

보일러 고온부 헤더의 균열수명 평가

김 건 영* · 송 기 욱*

Assessment on the Crack Growth of High Temperature Header at Boiler

K. Y. Kim* and G. W. Song*

1. 서 론

발전 Plant는 고온·고압하에서 장기간 사용되며 파손발생시는 대형 사고로 확대되므로 경년에 따른 운용기술의 확보가 현안 과제이다. 즉, 현재의 설비를 그대로 사용할 것인가? 또는 교체하여야 할 것인가? 그대로 사용한다면 취약부위는 어디이며 언제 보수하여야 하는가? 또 교체한다면 그 시기는 언제인가? 에 대한 기술적 예측이 필요하다.

수명예측기술은 이러한 의문에 대한 해답을 주는 Plant 설비 운용기술중 가장 최신 기술분야의 하나이다. 본고에서는 보일러 부분중 가장 사용조건이 가혹하고 교체하는데 많은 비용과 시간이 소요되는 최종과열기를 대상으로 균열전파에 의한 수명예측에 관하여 기술코저 한다.

2. 재료의 열화

평가대상 발전소의 최종과열기 헤더 재료는 저합금강인 2.25Cr-1Mo강으로 금속조직은 펄라이트(Pearlite)나 베이나이트(Beinite)조직을 이루고 있으며, 탄소강을 기본으로 하여 Cr, Mo등을 첨가하여 재료의 강도, 내산화성 및 각종 고온특성을 향상시켰다.

설비가 고온에 장시간 노출된 경우 탄화물의 종류, 분포 등이 변화되며 불순물 (Impurities)이 입

계에 편석되어 재료가 열화되며 정적인 응력(hoopstress)이 가해지면 크리프손상, 반복응력이 가해지면 피로손상이 발생한다.

Cr-Mo강의 열화는 두 가지 현상으로 나타나는데 하나는 탄화물의 구상화 즉, 펄라이트 또는 베이나이트 조직이 구상화되고, 시간의 경과에 따라 새로운 탄화물 등의 석출하여 조대화된다. 이 결과 인장 및 항복강도 같은 기계적 특성이 저하되므로 설계시 이용된 원소재보다 강도가 낮아지므로 동일한 사용조건에서도 소성변형이 생긴다.

또 하나 인(P), 황(S)등 불순물의 입계편석으로 탄화물의 입계석출 및 조대화와 같이 입계취화를 유발시킨다. 입계취화는 인성을 저하시켜 입계균열(Critical Crack Size)의 크기를 감소시키고 균열전파속도를 증가시켜 설비의 수명을 감소시킨다.

사진 2.1은 2.25 Cr-1Mo강의 금속조직이다.

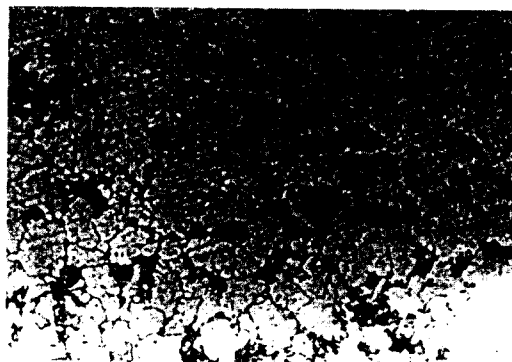


사진 2.1 2.25 Cr-1Mo강의 금속조직

* 비회원, 한전기술연구원 전력연구실

3. 헤더의 구조와 손상유형

헤더의 구조는 그림 3.1과 같이 원통형 용기에 많은 노즐과 2개의 파이프로 구성되어 응력은 노즐부, 노즐-노즐사이의 리가먼트(Ligament), 관대(stub tube)와 헤더사이의 용접부에 집중된다. 원통형 용기는 단조, 또는 압연으로 판을 만든후 판을 성형하여 용접관 형상으로 제작하거나 무게목(Seamless)강관상태로 인발한후 노즐, 파이프 등을 용접한다.

