

## 보일러 최적운전을 위한 슬래깅 및 파울링 제거 연구

육심균<sup>†</sup> · 김성호\* · 이병은\*\* · 이상룡\*\*\*

(2003년 8월 28일 접수, 2003년 11월 14일 심사완료)

### A Study on the Removal of Slagging and Fouling for an Optimal Operation of Power Utility Boilers

Simkyun Yook, Sungho Kim, Byeongeun Lee and Sangryong Lee

**Key Words :** Deposition(점착), FEGT(Furnace Exit Gas Temperature, 화로출구연소가스온도), Fouling(파울링), Slagging(슬래깅), Soot(그을음), Soot Blower(그을음 제거기기)

#### Abstract

An optimal soot blowing system has been developed for an optimal operation of power utility boilers by both minimization of the use of steam and the number of soot blowers worked during soot blowing. Traditionally, the soot blowing system has been operated manually by operators. However, it causes the reduction of power and thermal performance degradation because all soot blowers installed in the plant should be worked simultaneously even there are lots of tubes those are not contaminated by slagging or fouling. Heat transfer area is divided into four groups, furnace, convection area including superheater, reheater and economizer, and air preheater in the present study. The condition of cleanness of the tubes is calculated by several parameters obtained by sensors. Then, a part of soot blowers works automatically where boiler tubes are contaminated. This system has been applied in a practical power plant. Therefore, comparison has been done between this system and manual operation and the results are discussed.

#### 기호설명

R : 열저항  
Q : 열량  
U : 전열계수  
A : 전열면적(표면적)

fur : 화로영역  
duty : 보일러 전체  
FEGT : 화로출구연소가스온도  
Cal : 절탄기, 과열기, 재열기 열흡수량의 합  
Ratio : 보일러 상부 증발기 일부  
Roof : 보일러 상부 천정부 증발기  
Screen : 보일러 상부 측면 증발기

#### 하첨자

m : 평균값  
g : 가스  
w : 물(스팀)  
i : 입구, 내벽  
o : 출구, 외벽  
T : 전체에 의한 영향  
S : 그을음에 의한 영향

#### 1. 서론

발전용 석탄화력 보일러의 경우 열교환 튜브에 점착(deposition)되는 회분(fly ash)은 열교환 특성을 악화시켜 보일러 열효율을 저감시키며<sup>(1)</sup>, 그 정도가 심한 경우에는 보일러를 강제로 정지시켜 점착 물질을 제거하여야 한다. 일반적으로 점착된 회분을 운전 중에 제거하기 위하여 슈트 블로워(soot blower)가 사용된다. 슈트 블로워는 용융상태의 회분에 의해 보일러 노(furnace)내 벽튜브(wall tube)에 형성되는 슬래깅 및 고형 회분에 의해 재열기, 과열기 및 절탄기 등에 형성되는 파울링을 제거하기 위하여 보일러 열교환 튜브 전체에 걸쳐서 설치된다.

열전달의 저하는 튜브 표면에 생성되는 슬래깅

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 두산중공업 기술연구원  
E-mail : yooksk@doosanheavy.com  
TEL : (055)278-3751 FAX : (055)278-8593

\* 두산중공업 기술연구원

\*\* 항공기능대학 항공기계과

\*\*\* 경북대학교 기계공학과

과 파울링 뿐만 아니라 튜브내부의 스케일링에 의해서도 영향을 받게 된다. 그러나 본 연구에서는 튜브 표면에 슈트침적에 의한 영향만을 고려하였다. 이는 발전소에 사용되는 물의 경우 원수전처리 및 순수제조계통을 통해 부유물, 침전물, 칼슘, 마그네슘, 나트륨 등을 처리하고 수중의 CO<sub>2</sub> 도 제거하여 수처리된 물을 사용함으로써 튜브 내에 스케일링에 의한 영향은 고려하지 않았다.

Sondreal et al.<sup>(2)</sup>에 따르면 파울링이 심하게 발생하는 경우 보일러 출력의 10~20%, 열효율의 10% 까지 줄어드는 것으로 알려져 있다. 이는 파울링에 의한 열교환 특성 저하 뿐만이 아니라 슈트 블로잉(soot blowing)을 위한 작동유체로서 보일러에서 생성된 증기를 사용하기 때문이다. 기존의 경우 슈트 블로워를 작동시키기 위해서는 수동적인 방법으로 한번 작동 시 전체의 슈트 블로워를 작동시키거나 운전된 주관적인 판단에 의해 불규칙적인 주기로 작동시키므로 매우 비경제적인 방법으로 개선이 요구되는 부분이다. 이 방법은 보일러의 효율이 전혀 고려되지 않은 상황에서 점착물질을 제거하기 위해 과도한 증기 및 보조전력 소모를 야기시키기 때문에 일정 시간동안 보일러 온도와 효율을 감소시키는 요소로 작용되는 문제점을 초래하게 된다.<sup>(3,4)</sup>

슈트블로워를 최적으로 운전하기 위한 선행연구는 미국전력연구소(EPRI)를 중심으로 세계 몇몇 회사에서 수행되고 있지만 발표된 연구논문이나 참고문헌이 기업비밀로 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 최적의 슈트 블로워 작동을 위한 시스템을 개발하여 이를 실제의 대형 화력발전용 보일러에 적용시켜 그 결과를 분석하고 수동방식과 비교하였다. 보일러 관벽에 발생하는 점착 정도는 보일러의 상태 정보 신호와 각 영역별 오염도 판단 기준 데이터베이스와 비교하여 판단하였다. 이런 판단을 근거로 최적의 슈트 블로잉 운전 주기(시작시점과 정지시점)를 결정하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

## 2. Soot Blower Optimization System

### 2.1 SBOS(Soot Blower Optimization System)개요

슬래깅과 파울링이 발생하는 경우 보일러 효율 손실 및 슈트 블로잉에 따른 사용증기 증가로 인한 보일러 출력손실이 수반된다. 그런데 본 연구에서 개발된 SBOS 가 기존의 수동방식에 비해서 다른 점은, 1) 슬래깅 및 파울링에 따른 보일러 튜브의 오염상태를 정확히 인지하고, 2) 오염된 부분에 설치되어 있는 슈트 블로워만을 작동하게 하는 것이다. 이를 위해 슈트 블로워를 최적제어하기 위한 알고리즘의 개발이 요구된다. SBOS 를 채택하는 경우 슈트 블로워의 작동을 최적화하여 소비되는 증기의 양을 최소화시킬 뿐만 아니라 보일러 효율

및 부하 안정성을 향상시킬 수 있다.<sup>(3)</sup>

본 시스템은 국내 신규 발전소(관류형 초임계압 석탄화력, 보일러 용량: 1,475,600kg/hr, 255kg/cm<sup>2</sup>)에 적용하여 그 효율성을 검증하였다.

