

석탄화력발전소 보일러의 수냉벽튜브 부식 메커니즘에 대한 실증적 고찰

백세현[†] · 김현희 · 박호영 · 고성호*

한전 전력연구원, *충남대학교

(2014년 5월 9일 접수, 2014년 12월 10일 수정, 2014년 12월 12일 채택)

Empirical Study on water wall tube corrosion mechanism for Tangential type coal fired power plant boiler

Sehyun Baek[†] · HyunHee Kim · Hoyoung Park · SungHo Ko*

KEPRI, *Chungnam University

(Received 9 May 2014, Revised 10 December 2014, Accepted 12 December 2014)

요약

석탄화력 발전소 보일러의 부식 메커니즘에 대한 실증적 고찰을 위하여 500MW 표준화력 발전소 보일러에 대한 보일러 튜브의 두께측정 및 수치해석을 병행하여 분석을 시행하였다. 그 결과 접선연소 방식의 보일러 수냉벽 튜브의 부식에 가장 핵심적인 영향을 미치는 메커니즘은 퇴적된 미연탄소분에 포함된 유황분에 의한 부식이었으며, 두 번째 요소는 보일러 내부에서 국부적인 환원성 분위기가 생성 되는 위치에서의 H₂S 가스에 의한 부식으로 나타났다. 이와 같은 수냉벽튜브 부식을 완화시키기 위해서는 보일러의 다단연소 운전을 감소시키는 것이 필요하며, 미연분 감소를 위한 엄격한 미분도 관리 및 부식 취약부위에 대한 내부식 코팅보강 작업이 필요하다.

주요어 : 부식, 보일러, 수냉벽

Abstract - In this study, boiler tube thickness measurement and numerical analysis were conducted for standard 500MW coal-fired power plant in order to research the mechanism of tangential-fired boiler corrosion empirically. The most dominant corrosion mechanism of tangential-fired boiler waterwall was corrosion by sulfur contained in the unburned carbon. And the secondary mechanism was H₂S gas corrosion at localized reducing atmosphere. It is required to decrease the air-stage combustion operation in order to mitigate the waterwall tube corrosion. Also stringent coal pulverization quality control and reinforcing work for corrosion susceptible area such as anti-corrosion coatings is required

Key words : Corrosion, boiler, waterwall

1. 서 론

환경문제에 대한 인식이 높아지면서 화력발전소들이 보일러에 채택한 저 NO_x 버너와 Over Fire Air (OFA)와 같은 기술들은 NO_x 발생량을 효과적으로 저감할 수 있으나 이러한 기술의 핵심이 되는 연료-

공기의 다단연소는 보일러의 수냉벽(water wall tube)에 악영향을 미칠 수 있다.

접선연소형식으로 설계된 국내 표준화력 보일러도 대부분 OFA의 damper개도를 거의 100% open 하여 NO_x 저감효과를 높이는 운전 방법을 채택하였는데, 최근 광범위한 범위에서 수냉벽 튜브 부식이 발견되고, 보일러 튜브누설에 따른 발전소 불시정지가 발생되는 등 문제점들이 발생되고 있다.

이와 같은 미분탄 연소 보일러 수냉벽의 부식현상은

[†]To whom corresponding should be addressed.
Korea Electric Power Research Institute, KEPCO
Tel : 042-865-7522 E-mail : magenta@kepco.co.kr



Fig. 1. Boiler waterwall tube rupture of T-Powerplant

오래전부터 어느 정도는 인식되어 오던 문제점이며 석탄화력 보일러 화염측 부식 메카니즘에 대한 연구는 세계 여러 연구기관 및 발전회사에서 수행되고 있다. 현재까지 연구에 따르면 보일러 수냉벽 튜브의 부식은 기체상태의 황성분에 의한 요인, 보일러 튜브에 부착되는 퇴적물에 의한 요인 및 석탄 ash에 포함된 염소성분에 의한 부식이 지배적인 것으로 알려져 있다.[1-6]

본 논문에서는 500MW 표준석탄화력 발전소를 대상으로 보일러 수냉벽 튜브의 부식메커니즘을 실증적으로 고찰하고자, 총 20개호기중 가장 오랜 기간 운전된 B 화력 발전소를 대상으로 보일러 튜브에 대하여 두께측정 및 선행연구에서 제안된 부식 상관식을 활용한 수치해석을 시행하였으며, 그 결과를 발전소 설비 유지정비에 참고자료로 활용하고자 한다.