따라서 용접부에는 손상이 발생하며 온도가 높은 최종가열기 헤더(Final Super heater)가 가장 심하다. 표 3.1은 헤더부 각부위에서 발생하는 손

상종류와 손상기구를, 사진 3.1은 리가먼트 균열이다.

표 3.1은 헤더각부에서 발생하는 손상유형이다.

4. 보일러 헤더의 수명예측

4.1 평가대상 헤더

헤더의 리가먼트 크래킹 현상은 두께방향의 열응력에 의한 피로응력과 내압에 의한 크리프의 영향으로 볼 수 있다. 피로 균열전파는 Paris식을 이용하고, 크리프 균열전파는 Saxena의 균열전단 계수 Ct를 사용하여 평가한다.

리가먼트 크래킹문제의 모델은 그림 4.1에 있는

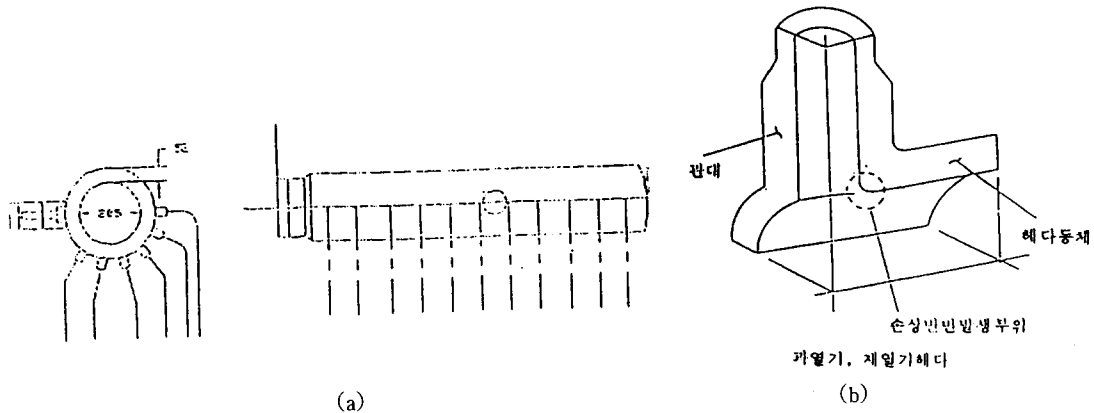


그림 3.1 대상발전소의 보일러 헤더 구조

표 3.1 헤더에서의 손상유형

Location	Survey(%)	Damage Mechanism
Stub tube/header Weld, Tube side	40	Creep-Cavitation in the HAZ
Stub tube/header Weld, Header side	34	Creep-Cavitation in the HAZ
Cracking of Ligment between tubes	21	Thermal fatigue
Logitudinal seam welds	3	Creep-Cavitation in the HAZ and weld
Girth butt Welds	3	Creep-Cavitation in the HAZ and weld
All other	10	
Branch connections sadle and crotch position	unknown	Creep-Cavitation in the HAZ
Header body swelling	unknown	Thermal softening
Other location	unknown	unknown

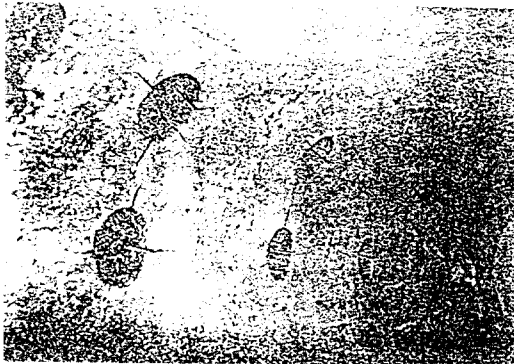
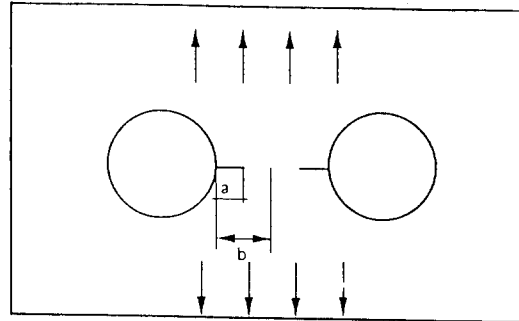


