

석탄연소중 발생하는 보일러 튜브의 화염측 부식특성

김태형* · 서상일* · 박호영* · 김영주*

Fireside Corrosion Characteristics in Coal-Fired Boiler Tube

Tae-Hyung Kim, Sang-Il Seo, Ho-Young Park and Young-Ju Kim

ABSTRACT

Although fireside corrosion of heat transfer surfaces in coal fired steam generators has been a problem to some extent for a number of years, with the advent of low NOx firing systems these surfaces can be exposed to conditions that will exacerbate wastage rates. Numerous reports of waterwall wastage in coal fired boilers have appeared in the literature. It is believed that wastage results both from gaseous phase attack of metal surfaces and from deposition of ash and unburned fuel. Gaseous phase attack is known to occur in the presence of reducing sulfur species such as H₂S and in the presence of fuel chlorine. The highest wastage rates are thought to be due to deposition of unoxidized material and the presence of fuel chlorine. Localized wall and near wall conditions that may exacerbate wastage include reducing conditions, high temperatures, high heat fluxes, and a high fraction of unoxidized material deposited. So, this study is directed at developing an advanced corrosion model in coal-fired utility boilers.

Key Words : Coal fired boiler, Test furnace, Fireside corrosion, Corrosion measurement

1. 서론

석탄연소중 발생하는 보일러 튜브의 화염측 부식과 관련한 연구들은 대부분 발전용과 산업용 보일러에서 연소중 질소산화물(NOx) 저감기술에 근거하여 시작되었다. 왜냐하면 NOx 저감기술의 핵심이 되는 연료/공기 다단연소와 관련하여 지금까지 경험하지 못했던 부식 현상 및 속도를 경험하게 되었기 때문이다. 이러한 연구들은 미국의 EPRI, 영국의 Cranfield와 National Physical Lab 등의 연구소와 대형 보일러 제작사에서 비교적 활발하게 이루어지고 있지만, 자세한 접근방법, 실험방법 및 결과 등은 거의 공개되고 있지 않다.

연소로 화염영역의 부식 메카니즘에 대하여 확실하게 규명된 것은 아직 알려지고 있지 않으며, 정량적 상관성을 도출하기 위한 많은 연구가 수

행되었다[1~5]. 현재까지 연구된 바에 따르면 석탄을 연소하는 보일러에서 복사부의 화염측에서 발생하는 부식은 기체상태의 황성분에 의한 것, 석탄에 포함된 연소성분에 의한 것, 보일러 튜브에 부착되는 퇴적물에 의한 것이 지배적인 것으로 알려져 있다.

보일러 튜브의 부식 모니터링 기술은 계획예방 정비 주기 사이에 실시하는 초음파 장비를 이용한 튜브의 두께 측정에 의존하거나 부식쿠포를 사용하기도 한다. 이러한 방법들을 이용하여 의미 있는 부식 데이터를 얻기 위해서는 상당히 긴 시간의 노출이 필요하며, 가장 큰 문제점은 부식에 의한 손실이 이미 발생된 후에 측정할 수 있기 때문에 부식예방에 효용성이 없다는 사실이다. 따라서 전체 보일러 튜브의 손실관리와 설비의 신뢰성 확보를 위해서는 부식을 예측할 수 있는 모델 및 프로그램과 항시 모니터링이 가능한 실시간 부식측정시스템을 이용하여 궁극적으로 설비 운전원에게 부식 조건에 대한 가이드를 제공하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 그 부식관리시스템 개발의 첫 단계로 연료성상, 연소방식 등에 따라 부식 발생부위와 부식 감량을 예측할

* 한전 전력연구원

† 연락저자, thej@paran.com

수 있는 부식 모델과 예측프로그램을 개발하여 부식으로 인한 경제적 손실을 저감시키고, 설비의 안정적 운영을 가능하게 하기 위한 것이다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험용 석탄