2. 수냉벽 부식예측 상관식

2.1 연소가스에 함유된 황성분에 의한 부식

석탄에 함유된 황은 충분한 공기가 공급된 산화성 분위기에서는 SO_2 또는 SO_3 로 대부분 산화되나, 공기가 부족한 환원성 분위기에서는 H_2S 로 전환되어 수냉벽 튜브를 부식 손상시킨다.[5]

보일러 화로내 벽면주변의 국부적 환원성 환경에서 불균일한 산화피막이 수냉벽 표면에 형성되며, 황화수소(H_2S)와 같은 환원된 황성분 튜브금속 표면으로 확산된다. 이후 튜브 금속 황화작용과 금속표면에서의 황화철 형성되는데 금속표면에 형성된 황화철은 다공성으로서 부식성 기체가 튜브 금속으로 접근시 보호막을 제공하지 못하기 때문에 부식현상은 계속 진행되게 된다. [4]

기체상태 황화수소(H_2S)에 의한 수냉벽 부식은 수냉벽 튜브에 포함된 크롬 함량이 $0 \leq Cr \text{ wt}\% \leq 10$

범위인 탄소강 및 저합금강의 경우에 Kung에 의해 경험적으로 개발된 부식 관계식이 아래와 같이 사용될 수 있다.[6]

$$CR_{H_2S} = (3.2 * \exp^5) * \exp\left(\frac{-15818}{1.987T}\right) * H_2S^{0.574} * \left[\frac{1}{(Cr\% + 10.5)^{1.234}}\right] \pm 2.2$$

2.2 수냉벽에 퇴적된 퇴적물의 미연분에 포함된 황성분에 의한 부식

불완전 연소된 탄소 성분 또는 금속표면위에 퇴적되는 황화철(FeS)의 부착물이 튜브의 부식 속도를 증가시킬 수 있고 경우에 따라서는 국부적으로 아주 심하게 부식속도를 증가시킬 수 있다. [5] [7]

보일러 화로내 벽면주변의 국부적 환원성 환경에서는 산화피막(Oxide scale) 형성이 억제되며 불균일한 산화피막에 퇴적물이 부착되면 퇴적물 표면 밑에 연료과잉 분위기가 형성되고 황화반응에 의한 부식이 발생된다. 높은 열부하로 분해된 황성분은 금속표면의 황화반응에 참여되는데, 생성되는 금속 황화물(Metal sulfide)피막은 기체투과성도 높고, Spalling도 잘 일어나 튜브 손상이 지속적으로 발생되게 된다.

한편 한전 전력연구원에서는 금속조각을 여러 가지 산화상태와 황 성분 비율을 가지고 있는 퇴적층으로 표면을 코팅한 후 온도와 산소 및 일산화탄소의 농도가 서로 다른 다양한 배기가스 모사 환경에 노출시키는 실험을 하였으며, 그 결과를 토대로 산화되지 않은 황 성분을 포함한 퇴적물에 의한 수냉벽 부식을 예측하기 위한 관계식이 제안한 바 있다. [4]

$$CR_{dep} = 474.13 * f(S) * h(dep) * g(SR) * \exp\left(\frac{-10313}{1.987T}\right) * (HF)^{0.198}$$

여기서 $g(SR)$ 은 국부적 당량비의 함수이고 국부적 당량비에 따라 SR 이 1 이하인 환원성 환경에서는 $g(SR) = B \times (1 - SR)^a + D$ 이고, SR 이 1 이상인 산화성 환경에서는 $g(SR) = C \times (1 - SR)^b + D$ 이다.

