

발전용 보일러 정밀진단기술

박민수* · 김종오*

Precise Diagnosis Technology for Power Plant Boiler

Min Su Park, Jong Oh Kim

Key Words: Fossil Power Plant(화력발전소), Power Plant Boiler(발전용 보일러), Diagnosis Technique(진단기술), Boiler Tube(보일러 튜브), Metal Examination(조직분석), Infrared thermography method(적외선 온도측정법)

Abstract

In most case high temperature components in fossil power plant are damaged by fatigue, creep and degradation. Design of power plant components is based on ideal loading such as temperature, pressure and so on. But in many cases unexpected loadings are applied at components. A key ingredient in plant life extension is the preventive diagnosis technology and remaining-life-assessment technology. This paper describes diagnosis technology and life-assessment technology for power plant boiler. It helps in setting up proper inspection schedules, maintenance procedures, and operating procedure.

1. 서론

발전용 보일러설비는 발전설비 중에서도 비교적 가혹한 환경에서 가동되기 때문에 설비가 여러가지 손상원인으로 자주 손상되며 특히 시간이 경과함에 따라 열화(degradation)와 재료손상정도가 더욱 심해진다.⁽¹⁾ 이러한 설비 손상은 불시정지를 가져올 뿐만 아니라 운전/정비 비용을 상승시켜 설비의 경제적 운용을 저해하므로 적절한 검사 및 정비주기, 교체주기를 설정하고 손상 발생시 신속한 복구가 수행되어야 한다. 또한 최근의 추세는 일정기간 설비운전 후 정밀진단을 통해 취약개소를 파악하여 성능개선, 구조보완 및 변경 등을 수행하는 성능분석 및 정밀진단기술과 재료의 변화를 계량화하여 설비수명을 예측하는

수명평가 기법이 예방 및 예측정비차원에서 다각도로 연구되고 있다.⁽²⁾

따라서 본 논문에서는 실제 사용중인 발전용 보일러의 주요설비를 성능분석 및 정밀 진단하여 설비상태를 판단하고 수명평가기법을 적용, 설비의 잔존수명과 계속 사용가능여부, 손상방지대책 등 제시하고자 한다.

2. 설비진단

2.1 운전 및 정비이력 분석

진단 대상발전소는 상업운전기간이 12년 경과한 설비로서 체계적인 자료관리가 미흡하여 부득이 '96년 이후의 자료를 토대로 평균값을 적용, 총 운전시간을 산출하였다. 또한 원인별 연간평균 정지형태는 Fig. 1 과 같이 고장정지 61%, 부하감소 27%, 한전정전 12%로 조사되었으나 세부적인 정지원인에 대한 데이터가 부실하여 발전설비에 어느 정도 영향을 주었는지 확인하기 어려

* 정희원, 한전기공(주) 기술개발원

왔다. 다만 보일러 설비와 관련하여 저 NO_x 버너교체 및 조정작업이 수행되었고, 일부 보일러 튜브를 교체한 실적만을 확보하였다. 따라서 점검항목을 폭넓게 선정하고 좀더 세밀하게 점검하여 전체적인 손상누적여부를 확인해야 했다.

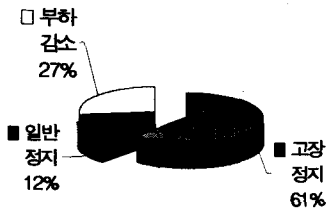


Fig. 1 연간평균 기동정지현황

본 논문에서의 진단대상 발전용 보일러는 준공 후 기동/정지의 비율이 Fig. 2 와 같이 연평균 80%로 연간 7,000시간정도 운전하였으며 전체적으로 약 81,166시간의 운전을 하였다.



Fig. 2 연간평균 가동율

2.2 노내점검

노내점검 방법은 육안검사, 두께측정, 및 초음파시험 등 비파괴검사를 위주로 실시하였다.