사진 3.1 헤더의 Ligament Cracking



b : Half of Ligament
a : Crack Length

그림 4.1 보일러 헤더의 리가먼트 크래킹 모델

일반 모델을 사용하고, 표 4.1에는 스테르튜브간의 거리와 스테르튜브의 반경, 균열의 크기 등이, 표 4.2에는 재료상수들이, 표 4.3에는 작용응력과 내압의 크기 등이 표시되어 있다.

그림 4.2는 본 해석에 이용된 전산 프로그램인 ROTBOIL(Rotor & Boiler Life time Prediction)의 흐름도이다.

표 4.1 균열의 위치 및 크기(평택보일러 헤더)

구 분	부 호	단 위	값	비 고
스테르튜브중심사이의 거리	L	in	12.000	
스테르튜브의 직경	R	in	1.124	
초기 균열길이	a ₀	in	0.010	
리가먼트의 길이	l	in	4.876	

표 4.2 재료상수(평택보일러헤더)

구 분	부 호	단 위	값	비 고
재료명				2.25Cr-1Mo
파리스 계수	C	in ³ /kg	0.170000E-08	
파리스 지수	m	-	2.800	
한계력 (Threshold)	T	kis √ in	5.000	
영율	E	kis	29384.848	
포와송 비	v	-	0.300	
크리프 계수	A	kis ⁿ	0.599E-17	1,050 °F
크리프 계수	n	-	8.000	
크리프 균열 진전 계수	b	In-Kips/in ² -hr	0.0904	
크리프 균열 진전 지수	q	-	0.805	
항복응력	δy	kis	20.994	
파괴인성	K _{IC}	kis √ in	190.000	

표 4.3 응력 및 내압(평택보일러헤더)

구 분	부 호	단 위	값	비 고
정상상태 응력	σ _s	kis	5.800	
과도상태 응력	σ _t	kis	15.000	
최대응력에서의 온도	T	°F	800.000	
최대압력	P	kis	2.440	

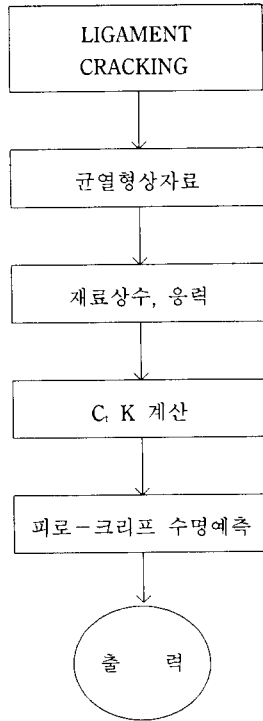


그림 4.2 ROTBOIL의 흐름도

4.2 수명예측의 기본개념

가. 재료특성 데이터

(1) 크리프 균열전파 관련상수

- A : 크리프 상수(Creep Coefficient)
- n : 크리프 지수(Creep Exponent)
- B : 크리프 균열전파 상수(Creep Crack Growth Coefficient)
- q : 크리프 균열전파 지수(Creep Crack Growth Exponent)

- E : 탄성계수(Elastic Modulus)
- v : 포와송비(Poisson Ratio)

(2) 피로균열전파 관련 상수

- C : 파리스 상수(Paris Coefficient)
- m : 파리스 지수(Paris Exponent)
- K_{IC} : 파괴인성(Fracture Toughness)
- σ_{ys} : 항복응력(Yield Stress)

나. C 파라메타

균열이 있는 설비에서 C 파라메타는 다음과 같

은 식으로 표현된다.

$$C_1 = \frac{4(\alpha - \nu)^2}{E(n-1)} \frac{K^{-4}}{b} (EA)^{2/(n-1)} t^{-(n-3)/(n-1)} \frac{F'}{F} + C \tag{4.1}$$