2.3 석탄회중 염소성분에 의한 부식

석탄에 포함된 염소 성분에 의해 연소 중에 발생하는 기체 상태에 의한 부식은 기체상태의 염화수소(HCl) 또는 염소가스(Cl)에 노출되어 발생할 수 있다. 그러나 국내석탄화력 발전소들이 수입해서 연소하는

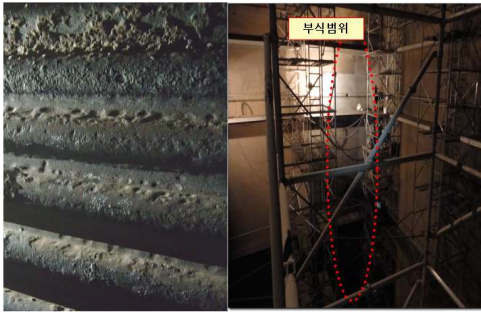


Fig. 2. tube corrosion of B Powerplant

석탄들은 외국의 사례와는 달리 염소성분이 거의 없기 때문에 이번 연구에서는 제외하였다.

3. 보일러 현장 상태진단

3.1 보일러 내부 육안점검

약 18년 3개월간 운전된 B 발전소 5호기의 계획에 방정비 기간중 보일러 내부를 육안점검하고 수냉벽 튜브의 부식발생부위에 대하여 초음파 두께측정 시험을 시행하였다.

육안점검결과 보일러 버너 및 OFA 구역의 각 코너 부위의 튜브 외면에서 부식 현상이 심하게 진행되고 있었으며, Fig. 2와 같이 보일러 내부에서 관찰시 각 코너에 설치된 버너기준 각각 좌측으로 화염 회전방향 반대 측 산소가 희박한 환원성구역에 3-4m 부근까지 집중적으로 부식이 진행되고 평균 잔여두께가 약 3.5mm 미만(설계두께 5mm)이므로 즉시 교체 또는 대대적인 정비작업이 필요한 상태였다.

3.2 초음파 두께측정

정량적인 평가를 위하여 부식발생 부위에 대한 초음파 두께 측정을 시행하였다.

초음파 펄스-에코 법에 의한 두께 측정기로 두께를 측정할 경우 측정 장치는 시험편을 왕복하는 초음파 펄스의 진행시간을 측정하게 된다. 이와 같은 측정 방법은 시험에 앞서 시험편과 동일한 재료의 대비시험편으로 측정 장치를 검 교정하게 되는데 이는 대비시험편의 종파속도를 장치에 설정시키는 결과를 가져온다. 교정 후 초음파 측정 장치는 시험편에서 측정된 초음파 펄스의 왕복진행 시간을 대비 시험편에 의해 세팅된 음속으로 곱해 주어서 시험편의 두께 정보를 출력시키게 된다.

측정위치는 보일러 각코너의 부식발생부위에 대하

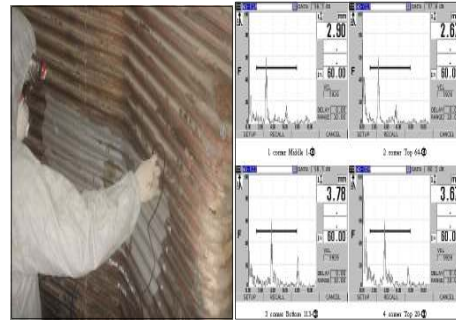


Fig. 3. UT thickness test for corrosion

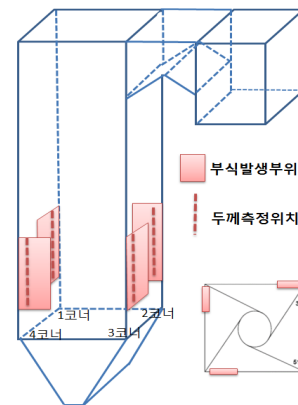


Fig. 4. Corrosion area and thickness measurements point

Table 1. Thickness measurements result

구분	1코너	2코너	3코너	4코너
검사개소	345	385	353	385
3mm이하	38	90	45	59
평균두께	3.5	3.3	3.4	3.3
원두께	5.5	5.5	5.5	5.5

여 OFA, 상, 중, 하부 버너 높이까지 총 1,509 point를 측정하였다.

측정대상 보일러 튜브의 신품 설계두께는 5mm 이나, 현재 부식이 진행되어 검사대상의 62.9%인 949개소 튜브의 잔여두께가 3.5mm 이하로 나타났다.

