

## 발전소 운전 data분석을 통한 보일러 슬래깅 상태에 대한 정량적 평가

백세현\*<sup>†</sup> · 김현희\* · 박호영\* · 김영주\* · 김태형\* · 고성호\*\*

\*한전전력연구원, \*\*충남대학교

### The quantitative evaluation techniques for state of the boiler slagging using the plant operation data analysis

Sehyun Baek\*<sup>†</sup>, Hyunhee Kim\*, Hoyoung Park\*, YoungJoo Kim\*, TaeHyung Kim\*, SungHo Ko\*\*

\*KEPRI, \*\*Chungnam university

#### 1. 서 론

석탄화력 발전소 보일러에서 석탄에 포함된 광물질은 석탄회로 되며 그 중 일부는 회분의 응집보다 높은 영역에서 용융된 상태로 가스흐름을 따라 배출되다가 보일러의 복사 전열면에 위치한 튜브표면에 부딪치게 되는데, 이때 급냉하면서 응고되어 보일러 튜브에 부착 및 퇴적하게 되고 이런 현상을 포괄적으로 슬래깅으로 분류한다.

한편 회성분 중 알칼리 및 휘발성 성분이 휘발하여 연소가스중의 fly ash와 함께 과열기, 재열기등의 대류 전열면에 응축, 부착되는 현상은 파울링으로 분류한다.[1]

슬래깅 현상은 심한 경우 열전달을 방해하고, 전열면간 열흡수 배분의 불균형 초래하며, 가스흐름을 편류시키고, 경질의 대형 슬래그가 떨어질 경우 보일러 화로 바닥의 보일러 튜브들에 손상을 가해 과열 및 누설을 발생시키기도 한다.

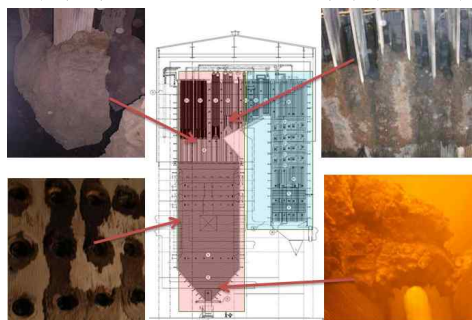


Fig. 1 various form of slagging by locations

발전소 현장에서는 석탄회의 성분분석 값을 활용하여 슬래깅 특성을 예측하는 다양한 지수들을 실무에 활용하고 있다. 그러나 같은 회의 성상에 대하여도 각각의 지수별로 다른 경향을 예측하기도 하고, 실제 발생하는 현상과 예측 값이 잘 일치하지 않는 문제점이 있다. 한편 최근에는 TM A (Thermo-Mechanical Analyzer)를 이용하여 석탄회의 용융 특성을 고려한 실험방법 및 지수도 제안되고 있다.[2]

슬래깅 특성은 화로내온도, 부착면의 성질, 회의 응집 및 용착특성 등 영향을 받기 때문에 단순히 연료의 성분만으로 슬래깅성을 예측하기에는 다소 무리가 있다. 따라서 보일러 운전중 슬래깅 현상을 감시하는 것이 발전설비의 안정적인 운전 에 반드시 필요하다.

그러나 현재까지 보일러 내부 슬래깅 발생 상태에 대한 평가 방법은 보일러의 일부 부위에 설치된 점검 창을 통한 육안점검에 의존하고 있는바, 점검 가능한 부위가 극히 제한되고, 점검자 개인별 판단기준이 상이하며 체계적인 평가와 기록 유지에도 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 발전소의 실시간 운전 data와 수치해석 연계를 통한 전열면 별 슬래깅 상태에 대한 정량적 평가기법을 개발하였으며, 500MW급 D화력 발전소에서 5일간 총 6종의 석탄혼탄 운전조건을 대상으로 현장테스트를 시행함으로써, 보다 명확한 평가방법을 제시하고자 하였다. 또한 상기 기간중 사용된 석탄혼탄 set 별 실측 Slagging성 분석결과를, 기존 각종 슬래깅 지수등의 예측값과 비교하였다.

