

접선분사형식 석탄화력 보일러 튜브의 화염측 부식경향에 대한 연구

백세현*†, 김현희*, 박상빈*, 김태형*, 박호영*, 김영주*

The study on fire side water wall tube corrosion trend for tangential fired coal boiler

Key Words : Boiler, Fire side corrosion, Coal

1. 서 론

현재 국내에서 대두되고 있는 석탄연소 보일러의 수냉벽 튜브에 대한 화염측 부식현상은 미국의 발전소들에서는 수십년전부터 알려져 있었으며, NOx 배출 저감을 위한 air staging 운전의 증가에 따라 부식경향도 증가되는 추세이다.^[1]

보일러 수냉벽 튜브의 부식형태는 Fig. 1과 같으며, 주로 연소가스중의 황화수소 그리고 튜브 외면에 부착되는 퇴적물에 포함된 유황 및 염소에 의한 부식이 주 원인으로 알려져 있다.^[2]



Fig. 1 Water wall tube corrosion^[2]

한편 국내 대용량 초임계압 석탄화력 발전소들은 Table 1과 같이 현재 38개 호기가 운영되고 있으며, 상기 보일러들은 NOx 저감을 위해 버너지역 상부에 위치한 OFA의 damper 개도를 거의 100% open 하는 air staging 운전을 적용하고 있다.

그중 초기에 건설된 500MW급 접선연소형식 보일러들은 운영기간이 약 15-20년에 경과함에 따라 Fig. 2와 같이 수냉벽 튜브에 부식이 광범위하게 진행되고, 보일러 튜브누설에 따라 발전소 불시정지가 발생하는 등 고질적 문제점으로 대두되고 있다.

Table 1 Status of domestic coal-fired power plants

Power plant type	Unit	construction completion
500MW grade 1pass corner fired boiler	20	1993-2001
500MW grade 2pass corner firing boiler	10	2005-2009
800MW grade 2pass corner firing boiler	4	2004-2008
500MW grade 2pass opposite firing boiler	2	2002
800MW grade 2pass opposite firing boiler	2	2014
1000MW grade 2pass opposite firing boiler	6	under construction



Fig. 2 Tube corrosion and maintenance

그러나 현재까지는 부식발생 경향 및 손상 메카니즘에 대한 정량적 분석은 미흡한 실정이다.

따라서 본 논문은 현재 부식문제가 대두되고 있는 500MW급 접선분사형식 석탄화력 보일러를 대상으로 육안점검과 두께측정 및 CFD 해석을 병행하여 부식 메카니즘을 고찰하고, 그 결과를 발전소 설비 유지정비 및 후속 발전소의 경향 예측에 참고자료로 활용하려는 목적을 가지고 있다.

* Corresponding Author, magenta@kepco.co.kr
© 2015 The Korean Society of Combustion

2. 발전소 현장점검 결과

2.1 화로내부 육안점검 및 두께측정

500MW급 접선연소형식 보일러들 중 B 발전소 (운전기간: 약 18년3개월)에 대하여 계획정비 기간 중 화로내부 육안점검을 시행 하였다.

그 결과 Fig. 3과 같이 버너 및 OFA가 설치된 높이에서 부식이 관찰되었으며, 화로내부 기준으로 버너분사 각도의 둔각측, 즉 각 버너의 좌측 튜브들에서 집중 발생되는 것으로 파악되었다.

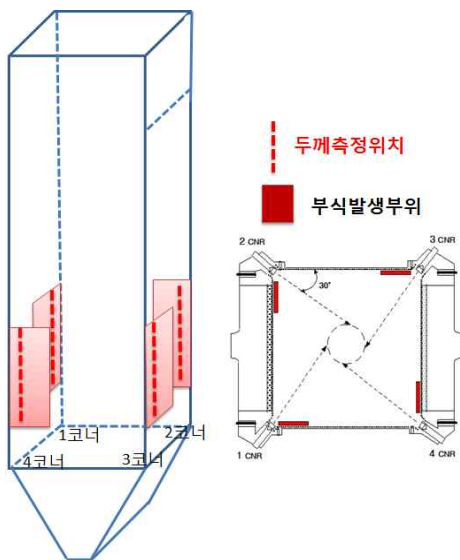


Fig. 3 Corrosion locations and ultrasonic thickness measurement point

부식율에 대한 정량적 평가를 위하여 보일러 각 코너의 부식발생 부위중 총 1,509 point에 대하여 Fig. 4와 같이 초음파 두께측정을 시행하였다. 측정대상 보일러 튜브의 재질은 저합금강 계열인 13CrMo44 이며 설계두께는 5.0mm 이나, 두께 측정결과 약 63%의 튜브가 현장의 정비관리 기준치인 3.5mm (설계두께의 70%) 이하로 두께 감소가 진행되고 있었다.^[3]