4. 수치해석

4.1 보일러 및 버너 특성

부식이 발생된 B화력 보일러는 500 MW급 초임계 압 관류, 원-패스 형이며, 접선연소 방식을 채용하였고, 폭 16.5 m 깊이 16.5 m 높이 86.91 m의 대용량 보일러이다. 1개 호기의 보일러에는 6대의 미분기가 있으며 각 미분기의 출구는 4개의 코너에 위치한 버

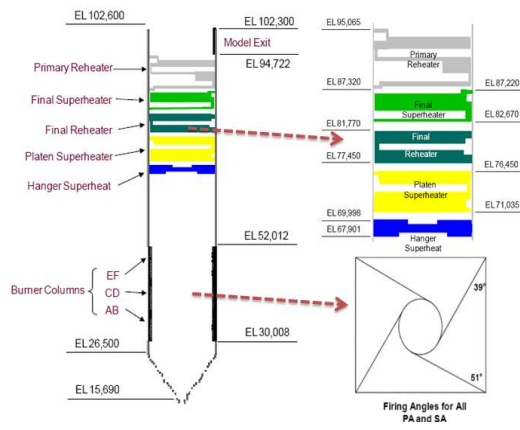


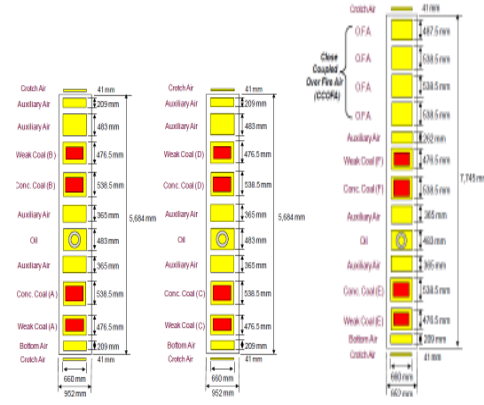
Fig. 5. Boiler layout

너로 보일러 노에 연결되어 있다. 타워형 구조이므로 높이가 높고, 전열면의 튜브들은 가스의 흐름 방향에 대하여 수직방향으로 설치되어 있다.

버너 계통의 구조는 보일러의 각 코너에 설치된 윈드박스에서 화로 중심부 측으로 버너 및 공기노즐들이 각각 50°(39°)의 각도로 배치되어 화로의 중심부에 회전하는 화염 형태(fire ball)를 형성시키는 방식인데, 화염에 강한 난류를 발생시켜 산소와 연료간에 강한 혼합이 이루어지도록 한다. 이러한 방식은 노내에서 열전달이 효율적으로 고르게 이루어 지도록 하고, 착화 안전성 및 미연탄소분의 손실 감소에 효과적이다. 버너는 분사 각도를 상하로 조절이 가능한데 이런 방법으로 입자 체류시간과 화염 분포에 변화를 줄 수 있다. 미분기에서 공급된 미분탄은 이송용 공기에 의하여 버너로 보내진 후 보일러 내부에 주입 된다. 1개의 버너는 2개의 노즐 (농후한 연소조건인 Cone 노즐 및 희박연소 조건의 Weak 노즐)로 구성되어 있으며 보일러 1개 호기에는 총 24개의 버너가 설치되어 있다. 각 버너 노즐의 상 하부에는 연소용 공기를 공급하기 위한 노즐이 위치하며, 버너의 최상부에는 고정형 과잉공기 주입노즐(CCOFA : closed coupled over fire air)이 설치되어 있다.

4.2 연료 및 운전조건

현재 국내 500 MW 표준석탄화력 발전소의 보일러는 운영비 절감을 위하여 기존의 설계탄인 역청탄에 아역청탄 또는 저 열량탄의 혼소를 증가하는 추세이며, 이번 연구에서는 부식 메카니즘 고찰의 목적에 따라 일반적으로 적용하고 있는 운전조건과 같이 역



(a)bottom (b)middle (c)top
Fig. 6. Burner Arrangement

청탄인 Design Coal 과 아역청탄계열인 ABK를 각각 50:50 혼탄하여 운전한 것으로 가정하였다.