주요 점검부위는 Fig. 3 와 같이 Scale이 발견된 Water Wall 및 Superheater Tube 외면과 Tube와 Tube 사이 용접부, Spacer, Fin, 지지금구류 등의 용접결합이 자주 보고되는 부위와 특히 운전 중 Tie-Lug 등에서 열팽창이 구속되어 열응력 및 진동의 반복으로 균열이 발생하기 쉬

운 부위를 세밀히 점검하였다

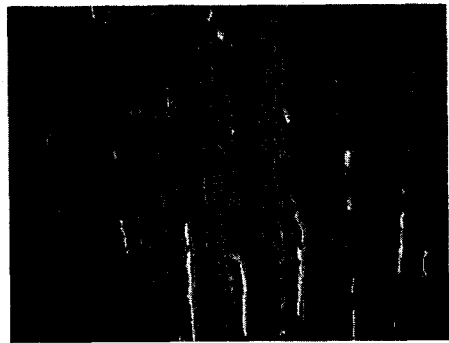


Fig. 3 Water Wall Tube 외면 Scale 부착상태

점검 결과 발견된 이상상태 부위는 Fig. 4 와 같이 이차 과열기 튜브가 Nose 튜브와 접촉되어 만곡되어 열이탈된 것을 확인하였다. 보일러 튜브에 나타나는 이러한 현상은 운전 중 튜브의 자유로운 팽창이 구속되는 경우와 버너의 화염에 의해 직접적인 영향을 받게되어 단기간 과열현상에 의한 경우가 있다. 이 경우에는 튜브의 조직분석을 통해 건전성을 확인하여야 하므로 이 부위에 대해 시편을 채취하였다.

튜브의 과도한 굽힘으로 인해 파급될 수 있는 현상은 Convection Pass의 폐쇄로 Draft Loss가 증가되어 보일러 효율이 저하될 수 있다.

가스통로에서 압력강하는 가스속도의 자승에 비례하며 다음과 같은 수식 (1)에 의해 산출한다.

$$\Delta P_0 = 0.11 \frac{(1 + a t_g)^2}{(1 + a t_w)} v_0 w^2 N f_N \quad (1)$$

$$a : \frac{1}{273}$$

w : 가스속도

$$t_g : \text{가스온도}$$

v₀ : 비중

$$t_w : \text{튜브온도}$$

N : 가스방향 튜브수

$$f_N : \text{Factor}$$

따라서 폐쇄율이 전체적인 투영면적의 10%를 넘게되면 이 현상을 제거하는 작업이 필요하다.

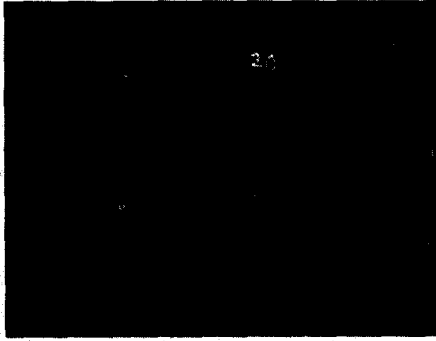


Fig. 4 이차과열기 열이탈 상태

아울러 검사결과를 바탕으로 시편채취 부위를 선정하여 총 6개 부위에서 시편을 채취했다. 검사 시 수행한 두께측정 결과치에 대한 판정기준은 ASME 최소두께 산출식인 아래 식 (2)을 사용하여 판단하였다. 이때 측정두께가 최소 필요두께와 연간 감육율의 합 값보다 적으면 교체하여야 하며, 최소 필요두께와 연간 감육율을 합한 값의 10%만큼 여유범위에 있다면 교체를 검토해야 한다. 연간 감육율은 0.5mm/10,000h 을 기준으로 이를 초과하면 교체를 고려하여야 한다.

$$t = \frac{PD}{200S+P} + \text{년감육율 (혹은 } 0.005D) \quad (2)$$

- t : 최소 필요두께
- P : 사용압력(kg/cm²)
- S : 허용 인장응력(kg/mm²)
- D : 외경(mm)

2.3 보온 누설부 점검

보온 누설부는 사용시간이 경과됨에 따라 손상되거나 함몰할 경우 보일러에서 발생하는 열을 효과적으로 보온하지 못하게 되며 이로 인하여 경제적인 운전이 지장을 초래하므로 금번 진단 시 누설여부를 점검하게 되었다.