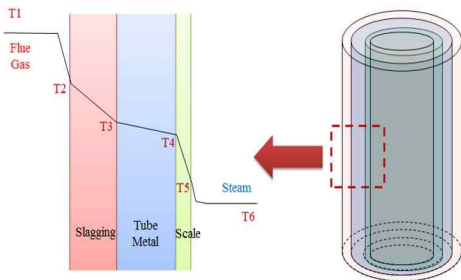
<sup>†</sup> Corresponding Author, magenta@kepco.co.kr

© 2014 The Korean Society of Combustion

## 2. 발전운전 data 분석을 통한 보일러 슬래깅 상태에 대한 정량적 평가

### 2.1 실증실험

보일러 전열면별 슬래깅 상태를 분석하기 위해서는 제한된 발전소 운전 data를 기반으로 전체 전열면 각각의 입 출구 증기 및 가스에 대한 온도, 유량, 압력, 엔탈피, 조성 및 열교환량을 계산하여야 하며, 그 후 각각의 전열면의 튜브 외면에 부착된 슬래깅 두께에 의한 열저항값을 슬래깅 상태에 대한 정량적 지표로 도출하게 된다.



$$\frac{Q}{A} = \frac{T_1 - T_6}{\frac{1}{h_o} + r_o * \frac{\ln(r_o/r_t)}{k_{slag}} + r_o * \frac{\ln(r_t/r_i)}{k_{metal}} + r_o * \frac{\ln(r_i/r_s)}{k_{scale}} + \frac{r_o}{r_s h_s}}$$

Fig. 2 Schematic diagram for Heat transfer through the boiler tubes

그러나 현실적으로 발전소에서 기존 설치된 계측기로부터 얻을 수 있는 data는 아래와 같이 제한적인 경우가 많다.

Table 1 Reliability classification of power plant operation data

구분	신뢰도있는 취득 data	불확실 data	미측정 data
유량	▪ 급수유량	▪ 가스 및 공기유량	▪ 주증기유량 ▪ 재열기유량 ▪ 보조증기
온도	▪ 일부 전열면의 입출구 증기 온도 ▪ 절탄기 출구 가스 온도 ▪ GAH 출구 공기 온도		▪ 각부 가스 온도
압력	▪ 급수, 주증기 및 재열기 3point		▪ 중간전열면 압력
연료	▪ 연료성상	▪ 연료유량, ▪ 연료성상, ▪ 발열량	
기타	▪ Stack O <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> ▪ 공기예열기 누설율 ▪ 전기출력	▪ Eco 출구 O <sub>2</sub> , CO, NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub>	

따라서 신뢰도가 확보된 일부 운전 data를 기반으로 열 물질정산을 통해 불확실성이 높거나 취득이 불가능한 운전 값을 역 계산하는 방법을 사용해야 한다. 예를 들면 주증기 유량은 측정된 급수 유량을 기반으로 하며, 중간에 가감되는 유량은 (과열저감수등) 측정된 온도, 압력을 입력 값으로 하는 열평형 계산을 통해 도출하여 최종단 증기 유량까지 합산한다. 재열기 측 유량은 주증기 유량에서 보조 증기등 각종 누설유량을 삭감하고, 고압터빈에서 급수가열기 공급되는 추기유량을 열평형 계산을 통해 산출하여 삭감함으로써 얻는다. 공기 및 가스유량은 배기가스에 포함된 O<sub>2</sub> 농도와 연료 data를 기반으로 연소계산을 통해 역 산출되며 보일러 각 전열면 위치별 가스온도는 보일러 출구가스온도 및 유량 계산 값을 기초로 각각의 전열면의 증기 측에서 흡수한 열량을 순차적으로 합산하는 방법을 적용된다.

그러나 위와 같은 계산방법은 많은 반복계산을 요구하므로 수치해석 모델을 활용하는 자동계산 방법을 적용하고 있다.

Fig 3은 500MW급 D표준화력 발전소에 대하여 보일러 화로, 열교환기, 터빈 및 터빈 보조기기를 상용코드인 PROATE [3]를 활용하여 모델링한 결과이다.

