

연탄 화력발전소 보일러에서 다탄종 연소가 슬래깅 발생에 미치는 영향

박지훈*, 유호선**†

*한국남동발전(주), **†대한기계설비산업연구원

The Effect of Multi-Coal Combustion on the Generation of Slagging in a Bituminous Coal-fired Power Plant Boiler

Jihoon Park*, Hoseon Yoo**†

*Korea South East Power Corp., Jinju 52852, Korea

**KRIMFI, Seoul 06058, Korea

ABSTRACT : In this study, I analyzed the effect of slagging caused by blending bituminous coal and sub-bituminous coal while maintaining the generator output, combustion conditions, and ventilation conditions for 870MW thermal power plant designed with bituminous coal. Accordingly I proposed an acceptable method of blending coal method. the blending ratio of sub-bituminous coal was adjusted to 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, etc. to confirm ultimate analysis, proximate analysis, ash fusion temperature change, slagging indices, etc. Proper blending coal conditions are blending with sub-bituminous coal at 40% or less, ratio of base component to acid component(B/A) is 0.4 or less or 1 or more, total alkali(TA) is 3.5 or less, fusion slagging index(Rfs) is 1,345°C or more, and ash content is 13% or less in ultimate analysis, the ash content in proximate analysis is 15% or less, and the initial deformation temperature(IDT) should be at least 1,200°C or more

초록 : 본 연구에서는 역청탄으로 설계된 870MW급 유연탄 화력발전소를 대상으로 발전기 출력, 연소조건, 통풍조건을 일정하게 유지하면서 역청탄과 아역청탄을 혼합하여 연소함에 따른 슬래깅 발생 영향을 분석하였으며, 이에 따른 보일러 성능에 영향을 주지 않는 허용 가능한 혼탄 방안을 제시하였다. 아역청탄의 혼합 비율을 10%, 20%, 40%, 60%, 80% 등으로 조정하여 원소분석, 공업분석, 회용점 변화, 슬래깅 지수 등을 확인하였고, 적정 혼탄 조건은 아역청탄은 40% 이하로 혼탄하고, 회의 산성분 대비 염기성분 비율은 0.4이하 또는 1이상, 총 알칼리는 3.5이하, 용점 슬래깅 지수는 1,345°C 이상, 원소분석 시 회함량은 13% 이하, 공업분석 시 회함량은 15% 이하, 초기용융점은 최소 1,200°C 이상이어야 바람직하다고 판단된다.

Key words : Slagging(슬래깅), Ash(회), Bituminous coal(역청탄), Sub-bituminous coal(아역청탄), Coal blending(혼탄)

-기호설명-

AFT : 회용점 (°C)

ASTM : 미국 재료 시험 협회

B/A : 산성분 대 염기성분 비율

BMCR : 보일러 최대 연속운전 정격

IDT : 초기변형점 (°C)

NR : 공칭정격

Rfs : 용융 슬래깅지수

SA : 실리카 대 알루미늄 비율

Si : 실리카 비율

TA : 총 알칼리

† Corresponding Author, hsyoo@ssu.ac.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

현재 우리나라는 석탄 연료를 전량 수입에 의존하고 있으며 양질의 석탄을 지속적으로 공급받지 못하고 있는 실정이며, 국내 발전회사는 경영 개선을 위해 전략적으로 연료를 구매하여 발전 원가를 낮추려는 노력을 함에 따라 발전 설비에 고휘발분, 고수분의 저열량탄을 공급하고 있다.

이로 인해 각 발전회사는 저급탄 사용을 확대하고 있으며 기존 고급탄을 기준으로 설계된 발전용 보일러의 경우 설계 기준 탄인 역청탄과 특성이 상이한 아역청탄 등을 지속적으로 혼탄하여 발전설비를 운영함에 따라 여러 연소 장애가 발생하고 있으며 그중 가장 큰 문제점 하나는 보일러 내 슬래깅 성장에 따른 클링커가 생성되는 것이다. 저급탄인 저열량탄은 회용점이 낮아 보일러 내부 열교환부인 튜브에 점착되어 열도율이 저하되고 보일러 수냉벽(water wall)과 과열기(superheater) 및 재열기(reheater)에 용융 회가 다량 형성되어 열전달을 저하시킴에 따라 배기가스의 온도를 상승시켜 보일러 효율 저하로 이어지며, 열교환부에 슬래깅이 성장하여 생성된 클링커 낙하로 인하여 튜브 파열, 연소실 내 압력변동 등으로 출력감발이나 불시정지 등의 문제점을 일으킨다.