여기서, b는 리가먼트 폭의 절반이고,

$$\alpha = \frac{1}{2n} \left(\frac{n+1}{2n\sigma_s^{n-1}} \right)^{2n-1} \tag{4.2}$$

으로, n이 3과 10사이에 있으면, 0.69의 값을 갖는다. 리가먼트 크래킹 문제에서 응력확대계수(Stress Intensity Parameter) K는 다음과 같다.

$$K = aB^{1/2}F(a/b) = cB^{1/2}(F_1 + F_2) \tag{4.3}$$

여기서 F₁은 작용응력에 의한 응력확대계수의 보정(K-Calibration)계수이고, F₂는 증기압력에 의한 응력확대계수의 보정계수이다. F₁, F₂의 값은 a/b의 함수로 표 4.4에 나와 있다. 또 하나의 균열전파 속도 C'에 대한 식은 다음과 같다.

$$C' = AB(1-a/b)^{-n} h_1(\sqrt{3/2})^{n-1} \tag{4.4}$$

여기서 h₁은 a/b의 함수로 표 4.5에 있다. K와 C'식은 응력확대계수 K 핸드북과 균열전파속도 C' 핸드북에서 얻을 수 있다. 식(4.2)과 식(4.3)에 대입하면 균열전파속도 C₁식을 얻을 수 있다.

다. 수명계산

앞에서 구한 균열전파속도 C₁와 응력집중계수의 증분 ΔK를 다음식에 대입하면 수명을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{da}{dN} &= C(\Delta K)^m + \int_0^t \frac{da}{dN} dt \\ &= C(\Delta K)^m + \int_0^t B(C_1) dt \end{aligned} \tag{4.5}$$

여기서, t는 헤다의 1회 기동시의 총 운전시간이다. 위 식으로부터 잔존수명은 초기균열 길이의 함수임을 알 수 있다. 최종균열 길이는 응력확대계수 K가 파괴인성 K_{IC}에 도달하거나, 균열전파속도 da/dN이 0.001 T_c* in/cycle에 도달할 때의 균열길이

표 4.4 a/b에 대한 F_1 , F_2 , F 값

a/b	F_1	F_2	F	F/F
.05	.444534	.6385071	.6846126	10.32518
.1	.6286498	.8981241	.966344	3.28183
.15	.7702443	1.090272	1.180187	4.991902
.2	.8904889	1.243755	1.358141	2.434441
.25	.9980581	1.369722	1.513074	1.933977
.3	1.097903	1.474233	1.652214	1.612597
.35	1.193516	1.561483	1.780634	1.400312
.4	1.2878	1.635047	1.902577	1.263897
.45	1.383516	1.698484	2.022146	1.186923
.5	1.483611	1.755756	2.143775	1.161974
.55	1.591539	1.8116	2.2727	1.18758
.6	1.711705	1.872023	2.415586	1.26731
.65	1.850174	1.945065	2.581518	1.41063
.7	2.015968	2.042176	2.783826	1.636125
.75	2.223709	2.1818014	3.04377	1.979542

표 4.5 a/b에 대한 h_1 값

a/b	G	H_1	$n = -10.1$ H	h_1	$n = 8$ H
0.10	4.353	2.2	6.376	1.6	3.717
0.15	6.367	1.62	8.363	1.5	5.504
0.20	8.283	1.70	16.190	1.65	*9.835
0.25	10.137	1.80	32.896	1.77	17.680
0.30	12.017	1.75	64.200	1.77	30.703
0.35	14.077	1.75	135.710	1.77	55.548
0.40	16.561	1.75	304.580	1.90	113.121
0.45	19.846	1.80	754.410	2.10	250.790
0.50	24.542	2.12	2320.000	2.24	753.440

이고, 이때 구조물이 파괴되는 것으로 간주한다.