석탄을 사용하는 미분탄 연소 시스템에서 발생하는 부식 현상 및 속도는 시스템 운전조건에도 영향을 받지만 석탄 중에 포함된 황(S) 성분, 염소(Cl) 성분에도 밀접하게 영향을 받는다. 석탄의 황 성분이 증가할수록 그 석탄을 사용하는 시스템 내에서의 부식 가능성은 증가할 것이지만 황 성분이 계속 증가한다고 하더라도 일정한 범위 이상으로 증가하게 되면 더 이상 영향을 미치지 않게 된다[1]. 또한 석탄 중에 포함된 황 성분이 어떠한 형태로 존재하느냐에 따라서도 부식 현상에 영향을 미칠 것이다. 염소 성분에 의한 부식 성분도 어느 정도 범위까지는 석탄에 포함된 염소 성분 함량이 높아짐에 따라 증가하게 될 것으로 예상된다. 또한 황 성분과 염소 성분사이의 반응도 전체적인 부식현상에 영향을 미칠 수 있는 중요한 요인이 될 수 있다. 따라서 부식현상을 이해하기 위해서는 석탄의 이 두 성분, 즉 황과 염소 성분의 분석과 황 성분의 존재 형태를 분석하고 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 실험을 위해 신화탄과 인도민코탄을 선정하게 되었으며, 신화와 인도민코 탄의 공업분석과 원소분석 결과 및 측정된 염소 성분 값이 Table 1과 같으며, 미네랄 분포는 CCSEM(Computer Controlled Scanning Electron Microscopy)을 이용해 측정하여 Table 2에 나타냈다.

Table 1 석탄 분석(공업 및 원소 분석, 염소 분석)

Items	Shenhua	Indominco	
Ultimate Analysis (wt %)	C	75.88	65.42
	H	4.47	4.81
	O	6.13	8.48
	N	0.95	1.32
	S	0.37	0.93
	Ash	5.70	6.45
	H ₂ O	6.48	12.60
	Total	100.00	100.00
Proximate Analysis (wt %)	Cl	0.0250	0.0035
	F.C.	55.47	40.97
	V.M.	32.35	39.98
	Ash	5.70	6.45
	Moisture	6.48	12.60
Heating Value(kcal/kg)	Total	100.00	100.00
	LHV	6822	5900
	HHV	7102	6235

Table 1 미네랄 분포(wt% of all minerals)

Category	Shenhua	Indominco
Quartz	29.6%	17.6%
Unclassified	19.4%	27.8%
Mixed silicates	15.5%	19.1%
Clays	10.6%	6.6%
Si-rich	6.0%	5.4%
Calcite	5.3%	1.2%
Pyrites	4.7%	11.3%
Fe-Al-Silicate	4.0%	3.9%
Ca-rich	3.2%	0.9%
Gypsum/Barite	1.0%	5.4%
Dolomite	0.4%	0.4%
Rutile	0.3%	0.2%
Iron oxide	0.1%	0.1%

2.2 시험연소로

본 연구를 위해 사용된 시험연소로는 발전용 보일러 시스템을 모사한 파일럿 연소설비로서 미분탄을 연료로 사용하는 보일러에서 발생할 수 있는 연소현상 및 공정들을 시뮬레이션을 할 수 있도록 설계되었으며, 미분탄 기준으로 시간당 200kg을 연소할 수 있다. 전체적인 시스템은 Fig. 1과 같으며, 연소로 본체와 석탄취급 및 분쇄계통, 통풍계통, 냉각수 계통을 포함하는 연소공정 그리고 집진설비와 배연탈황설비를 포함하는 배기가스 후처리공정으로 구성되어 있다. 또한, 연소생성물을 측정하기 위한 각종 계측제어 장치와 전체 설비를 감시하고 통제할 수 있는 분산제어 시스템(DCS)으로 이루어져 있다. 본 실험은 T-Fired 연소 시스템을 사용하였고, 복사부에는 저 NOx 설비 모사 실험이 가능하도록 SOFA(Separated Over Fire Air) 설비가 구축되어 있고, 수평대류부에는 Soot Blowing 시스템 설비가 갖추어 졌다.