1.2 연구 내용

이에 본 연구에서는 870 MW급 유연탄 화력발전소를 대상으로 발전기 출력, 연소조건, 통풍조건 등을 일정하게 유지하면서 연료로 사용하는 2종의 역청탄과 1종의 아역청탄을 혼탄하여 연소하는 경우 아래와 같이 연구를 진행하였다.

첫째, 탄종별 원소분석, 공업분석, 회성분 분석 및 회용점을 측정하여 경험적 슬래깅 지수를 계산하여 슬래깅 경향을 분석하였다.

둘째, 2종의 역청탄과 1종의 아역청탄에 대한 혼탄비율(역청탄A : 아역청탄B : 역청탄C)을 10:80:10, 20:60:20, 30:40:30, 40:20:40, 45:10:45 등 5가지로 분류하여 원소 분석, 공업분석, 회성분 분석 및 회용점을 측정하였고, 경험적 슬래깅 지수를 계산하여 슬래깅 경향을 분석하였다.

셋째, 혼탄비율별 노출구에서의 연소가스 온도변화, 보일러 내부 열교환부인 수냉벽(water wall), 과열기(superheater), 재열기(reheater) 등 표면온도를 측정함으로써 슬래깅 생성을 예측하였고, 그 결과를 토대로 최적의 혼탄비율을 제시하고자 한다.

2. 슬래깅 발생 메커니즘

2.1 보일러 연소 개요

연료는 한번 착화되면 고온으로 되어 아주 빠른 속도로 반응이 일어난다. 이 반응속도는 너무 빨라서 보통의 방법으로는 측정할 수 없을 정도이다. 연소 반응의 특징은 저온에서는 반응속도가 매우 느리고 고온에서는 대단히 빠르며 반응과 동시에 다량의 열과 빛을 발생한다. 미분탄이 보일러로 투입되어 착화 및 연소되는 과정은 투입된 미분탄 입자가 급격히 가열되어 입자표면에서 기체가 방출됨으로서 시작된다. 이 때 열량이 높은 미분탄의 경우 석탄입자는 노내 투입 즉시 기체 상태로 분출되는데 반하여 저열량탄인 경우는 입자들이 균열이 생기거나 분열되면서 휘발분이 빠져나가 착화되기 때문에 착화 및 연소시간이 고열량탄에 비해 길어진다. 이와 같은 석탄입자의 변화는 열량뿐만 아니라 온도, 가열속도 및 압력 등에 따라서도 많은 영향을 받게 된다.

2.2 슬래깅성 예측인자

현재 슬래깅 예측을 위한 Tool로는 크게 Empirical approach, Mechanistic approach, Computational Fluid Dynamics 기법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 위 3가지 중 가장 대표적이며 전통적인 예측 Tool인 Empirical approach에 대해 기술하고 이 Tool을 활용하여 시험 및 분석결과를 도출할 것이다. 경험적 예측 Tool로는 석탄의 회 성분 또는 회 용융점을 기반한 Slagging Index가 있다. 이 방법은 비교적 간단하고, 현장에 실제로 적용 가능한 방법으로 많이 사용된다. 회 조성 가운데 Acidic metal oxides(SiO_2 , AlO_3 , TiO_2)와 Basic oxides(Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O) 비율인 B/A

연탄 화력발전소 보일러에서 다탄종 연소가 슬래킹 발생에 미치는 영향

ratio가 대표적인 예측 Index 가운데 하나이며, Table 2-1은 다양한 Slagging Index와 판별정도를 보여주고 있다. 또 하나의 Tool은 Standard Ash Fusion Test(AFT)이다. 이 방법은 Lab Scale Furnace 내에서 온도를 증가 시킴에 따라 회 샘플의 형태 변화를 관찰하여 점착성을 평가한다. 이는 ASTM D1857 표준법으로서 고체 연료의 Slagging 성을 평가하는데 가장 일반적으로 사용한다. Fig. 2-1은 AFT 실험에서 온도변화에 따른 회 샘플 형태 변화를 보여주고 있다.