슈트 블로워는 복사영역인 화로영역에 월 블로워(wall blower) 34 개와 대류영역인 과열기, 재열기, 절탄기 영역에 롱 블로워(long blower) 38 개, 그리고 공기에열기(Gas Air Heater) 영역에 롱 블로워 4 개가 설치되어 있다. 월 블로워는 운전시간이 3 분이고 단독(Single)운전이 되며, 롱 블로워는 8 분(공기에열기: 28 분)이고 쌍(Pair)으로 운전된다. 본 연구에서는 최적의 슈트 블로워 운전을 위하여 보일러 내부를 화로영역, 과열기 및 재열기 영역, 절탄기 영역, 그리고 공기에열기 영역으로 나누었다.

### 2.2 SBOS 입력변수

보일러 튜브의 오염도를 판단하기 위한 주요 변수들은 다음과 같다:

- 화로출구 연소가스 온도(FEGT, Furnace Exit Gas Temperature)
- 과열기/재열기 입/출구 온도, 압력, 증기량
- 절탄기 입/출구 온도, 압력, 급수량
- 공기에열기 입/출구 연소가스 및 공기 온도
- 연료성분/과잉 공기량 등

화로영역에서의 오염도는 센서(heat flux sensor, slagmeter)를 설치하여 슬래깅 정도를 직접 측정하는 방법과 계산을 통해 그 정도를 간접적으로 산출하는 방법이 있다.<sup>(3,5,6)</sup> 본 연구에서는 발전소 운전 여건상 간접방법을 사용하였다. 일반적으로 과열부, 재열부, 절탄부 등은 온도, 유량, 압력 등을 측정 후 계산을 통해 최종 파울링 정도를 예측하는 방법이 이용된다.

연소가스영역에 있어 가스량은 측정되어지지 않는 주요변수이나 연료분석과 과잉 공기량으로부터 계산할 수 있다. 석탄화력발전의 경우 직접적으로 가스량을 측정하는 것은 비실용적인 방법인데 이는 연소가스유동에 대한 측정이 어렵고 발열량(Heating Value)이 일정하지 않기 때문이다. 가스량 측정에 있어 역청탄 혹은 아역청탄의 경우 측정치와 평균 연료분석 결과에 의한 값은 1%이내의 오차 범위내로 접근함을 알 수 있다.<sup>(7)</sup>

### 2.3 하드웨어 구성

SBOS 는 Figure 1 과 같이 보일러 상태량 정보 신호처리부(DCS, Distributed Control System), 슈트 블로워 기기 정보 처리부(Soot blower controller, AB PLC, Programmable Logic Controller), 그리고 보일러 내부 오염 그룹 및 오염정도 예측, 최적의 블로잉 시기선정 및 명령 전송처리부(SBOS)로 구성되어 있다.

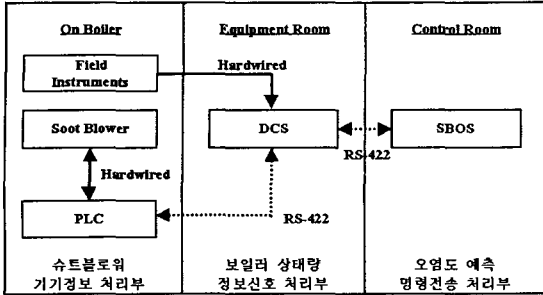


Fig. 1 Configuration of soot blower optimization system

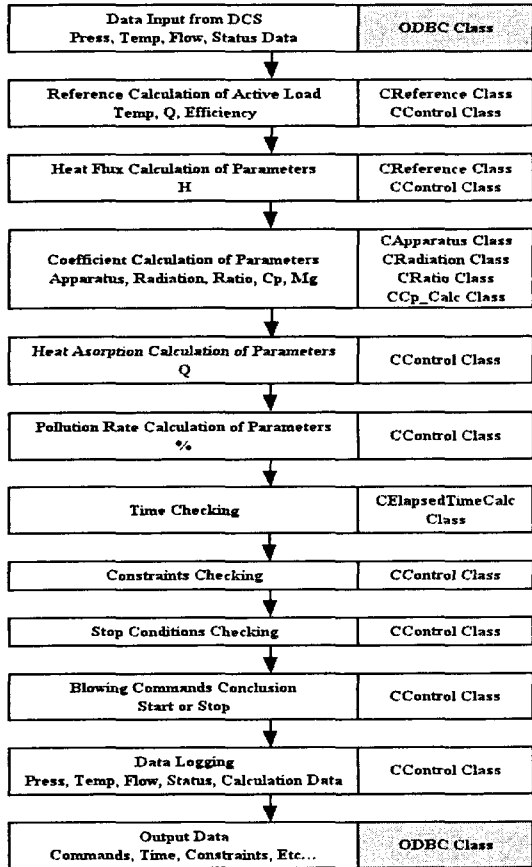


Fig. 2 Data flow of soot blower optimization system

2.4 소프트웨어 구조

DCS 로부터 입력된 신호들은 통신망을 통해 SBOS 내부의 운전원 조작모듈(HMI, Human Machine Interface)로 전송되며 전송된 데이터는 각 그룹별 상태정보 및 오염도 계산 프로그램에 의해 추론된 오염상태 등의 정보를 운전원에게 제공한다. 아울러 입력 신호들은 시스템에 내장된 데이터베이스에 저장되어 운전이력이나 보일러 상태변화에 따른 오염도 변화 추이 등에 대한 정보로 이용된다.

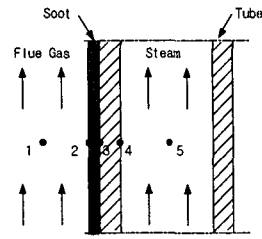


Fig. 3 Heat transfer model with soot

SBOS 제어 프로그램은 프로그램 내부에 새로운 데이터베이스(Core Database)를 생성하고 성능 계산을 실행하여 각 그룹별 오염도를 판단하게 되며, 그 결과에 따라 슈트 블로잉 실시 여부를 추론하게 된다. Figure 2 는 제어프로그램의 데이터 계산 흐름도를 보여주고 있다.

