \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서 t_r 은 파단 시간이고 C 는 상수이며 사용 재료에 따라 다양한 값을 나타낸다. 마르텐사이트 강의 열화를 관찰하는 경우 25~36을 사용하나 단시간의 수명 평가에서는 재료 상수에 따른 LMP 값에 큰 차이를 보이지 않는다고 보고 된 바 있다²⁾.

2.2. 경도와 수명 소비율

템퍼링 된 마르텐사이트 조직의 라스는 높은 전위밀도를 지니고 있으나 열화 과정 중 전위밀도가 감소하게 되고 결과적으로 라스의 폭이 증가하게 된다. 실온에서 라스 폭과 크리프 변형률이 비례관계가 됨을 밝히고 아래의 식을 제시하였다³⁾.

$$H/H_0 = 1 - 6.7[(1/\Omega) \left(\frac{W_s - W_0}{W} \right) \cdot \psi](t/t_r) \quad (2)$$

여기서 H 는 열화 후의 측정경도, H_0 는 상온에서의 초기 경도, Ω 는 크리프 곡선에서 직선의 구배(변형률 속도 가속 인자), W_s 는 최종 라스폭, W_0 는 초기 라스폭, ψ 는 크리프 변형률을 수명소모율로 나타내기 위해 도입한 값으로 다음과 같다.

$$\psi = \ln[1/(1-t/t_r)]/(t/t_r) \quad (3)$$

식 (2)는 다음과 같이 재료 상수 α 를 도입하여 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{H}{H_0} = 1 - \alpha \left(\frac{t}{t_r} \right) \quad (4)$$

3. 재료 및 시험 방법

3.1. 시험 재료

본 연구에 사용된 재료는 HRSG 고온부 소재인 마르텐사이트 강 Modified 9Cr-1Mo (T91)을 사용하였다. T91은 고온내열강으로 우수한 크리프 파단 강도, 파괴인성, 고온

Table 1. Chemical compositions of modified 9Cr-1Mo steel(wt%).

C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	V	Nb
0.1	8.59	0.39	0.43	0.007	0.96	0.21	0.07

Table 2. Mechanical properties for modified 9Cr-1Mo steel at Room temperature.

E (GPa)	σ_{YS} (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	E.L. (%)	R.A. (%)	Hardness (Hv)
202	479	653	25	73	225

Fig. 1. Geometry of the creep test specimen.

내 산화성, 열 피로 강도 특성을 갖는 재료이다. 시편의 세부적인 조성을 Table 1에 나타내었고 Table 2는 Instron 8801 (10 ton)을 사용하여 얻어진 기계적 물성을 나타내고 있다. 시험에서 사용된 시편은 Fig. 1과 같이 KS 규격에 의해 직경 5 mm, 게이지 길이 27 mm의 크리프 시편으로 제작되었다.

3.2. 시험 방법

본 크리프 시험에 사용된 장비는 AVS의 series 2320M으로 Lever-arm 형식의 장비이다. 크리프 파단 시험은 600, 650°C에서 100~200 MPa의 응력 범위에서 수행되었다.

크리프 중단 시험은 630~700°C의 온도 범위에서 35~101 MPa의 응력 범위로 진행되었다. 시험 중 일정 기간을 설정하여 시험을 중단하고 시편의 경도를 측정하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도 시험기를 500 g의 하중을 15초 동안 압입하여 5개 지점 이상을 측정한 경도의 평균값을 사용하였다.

3.3. 미세구조 분석을 위한 에칭

온도 및 시험 하중에 따른 탄화물의 거동을 보기위해 에칭을 실시하여 SEM 분석을 실시하였다. 시험에 사용된 부식액은 Vilella's Reagent으로 100 ml 에탄올, 5 ml 염산, 1 g 피크린 산으로 제작하였다.