Table 2-1 Empirical approach indices of slagging tendency prediction

Index	Formula	Slagging Tendency		
		Low	Medium	High
Base-Acid ratio(B/A)	$\frac{Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2}$	<0.4 >1	0.7 ~ 1	0.4 ~ 0.7
Iron-Calcium ratio(IC)	$\frac{Fe_2O_3}{CaO}$	<0.3 >3	0.3 ~ 3	=1
Total Alkali (TA)	$Na_2O + K_2O$	<3.5	3.5 ~ 5	>5
Silica-Alumina ratio(SA)	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	<1.4	1.4 ~ 2.2	>2.2
Silica Ratio(SI)	$\frac{SiO_2}{SiO_2 + Fe_2O_3 + CaO + MgO}$	0.72 ~ 0.8	0.65 ~ 0.72	0.5 ~ 0.65
Fee	$\frac{4(\min IDT) + (\max HT)}{5}$	>1,345	1,150 ~ 1,345	<1,150
Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	3 ~ 8	8 ~ 15	>15

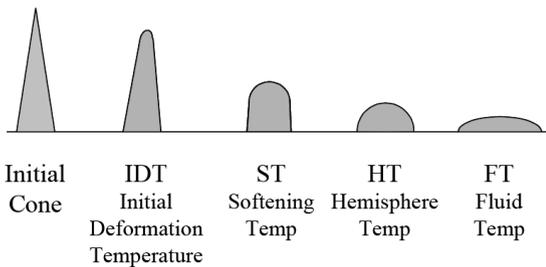


Fig. 2-1 Critical temperature points as defined in ASTM D1857-03

3. 혼탄 연소시험

3.1 시험조건 및 방법

시험 대상 발전소인 영흥발전본부 3호기는 수입 유연탄

인 역청탄과 아역청탄을 혼탄하여 주 연료로 사용하며, 초임계압, 관류형, 평형통풍, 변압운전, Two Pass, 미분탄보일러와 직렬배열 4 Flow 재열·재생 복수식 터빈으로 설계된 공칭정격(NR, Norminal Rating) 870 MW 급 발전설비이며, 보일러 최대 연속운전 정격(BMCR, Boiler Maximum Continuous Rating) 기준 주증기 압력과 온도는 각각 255 kg/cm², 569 °C 이며, 재열증기 압력과 온도는 46.72 kg/cm², 596 °C 이다. 보일러 내 연소온도는 약 1,100°C에서 1,150°C 정도이며, Fig. 3-1은 영흥화력 3,4 호기 보일러 개략도이다. 그림에서 보일러 내 슬래킹이 주로 발생하는 영역에 위치한 튜브 중 7번은 Furnace spiral waterwall tubes, 16번은 Division superheater tubes, 17번은 Platen superheater tubes, 22번은 Final reheater tubes, 18번은 Final superheater tubes 이다.

시험탄종은 역청탄 2종과 아역청탄 1종으로 호주산 역청탄 Bloomfield, 미국산 역청탄 Signal Peak, 러시아산 아역청탄 Solntsevsky 등이다. 이 시험탄종 각각의 원소분석, 공업분석, 회성분 분석, 회용점 분석, 발열량 측정 등을 통해 경험적 슬래킹 지수를 바탕으로 슬래킹성을 고찰하고, Bloomfield 과 Solntsevsky 과 Signal Peak 를 각각 10:80:10, 20:60:20, 30:40:30, 40:20:40, 45:10:45 비율로 혼합한 탄에 대해 각각의 원소분석, 공업분석, 회성분 분석, 회용점 분석, 발열량 측정 등을 통해 경험적 슬래킹 지수를 바탕으로 슬래킹성을 고찰하였으며, 5가지의 혼탄 비율에 따라 노출구에서의 연소가스 온도변화, 보일러 내 슬래킹 발생 영역에 있는 열교환 튜브별(Water wall spiral tubes, Division superheater tubes, Platen superheater tubes, Final reheater tubes, Final superheater tubes) 튜브 표면온도 변화를 분석하여 슬래킹 발생에 대한 분석을 하였다.

3.2 혼탄 슬래킹성 분석

아역청탄의 혼탄비율에 따른 시료의 기진식 기준 원소분석 결과는 아역청탄 혼탄비율이 증가함에 따라 탄소, 수소, 질소, 황 등은 감소하는 경향을 보여주고, 회함량은 증가하는 것을 보여주고 있다. 이는 아역청탄 혼탄비율에 따라 원소함량이 선형적인 변화를 한다는 것을 알 수 있다.