점검방법은 육안점검과 열화상 측정장비를 이용한 보온 누설부위를 측정하였다. Fig. 5와 같이 보온재의 탈락 및 빗물유입 등으로 인한 처짐이 발생되었을 가능성이 크다고 판단된 부위를 열화상 측정하였고 그 결과 Fig. 6, 7과 같이 다수의 보온누설부위를 발견하였다.



Fig. 5 부식 및 보온재 함몰상태

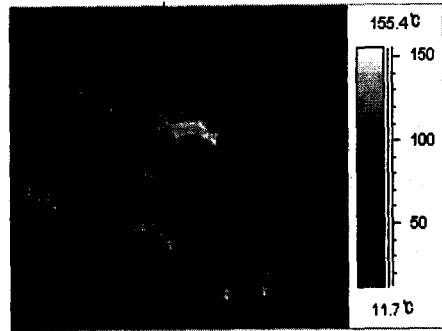


Fig. 6 보일러 상부 열화상 측정결과

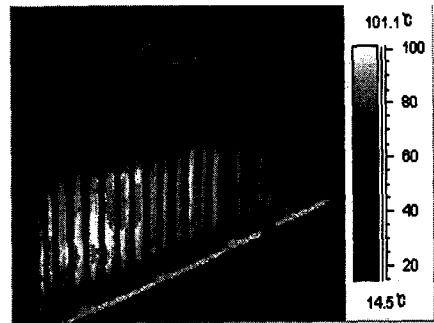


Fig. 7 보일러 중간부 열화상 측정결과

이때 사용된 장비는 FLIR Systems의 AGEMA 550 Infrared Camera로 적외선을 이용하여 원거리에서 보온결함여부를 손쉽게 알 수 있었다.⁽³⁾

3. 재질분석

3.1 시편채취

시편채취는 보일러 구성요소 중 비교적 가혹한 운전환경에 노출되어있는 과열기 튜브나 증발관을 주 대상으로 하는 경우가 많으며 설비 진단시 재질열화 및 변형이 심한 부위를 파악하여 수행한다.

이때 시편채취 부위선정은 전체 튜브를 대표하여 열화도를 조사하는 것이므로 Fig. 8과 같이 가장 변형이 심하고 취약한 부위를 선정하는 것이 바람직하다

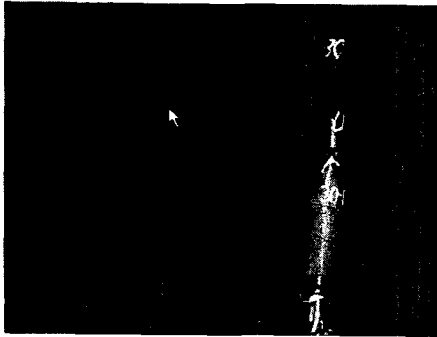


Fig. 8 시편채취 및 용접부위

또한 과열기, 재열기 튜브의 경우에는 최대 열 부하위치, 온도차 및 응력집중이 예상되는 부위를 선정하게되며 튜브 외면 손상상태, 스케일 부착상태, 지지금구류의 소손, 두께측정결과 등을 종합적으로 판단하여 선정하였다.

3.2 조직분석

일반적인 보일러 설비는 크립(Creep) 및 고온 산화에 의한 재질열화가 많이 발생된다. 특히 크립은 고온에서 일 방향성 하중을 받아 시간이 경과됨에 따라 변형률이 누적되어 가는 손상으로 고온·고압부에서 내부유체압력에 의해 진행되어 수명소비의 주 요인이 된다. 또한 크립손상과 함께 탄화물이나 석출물의 석출거동과 관련된 재질 열화도 진행되어 재료의 강도저하를 유발시키기도 한다.

각 부위에서 채취된 보일러 튜브재질은 각각

SA209 T1, SA312 TP304H, SA192로서 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. 재질별 화학적 조성

재질	C	Si	Mn	P	S	Mo	Cr	Ni
SA209 T1	0.1 ~ 0.2	0.1 ~ 0.5	0.3 ~ 0.8	≤0.035	≤0.035	0.45 ~ 0.65		
SA213 TP304H	0.04 ~ 0.1	≤0.75	≤2.0	<0.04	0.03		18 ~20	8~ 11
SA192	0.06 ~ 0.18	0.25	0.27 ~ 0.63	0.035	0.035			

Platen Superheater의 재질인 SA209 T1 신재의 경우 Fig. 9 과 같이 검은 부분의 퍼얼라이트와 하얀 부분의 페라이트가 골고루 분포되어 입계가 명확하게 구분되지 않는 조직을 가지고 있다. 그러나 고온·고압에서 사용된 사용재의 경우 Fig. 10 에서와 같이 퍼얼라이트가 분해되어 결정입계가 다소 뚜렷해졌다는 것을 확인하였다.