4.3 수명예측

리가먼트에서의 수명예측은 피로-크리프 상호 작용을 고려한 방법으로 과도상태와 정상상태에서의 응력의 크기는 헤더재료인 2.25Cr-1Mo의 각 온도별 허용응력을 이용하여 계산한다. 그림 4.5는 2.25Cr-1Mo의 온도별 허용응력값을 보여준다. 800 °F까지는 15 ksi이고, 1050 °F에서는 5.8 ksi값임을 알 수 있다.

1회 운전시간 동안의 크리프균열 전파량을 피로 균열 전파량에 더하여 균열 전파속도를 계산한다. 1회 운전시간은 각 기동의 평균 1회 운전시간을 계산하여 입력하도록 되어 있다. 최종수명은 다음 세 가지 기준에 의하여 결정되는데, 어느 하나의 기준에 도달되면 수명이 끝나는 것으로 간주한다.

첫째, 신간에 따른 균열전파율이 시간당 0.001 in를 초과할 때, 둘째 응력확대계수가 파괴인성치에 다 다를 때, 셋째 균열길이가 헤더두께의 75%를 초과 되면 헤더는 그 수명을 다한 것으로 본다.

본 응용에서는 초기 균열길이가 0.01 in이고, 과도상태에서의 피로응력이 15.0 ksi, 정상상태에서의 크리프 작용응력이 5.8 ksi인 경우이다. 이 경우에는 위에서 제시한 세 가지 조건중 첫 번째인 임계균열전파속도 (0.001 in/hr)에 의해 헤더의 수명이 결정되었다. 이 경우에 최종균열길이는 3.3 in 이고, 잔존수명은 약 4,600회로 나타났다. 그림 4.6은 균열전파에 따른 잔존수명을, 표 4.6은 초기 균열길이와 잔존수명의 관계를 보여준다.

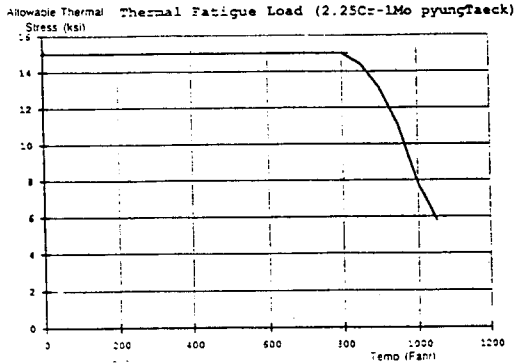


그림 4.5 온도에 따른 허용응력의 변화

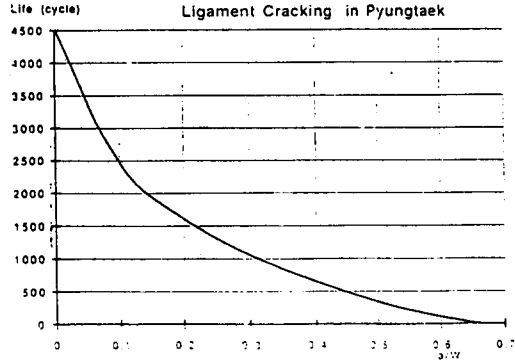


그림 4.6 균열전파에 따른 잔존수명

표 4.6 초기균열길이와 잔존수명(보일러헤드)

초기균열길이 a_0 (in)	임계균열길이 a_c (in)	수명가동횟수 N (Cycle)
0.0100	3.6572	0.458763E+04
0.0500	3.6579	0.439894E+04
0.1000	3.6581	0.458766E+04
0.1500	3.6570	0.392620E+04
0.2000	3.6600	0.369047E+04
0.3000	3.6600	0.323623E+04
0.4000	3.6640	0.287504E+04
0.5000	3.6600	0.255281E+04
0.6000	3.6600	0.228547E+04
0.7000	3.6680	0.209844E+04
0.8000	3.6640	0.195680E+04
0.9000	3.6720	0.182600E+04
1.0000	3.6600	0.169112E+04
1.5000	3.6600	0.113533E+04
1.7500	3.6750	0.921061E+04
2.0000	3.6800	0.733173E+04
2.5000	3.7000	0.427193E+04
3.0000	3.6600	0.193132E+04

5. 결 언

국내에서 개발되어 신뢰성이 검증된 전산프로그램을 이용하여 보일러에서 가장 온도가 높은 Cr-Mo강 최종 파열기 헤드의 균열수명을 평가하였다.