3. 그룹별 오염도 판단 알고리즘

3.1 열전달 이론

Figure 3 은 회분이 보일러 튜브 벽면에 점착되었을 경우에 대한 열전달 모델로 점착이 진행되는 경우 2→3 영역에서 열저항( $R_s$ )항목이 증가하게 됨으로 전체적인 열전달을 저하시키게 된다. 이 모델을 열저항 식으로 표시하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_T = R_{1 \rightarrow 2} + R_{3 \rightarrow 4} + R_{4 \rightarrow 5} + R_o + R_s(2 \rightarrow 3) \quad (1)$$

1→2 : 대류, 2→3 : 슈트, 3→4 : 전도, 4→5 : 대류에 의한 열전달을 열저항으로 표시하면 식(2)와 같다.<sup>(8)</sup>

$$R_T = \frac{1}{U_o \cdot A_o} = \frac{1}{h_o \cdot A_o} + \frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_i \cdot A_i} + R_o + R_s \quad (2)$$

여기서,  $U_o$ 는 튜브 외벽의 전열계수,  $A_o$ 는 튜브 외벽의 전열면적,  $h_o$ ,  $h_i$ 는 대류열전달계수로서 튜브 표면의 형상 및 유속 등에 의해 결정되는 값이며,  $r_o$ ,  $r_i$ 는 튜브의 외/내경,  $A_o$ ,  $A_i$ 는 튜브외/내벽 표면적,  $k$ 는 튜브 재질에 따른 전도 전달계수,  $R_o$ 는 열저항 계산시 사용되는 보정계수로 설계 후 테스트시 측정된 값과 비교하여 보정계수를 구한다. 그러나 저항값이 매우작으므로 무시하여 계산하였다.

열교환기의 열전달을  $Q$ 는 다음 식(3)과 같다.

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m = U \cdot A_o \cdot \frac{(T_{g,i} - T_{w,o}) - (T_{g,o} - T_{w,i})}{\ln \left( \frac{T_{g,i} - T_{w,o}}{T_{g,o} - T_{w,i}} \right)} \quad (3)$$

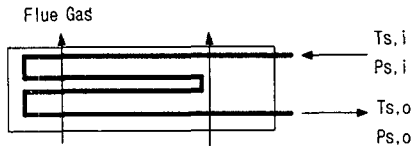


Fig. 4 Model of heat transfer for enthalpy

여기서,  $T_{g,i}$ ,  $T_{g,o}$ 는 가스측 입·출구 온도이고  $T_{w,i}$ ,  $T_{w,o}$ 는 스팀의 입·출구 온도를 의미한다.

Figure 4는 엔탈피 계산을 위한 열전달의 개략적인 모델을 나타낸다. 증기 입·출구의 압력이 같다고 가정하면( $P_{s,i} = P_{s,o}$ ) 엔탈피는 식(4)와 같다.

$$\Delta h = C_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

여기서, 정압비열은  $C_p = f(P,T)$ 의 관계식으로 알려져 있으며, 증기유량( $\dot{m}$ )이 측정되어지면 열전달율( $Q$ )을 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$Q = \dot{m} \cdot \Delta h \quad (5)$$

그물음에 의한 열저항( $R_s$ )을 계산하면 식 (3)과 (5)에 의하여( $\Delta T_m$ 은 알려진 값이므로,  $C_1$ 로 두면)

$$\dot{m} \cdot \Delta h = U \cdot A \cdot C_1 \quad (6)$$

식(2)에서 알려진 값들을 묶어서  $C_2$ 로 두면,

$$\frac{1}{U \cdot A} = C_2 + R_s \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면, 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{m} \cdot \Delta h \cdot (C_2 + R_s) &= C_1 \\ \therefore R_s &= \frac{C_1}{\dot{m} \cdot \Delta h} - C_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$R_s$ 를 계산함으로써 열전달면의 슈트점착 정도를 산출할 수 있다.

슈트는 부하량과 시간이 지남에 따라 점진적으로 점착되는데 점착된 양이 어느 정도 이상되면 열전달이 원활히 이루어지지 않게 되고 결국 효율 감소를 유발하게 된다. 슈트에 의한 영향으로 열흡수율·스팀온도가 저하될 때 블로잉 주기 관점에서 살펴보면 1)우선 적정주기보다 빠를 경우 필요이상의 스팀이 소모되고 시간이 지남에 따른 관의 부식 등을 유발하게 된다. 2)적정 주기보다 늦게 운전할 경우는 가스 및 스팀간의 열전달이 원활히 이루어지지 않게 되고 점착되는 양이 증가되어 같은량의 스팀으로 블로잉 할 경우 슈트의 일부가 관구에 잔존하게 됨으로 슈트 블로잉 효과가 나빠지게 된다. 3)그러므로 최적의 적정 블로잉 주기를 예측

또는 계산하여 블로잉하는 것이 가장 바람직한 방안이다.<sup>(3)</sup>

### 3.2 그룹별 오염도 산출 기준

보일러 내부의 오염도는 다음과 같이 세 가지로 분류한다.

- 오염도 100% (오염상태, Polluted)
- 오염도 50% (정상상태, Normal)
- 오염도 0% (청정상태, Clean)

발전소 최초 화입 전 보일러 내부상태는 매우 깨끗하며 오염도 0%이다. 이후 발전소가 가동됨에 따라 점차적으로 회분이 튜브에 점착되고 보일러 효율에 미치는 영향이 증가하여 블로잉이 요구되는 상태를 오염도 100%라 규정하였다. 그리고 어느 정도 회분 점착을 허용할 수 있는 범위 즉, 일반적인 운전상태를 오염도 50%인 정상상태로 정의하였다. 한편, 전열부에 대한 열전달을 혹은 온도를 단위화 시킨 값인 dirty factor(DF)를 사용할 수도 있다.<sup>(3)</sup> DF 1.0은 오염도 0%를 의미하며, 0.9는 어느 정도 슬래깅이나 파울링이 진행된 상태로 열전달율이 다소 저하되지만 효율에 크게 영향을 미치지 않는 상태를 의미한다. DF가 0.8인 경우는 슬래깅이나 파울링이 심하게 진전되어 보일러 열효율 회복을 위하여 이를 제거해야 할 상태임을 의미한다. 각 그룹별 오염도 판정기준 요소들을 각 그룹별로 아래에 정리하였다.