아역청탄의 혼탄비율에 따른 시료의 기진식 기준 공업분

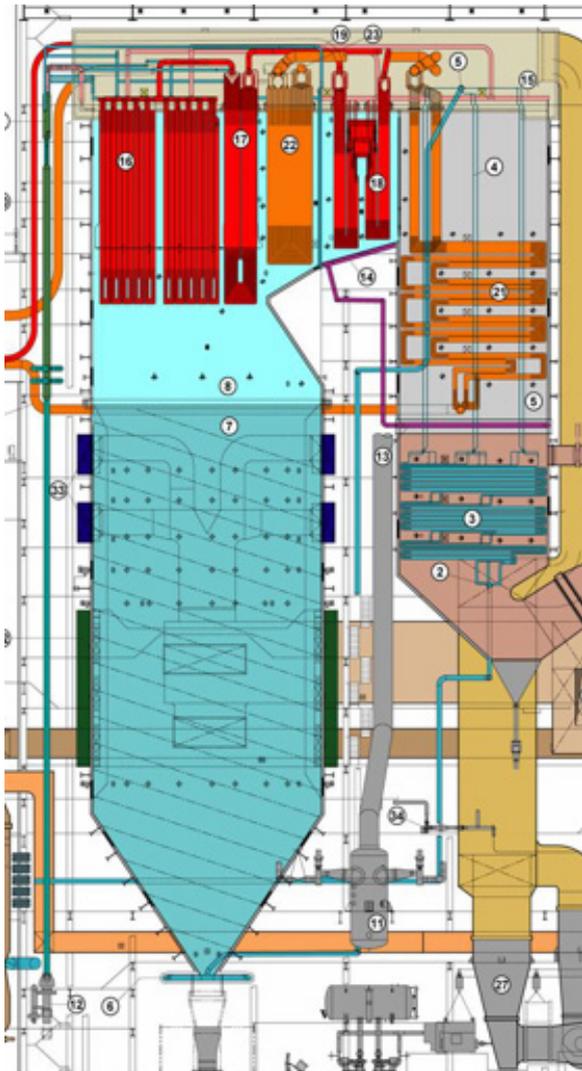


Fig. 3-1 The outdrawing boiler of Yonghung theraml power plant unit 3,4

석 결과는 아역청탄의 혼탄비율이 증가함에 따라 고유수분과 회는 증가하는 경향을 보여주고, 고정탄소는 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 휘발분은 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

아역청탄인 B탄의 혼탄비율에 따른 시료의 회용점 측정 결과는 A탄, B탄, C탄의 초기 변형 온도 IDT는 각각 1,450℃, 1,090℃, 1,290℃ 이나, 혼탄할 경우 B탄의 비율

이 10%일 경우 IDT는 1,310℃, 20%일 경우 1,280℃, 40% 일 경우 1,116℃, 60% 일 경우 1,113℃, 80%일 경우 1,110℃로 아역청탄의 혼탄비율이 높아질수록 점점 낮아지는 것을 알 수 있다. 그리고 연소 초기의 연소가스의 온도가 1,115℃에서 1,120℃임을 보여준다. 혼탄 시 IDT가 연소가스 온도 범위와 유사함에 따라 탄은 용융하게 되어 튜브에 슬래깅을 발생시킬 수 있는 조건을 조성하게 되는 것으로 예상할 수 있고, 연소가스 온도에 비해 IDT가 높은 경우에는 슬래깅 발생이 적을 것으로 판단할 수 있다.

혼탄 Ash의 회성분을 기반으로 한 슬래깅 예측 지수 결과는 Table 3-1과 같다. 슬래깅 발생 경향은 Low, Medium, High 의 3가지 상태로 판단하고 있으며, 판정기준은 Table 2-1과 같다. 각 예측 지수의 특성별로 판정 결과가 다양함을 확인할 수 있다. 아역청탄인 B탄의 혼탄비율이 10%일 경우 판정결과는 예측지수 중 3가지는 Low, 4가지는 Medium 이었고, 20%일 경우 2가지는 Low, 4가지는 Medium, 1가지는 High 이었으며, 40%일 경우 2가지는 Low, 2가지는 Medium, 3가지는 High 임을 보여준다. 이것은 아역청탄 비율이 40% 이하일 경우라도 예측 지수 모두가 Low를 나타내지는 않는다는 것을 보여준다. 그리고 아역청탄 혼합비율이 60%일 경우 2가지는 Low, 1가지는 Medium, 4가지는 High 이었으며, 80%일 경우는 2가지는 Low, 1가지는 Medium, 4가지는 High 로 나타났다. 이것은 아역청탄 비율이 60%이상 높을 경우에도 예측 지수 중 Low도 다수 있다는 것을 보여준다.