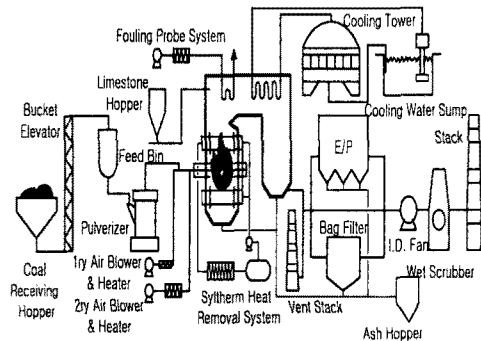


Fig. 1 시험연소로 시스템 구성도

시험연소로를 이용한 연소실험은 먼저 가스를 연료로 사용하여 연소로 내부를 예열하며 기준이 되는 온도 즉, 버너부 약 1m 상부에 위치하며 화염측 벽면으로부터 약10cm 떨어진 위치에 부착한 온도계를 기준으로 이 온도가 900℃에 도달할 때까지 2대의 가스버너를 사용한다. 기준온도가 900℃에 도달하면 미분탄 공급을 시작하고 30 정도는 가스버너와 미분탄 버너를 동시에 사용한 후 가스버너를 소화시킨다. 이후 시험연소로 운전조건은 계획된 실험조건으로 설정하여 유지시킨 후 연소상태를 확인하고 평가하여 양호할 경우 실험조건으로 채택하고 주기적으로 측정과 실험 자료를 취득한다. 그 후 실험을 종료하거나 다음 실험조건으로 변경하게 된다. 실험조건은 1차공기 온도 66℃, 2차공기 온도 300℃이고 1차공기/연료의 비는 2.1로 일정하게 유지하였다. 석탄 공급량은 1,247,036kcal/hr과 1,136,364kcal/hr를 기준으로 조정하였고, 버너부의 공기비(BSR)는 0.8~1.2 범위로 실험하였다.

2.3 부식속도 측정장치

일반적으로 발전용 보일러 튜브의 부식측정을 위해 다양한 방법이 사용되고 있으며, 본 실험에서는 부식속도를 실시간으로 측정하기 위해 전기화학적노이즈 법을 이용하여 Fig. 2와 같이 제작 구성된 CMS(Corrosion Monitoring System)를 사용하였다. CMS의 부식 측정 원리는 전기화학적 노이즈에 근거한 전극사이의 미세 전류 및 전압변화를 측정하여 부식속도를 계산하게 되며, 이와 같은 방법은 화염측 부식속도 측정에 널리 이용되고 있다. 본 장치는 전기화학적 노이즈 센서(부식센서), 신호조정 및 데이터 취득 모듈(신호변환 및 제어), 온도조정 장치, 냉각용 공기 공급장치, 부식신호를 해석하기 위한 데이터 취득 및 저장용 컴퓨터로 구성되어 있다.

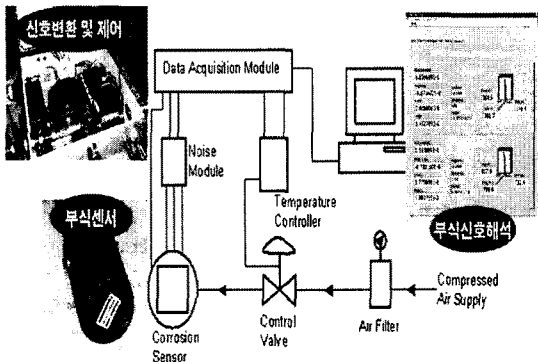


Fig. 2 CMS 구성도

부식속도는 CMS Probe를 시험연소로에 설치되어 있는 샘플 Port를 선정하여 측정하였으며, 구분하기 쉽도록 하기 위하여 각 Port는 Fig. 3과 같이 번호가 부여되어 있다.

