

초임계압 보일러 수냉벽 튜브의 파열사고 분석 Failure Analysis of Waterwall Tubes in Super Critical Boiler

김범수 · 정남근 · 김두수 · 이성호

B.S. Kim, N.G. Jung, D.S. Kim and S.H. Lee(KEPRI)

Key Words : Boiler Tube(보일러 관), Waterwall Tube(수냉벽 관), Fractography(파면 관찰), 13CrMo44, Creep Void(크리프 기공)

Abstract : Boiler is one of the most important utilities providing steam to turbine in order to supply mechanical energy in thermal power plant. It is composed of thousands of tubes for high efficient heat transfer. Water is converted to steam inside the waterwall tubes. Many chemical components dissolved in boiler water come out of itself, deposit to the tube wall surface, prohibit heat transer, raise tube metal temperature, eventually fail the boiler tubes. Several tasks such as fracture surface study, tensile test, hardness test, metallurgical test, composition analysis of sticking elements were conducted to identify the root cause of tube failure.

1. 서 론

발전소에서 사용하고 있는 보일러는 물을 가열하여 증기를 만들어 증기가 가지고 있는 열에너지를 터빈에 전달함으로써 터빈의 기계적에너지로 변환시키는 중요한 설비이다. 따라서 동시에 다량의 물을 가열해야 하기 때문에 수많은 튜브로 이루어져 있으며, 수냉벽 튜브, 과열기튜브, 재열기 튜브군으로 구분되어 있다.

수냉벽튜브는 물을 습증기로 가열하는 튜브군으로 외면에 흐르는 고온 연소가스의 연소열에 의해 내면에 흐르는 물을 가열하여 물을 습증기로 변화시킨다.

연소가스는 1500℃ 이상의 고온으로 S, V 등 부식성 가스와 회입자가 포함되어 있어 튜브 외면 부식 및 마모 등을 야기시켜 튜브를 손상시키고 있다.

또한, 내면에 흐르는 물에는 부식성 물질과 불순물이 용해되어 있어 증기로의 상변태 과정에서 석출되어 튜브 벽면에 부착되고 부식을 일으키는 물은 금속온도를 상승시켜 결국 튜브를 손상시키는 사고의 원인이 되고 있다.

본 고는 국내 표준화력 발전소에서 발생한 수냉

벽튜브의 손상원인을 규명한 내용으로, 사고 현황, 손상튜브의 재질시험, 미세조직시험, 인장강도시험, 스케일성분시험 등을 통해 손상원인을 규명한 사례에 대해 기술하였다.

2. 설비현황

대상 보일러는 유연탄을 사용하는 초임계압 관류형 재열보일러로 튜브배열은 Fig. 1과 같다.

보일러에 공급되는 물은 연소가스 후류부의 절탄기 튜브로 유입되어 버너가 있는 수냉벽튜브를 지나면서 증발되어 Hanger 과열기튜브, Platen 과열기튜브, 최종과열기튜브를 거쳐 온도 및 압력이 각각 541℃, 25.06MPa인 과열증기가 되어 터빈으로 전달된다.

터빈에서 팽창된 증기는 다시 보일러의 1차재열기로 유입되어 최종재열기를 거치면서 온도 및 압력이 각각 541℃, 3.98MPa로 재가열되어 터빈으로 전달된다.

보일러의 설계 증발량은 1720ton/hr이고, 건설 후 4000시간 가량 운전하였다.

수냉벽튜브는 spiral type으로 설계온도와 압력이 각각 450℃, 30.89MPa이고, 튜브 재질은 13CrMo44 (DIN 17175 규격)이며, 설계치수는 외경 38mm, 두께 5.0mm이다.

접수일: 2002년 12월 10일

김범수(책임저자) : 한국전력연구원 발전연구실

E-mail : kims@kepri.re.kr Tel. 042-865-5316

이성호, 정남근, 김두수 : 한국전력연구원 발전연구실

3. 손상현황

수냉벽튜브 파손은 2000년 8월에 2회, 11개 튜브에 걸쳐 발생하였으며, Fig. 1에서 보는 바와 같이 모든 손상튜브가 노내 온도가 가장 높은 최종버너 직상부에 위치하고 있다. 1차 손상 시 4개의 튜브에 균열이 발생하여 내부 고압 증기가 누출되었고, 2차 사고 시 5개의 튜브에서 균열이 발생하고 2개의 튜브가 부풀어 오르는 현상이 발생하였다. Fig. 2는 균열과 함께 부풀어 오른 튜브의 손상사진을 보여주고 있다.