Fig. 4 Tube corrosion status & measurement point

2.2 튜브부식 메카니즘

미분탄 보일러의 수냉벽 부식기구 규명 및 부식속도 예측에 관한 선행연구의 내용을 참고하면, B화력 발전소 수냉벽 튜브의 부식 원인은 Fig 5와 같은 수냉벽 퇴적물의 황성분에 의한 부식과, Fig 6과 같은 연소가스의 황화수소에 의한 부식으로 판단된다. 한편 B화력에 연소되는 석탄은 외국 사례와는 달리 염소성분이 거의 없어 HCl 또는 Cl에 의한 부식은 무관한 것으로 판단된다.

튜브에 부착되는 퇴적물은 부식 속도를 증가시키며, 경우에 따라서는 국부적으로 심한 부식을 발생 시킬 수 있다.^[4] 보일러 화로내부 벽면주변에 환원성 환경이 조성되어 불균일한 산화피막에 퇴적물이 부착되면 퇴적물 표면 밑에서 연료과잉 분위기가 형성되고 황화반응에 의한 부식이 발생된다. 높은 열부하로 분해된 황성분은 금속표면의 황화반응에 참여하는데 이때 생성되는 금속 황화물피막은 기체투과성도 높고, 박리도 잘 일어나 튜브 손상이 지속적으로 발생된다.^[5]

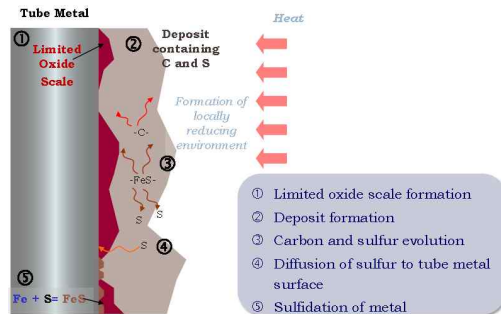


Fig. 5 Schematic of deposition related corrosion mechanism

석탄에 함유된 황은 일반적인 조건에서는 SO₂ 또는 SO₃로 대부분 산화되나, 공기가 부족한 환원성 분위기에서는 H₂S로 전환된다.^[6]

화로 내부에서 H₂S가 보일러 튜브의 튜브금속 표면으로 확산되면 다공성의 황화철이 형성되는데 형성된 물질은 기체투과율이 높기 때문에 부식 현상이 계속 발생된다.^[5]

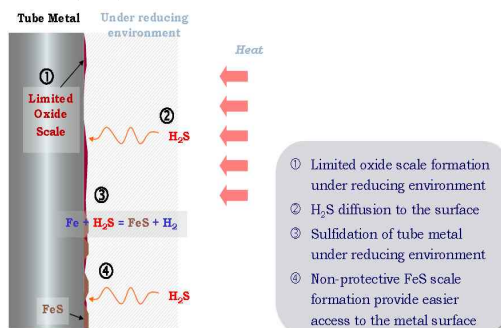


Fig. 6 Schematic of H₂S corrosion mechanism

3. CFD 해석 및 고찰

3.1 적용조건 및 모델

B 석탄 화력 보일러는 500 MW급 초임계압 관류형, 1pass형식이며 W 16.5 * D 16.5 * H 86.91 m의 대용량 보일러이다. 버너는 보일러의 각 코너에서 화로 중심부 측으로 50°(39°)의 각도로 배치되어 화로의 중심부에 fire ball를 형성시키는 방식으로 연소한다.

CFD 해석시 연료는 설계연료인 역청탄과 아역청탄을 50:50 혼탄한 것으로 가정하였으며, 일반적으로 사용중인 운전조건인 총 공기비 1.17 및 OFA damper 100% 개방조건을 적용하였다.