각 버너별 배분은 A버너~E버너는 동일조건이고 실제의 일반적인 현장조건과 마찬가지로 F 버너는 사용하지 않는 상태로 가정하였다. 연소로의 운전조건은 석탄 이송용 공기 온도는 60℃, 연소용 공기 온도는 309℃이며, 총 stoichiometry ratio는 모든 조건에서 1.17 으로 하였으며 발전소의 운전조건과 같이 고정형 과잉공기 주입노즐(CCOFA)의 damper는 100% 개방한 것으로 하였다

4.3 수치해석결과

수치해석의 결과는 실제 현장에서 육안점검 및 초음파 두께측정 확인된 것과 같이 화로 내부 중 버너주변 지역에서부식이 발생됨을 예측가능 하였으며, 부식위

Table 2. Coal properties

COAL ANALYSIS		Design Coal	ABK
TotalMoisture(asfired)		10	20
HHV, kcal/kg (asfired)		6,080	5,090
Proximate Analysis (wt %)	Moisture	5	10
	Ash	15	4.15
	Volatile Matter	28	41.3
	Fixed Carbon	52	44.55
Total		100	100
Ultimate Analysis (wt %)	Carbon	69	70.66
	Hydrogen	4.3	5.0
	Oxygen	8.7	18.17
	Nitrogen	1.4	1.29
	Sulfur	0.8	0.08
	Ash	15.8	4.81
Total		100	100

Table 3. Comparison between CFD analysis and Measurement

	수치해석	초음파두께측정
검사개소	-	1,509
평균잔여두께	2.68 mm	3.52 mm
최초두께	5 mm	5 mm
최대부식율	11.7 mil/yr	파열사레다수
평균부식율	5.9 mil/yr (0.1498mm/yr)	3.76mil/yr (0.0955mm/yr)
운전시간	18년3개월	
발전소이용율	0.85	

치도 화로내부에서 보는 시점기준으로 각각의 버너의 좌측면 측에 집중적으로 발생하는 경향이 일치하였다. 또한 수치해석에서 예측된 평균 부식율은 5.9 mil/yr 이며 운전시간 18년3개월에 이용율 0.85를 곱하면 평균 두께감소량은 약 2.33 mm이고 최초두께가 5mm 이므로 평균잔여 두께는 2.68mm로 계산된다. 한편 실제 초음파 두께측정결과 평균잔여 두께는 평균 3.52mm로 측정되어 수치해석과 실측 data가 유사한 결과를 얻었다. 그러나 부식진행 범위 및 부식율이 실제보다 다소 크게 예측되는 경향에 대해서는 향후 보완 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.4 보일러 수냉벽 부식메카니즘 고찰

B 표준화력 발전소는 보일러의 각 코너에 버너 및

공기노즐들이 각각 50°(39°)의 각도로 배치되어 화로의 중심부에 회전하는 화염 형태(fire ball)를 형성시키는 접선연소 형식이며, NOx 저감을 위하여 OFA 를 거의 full open 상태로 운전하는 다단연소를 적용해 왔다. 따라서 화로내부는 전반적으로 환원성 분위기 일 뿐만 아니라 벽면주변은 위치별로 가스온도, 열부하, O₂ 농도, H₂S 가스농도 및 미연분 퇴적의 경향이 다르게 나타난다.

실제 운전조건을 적용하여 CFD 해석을 시행한 결과에서는 당초 접선연소형식 및 다단연소의 영향에 따라, 실제 부식이 발생되고 있는 버너구역의 각 코너 좌측지역 튜브의 벽면 주변은 국부적으로 가스의 온도가 높고, O₂ 가 결핍한 환원성 분위기로써 미연탄소분 발생 가능성이 상대적으로 크며, H₂S 가스의 농도가 높아 부식을 가속시키는 분위기가 조성되고 있는 것으로 예측되었다.

앞에서 고찰한 바와 같이 석탄화력 보일러의 수냉벽 튜브는 NOx 저감을 위한 다단운전 및 과도한 저과잉 공기운전에 의한 환원성 분위기 형성, H₂S 가스 발생, 국부적 불완전연소에 의한 미연탄소분의 퇴적에 따라 부식이 발생되는데, 접선연소 형식의 경우 분사방향의 특징에 따라 각 코너에 설치된 버너의 좌측면에 집중적인 부식이 진행된다.