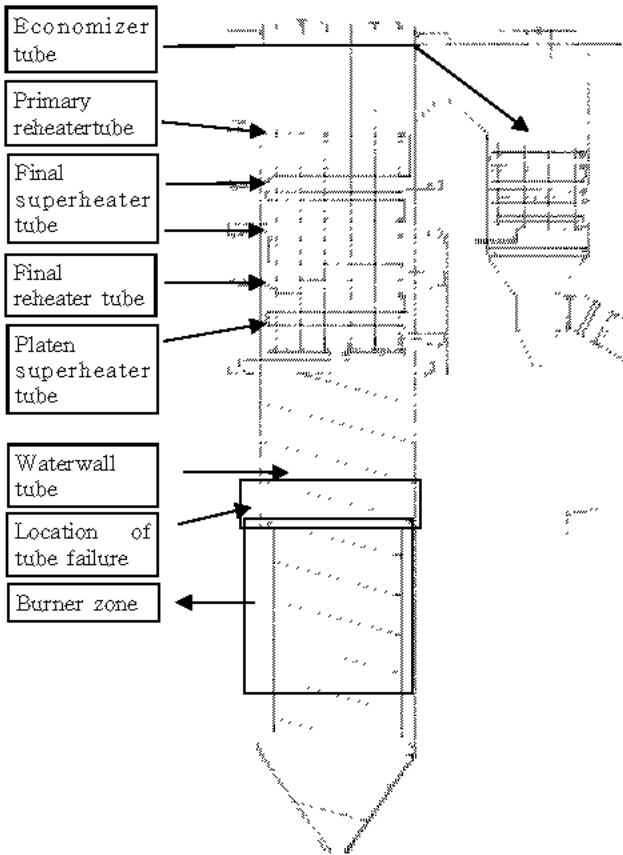


Fig. 1 The layout of Boiler tubes

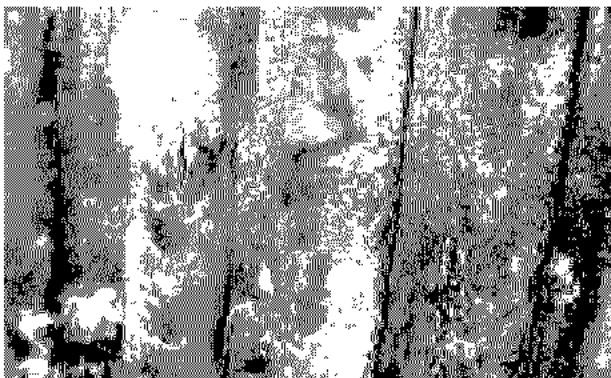


Fig. 2 Crack shape of failed boiler tube

4. 시험결과

수냉벽튜브 손상원인을 규명하기 위해서 손상튜브 균열이 발생한 튜브(A), 표면이 부풀어 오른 튜브(B)와 손상튜브에 인접한 건전튜브(C)에 대하여 비교시험을 수행하였다.

시험에 대하여 개략적인 손상현황을 파악하기 위한 육안 및 치수검사, 재질의 건전성 확인을 위한 화학성분시험, 재질의 열화도를 확인하기 위한 인장강도시험과 금속조직시험, 크랙의 시점 및 전파를 파악하기 위한 미세조직 시험을 수행하였고, 그 결과는 다음과 같다.

4.1 육안검사

균열이 관통되어 증기가 누설된 튜브는 균열부가 연신이 적은 thick edged 형태를 갖고 있다. 균열 및 부풀어 오른 튜브는 내, 외면에 두꺼운 scale이 부착되어 있으며, 내면 scale은 화염을 따라 150° 방향으로 두껍게 형성되어 있거나 탈락된 흔적이 남아 있다.

시험의 내면 스케일은 0.5mm 정도로 아주 두껍게 붙어 있었으며 작은 충격에도 쉽게 탈락되는 약한 결합을 갖고 있었고, 외면 스케일은 Fig. 3과 같이 0.2~0.3mm의 산화스케일 층이 단단하게 부착되어 있다.

사용온도 범위가 400℃ 이하인 수냉벽튜브에서 단단한 산화스케일 층은 특이한 현상으로, 주로 500℃ 이상의 고온에서 사용되고 있는 과,재열기 튜브에서 발견되는 현상으로 사고튜브가 고온에 노출되었음을 보여주고 있다.