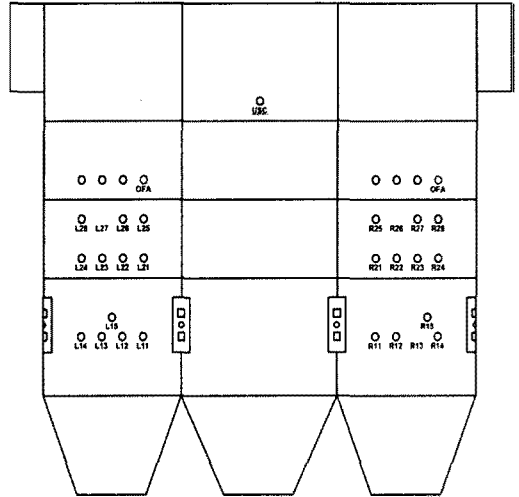


Fig. 3 시험연소로 Port위치 및 식별번호

3. 실험결과 및 고찰

3.1 인도민코탄의 부식속도

Fig. 4와 Fig. 5는 운전조건이 동일할 때 인도민코탄 200kg/hr, BSR 1.2에서 각 Port에서의 시간에 따른 센서 온도와 부식속도값의 변화를 보여주고 있다. 부식 Probe는 2개가 사용되었고 각 Probe를 설치한 후 번갈아가면서 각 Probe의 온도와 부식속도값을 기록하였다. 전체적으로는 낮은 부식 값을 보여 주고 있다. Fig. 4의 각 Port 중 Port L23에서 가장 높은 부식 성향을 보인다. 바로 옆의 Port L22는 L23보다 낮은 값을 보이고, Port L26은 아주 낮은 값을 보이고 있다. Fig. 5에서 측정되는 Port R22, R23, R27은 거의 비슷한 부식성향을 보이고 있다. 이들 값들은 온도 및 부식신호가 비교적 안정적인 시간대를 이용하여 부식속도 평균값을 구하면 R15:0.348 mm/yr, R22:0.452mm/yr, R23:0.405mm/yr, L22:0.243mm/yr, L23:0.735mm/yr, L26:0.024 mm/yr와 같다. 측정된 위치 중 Port L23에서 가장 높은 부식 속도값 0.735mm/yr를 보이고 있다. 이 Port를 제외한 다른 Port들에서는 왼쪽 측면 벽에서나 오른쪽 측면 벽에서는 비교적 낮은 값을 보여주고 있다.

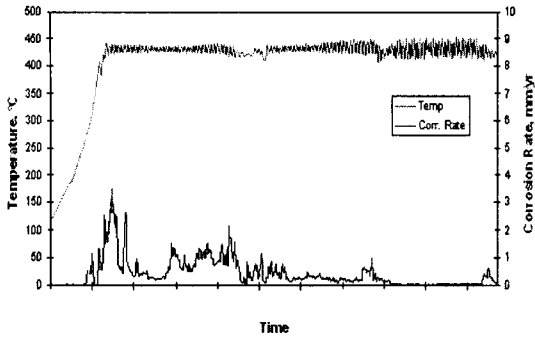


Fig. 4 측정위치별 부식속도
(인도민코탄 200kg/hr, BSR 1.2)

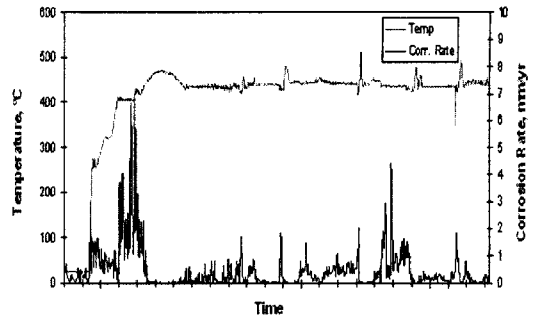


Fig. 6 측정위치별 부식속도
(인도민코탄 200kg/hr, BSR 0.8)

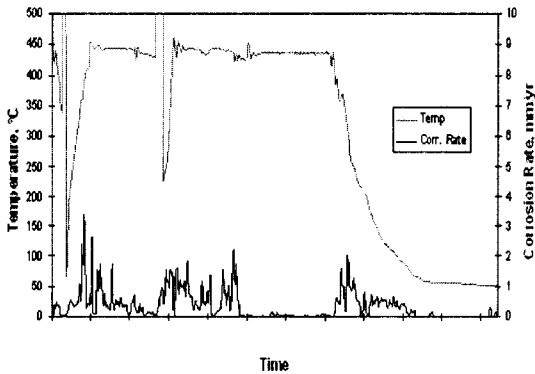


Fig. 5 측정위치별 부식속도
(인도민코탄 200kg/hr, BSR 1.2)

Fig. 6은 인도민코 탄 200kg/hr이고, BSR 0.8에서 각 Port에서의 시간에 따른 센서 온도와 부식속도값의 변화를 보여주고 있다. 전체적으로 부식 속도값은 낮게 나오고 있다. Port R22의 경우 낮은 Level의 신호가 있다가 Port R23에서는 부식 속도가 많이 줄어들었다. Port R27에서는 약간 증가하고, Port L23에서는 앞의 BSR 1.2의 경우와 마찬가지로 측정된 Port중 가장 높은 부식 성향을 보이고 있다. Port L22와 Port L26에서는 이와 같은 값들이 더욱 줄어들었다. 왼쪽 측면 벽에서는 Port L23, L22, L26 순서로 부식 속도값이 감소하고, 오른쪽 측면 벽에서는 Port R27, R22, R23 순서로 감소하고 있다. 그러나 전체적인 부식속도 값은 높지 않은 것으로 나타났다.