같은 방법으로 Water Wall, Spaced Superheater 등에서 채취한 시편을 분석한 결과 사용재에서 기공(Void)가 생성되었다는 흔적을 발견할 수 없었으며 미소 Crack도 발견되지 않았다. 단지 재결정 진행 및 결정립 성장이 되고 있으나 열화 정도가 수명에 영향을 미칠 정도로 많이 진전되지는 않은 것으로 판단된다.

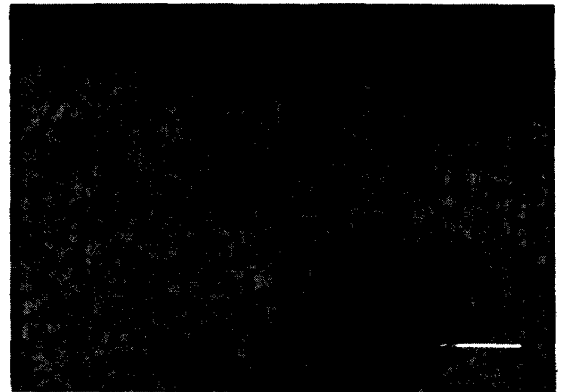


Fig. 9 Platen Superheater Tube 신재에 청상태

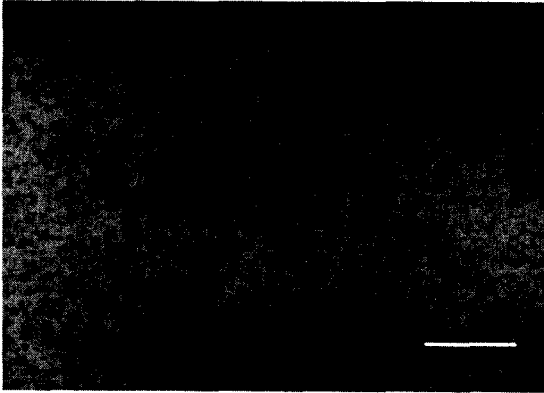


Fig. 10 Platen SH Tube 에칭
(8열 1행 중단부)

재질분석 시 튜브시편의 내측, 중간부, 외측의 경도를 측정하여 분석하였다. 이때 경도 측정조건은 Rockwell B Scale을 사용하여 각 시편별로 30 Point를 측정 후 평균값을 취하였으며 측정 결과값은 Fig. 11 과 같다. 이 측정 경도값은 각 재료의 표준경도 범위 내에 있음을 확인하였다.

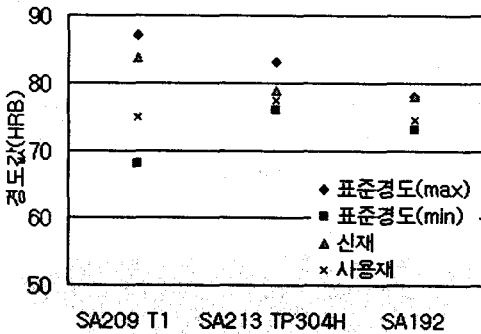


Fig. 11 재료별 경도측정값

4. 수명평가

발전설비의 수명평가법으로 많이 사용하는 방법은 크게 파괴적인 방법과 비파괴적인 방법으로 구분하여 볼 수 있다. 비파괴적인 방법은 경도법, 조직대비법, 입계부식법 등이 있는데 금속의 조직을 간접적으로 채취하여 분석하므로 설비에 손