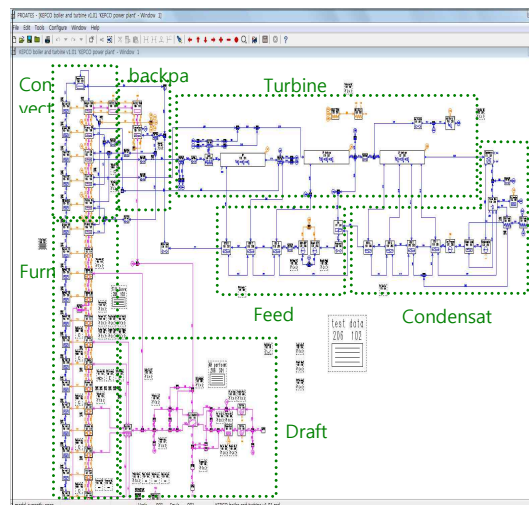


Fig. 3 Thermal performance analysis model of 500MW standard power plant using PROATES

화로, 열교환기, 공기에열기등 총 240개의 기기 모듈 및 제어모듈 (변수제어, 사용자 연산등 모듈제어)은 총 104개가 사용되었으며 각각의 모듈들을 가스, 증기, 파워 및 제어 stream으로 연결하였다. 보일러 화로모델은 화로의 높이별 총 22 zone의 화로 모듈을 연결하여 멀티존 화로로 구성하였으며 각각의 화로 모듈에서 흡수된 열에

너지는 수냉벽 튜브 모듈로 전달되고 수냉벽 튜브의 유체온도는 화로모듈의 벽면온도로 설정되게 하였다. 각각의 화로모델에는 실제 보일러의 해당부위의 형상, 치수, 반응이 입력되며 다른 유틸리티 모듈과 상호 연결되어 계산을 수행한다. 대류전열면의 과열기, 재열기 및 절탄기들은 열교환기 화로 모델로 구성되며 각각의 모듈에는 실제 보일러 튜브의 형상에 대한 모사 및 가스방사율, 대류열전달 계수등에 대한 correlations들을 적용하였다.

2.2 현장 운전 data 분석결과

D화력 1호기 보일러를 대상으로 5일간 운전 data를 취득 분석하였다. 상기기간에는 Fig 4와 같이 각 시점별로 동시에 각각 탄종 4종을 혼탄 연소하고 있었으며 1일 1-2회 탄종교체가 이루어지고 있었다. 석탄 성상은 소비탄 분석치를 적용 하였고 시간대별 혼탄 상황은 상탄일지의 자료를 기초로 하였으며 coal silo에서의 체류시간을 고려하여 8시간을 지연 보정하였다.

19일		20일		21일		22일	
14:15		14:40		12:45		13:50	
ALINOS 30	ARCH 70	SIIEK 40	PRB 60	SIIEK 40	PRB 50	SIIEK 40	ARCH 40
ALINOS 30	ARCH 70	SIIEK 40	PRB 60	SIIEK 40	PRB 50	SIIEK 40	ARCH 40
ALINOS 30	ARCH 70	SIIEK 40	PRB 60	SIIEK 40	PRB 50	SIIEK 40	ARCH 40
NCA 40	INDOMIN 60	NCA 50	ARCH 50	NCA 50	ARCH 50	MOCLARB 40	INDOMIN 60
NCA 40	INDOMIN 60	NCA 50	ARCH 50	NCA 50	ARCH 50	MOCLARB 40	INDOMIN 60
NCA 40	INDOMIN 60	NCA 50	ARCH 50	NCA 50	ARCH 50	MOCLARB 40	INDOMIN 60
23일		24일		25일		26일	
13:30		12:45		13:50		13:50	
SIIEK 60	ARCH 40	SIIEK 50	PRB 50	SIIEK 60	ARCH 40	ALINOS 50	ARCH 50
SIIEK 60	ARCH 40	SIIEK 50	PRB 50	SIIEK 60	ARCH 40	ALINOS 50	ARCH 50
SIIEK 60	ARCH 40	SIIEK 50	PRB 50	SIIEK 60	ARCH 40	ALINOS 50	ARCH 50
MOCLARB 40	INDOMIN 60	ALINOS 60	BLENDRE 40	ALINOS 60	BLENDRE 40	MOCLARB 50	LANKEE 50
MOCLARB 40	INDOMIN 60	ALINOS 60	BLENDRE 40	ALINOS 60	BLENDRE 40	MOCLARB 50	LANKEE 50
MOCLARB 40	INDOMIN 60	ALINOS 60	BLENDRE 40	ALINOS 60	BLENDRE 40	MOCLARB 50	LANKEE 50

Fig. 4 The applied coal blending chart during test

당진화력 PI(운전정보시스템)서버에서 자동으로 운전 data를 취득할 수 있는 엑셀 매크로를 만들어 Fig.3의 수치해석 모델과 연결하였으며 data 취득 주기는 10분 간격으로 하였고 외란성분을 최소화하고 data의 신뢰도 확보를 위하여 각 시점별 각각 1분 평균치 값을 적용하였다.