Fig 9와 같이 부식에 가장 큰 영향을 미치는 메카니즘은 미연분 퇴적에 의한 미연탄소분내의 황성분에 의한

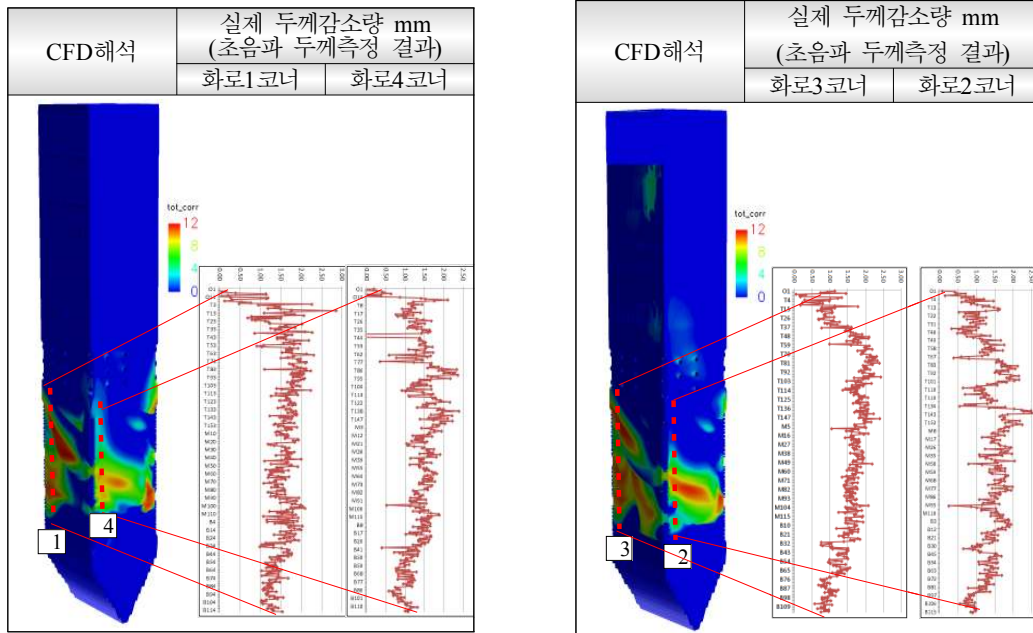


Fig. 7. Comparison between CFD analysis and Measurement

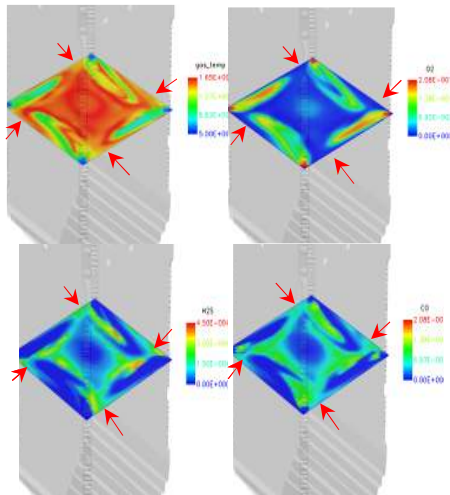
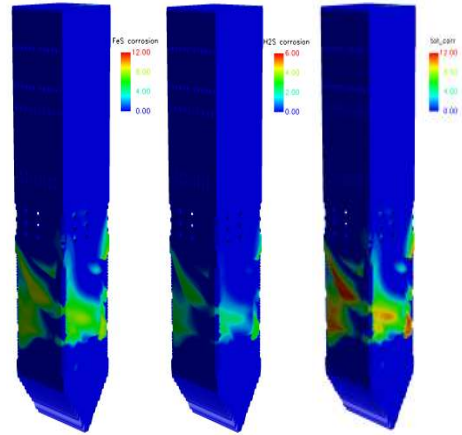
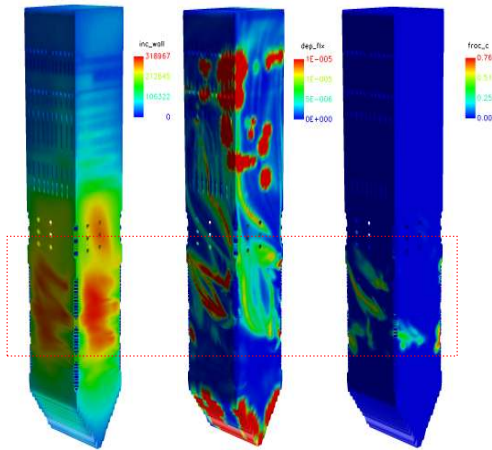