상없이 수행할 수 있는 장점이 있으나 정확도가 낮아지는 측면이 있다. 대개의 경우 보일러 튜브에 적용하는 수명평가법은 튜브를 Sampling하여 직접 조직을 비교하여 볼 수 있으므로 다른 방법에 비해 비교적 정확하게 결과를 도출할 수 있다.⁽⁴⁾ 보일러 튜브의 수명평가는 튜브에 가해지는 평균응력과 운전 시간·온도변수(Time-Temperature Parameter)에 의해 잔여수명을 평가할 수 있으며 평가방법으로는 Larson-Miller Parameter, Manson-Haferd Parameter, Orr-Sherby-Dorn Parameter, Manson-Succop Parameter 등이 있으며, 이 중에서 가장 널리 사용되고 있는 Larson-Miller Parameter 법⁽⁵⁾을 이용하여 튜브의 수명을 평가하였다

본 진단에서는 설비진단 시 분석한 운전 및 정비이력을 고려하여 유효한 Factor를 결정하였으며 Table 2의 운전조건과 각 재료의 화학적 조성을 조사하여 각각의 Rupture Curve를 찾아 값을 대입하였다

Table 2. 운전조건

구분		운전조건
압력	설계압력	114kg/cm ²
	운전압력	105kg/cm ²
Main Steam Temp(설계치)		440℃
Superheater Metal Temp		500℃
Waterwall Tube Metal Temp		345℃
운전시간(hr)		81,166

채취된 Superheater 튜브의 운전조건을 대입하여 식 (3)와 같이 평균직경식으로부터 응력을 산출하였다.

$$\sigma = \frac{PD}{2t} \quad (3)$$

P = 내압(kg/cm²)

D = 내경(mm)

t = 두께(mm)

구해진 응력값을 Fig. 12 의 18Cr-8Ni Steel

Rupture Curve⁽⁶⁾에 의해 LMP(Larson-Miller Parameter)를 결정하고 식 (4)로부터 파단시간을 산출하였으며 그 결과값을 분석한 결과 튜브 파열이 일어날 가능성이 적음을 알 수 있었다.

$$LMP = T(C + \log t_r) \quad (4)$$

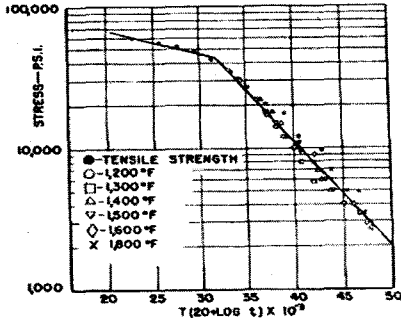


Fig. 12 18Cr-8Ni Steel Rupture Curve

LMP : Larson-Miller Parameter

T : 사용온도(°K)

C : 재료상수

t_r : 파단시간(h)

5. 결론

발전설비의 정밀진단기술은 기존의 고장 정비 개념이 아닌 예방 및 예측정비기법으로 설비의 안정적 운영과 장 수명화에 가장 이상적인 정비 기법이라고 할 수 있다. 또한 보일러의 경우 정밀진단기술은 기계설계, 시스템공학, 열 및 유체공학, 연소공학, 금속 및 재료공학 등 다양한 전문분야의 기술을 확보하고 있어야 가능하며 현재 까지도 대부분 이중 어느 한 분야에만 치우치거나 현장 적용성이 떨어지는 연구나 기술사례가 많았던 것이 사실이다.

본 논문에서는 산재해 있는 설비점검정비기술과 이론적 수명평가기술의 체계적인 도입과 각종 전문분야의 기술을 실제 발전소에 적용함으로써 발전용 보일러의 정밀진단기술을 체계화하고 실용화 한 것에 의의를 갖는다.

참고문헌

- (1) R.Viswanathan, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components", ASM INT.(1989)
- (2) 김종오 외 4, "화력발전소 보일러튜브 손상 해석", 대한기계학회 '99추계학술대회 논문집 A, 1999
- (3) 박문호 외 1, "적외선을 이용한 비파괴검사 기술", 비파괴검사학회지, Vol 14, No 4, 1994
- (4) 김건영, "화력발전용 보일러튜브의 수명 평가", 대한기계학회지, Vol 32, No 4, 1992
- (5) F. R Larson & James Miller, "A Time-Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses", Transaction of the ASME, July, 1952
- (6) American Society for Metal, Metals Handbook Vol.1 "properties and selection", 8th Edition