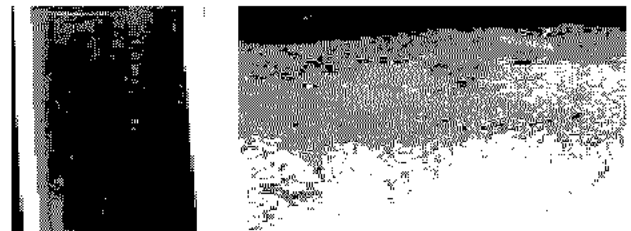


Fig. 3 Scale formed on the inside and outside of the tube

4.2 치수검사

튜브의 치수를 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 튜브 벽측은 거의 두께 변화를 보이지 않고 있으며, 화염측은 5% 이내의 두께 감소를 나타내고 있다. 또한 균열 및 부풀어 오른 튜브는 미량 내경이 증가하였다.

Table 1 Thickness and diameter of sample tubes (mm)

| items | | design | A | B | C |
|----------------|-----------|--------|------|------|------|
| Inner diameter | | 27.2 | 28.0 | 28.0 | 27.2 |
| Thickness | fire side | 5.0 | 4.83 | 4.73 | 4.85 |
| | wall side | 5.0 | 4.95 | 4.9 | 5.1 |

4.3 화학성분분석

유도형광분광기로 각 튜브에서 3개씩 시료를 채취하여 분석하였으며, 결과는 Table 2와 같다. Table에서 보는 바와 같이 Cu성분이 미량 포함되어 있으나 재료 성질에 영향을 미칠 정도는 아니며 DIN17175 규정을 만족하고 있다.

Table 2 Compositions of specimens(wt%)

| items | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Al | Cu |
|-------------|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|
| DIN 17175 | Min | 0.1 | 0.1 | 0.4 | | | 0.7 | 0.45 | | |
| | Max | 0.18 | 0.35 | 0.7 | 0.035 | 0.035 | 1.1 | 0.65 | | |
| Sample tube | A | 0.17 | 0.15 | 0.43 | 0.013 | 0.004 | 0.84 | 0.46 | 0.015 | 0.2 |
| | B | 0.13 | 0.11 | 0.45 | 0.013 | 0.005 | 0.89 | 0.50 | 0.017 | 0.19 |
| | C | 0.16 | 0.10 | 0.46 | 0.013 | 0.004 | 0.91 | 0.50 | 0.017 | 0.2 |

4.4 인장강도시험

Instron사의 만능인장시험기를 이용해 각 튜브에서 3개씩 채취한 시료에 대해 인장시험을 실시하였으며, 평균값은 Table 3과 같다.

Table 3 Result of strength test

| 구분 | | Yield strength (MPa) | Ultimate strength (MPa) | Elongation (%) | |
|-------------|-----|----------------------|-------------------------|----------------|----|
| DIN 17175 | Min | 305 | 440 | 22 | |
| | Max | | 590 | | |
| Unused tube | | 405 | 519 | 26 | |
| Sample tube | A | Fire side | 338 | 510 | 24 |
| | | Wall side | 400 | 552 | 26 |
| | B | Fire side | 310 | 503 | 28 |
| | | Wall side | 372 | 538 | 26 |
| | C | Fire side | 317 | 496 | 25 |
| | | Wall side | 386 | 531 | 28 |

Table에서 보는 바와 같이 시료는 모두 DIN 17175규격을 만족하고 있다. 튜브 벽측의 항복강도는 신재에 비해 5% 감소하였고, 인장강도는 4% 증가한데 비해 튜브 화염측의 항복강도는 20% 감소하였고, 인장강도는 3% 감소하였다. 또한, 인장강도와 항복강도는 모두 벽측이 화염측보다 높았다. 이와 같은 현상은 튜브의 고온 노출에 따른 탄화물의 거동과 관련이 있는 것으로 화염측의 열화가 많이 진행된 것으로 보인다.

4.5 미세조직시험

주사전자현미경을 이용해 'A' 튜브의 균열부위를 횡단면으로 절단하여 미세조직을 관찰하였다. Fig. 4, 5는 주 균열 및 주 균열 주변의 2차 균열과 균열 주변의 미세조직을 보여준다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 주균열은 튜브외면에서 내면으로 진행되고 있으며, 주 균열 주변에 많은 2차 균열이 형성되어 있다.