#### 3.2.1 화로영역(그룹 A)

그룹 A는 보일러 화로영역으로 오염도를 판단하고 최적의 블로잉 시기를 선정하기 위하여 다음과 같은 3개의 주요 변수를 이용하였다:

##### 노즈 출구 포화온도( $T_{nose}$ )

화로영역이 오염되지 않은 상태에서 절탄기영역의 오염상태가 정상일 때 노즈 출구 포화온도는 부하대별로 일정 값을 유지하게 된다. 그러나 오염되었을 경우 실제 부하대별 온도가 기준값 보다 감소하게 된다. 이는 화로영역에서 충분한 열교환이 이루어지지 않아 노즈 출구 포화온도를 감소시키는 결과를 초래하게 되기 때문이다. SBOS 적용 발전소의 정격부하운전(100%)일 때의 노즈 출구 포화온도 기준값을 성능 프로그램을 이용하여 구한 결과 오염상태일 때 416.3℃, 정상상태일 때 420.6℃ 그리고 청정상태일 때 425.2℃ 값을 얻었다.

##### 화로 수열비율( $Q_{fur}/Q_{duty}$ )

화로 수열비율은 화로수열량에 대한 보일러 전체 열량의 비로 나타내며 슬래깅이 진전되면 화로에서 흡수되어야 할 열량이 점차 감소하게 되므로 화로 수열비가 작아지게 된다. 다음식(9),(10)은 화로수열비 계산식을 보여주고 있다.

$$Q_{fur} = (h_{N,o} - h_{fur,i}) \cdot \dot{m}_{fur} \quad (9)$$

Table 1 Reference values of  $Q_{fur}/Q_{duty}$

항 목	상 태	BMCR	VWO	NR	75%NR	50%NR	30%NR
화로 수열비율	오염	0.4310	0.4342	0.4488	0.4899	0.5113	0.5553
	정상	0.4522	0.4553	0.4700	0.5116	0.5342	0.5792
	청정	0.4735	0.4766	0.4914	0.5333	0.5567	0.6073

$$Q_{duty} = (h_{FSH,o} - h_{ECO,i}) \cdot \dot{m}_M + (h_{RH,o} - h_{RH,i}) \cdot \dot{m}_{RH} \quad (10)$$

$Q_{fur}/Q_{duty}$  는 각각 화로수열량과 보일러 전체 수열량이고,  $h_{N,o}$ ,  $h_{fur,i}$ ,  $h_{FSH,o}$ ,  $h_{ECO,i}$ ,  $h_{RH,o}$ ,  $h_{RH,i}$  는 각각 노즈출구, 화로입구, 과열기출구 및 절탄기 입구, 재열기 출·입구의 엔탈피를 의미하고,  $\dot{m}_M$ ,  $\dot{m}_{RH}$ ,  $\dot{m}_{fur}$  는 주증기, 재열증기, 화로부의 유량을 나타낸다. 이와 같이 식(9), (10)을 이용하여 부하대별 오염도에 따른 화로 수열비율을 계산하여 얻은 결과를 Table 1 에 정리하였다.

여기서, BMCR(Boiler Maximum Continuous Rating) 은 보일러 최대연속 정격출력, VWO(Valve Wide Open)는 터빈 제어밸브 전개출력, NR (Nominal continuous Rating)은 정격출력을 의미한다.

**FEGT**

FEGT 는 화로 설계에 있어 가장 중요한 요소 가운데 하나이다.<sup>(3,4)</sup> 오염도 판단에 큰 영향을 미치는 FEGT 의 경우 간접적 방법인 계산을 통하여 구하였다.

FEGT 를 계산하기 위하여 보일러 화로 출구에서부터 절탄기 후단의 보일러 출구까지를 검사체적으로 설정하였으며, Figure 5 에 설정된 검사체적을 나타내었다. 검사체적 내에서 FEGT 를 계산하기 위한 식은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$FEGT = \{ Q_{FEGT} / (m_g \times C_p) \} + T_{BOGT} \quad (11)$$

여기서,  $Q_{FEGT} = Q_{cal} + Q_{ratio}$   
 $Q_{cal} = Q_{PISH} + Q_{FSH} + Q_{FRH} + Q_{PISH} + Q_{PIRH} + Q_{ECO} + Q_{HRA} - Q'_{PISH}$   
 $Q_{ratio} = Q_{Noseupper} + Q_{Frupper} + Q_{Screen} + Q_{Roof}$   
 $Q_{Noseupper} = (Q_{PISH} + Q_{FSH}) \times Ratio_{Noseupper}$   
 $Q_{Frupper} = Q_{PISH} \times Ratio_{Frupper}$   
 $Q_{Screen} = (Q_{PISH} + Q_{FSH}) \times Ratio_{Screen}$   
 $Q_{Roof} = (Q_{PISH} + Q_{FSH}) \times Ratio_{Roof}$

여기서,  $T_{BOGT}$  는 보일러 출구 가스온도,  $Q_{cal}$  은 Figure 5 에 나타난 절탄기, 과열기 3 개, 재열기 2 개 영역의 열량 총합이며,  $Q'_{PISH}$  는 Platen 과열기 (SH)로 유입되는 복사 열전달량이고,  $Q_{ratio}$  는 수관벽을 통한 열흡수량의 합을 나타낸 것이다.

한편,  $m_g$  는 연료성분(C, H<sub>2</sub>, S, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O)량과 과잉공기량을 이용하여 연소가스량을 산출한 후 연료소모량의 곱으로 계산된다. 그리고  $C_p$  는 연소가스의 성분(H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)량과 온도 값을

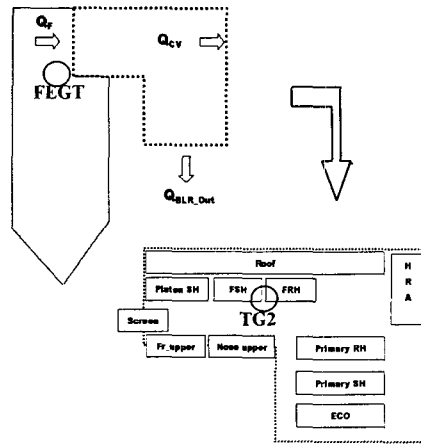


Fig. 5 Control volume for calculation of FEGT.