3.2 신화탄의 부식속도

Fig. 7은 신화 탄을 175.6kg/hr 연소시키면서 BSR을 1.2 → 1.0 → 0.8로 바꾸었을 때 시험연소로 Port L26에서 시간에 따른 부식 속도값 변화를 보여주고 있다. BSR 1.2에서는 낮은 부식 속도값을 보이고 BSR 1.0에서는 약간 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 BSR 0.8에서는 부식 속도값이 감소한다. 즉, 시험연소로는 BSR변화 보다는 2차 공기 유량/유속 변화에 의해 확립되는 Flow Pattern에 1차적으로 반응한다는 것이다. 이는 시험연소로의 비교적 단순한 Firing 구조에 의한 것으로 생각되고 실제 Full-Scale 보일러에서는 각 버너의 상호작용으로 BSR 변화에 의한 각 버너부위의 상세한 공기유량 변화는 서로 상쇄되어 그 변화의 자세한 내용이 전체 결과에 영향을 비교적 적게 미치게 된다. 그러나 시험연소로에서는 이러한 공기유량의 변화가 직접 전체적인 결과에 영향을 미친다. Fig. 8은 각 BSR에서의 부식 속도 평균값을 보여주고 있다. BSR 0.8의 부식 속도값이 가장 낮고, BSR 1.0의 경우 가장 높다. 물론 이 값들은 Port L26에서 측정된 값으로 전체적인 부식성향이라고 단적으로 말하는 것은 어렵다.

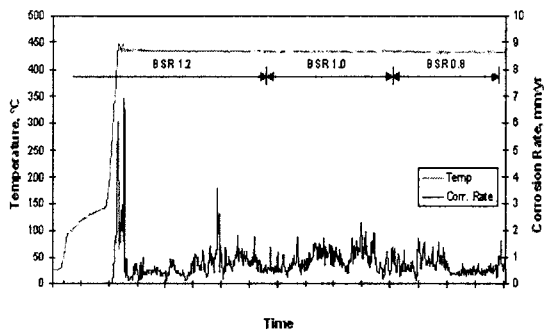


Fig. 7 BSR 변화에 따른 부식속도
(신화탄 175.6kg/hr)

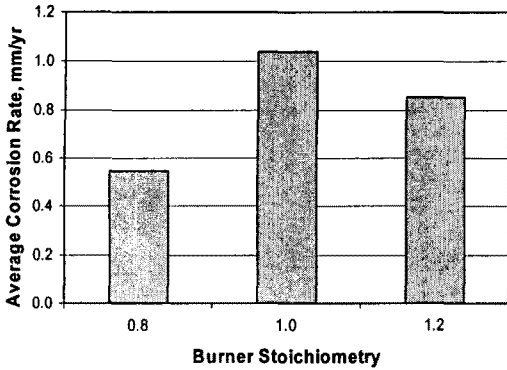


Fig. 8 BSR 변화에 따른 평균 부식속도 (인도민코 175.6kg/hr)

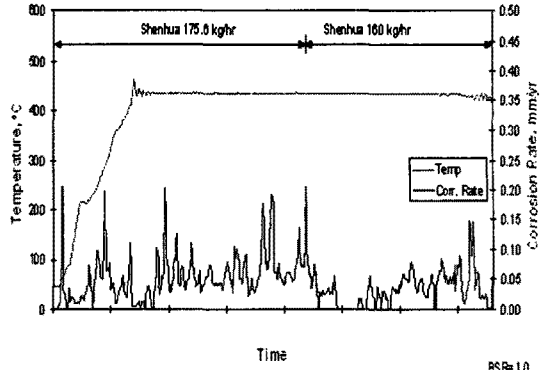


Fig. 10 석탄공급량 변화에 따른 평균 부식속도 (측정위치 L15)

Fig. 9는 신화탄 175.6kg/hr, BSR 1.2 조건으로 운전시 시험연소로 각 Port에서의 시간에 따른 부식속도값 변화를 보여주고 있다. 온도 변화가 심할 때의 부식속도값은 의미가 없다. 전체적으로 낮은 값을 보여주고 있다. 각 Port에서의 평균 부식속도값은 측정된 왼쪽 측면 벽에서 0.244mm/yr~0.854mm/yr이고, 오른쪽 측면 벽에서 0.081mm/yr~0.302mm/yr로 나타나 외쪽 측면 벽에서 측정된 부식속도가 높게 나타나고 있다.