Fig. 5 및 6은 운전 data를 취득하여 분석한 결과의 일부 예시이다

보일러 Waterwall 부위에서의 슬래깅 특성은 연료중 회분의 용점은 물론이고 온도별 점도의 특성에 영향을 많이 받는다. 또한 Waterwall 벽면에 부착되는 퇴적물을 제거해주는 sootblower 설비의 운전 빈도에 따라 부착상태가 크게 변화하게 된다.

Fig. 5의 상부 그래프는 시간대별 Waterwall 부위의 열저항 값의 변화이며 하부 그래프는 화로출구 온도(Furnace exit temperature)로서 상호 직접적인 비례 상관관계가 성립됨을 알 수 있다.

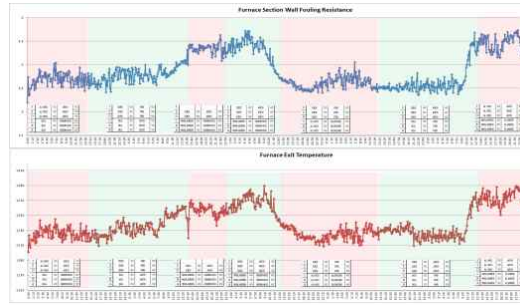


Fig. 5 The thermal resistance & furnace exit temperature of waterwall

Fig. 6의 상부 그래프는 버너 상부측에 최초로 배치된 Primary superheater의 시간대별 슬래깅에 의한 열저항 값의 변화이며 하부측은 이에 따른 열흡수율의 변화를 비교한 결과이며 서로 반대의 경향을 가지고 있음을 볼 수 있다.

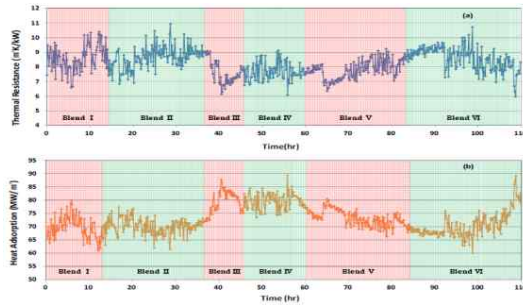


Fig. 6 The thermal resistance & heat absorption of primary superheater

3. 현장 실측 분석값과 각종 슬래깅 지수의 예측결과 비교

석탄회의 성분분석 값을 활용하여 슬래깅 특성을 예측하는 지수들 일부를 Table 2에 나타냈으며, 상호 경향성 비교를 위하여 결과 값을 normalize하는 방법을 적용하였다.

Table 2 Various slagging prediction index [4]

구분	계산방법	normalize
Rs	$\frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	$\frac{Rs}{Rs\ average}$
Rs*S	$\frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} * S$	$\frac{Rs * S}{Rs * S\ average}$
Si/Al	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{Si / Al}{Si / Al\ average}$
R <sub>FS</sub>	$\frac{HT + 4 * IDT}{5}$	$\frac{R_{FS\ average}}{R_{FS}}$
Sp	$\frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$	$\frac{S_p\ average}{S_p}$

Fig.7은 D화력 발전소에서 5일간 연소된 총 6종의 석탄 혼탄set 조건별로, 용융회의 응고 메카니즘이 지배적인 복사과열기에서 분석된 열저항 계수 변화와 table 2에 제시된 각종 슬래깅 지수 등의 예측값들을 비교한 결과이다.

그 결과 혼탄 탄종별로 슬래깅성 예측 지수들이 실제의 열저항 변화와는 다소 상이한 결과를 나타내고 있었으며, 그중 Rs 및 Rs\*S 지수가 비교적 유사한 경향성을 나타냈다.