이용하여 산출한다. 단, 연료성분은 사용전 연료분석치를 이용하였으며 매시간 일정하다고 가정하였다. 이와 같이 검사체적에서의 열흡수량이 구해지면, FEGT 를 구할 수 있다.

이상과 같이 화로영역의 경우 3 가지 주요 변수를 이용하여 슬래깅 정도를 판단하는 기준값으로 설정하였다.

3.2.2 재열기 및 과열기영역(그룹 B)

대류영역인 과열기와 재열기 영역을 그룹 B 로 분류하였다. 그룹 B 의 오염도를 판단하기 위한 변수로는 B 그룹 수열량(과열기영역과 재열기 영역에서 흡수한 열량의 합  $Q_b$ )과 재열기 입구 가스 온도( $TG_2$ )변화가 대표적이다.

보일러 설계 시 부하대별로 그룹 B 에서 흡수해야 할 수열량이 결정된다. 따라서 수열량이 기준치를 벗어나는 경우 파울링이 진전되어 있거나 가스온도가 높기 때문이라 판단할 수 있다. 따라서 수열량 변화를 통하여 오염정도를 판단할 수 있다. 그리고  $TG_2$  는 연소가스 온도로 그룹 B 에 파울링이 발생한 경우 충분한 열전달이 이루어지지 않아 연소가스온도가 상승하게 된다. 한편, 그룹 A 에 슬래깅이 발생되어 FEGT 가 상승하면 그룹 B 가 오염되지 않았음에도 불구하고  $TG_2$  가 상승한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 FEGT 상승에 따른  $TG_2$  변화량을 고려하여 오염상태를 판단할 수 있도록 기준값을 설정하였다.

3.2.3 절탄기영역(그룹 C)

그룹 C 의 경우 절탄기에서 흡수한 수열량에 대한 화로전체에서 흡수한 수열량의 비( $Q_{ECO}/Q_{fur}$ )로써 오염도를 판단하였다. 그룹 C 의 경우도 그룹 B 와 마찬가지로 FEGT 에 의한 영향을 고려하여 9 가지 경우에 대해 오염도 판단 기준값을 설

Table 2 GAH Efficiency Reference Values

항목	상태	BMCR	VWO	NR	75% NR	50% NR	30% NR
GAH 효율	오염	0.66769	0.66667	0.66539	0.67241	0.68635	0.70313
	정상	0.69846	0.69753	0.69775	0.70690	0.72325	0.74219
	청정	0.71385	0.71296	0.71383	0.72414	0.74170	0.76172

계하였다.

정상상태에서 FE<sub>GT</sub> + 0℃(DF 0.9 상태), FE<sub>GT</sub> + 50℃(DF 0.8 상태), FE<sub>GT</sub> - 50℃(DF 1.0 상태)일 경우에 대한 기준값을 구하고, 오염상태 및 청정상태인 경우에 대해서도 FE<sub>GT</sub>에 대한 영향을 고려하여 설정하였다.

3.2.4 공기 예열기영역(그룹 D)

그룹 D의 경우 공기에열기(Gas Air Heater; GAH)의 효율을 오염도 판단의 변수로 설정하였다.

Table 2는 부하대별 오염상태에 따른, 공기에열기 효율에 대한 기준 값을 보여주고 있다.

3.3 오염도 판단 기준값 계산

오염도 판단을 위한 기준값은 보일러 설계 시각 영역별 열흡수율 등을 계산하기 위해 사용하는 성능설계 프로그램을 이용하여 구한다. 그룹별 오염도 판단 기준 값은 부하, 공급연료 종류, 그리고 각 영역별 오염상태에 대한 DF를 변화시켜 입력 조건을 변경하면서 계산하였다. Figure 6은 오염도 판단 기준 값을 계산하는 절차를 보여준다. 이러한 절차에 의해 계산된 기준값은 현장에서 보일러의 운전상황에 따라 재조정하여 최종적인 기준값으로 설정하게 된다.

3.4 운전허용 조건

SBOS는 다음과 같은 조건을 만족해야만 작동하도록 운전허용 조건을 설정하였다. 이는 발전소의 운전 상태변화나 블로잉을 위한 증기조건 만족 여부 그리고 블로잉 실시 후 최소한의 정지시간 조건 등을 설정하여 불필요한 블로잉을 방지하여 증기소모량을 최소화시키기 위함이다.

- 보일러 부하 30% 이상 운전시: 허용
- 스토름압력 83Kg/cm<sup>2</sup> 이상: 허용
- 기동/정지 동작 시: 불가
- 런백(Runback) 동작시: 불가
- Master fuel trip 나 Fast cutback 시: 불가
- 밀(Mill) 운전 대수가 변한 경우: 불가
- 슈트 블로잉용 증기압력 저하시: 불가
- 부하변경 시: 불가
- 블로잉 후 최소시간이내 오염된 그룹: 불가

3.5 제한조건

BOS 적용 발전소의 운전/설계에 따른 몇 가

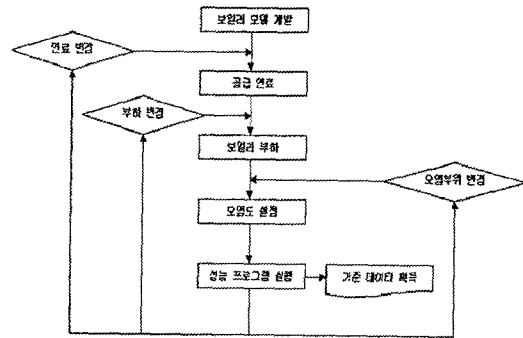


Fig. 6 Calculation of reference value

지 제한조건이 있었으며, 다음과 같다:

- 화염을 제어할 수 없는 조건(버너틸트(Tilt) 고정)
- 슈트 블로워 위치 및 수량이 고정
- 슈트 블로잉용 증기 압력/온도가 일정
- 슈트 블로워의 블로잉 타임이 고정

입력되는 데이터에 의해 오염정도를 계산한 후 오염의 심각도에 따라 증기분사시간(Blowing Time), 분사압력(Blowing Pressure) 등을 조절함으로 보다 효과적인 제어가 기대되나<sup>9)</sup> 대상발전소의 제한조건으로 활용할 수 없는 상황이다. 그리고 버너틸트는 제열기의 온도 제어용으로 사용된다. 하지만 버너틸트의 변경은 보일러 전체 열정산에 큰 영향을 미치므로 보통 아주 조금씩 조절하여 운전하게 된다. 일부 발전소에서는 운전의 편의를 위해 고정을 시키기도 한다. 그래서 틸트를 보일러 화로 오염도 판단 요소로 선택하기에는 무리가 있다.