또한, 균열 내부에는 부식물이 두껍게 형성되어 있으며, 에너지분광시험기를 이용해 성분을 분석해 본 결과 산화철로 이루어져 있고 기타 부식성분은 발견되지 않았다.

균열 주변의 미세조직은 입계 및 입계 3중점에 공동이 다수 형성되어 있으며 공동은 일부 합체되어 균열로 성장 및 전파되고 있다. 따라서 균열에 인접할수록 많은 공동 및 균열들이 존재하고 있다.

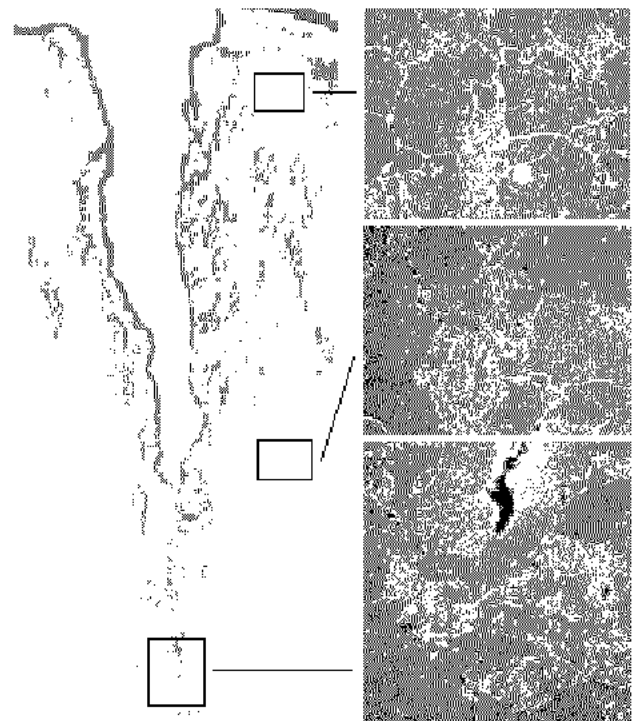


Fig. 4 Shape and Microstructures of crack

Fig. 5는 1000배 확대한 균열부 인근 미세조직 사진으로 다수의 공동 및 균열이 입계를 따라 분포되고 있으며 탄화물이 분리되고 있으나 기본 조직은 신재조직과 동일한 Ferrite와 Pearlite로 구성되어 있음을 보여준다. 이와 같은 사실은 튜브가 상변태 온도인 720℃ 이하의 고온에 노출되었음을 보여 준다.

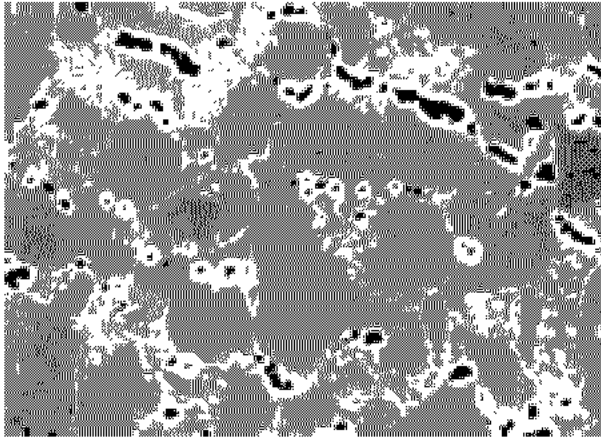


Fig. 5 Microstructure near creep cracks(X 1000)

4.6 스케일 성분시험

습식성분분석기를 사용해 튜브 내면에 형성된 스케일 성분 및 양을 분석하고 그 결과를 Table 4에 나타내었다. Table에서 보는 바와 같이 튜브 내면 스케일 부착량은 화염측과 벽측이 각각 113.87mg/cm², 16.68mg/cm²로 초임계압 보일러의 화학세정시기(기준치:20 30mg/cm²)를 훨씬 초과하고 있으며, 운전기간을 고려해 볼 때 아주 많은 양이 부착되어 있다. 스케일의 주성분은 산화철이며, 산화철은 마그네타이트(70%)와 헤마타이트(30%)가 혼합되어 있는 상태이다.