4. 시험 결과 및 고찰

4.1. LMP와 응력과의 관계

크리프 시험에 의한 열화거동을 살펴보기 위해 크리프-파단 실험을 실시하였다. 재료 상수 $C=25$ 를 사용하였다²⁾. Table 3은 9Cr 강을 사용하여 600, 650°C에서 100~200 MPa의 응력을 선택하여 크리프-파단 실험을 실시한 결과를 나타내고 있다. Fig. 2는 응력과 파단시간을 나타내고

Table 3. Results of creep rupture and creep interrupt test.

Temp.(°C)	Stress(MPa)	Time(hr)	LMP
650	160	3.26	29,087
	140	13.01	29,642
	120	600.40	31,177
	100	1,060.12	31,405
600	200	25.04	28,284
	180	234.80	29,133
	160	1,090.14	29,715

Fig. 2. Relationship between stress and rupture time.

Fig. 3. Relationship between stress and Larson-Miller parameter.

Fig. 4. Relationship between LMP and hardness.

있고 Fig. 3은 응력과 LMP의 관계를 그래프로 나타내었다.

Fig. 4는 경도와 라스-밀러 파라미터의 관계를 나타낸 그래프이다. 그래프에 나타난 점들은 상온경도인 225 Hv 에서 일정한 분포를 보이는 것을 확인하였으나 식 (1)이 온도와 수명의 2 변수 함수이기 때문에 초기 값을 판별하는데 어려움이 있어 정량적인 수명을 나타낼 수가 없는 것으로 나타났다.

Table 4와 NIMS data sheet⁹⁾을 사용하여 수명 소비율을 계산하고 측정한 경도값을 이용하여 Fig. 5로 나타내었다. 경도의 비와 LCR은 선형 관계로 Fig. 5의 실선과 같이 나타낼 수 있다.

$$H/H_0 = 1 - 0.19109(t/t_r)$$

국내 연구결과로 9Cr-1Mo 강의 수명소모율을 장시간에서 계산하였는데 거의 동일한 $\alpha = 0.19$ 를 도출하였다³⁾.

4.3 미세조직 분석

Fig. 6은 온도에 따른 열화도의 차이를 보기 위하여 600, 650°C에서 크리프 파단 시편의 SEM 관찰 사진이다. 일반적인 9Cr 강은 석출강화 재료로 고온에서 탄화물이 고용

Table 4. Results of creep interrupt test for hardness.

Temp. (°C)	Stress (MPa)	Stop time (hr)	LMP	Hardness (Hv)	H/H_0	LCR
630	101.3	410	34,152	221.79	0.986	0.122
630	101.3	720	34,185	213.86	0.950	0.214
650	101.3	500	34,796	191.00	0.849	0.796
690	45.2	400	36,023	220.86	0.982	0.097
690	45.2	480	36,287	220.04	0.978	0.116
690	45.2	500	36,304	219.83	0.977	0.121
690	45.2	695	36,442	216.81	0.964	0.168
700	35.3	400	36,587	222.00	0.987	0.070
700	35.3	500	36,681	220.75	0.981	0.088
700	35.3	580	36,744	220.45	0.980	0.102
700	35.3	700	36,823	219.75	0.977	0.123

Fig. 5. Relationship between H/H_0 and life consumption rate.

Fig. 6. Photos of SEM for creep rupture test.

되어 열화현상을 보이고 있다. Table 3의 3열의 파단 시간과 연관지어보면 다른 파단 시간과 비교하여 매우 적은 시간 동안 시험이 진행되었는데 열화의 정도가 다른 온도보다 심한 것을 알 수 있다. 이는 시간이 진행될수록 두드러지게 나타난다. 그러나 600°C에서는 시간이 오래 진행되더라도 열화의 정도가 두드러지게 나타나지 않았다.

탄화물의 성장과 분포도를 비교해보면 온도가 높을수록 불규칙적인 분포를 보이는 것으로 관찰된다. 파단 시간의 관점에서 파단시간이 길수록 탄화물이 더 크게 성장하였다.