4. 실증시험 및 결과분석

본 연구를 통해 개발된 SBOS를 국내의 실제 발전소에 설치하여 운전하였다. 한편, SBOS는 공기에열기 보호를 위해 보일러 출구 연소가스 온도를 일정한 온도(370℃~380℃) 이하로 유지시키는 기능 즉, 자동 블로잉에 의해 온도조절하는 기능을 포함하고 있다.

SBOS의 운전은 보일러 운전원이 조작화면에서 SBOS 모드를 선택함으로써 운전이 시작된다. SBOS를 적용하여 운전한 결과는 로그파일로 시스템에 자동 저장된다. Figure 7은 SBOS에서 운전자를 위해 제공되는 화면으로 그룹별 슈트 블로워 운전상태 및 각 그룹별 오염정도 등을 보여주고 있다.

4.1 SBOS 모드에 의한 운전

Figure 8은 보일러 부하 기준값과 실제 부하값의 변화를 보여주고 있다. Figure 9와 10은 각각

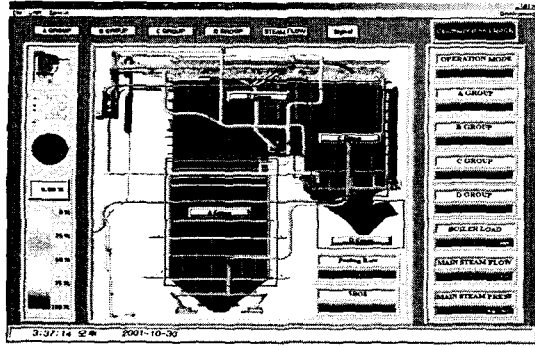


Fig. 7 HMI overview of operation of SBOS

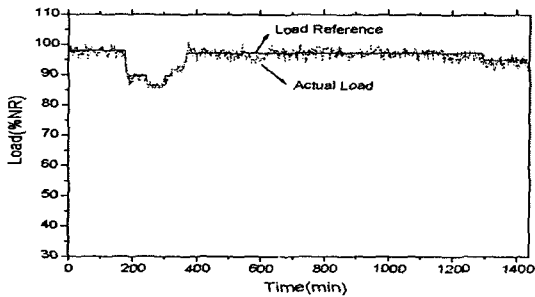


Fig. 8 Boiler load

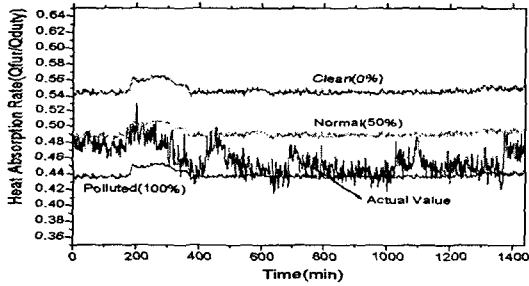


Fig. 9 Furnace heat absorption rate

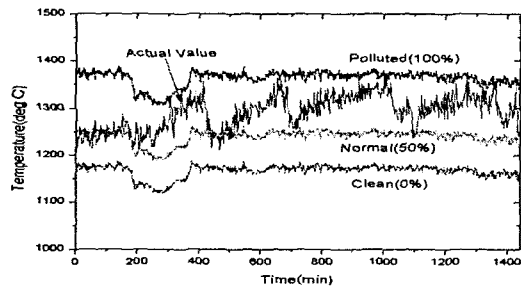


Fig. 10 FEGT

그룹 A의 오염도 판단 기준 요소인 화로 수열비와 화로출구 연소가스 온도(FEGT)의 청정상태, 정상상태, 오염상태 기준선과 실제 오염도 계산에 의한 오염도 변화를 보여주고 있다.

부하가 변경됨에 따라 오염도 기준 값은 이에 상응한 변화를 일으키게 된다. 이는 Figures 8~10

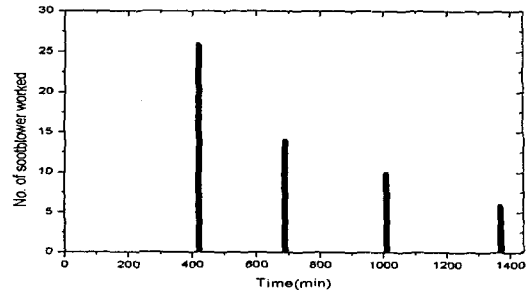


Fig. 11 Operation of soot blower in SBOS mode

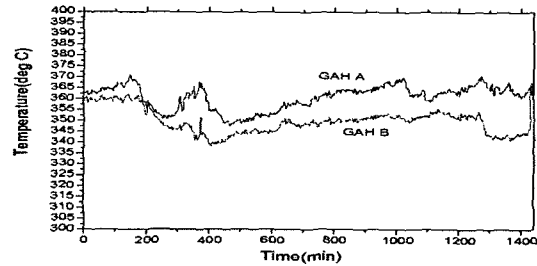


Fig. 12 Boiler outlet flue gas temperature

을 통하여 확인할 수 있는데, Figure 8에서 약 180min 경과 후 부하변동이 발생하였으며, 이에 따라 Figure 9와 10의 오염도 기준선이 변경되었음을 통해서 확인할 수 있다. Figure 9에서 화로 수열비가 몇 구간(390min, 660min, 840min, 1360min 부근)에서 오염상태 이하로 감소하였음을 알 수 있다. 이는 화로영역이 시간이 지남에 따라 점착된 슈트에 의한 영향으로 연소가스가 화로영역에 충분한 열 전달을 하지 못했기 때문에 블로워가 작동해야 함을 의미한다.

Figure 10의 FEGT는 Figure 9의 화로수열비 변화와 반대 경향을 보이는데 이는 연소가스와 화로 수관벽 사이에 슈트에 의해 열교환 장애가 발생하여 결과적으로 배기가스 온도가 높아지기 때문이다.