Fig. 11은 신화탄(175.6kg/hr) 연소중 버너화학량론비(BSR) 0.8에서 시험연소로 각 Port에서의 시간에 따른 부식속도값 변화를 보여주고 있다. Port R23과 R22에서 비교적 높은 부식속도값을 보여주고 있는 데 이러한 현상은 좀 더 확인이 필요할 것으로 생각된다. 부식속도측정은 실시간으로 이루어지지만 신뢰할 만한 부식속도값을 얻기 위해서는 시험연소로가 어느 정도 안정화 상태가 되어야 한다. 따라서 부식속도값 측정은 시험연소로 운전 현상의 함수가 된다. 측정된 높은 부식속도값이 Steady State 인지는 다시 확인할 필요가 있다.

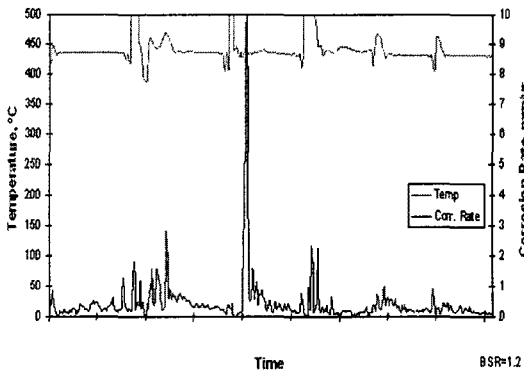


Fig. 9 측정위치별 부식속도 (신화탄 175.6kg/hr, BSR 1.2)

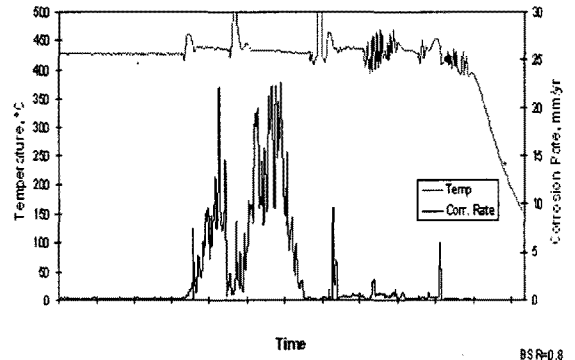


Fig. 11 측정위치별 부식속도 (신화탄 175.6kg/hr, BSR 0.8)

Fig. 10은 시험연소로 Loading 변화에 따른 부식속도값 변화를 보여주고 있다. BSR 1.0에서 신화탄 주입량을 175.6 kg/hr에서 160 kg/hr로 줄이면서 Port L15에서 부식속도값이 측정되었다. 그 결과 석탄의 주입량을 줄였을 때 부식속도값도 함께 줄어드는 것을 알 수 있다. 부식속도 평균값은 석탄공급량을 줄이게 되면 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 Firing Rate 감소에 의한 열유속 변화에 의한 현상으로 생각 된다.

4. 결론

시험연소로에서 인도민코탄과 신화탄을 연소하면서 CMS를 이용하여 측정된 부식속도로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 전체적인 부식속도값이 낮게 나온다. 이는 석탄의 낮은 황과 염소 성분 함유량으로

예상되는 것이었다.

- 부식 속도 측정을 위해 좀 더 장시간 동안 측정이 지속되어야 함을 알 수 있었다. CMS는 실시간으로 부식소도 측정이 가능하지만 연소로내의 환경이 안정화되는 것이 필요하다. 특히 운전조건 변화시에 주의하여야 한다. 또한 Tangential Firing의 특성상 시험연소로 내부가 상당히 불안정 할 수 있으므로 적절한 부식 속도값을 측정하기 위해서는 오랜 시간 측정할 필요가 있다.

후 기

This project was funded by Korean Electric Power Industry Technology Evaluation & Planning under project R-2004-0-018-0-00

참고문헌

- [1] EPRI, Waterwall Wastage Mechanisms in Coal-fired Boilers: The Effect of Coal Chemistry on Waterwall Wastage 2001, TR-1004021.
- [2] Kung, S. C.; Materials Performance 1997, 36 (12), 36-40, (1997).
- [3] Bakker, W. T.; Materials at High Temperatures 2003, 20 (2), 161-168.
- [4] Bakker, W. T.; Wastage in Low NOx Boilers, Root Causes and Remedies, EPRI Report TR11115, 1998.
- [5] Bakker, W. T. Kung, S. C. Heap, M. P. Valentine, J. R. Proceedings of the EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium: The MEGA Symposium, Volume 2: NOx and Multi-Pollutant Controls 1999, 13-17 13-30.