Fig. 8. Gas temperature and O₂, H₂S, CO concentration



(a)미연분퇴적부식 (b)H₂S가스부식 (c)전체부식

Fig. 9. Corrosion of the water wall according to each mechanism



(a)열부하 (b)퇴적물 (c)미연분부착

Fig. 10. Conditions that affect the corrosion wall

부식이고, 그 다음은 H₂S가스에 의한 부식이다. 단 이번 연구는 국내 발전소에서 연소되는 탄종의 특성을 고려하여 염소(Cl)에 의한 부식은 검토하지 않은 결과이다.

부식위치는 화로내 벽면주변 가스상의 분위기는 물론이고 Fig.10 과 같이 국부적인 열부하 퇴적물 및 퇴적물내 미연분의 조건에 따라 영향을 받으며 높은 열부하, 높은 퇴적을 및 미연탄소분 부착 3가지 항목이 동시에 만족되어야 부식에 취약한 환경이 조성되는 것을 알 수 있다.

5. 결론 및 대책

- (1) 약 18년 3개월간 운전한 B발전소 집선연소식

보일러의 수냉벽 튜브에 대한 현장점검 결과, 부식위치는 집선연소의 특성에 따라 화로 내 각 코너에 설치된 버너들 각각의 좌측구역에서 집중적으로 발견되었고 평균 부식율은 0.0955mm/year 였다.

- (2) B 발전소의 연료 및 운전조건을 반영하고 선행 연구들에서 제안된 상관식을 적용하여 CFD 해석을 시행한 결과, 부식율 및 부식위치 경향이 유사하게 예측됨을 확인하였다.
- (3) 국내 석탄화력 보일러의 부식 메카니즘은 화로 내 국부적 환원성 분위기 구역에서 퇴적된 미연탄소분에 포함된 황성분에 의한 부식이 가장 우세하고, 그 다음으로는 연소가스중 H₂S에 함유된 황성분에 의한 부식이었다.
- (4) NO_x 저감을 위한 다단운전 및 과도한 저 과잉 공기운전은 환원성 분위기를 생성하고 미연분 퇴적을 증가시켜 부식에 취약한 환경을 조성하는 것으로 판단된다. 따라서 수냉벽 화염부식을 저감하기 위해서는 가능한 다단연소를 감소시켜야 하며, 미연분 저감을 위한 석탄의 미분도 관리가 중요하며, 부식취약부에 대한 내부식 코팅등 보강작업이 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제

(2010101010027C)의 일환으로 수행 되었습니다.

References

1. EPRI : “Waterwall wastage in low NOx Boilers TR-111155”, (2006)
2. EPRI : “Waterwall wastage mechanism in coal fired boilers TR-1004021“, (2001)
3. Nava. Paz, J. C., Plumley, A. L. : “Chow, O. K. and Chen, W., "Waterwall corrosion mechanisms in coal combustion environments," Materials at High Temperatures, Vol.19, No. 3, pp.127-137. (2002)
4. 서상일: “미분탄 보일러의 수냉벽 부식기구 규명 및 부식속도 예측에 관한 연구”, 충남대학교 학위논문, pp. 26-48. (2009)
5. 김태형 서상일 박호영 김영주 : “저 NOx 연소 환경에 의한 미분탄 연소로의 화염측 부식 연구”, 대한기계학회 춘추학술대회 Vol.2006 No.6, (2006)
6. Kung,S.C.:“corrosion Studies for Low NOx Burner Technology,”EPRIReportTR-108750. (1997)
7. Bakker, W.T. : “he effect of deposits on waterwall corrosion in fossil fuel boilers”, Materials at High Temperatures, Vol. 20, No. 2, pp.161-16(2003)