부식 모델중 퇴적물 관련 상관식은 식(1)과 같이 전력연구원에서 개발한 관계식^[5]을 적용하였다.

$$CR_{dep} = 474.13 * f(S) * h(dep) * g(SR) \quad (1)$$

$$* \exp\left(\frac{-10313}{1.987 T}\right) * (HF)^{0.198}$$

where

$S \leq 1\%$ 일때 $f(S)=S$, $S > 1\%$ 일때 $f(S)=1$

$dep \leq 0.2(20\%)$ 일 때 $h(dep) = 5 \times dep$

$dep > 0.2(20\%)$ 일 때 $h(dep) = 1$

환원성 환경일때 $g(SR) = B \times (1 - SR)^a + D$

산화성 환경일때 $g(SR) = C \times (SR - 1)^b + D$

한편 연소가스중 황화수소(H₂S)에 의한 수냉벽 부식은 Kung^[7]이 제시한 관계식을 적용하였다

$$CR_{H_2S} = (3.2 * 10^5) * \exp\left(\frac{-15818}{1.987 T}\right) * H_2S^{0.574} \quad (2)$$

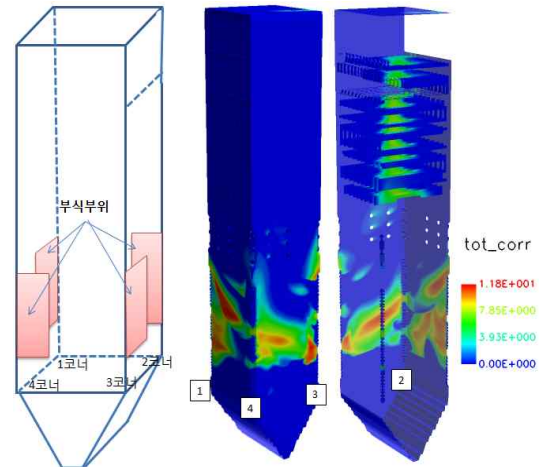
$$* \left[\frac{1}{(C\% + 10.5)^{1.234}} \right] \pm 2.2$$

부식해석은 연소해석이 완료된 후 후처리 방법으로 처리하며 벽면 및 벽면에 인접한 유동장의 조건을 식 (1), (2)에 적용하여 계산된다.

3.2 해석결과 및 고찰

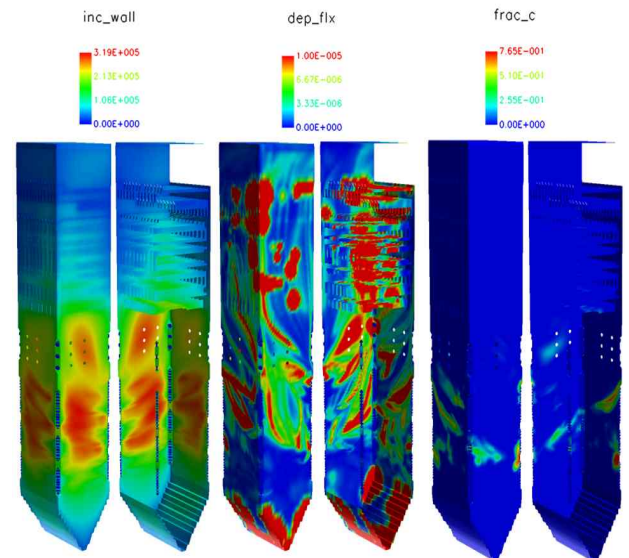
CFD 해석 결과는 Fig 7과 같이 실제 현장에서 확인한 부식 부위보다 다소 광범위하게 계산되었으며 초음파 두께측정 결과에서의 평균 부식율은 3.76 mil/yr, 동일 부위에 대한 CFD 해석의 결과는 5.9 mil/yr 로서 약 60% 정도의 편차가 있으나 전반적인 경향은 유사하였다.

단 Fig. 7 (b) 우측 상부의 결과와 같이 고압급강 재질의 과/재열기 튜브에 대해서는 검증이 이루어 지지 못했으므로 향후 별도의 현장 두께측정 및 해석결과에 대한 비교분석이 필요하다.



(a) Field result (b) CFD result
Fig. 7 Comparison of field result & CFD analysis for waterwall tube corrosion

또한 Fig. 8을 참조하면 부식 상관식(1)에 제시된 바와 같이 높은 열부하와 퇴적을 항목이 동시에 만족되어야 부식에 취약한 환경이 조성되는 점이 타당함을 알 수 있었다.