Figure 11은 시간에 따른 슈트 블로워 동작상태를 보여주고 있다. Figure 9에서 390min 경과 후 오염상태로 저하되었음에도 불구하고 블로워가 곧바로 작동하지 않고 약 410min 부근에서 블로워가 작동되었음을 알 수 있다. 이는 SBOS에서는 오염도 추론에 의해 블로잉 명령을 내려보냈으나 블로워에 공급되는 증기조건이 허용조건(26Kg/cm<sup>2</sup>, 270°C)을 만족하지 못했기 때문이다. 한편, 증기 공급시스템에서 증기조건을 만족시키기 위해 각종 배기 및 주 조절밸브 등을 조절하여 블로워에 공급할 증기조건을 맞추기 위해 약 20min 소요되었음을 알 수 있다.

410min에서 블로워가 작동하여 점착된 그을음을 제거함에 따라 Figure 9에서 화로 수열비가 정

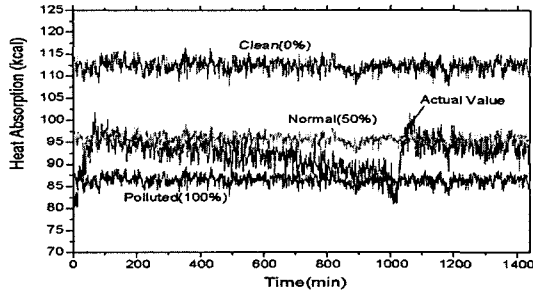


Fig. 13 B group heat absorption in SBOS mode

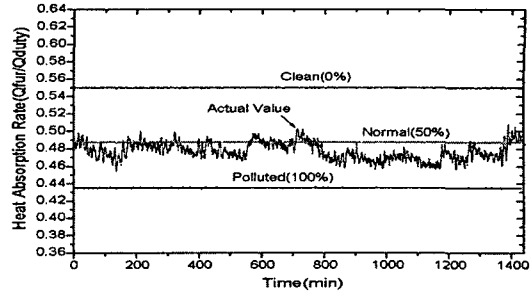


Fig. 15 Furnace heat absorption rate in manual mode

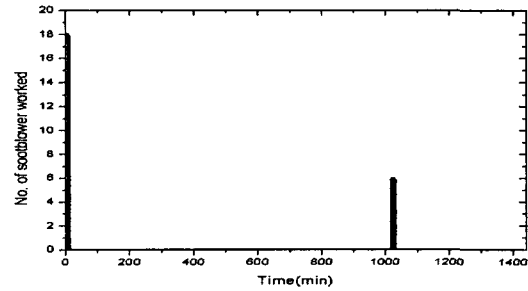


Fig. 14 Operation of soot blower in SBOS mode

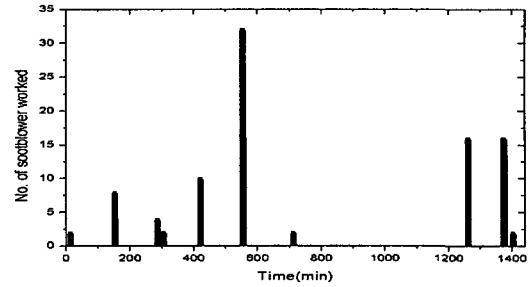


Fig. 16 Operation of soot blower in manual mode

상상태로 회복되었음을 알 수 있다. 이 과정에서 총 34 개 블로워 중 26 개의 블로워만 작동되었음을 Figure 11 을 통해서 알 수 있다. 이와 같이 시간이 지남에 따라 슈트는 점진적으로 점착되고 점착된 그을음이 보일러 효율이나 열평형(Heat Balance)에 악영향을 미치게 되면 블로워를 동작시켜 그을음을 제거하게 된다. 또 슈트 점착정도에 따라 SBOS 는 적정 블로워를 작동시키고, 회복정도에 따라 블로워 개수를 제한하여 운전한다.

Figure 9 의 390min, 660min, 840min, 1360min 부근에서 오염정도는 유사하나 Figure 11 의 블로워 동작개수가 차이는 이유는 블로워의 위치에 따라 오염도를 회복시키는 영향이 차이가 나기 때문이다. 이는 국부적으로 슈트의 침착되는 정도가 같은 그룹내에서도 차이가 발생하기 때문이다. A 그룹의 경우 블로워 개수가 많고 높이 및 설치위치(좌/우)가 광범위하기 때문에 그 효과는 다양하게 차이가 난다.

Figure 12 는 보일러 출구 연소가스 온도를 보여 주고 있다. 이 그림을 통하여 슈트 블로잉을 통하여 보일러 출구 연소가스 온도가 일정온도(372℃) 이하로 유지 되고 있음을 알 수 있는데, 이는 연소가스 온도가 365℃ 이상이 되면 과열기 영역(그룹 B)과 절탄기 영역(그룹 C)의 슈트 블로워를 동작시켜 일정온도 이하로 유지되도록 프로그램화 되어있기 때문이다.

Figure 12 에서 GAH(Gas Air Heater) A 와 GAH B 온도 차이가 발생하는 이유는 보일러 출구부로 흐르는 연소가스가 출구부의 A 영역과 B 영역에 설치되어 있는 댄퍼출구로부터 GAH A 와 GAH B

영역으로 연소가스가 흐르는데 댄퍼 후단에서 이들 연소가스가 충분히 섞이지 못하고 GAH A/B 영역으로 유입됨에 따라 발생하는 현상으로 댄퍼개도에 따라 온도차가 발생하게 된다.

Figure 13 과 14 는 그룹 B 의 열흡수량 변화와 이때 블로워의 작동상태를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기상태에 그룹 B 영역의 열흡수량이 그을음에 의해 저하됨을 알 수 있다. SBOS 는 이러한 상황을 오염도 추론을 통한 오염상태를 분석하고 최적 블로잉 시점을 결정하여 블로워를 동작시켜 열흡수량을 정상상태로 회복시켰다. 그을음 점착 패턴이 그룹 A 와 다른데 이는 운전상태와 작동 블로워의 수량에 따라 다르게 나타나기 때문이다. 이 그림들에서 시간이 지나 약 1000min 부근에서 다시 오염상태(85Kcal 이하)로 떨어졌다. 이 오염된 시점을 SBOS 가 정확히 파악하여 적정 블로워를 적정수량만큼 동작시켜 오염도를 정상상태로 회복, 안전하게 운전되게함을 확인할 수 있었다.