Table 4 Compositions of scale(wt%)

| items | total | fire side | wall side |
|--|--------|-----------|-----------|
| Si as SiO ₂ | 0.79 | 0.49 | 1.08 |
| Cr as Cr ₂ O ₃ | 0.94 | 0.72 | 1.16 |
| Mg as MgO | 0.22 | 0.37 | 0.07 |
| Mn as MnO | 0.81 | 0.62 | 1.00 |
| Fe as Fe ₂ O ₃ | 96.25 | 97.09 | 95.4 |
| Mo as Mo ₃ O ₄ | 0.30 | 0.23 | 0.36 |
| 기타 | 0.71 | 0.48 | 0.93 |
| Quantity of scale(mg/cm ²) | 130.55 | 113.87 | 16.68 |

*Others: Al, Na, Ca, Cu, Zn, Ti, P, V

5. 시험결과 분석

손상이 발생한 수냉벽 보일러튜브의 원인을 규명하기 위해 여러 가지 실험을 하였으며, 그 결과 다음과 같은 추론을 유도할 수 있다.

손상튜브는 연신이 거의 없는 thick edged 형태의 손상부를 갖고 있어 연신이 많이 발생하는 단기와 열과는 다른 양상을 보여주고 있다.

손상 튜브는 화염측 외면에 길이방향의 균열이 존재하고 있으며, 균열주변에 다수의 공동이 형성되어 있고 일부는 균열로 성장하고 있어 creep현상에 의해 강도저하가 발생했음을 알 수 있다.

그러나 사고튜브의 경우 1% 가량의 Cr이 포함되어 있는 저합금강으로 설계온도인 450℃이하에서 운전되면 creep현상이 발생되지 않는 재료로 알려져 있고, 손상튜브의 외면에 단단한 고온산화에 의한 스케일이 형성되어 있는 것으로 미루어 사고튜브는 이보다 상당히 높은 온도에 노출되었음을 알 수 있다.

또한, 손상된 수냉벽튜브는 정상적인 보일러에 비해 화염측 내면에 스케일이 다량 형성되어 있었으며, 일부 스케일은 탈리가 용이한 약한 결합 상태를 취하고 있어 열전달을 상당히 방해하였을 것으로 보인다. 따라서 손상튜브의 손상원인을 다음과 같이 정리할 수 있다.

손상튜브는 내부스케일이 다량 퇴적됨으로 인하여 이상 고온에 노출되었으며, 이로인해 온도가 높은 화염측 외면에 creep으로 인한 기공이 형성되었고, 기공이 성장 및 합체에 의해 균열로 전파되어 최종적으로 파열에 이른 것으로 판단된다.

6. 결 론

국내 표준화력 보일러 수냉벽튜브의 손상원인을 규명하기 위하여 육안검사, 치수검사, 화학성분시험, 인장강도시험, 미세조직시험, 내면스케일성분시험 등을 수행한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

1. 육안검사 결과 손상부는 연신이 적은 thick edged 형태를 갖고 있고, 튜브 내·외면에 두꺼운 스케일을 갖고 있었다.
2. 치수검사 결과 연신이 적게 발생했다.
3. 화학성분시험 결과 규격을 만족하고 있었다.
4. 손상튜브의 인장강도는 DIN17175 규정을 만족하고있으며, 화염측은 항복강도가 신재에 비해 20%감소되었다.

5. 미세조직시험 결과 손상은 외면에서 시작하여 내면으로 진행하고 있었으며, 주 균열 부근에 많은 기공 및 균열이 존재하고 있었다.
6. 튜브 화염측 내면에는 스케일이 두껍게 부착되어 있었으며, 내면스케일은 정상보일러의 10배 이상이 되었으며, 성분은 유사하였다.

따라서, 수냉벽보일러튜브의 손상원인은 내면스케일의 과다 퇴적에 따른 튜브의 고온노출에 의한 creep현상으로 판명되었다.

참 고 문 헌

1. R. Viswanathan, "Damage Mechanism and Life Assessment of High Temperature Components", ASM International, pp.189~243, 1989
2. R. B. Dooley and W. B. Mcnaughton, "Boiler Tube Failures", EPRI Report, Vol. 1, pp. 61~75, 1973
3. H. Ishikawa 외 3인, "Thermal Factors on Maintaining the Reliability of Boiler Tubes", 화력원자력발전, Vol. 29, No. 4, 1978
4. A. Kaeabe, H. Karasu, "Calculation of Critical Values for Boiler Scale and of Cleaning Intervals", 화력원자력발전, Vol. 27, No. 4, 1976