Fig. 7은 550°C에서 2920 hr, 600°C에서 3900 hr 동안 시험 후 시편을 채취하여 SEM을 이용하여 촬영한 사진이다. 관찰 결과 모든 시편에서 탄화물의 고용에 의한 열화가 발생하지 않았으며 분포가 균일하게 나타났다. 열화가 진행되지 않았기 때문에 재료의 수명소모가 아주 적게 일어났음을 추측할 수 있고 경도 값의 차이가 적음을 알 수 있다.

Fig. 8은 600°C와 650°C에 대한 크리프 파단 실험에 대

Fig. 7. Photos of SEM for creep interrupt test.

Fig. 8. Photos of TEM for creep at 650°C and 600°C.

한 TEM 사진이다. 온도가 증가할수록 라스 폭이 커지는 것을 알 수 있는데 라스 사이의 폭을결정하는 전위들이 고온에서 회복, 열화 등의 이유로 줄어들게 되어 라스 사이의 간격이 넓어지게 된다. 라스의 형태는 등축상의 모습이다. 동일 온도에서 하중이 증가할수록 라스폭이 증가하였으며, 동일 하중에서 온도가 증가할수록 라스폭이 증가하였다. 재료가 17000 hr 이상인 경우에는 변형량보다 온도에 더 민감한 것으로 알려져 있다⁶⁾.

5. 결론

Modified 9Cr-1Mo 강을 사용하여 크리프 파단 실험 및 크리프 중단 실험을 수행하였다. 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 크리프 파단 시험을 실시하여 9Cr-1Mo 강의 크리프 물성을 얻었다. 온도가 높을수록 파단 수명이 짧게 나타났다. 또한 LMP와 응력의 관계를 하나의 직선이 형태로 나타났다.
- 2) 크리프 중단시험을 실시하여 크리프변형에 따른 경도변화를 크리프 수명소비율의 함수로 표현하였다. 사용재의 경도가 측정되면 크리프 수명은 9Cr-1Mo 강의 경우 다음 식으로 예측된다.

$$H/H_0 = 1 - 0.19(t/t_r)$$

- 3) 크리프 파단 시험 후에 파단면에 대한 SEM 분석을 실시하였다. 고온에서 탄화물이 고용되어 열화현상이 관찰된다. 열화 시간이 큰 경우 탄화물이 성장하고 불규칙적 분포가 나타나고 있다.

- 4) TEM 관찰 결과 마르텐사이트 강의 라스는 응력이 높을수록 라스 폭이 증가하고 라스의 형태는 기존보다 등축상의 형태이다.

References

- 1) F. R. Larson and J. Miller, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Trans. ASME, Vol. 74, pp. 756~775, 1952
- 2) H. Kushima, K. Kimura and F. Abe, "Degradation of Mod. 9Cr-1Mo Steel during Long-term Creep Deformation", Tetsu to Hagane, Vol 85, No. 11, pp. 841~847, 1999
- 3) K. S. Park, K. J. Lee, H. S. Chung, J. H. Kim, Y. G. Jung and T. Endo, "Effect of Hardness and Substructure on Long-term Creep Behavior of Mod.9Cr-1Mo Steel", The Korean Society of Precision Engineering, Vol. 21, pp. 168~176, 2004
- 4) T. Endo and J. Shi, "Strength of Materials", (Ed. by H. Oikawa, K. Maruyama, S. Takeuchi and M. Yamaguchi) JIM, pp. 665, 1994
- 5) I. Hirosada "Data Sheets on the Elevated- Temperature Properties of 9Cr-1Mo-V-Nb Steel tube for Boilers and Heat Exchangers(ASME SA-213/SA-213M Grade 91) and 9Cr-1Mo-V-Nb Steel Plates for Boilers and Pressure Vessels (ASME SA-387/SA-387M Grade 91)", National Institute for Materials Science, No. 43, pp. 200, 1996,
- 6) Y. He, J. C. Chang, J. I. Dong and K. Shin, "Microstructural Evolution of X20CrMoV12.1 Steel Upon Long-Term On-site Exposure in Power Plants", Advanced Science Letters, Vol. 4, No. 4/5, pp. 1416~1423, 2011