#### 4.2 수동모드에 의한 운전

Figure 15 에 나타나 있듯이 화로 수열비 변화가 정상상태 기준선을 따라 변화함을 알 수 있다. 이는 블로워 동작상태를 나타내는 Figure 16 에서 알 수 있듯이 그을음 점착 주기보다 빠른 주기로 과도하게 블로워를 작동시킨 결과이다. 그러므로 오염상태까지 떨어지지 않고 깨끗한 상태로 운전됨을 알 수 있다.

한편, Figure 9(총 56 개 블로워 동작)와 Figure 16(총 94 개 블로워 동작)을 비교해 보면 수동운전



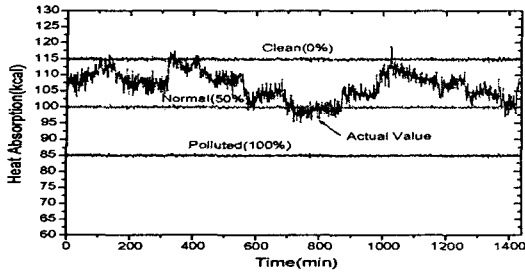


Fig. 17 B group heat absorption in manual mode

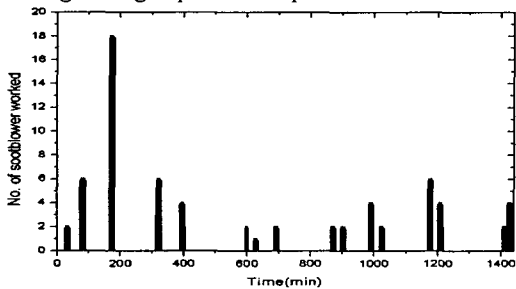


Fig. 18 Operation of soot blower in manual mode

시 SBOS 에 의한 자동운전보다 빈번한 블로잉에 의해 스팀이 과도하게 소모됨을 알 수 있다.

Figure 17 과 18 은 그룹 B 에 대한 열흡수량과 수동운전에 따른 블로잉의 동작상태를 보여주고 있다. 만일 초기시점인 180min 경부터 운전원이 블로잉을 실시하지 않았을 경우, 시간이 지남에 따라 그을음이 점진적으로 점착되고 결국에는 오염상태에 도달하게 되었을 것이다. 그러나 운전원의 판단에 의해 오염상태가 되지 않았음에도 불구하고 잦은 블로잉으로 매우 청정상태로 운전하였음을 알 수 있다. 이는 불필요한 스팀 소모, 블로잉 구동용 보조전력 과다 소모 및 잦은 블로잉에 의한 관 부식 등을 유발하게 된다.

이상에서와 같이 SBOS 에 의한 자동운전과 운전원의 경험에 의한 수동운전을 비교해 보았다. 그 결과 SBOS 에 의한 운전방법이 보다 과학적이고 체계적이며 오염부위를 정확히 판단하여 해당 블로잉을 적정주기로 동작시킴으로써 수동운전 방법보다 보일러 전체 효율향상 및 그을음 제거용 스팀 소모량을 최소화하여 효율적인 보일러 운전을 가능케 할 수 있음을 알 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 슬래깅 및 파울링을 최적기에 최소의 동력과 증기를 이용하여 제거하기 위한 시스템을 개발하였다. 이를 위해 보일러를 몇 개의 그룹으로 나누어 그룹별 점착된 그을음에 의한 영

향을 평가하여 최적의 블로잉 시점 및 작동 블로잉 수를 결정하여 가장 경제적인 보일러 운영을 할 수 있도록 하였다. 본 연구를 통하여 개발된 내용은 다음과 같다.

- 그룹별 오염도 판단을 위한 주요변수 설정
- 그룹별 열역학적인 해석을 통해 기준값 계산
- 보일러 내부 오염도 계산
- 허용조건 및 오염도 판단에 따른 블로잉 여부 결정로직
- 최적의 블로잉 주기 결정로직
- 슈트 블로잉 전후 상태분석 기능

본 연구를 통하여 개발된 알고리즘을 적용함으로써 기존의 수동운전 혹은 정해진 시간에 의한 순차운전 등 정확한 열역학적 해석 없이 혹은 단순 센서에 의한 상태량에만 의존해 수행해왔던 기존의 방법을 크게 개선하였다.

### 참고문헌

- (1) EPRI, 1987, "Slagging and Fouling in Pulverized - Coal-Fired Utility Boilers," Vol I Final Report.
- (2) Sondreal, E. A., Tufte, P. H. and Beckering, W., 1977, "Ash Fouling in the Combustion of Low rank Western U. S. Coals," *Combust. Sci. and Tech.*, Vol. 16, pp. 95-110.
- (3) EPRI, 1988, "Slag Monitoring for Utility Boilers," Final Report.
- (4) Attig, R. C. and Duzy, A. F., 1969 "Coal Ash Deposition Studies and Application to Boiler Design," *Proceedings of the American Power Conference*, Vol 31, pp. 290-300.
- (5) Levert, F. E., Robinson, J. C., and Frank, R. L., 1987, "A Slag deposition Monitor for Use in Coal-Fired Boiler," *ISA Transactions* Vol. 26, No. 2, pp 51-64.
- (6) Simon P. Hanson and Murray F. Abbott, 1998, "Furnace Water Wall Slag Deposition Testing in a 0.5 MW," *Prog. Energy Combust. Sci.* Vol. 24, pp. 503-511.
- (7) Heil, T. C. Scanuzzo, S. A. and Nethercutt, R. M., 1981, "Boiler Heat Transfer Model for Operator Diagnostic Information," *ASME/IEEE Power Generation Conference*, pp. 1-5.
- (8) Baxter, L.L. et al, 1998, "The Behavior of Inorganic Material in Biomass-Fired Power Boilers: Field and Laboratory Experiences," *Fuel Processing Technology*. 54, pp. 47-78.
- (9) Isreb, M., 1995, "Integrated Life Synthesis for Boiler Sootblower in Fossil Power Plant," *Computer & Structure* Vol. 63, No. 6 pp. 1043-1051.