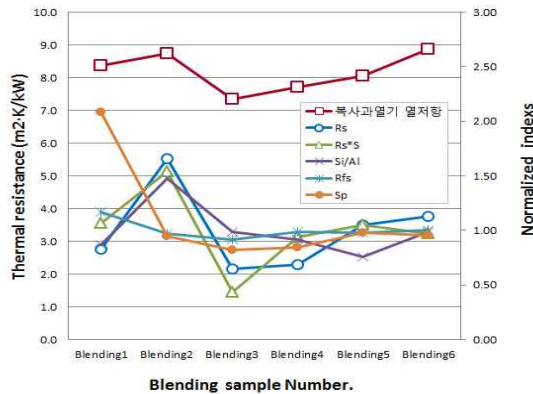


Fig.7 Comparisons of normalized conventional slugging index with the field dat

Fig. 8은 TMA (Thermo-Mechanical Analyzer) 실험장치 및 실험결과 그래프에 대한 예시이다.

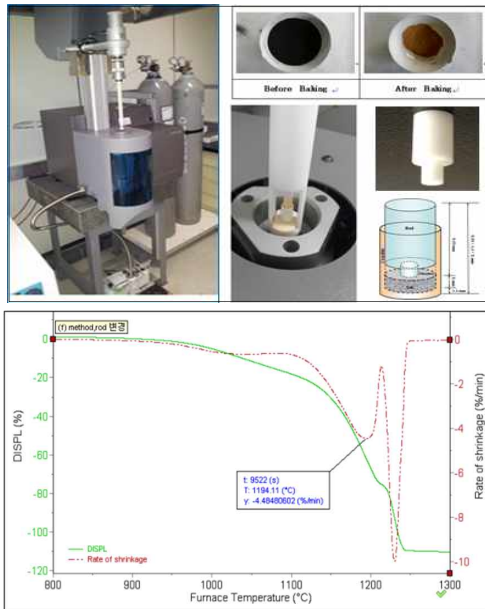


Fig. 8 The illustration of TMA test result graph

TMA 를 활용한 분석 방법은 여러 가지가 있으며 본 연구에서는 수축율 곡선의 2번째 Peak 에

서의 수축율과 온도를 적용하였으며 식(1)과 같은 BHEL 지수[2]를 산출하였다.

$$BHEL = \left( \frac{R_m}{T_m} \right) * \left( \frac{\%ash}{HHV} \right) \quad (1)$$

Fig 9는 혼탄 탄종별로 현장 실측 분석값과 BHEL 지수에 의한 예측값을 비교한 결과로서 상호 유사한 경향성이 나타남을 확인하였다.

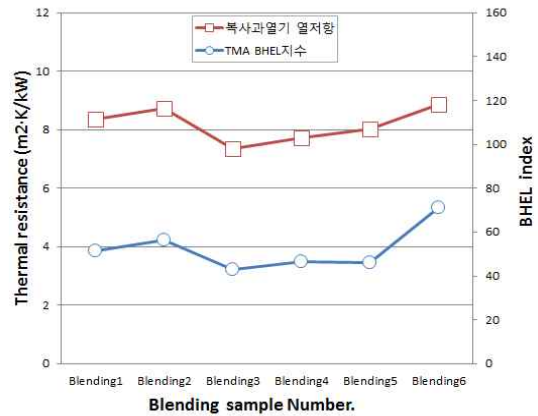


Fig. 9 The Comparisons of BHEL index with the slugging field data

### 4. 결론

- 1) 석탄화력 발전소 운전 data 취득, 조율 및 수치해석 모델을 활용한 보일러 전열면별 열저항 계수변화 분석을 통하여, 각각의 전열면별 실시간 슬래깅 상태감시 및 평가가 정량적으로 가능하였다.
- 2) TMA 실험에서 수축율 곡선의 2번째 Peak점을 기준으로 적용한 BHEL 가 슬래깅성 예측에 유용함을 확인하였다.

### 후 기

본 연구는 2014년 한국 남동발전과의 연구과제 협약을 통해 지원을 받아 수행한 연구과제(R14GF03)의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] 보일러운전 실무, 발전교육원, 2010
- [2] Lawrence A, Kumar R, Nandakimar K, Narayanan K. A novel tool for assessing slugging propensity of coals in PF boilers. Fuel 2008;87:946-950.
- [3] PROATE manual. E-ON UK
- [4] 연소관리실무, 발전교육원, 2010