이런기술의 확보는 plant설비의 신뢰성뿐만 아니라 경제성을 확보 할 수 있는 고도기술로서 대단히 유용한 기술분야이다.

보다 활용성을 높이기 위해서는 모재뿐만 아니라 용접부 수명평가 전산프로그램의 개발이 필요

하다 용접학회 회원 여러분의 노력을 기대 합니다.

참 고 문 헌

1. R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM INTERNATIONAL, 1989
2. EPRI, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts-Crack Growth Studies", EPRI CS-4688 Project 2253-7, Jul. 1986
3. R. Viswanathan, P.K.Liaw, A.Saxena, "Remaining-Life Estimation of Boiler Pressure Parts Crack Growth Studies", CS-4688, EPRI, Research Project 2253-7, Final Report, Jul, 1986
4. F. V. Ellis, J. F. Herny, B.W.Roberts, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts, Volume 1 : Identification of Relevant Damage Mechanisms", CS-5388, Vol.1, EPRI, Research Project 2253-1, Final Report, Nov, 1988
5. F. V. Ellis, J. F. Herny, B.W.Roberts, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts, Volume 2 : Identification of Relevant Damage Mechanisms", CS-5388, Vol.2, EPRI, Research Project 2253-1, Final Report, Nov, 1988
6. F. V. Ellis, J. F. Herny, B.W.Roberts, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts, Volume 3 : Base Metal Model", CS-5388, Vol.3, EPRI, Research Project 2253-1, Final Report, Nov, 1989
7. F. V. Ellis, J. F. Herny, B.W.Roberts, "Remaining Life Estimation of Boiler Pressure Parts, Volume

- 4 : Metallographic Models for Weld-Heat Affected Zone", CS-5388, Vol.4, EPRI, Research Project 2253-1, Final Report. Nov, 1988
8. D.I.Roberts, A.Saxena, J.Han, K.Banerji, "Creep Crack Growth in Boiler and Steam Pipe Steels", CS-5585, EPRI, Research Project 2253-10 Topical Report, Jan, 1988
 9. R. Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM INTERNATIONAL, 1989
 10. A. Merz, R. Reifenhauer, "Turbine Failure at Irsching Power Plant", Proceeding of VGB Conference, Dortmund, Sep., 1988
 11. A. Saxena, T.P.Sherlock, R.Viswanthan, "Evaluation of Remaining Life of High Temperature Headers : A case History"
 12. General Electric Company, "A Methodology for Predicting Torsional Fatigue Life Turbine Generator Shafts Using Crack Initiation Plus Propagation : , E1-4333, EPRI Research Project 1531-1, Nov., 1985
 13. A.saxena, 'A Model for Prediction the Effect of Frequency on Fatigue Crack Growth at Elevated Temperature'" Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol.3, 1981, P.247-255
 14. A. Saxena, R.S.Williams, and T.T.shih, "A Model for Representing and Predicting the Influence of Hold Times on Fatigue Crack Growth Behavior at Elevated Temperature", Fracture Mechanics, 13th Conference, ASTM STP7843, 1981, P.86-99
 15. A.Saxena and J.L.Bassani, "Time-Dependent fatigue Crack Growth Behavior at Elevated Temperature, Fracture : Interactions on Microstructures, Mechanisms and Mechanics", AIME/ASME Conference CA, 1984, P.357-383
 16. H.Riedel, "Crack-Tip Stress Fields and Crack Growth under Creep-Fatigue Conditions", Elastic-Plastic Fracture : 2nd Symposium, Vol.II, ASTM STP 803, 1983, P.I-505 to I-520