(a)Heat flux (b)Deposition (c)Unburned carbon

Fig. 8 CFD analysis result for factors that affecting waterwall tube corrosion

B 화력 발전소는 NOx 저감을 위해 air staging 운전을 적용하여 왔기 때문에 버너지역은 상대적으로 환원성 분위기가 조성된다.

Fig. 9는 상부와 중간단 버너사이의 수평단면에 대한 황화수소농도, 가스온도 및 O₂ 농도 분포결과이다. 점선연소 형식의 특성에 따라 각 버너 분사각도의 둔각 측 벽면주변은 국부적으로 가스온도가 높게 유지될 뿐만 아니라, O₂가 부

죽한 환원성 분위기가 조성되어 미연분의 퇴적 가능성이 상대적으로 크고, 벽면주변의 H_2S 가스 농도가 높아 튜브 부식을 가속시키는 것으로 판단되며, 현장에서 확인된 부식위치와 계산결과가 유사함을 볼 수 있다.

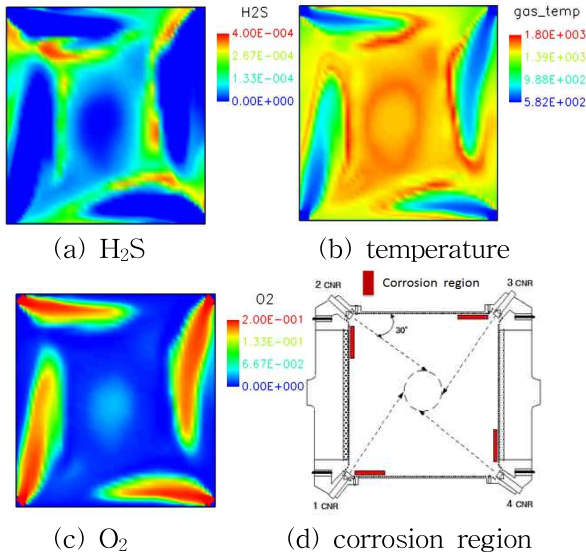


Fig. 9 Comparison of corrosion location with H_2S , Gas temperature, CO distribution

4. 결론

현재 수냉벽 튜브의 부식문제가 대두되고 있는 500MW급 집진연소형식 석탄화력 보일러를 대상으로 육안점검, 두께측정 및 CFD 해석을 병행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 보일러 화로 내부중 환원성 분위기이며 열부하 및 퇴적물이 높은 위치인 버너 및 OFA가 설치된 높이 구역에서 부식이 발생되며, 집진연소의 특성상 각 버너의 분사 방향의 둔각 부위에 위치한 튜브에서 집중적으로 발생된다.

(2) 퇴적물 및 황화수소와 관련하여 선행연구에서 제시된 부식 상관식을 CFD에 적용하여 계산한 결과, 현장의 부식을 및 부식위치 경향이 비교적 유사하게 모사되었다.

(3) 현장점검 및 수치해석 결과를 통해 얻은 경향을 부식 취약부 튜브에 대한 내부식 코팅 또는 교체등 정비작업에 활용 가능할 것으로 판단된다

또한 향후 버너지역 공기비가 부식 경향에 미치는 민감도 분석을 및 운전최적화 시행이 필요하다

것이다.

후 기

본 연구는 2014년 한국전력공사가 수행중인 자체 연구과제(R15GA11)의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] EPRI, "Waterwall wastage in low NO_x Boilers TR-111155", 2006

[2] EPRI, "Waterwall wastage mechanism in coal fired boilers TR-1004021", 2001

[3] Sehyun Baek, HyunHee Kim, Hoyoung Park, SungHo Ko, "Empirical Study on water wall tube corrosion mechanism for Tangential type coal fired power plant boiler" Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 4, pp.49-55, 2014

[4] Bakker, W.T., 2003, "The effect of deposits on waterwall corrosion in fossil fuel boilers," Materials at High Temperatures, Vol. 20, No. 2, pp. 161-16

[5] 서상일, "미분탄 보일러의 수냉벽 부식기구 규명 및 부식속도 예측에 관한 연구", 충남대학교 학위논문, 2009, pp. 26-48.

[6] 김태형 서상일 박호영 김영주, "저 NO_x 연소환경에 의한 미분탄 연소로의 화염측 부식 연구", 대한기계학회 춘추학술대회 Vol.2006 No.6, 2006.

[7] Kung, S. C., "corrosion Studies for Low NO_x Burner Technology," EPRI Report TR 108750. 1997,