그런데 연소가스 온도 변화와 보일러 튜브 번들 표면의 온도 변화 등으로 알 수 있듯이 아역청탄 비율이 40% 이하일 경우에는 슬래깅 발생이 적었으나 슬래깅 예측 지수 중 High로 계산되는 것도 있다는 것을 보여주고 있다.

또한 예측지수 중 IC, SA, Si, FeO₃ 등은 혼탄비율에 따른 예측 지수 판정에 영향이 미미하였고, 따라서 이번 연구에서 예측 지수로서 활용할 수 있는 지수는 B/A, TA, Rfs 등 이었다.

3.3 시험결과 및 고찰

보일러 내부 열교환부인 튜브 번들 중 수냉벽(Water Wall) 튜브의 혼탄비율에 따른 표면온도 변화는 Fig. 3-2와 같이 나타났다. 아역청탄 B의 비율이 80%로 가장 높을

연탄 화력발전소 보일러에서 다탄종 연소가 슬래킹 발생에 미치는 영향

Table3-1 Slagging tendency of sample blending coal ashes

	10:80:10		20:60:20		30:40:30		40:20:40		45:10:45	
	value	tendency								
B/A	0.41	high	0.43	high	0.40	high	0.72	med	0.35	low
IC	0.51	med	0.46	med	0.49	med	0.40	med	0.40	med
TA	5.01	high	4.70	high	4.29	med	4.03	med	3.49	low
SA	2.25	high	2.44	high	2.81	high	2.40	high	1.58	med
Si	0.78	low	0.81	low	0.84	low	0.75	low	0.68	med
R _h	1126	high	1128	high	1135	high	1296	med	1327	med
Fe ₂ O ₃	4.21	low	3.45	low	3.21	low	4.12	low	4.55	low

때 연소 초기 408℃ 이었으나 21시간 후 397℃로 약 11℃가 하락하여 다른 혼탄비율에 비해 가장 큰 온도 감소를 보였으며, 그 외 B의 비율이 60%일 때 온도 감소는 10℃, 40%일 때 온도 감소는 4℃, 20%일 때 온도 감소는 5℃, 10%일 때 온도 감소는 3℃로 나타났다. 이 결과로 인해 아역청탄 비율이 높을수록 수냉벽 튜브 표면에 슬래킹 발생량이 많아짐에 따라 고온의 연소가스로부터 튜브로의 열전달량이 낮아지는 것을 알 수 있다.

1차 과열기(Division Superheater) 튜브의 혼탄비율에 따른 표면온도 변화는 Fig. 3-3과 같다. 이 경우는 수냉벽 튜브 표면온도 변화와 다르게 아역청탄 B의 비율이 80%와 60%일 경우 각각 연소초기 표면온도는 470℃, 471℃이며, 21시간 후 표면온도가 459℃, 460℃로 약 11℃의 온도 감소를 보였고, 그 외 B의 비율이 40%, 20%일 경우에는 3℃의 온도 감소를 보였고, 10%일 경우에는 1℃ 온도 상승을 보였다. 이 결과는 B의 비율이 40% 이하일 경우에는 튜브 표면에 슬래킹 발생이 적어서 연소가스로부터 튜브로의 열전달에 방해가 적어진다는 것을 알 수 있다.

2차 과열기(Platen Superheater) 튜브의 혼탄비율에 따른 표면온도 변화는 Fig. 3-4와 같다. 이 경우는 1차 과열기(Division Superheater) 튜브 표면온도 변화와 유사한 변화를 보여주고 있다. 즉, B의 비율이 80%와 60%일 경우 각각 연소초기 표면온도는 545℃, 547℃이며, 21시간 후 표면온도가 533℃, 538℃로 약 12℃, 9℃ 온도 감소를 보였고, 그 외 B의 비율이 40%, 20%일 경우에는 1℃의 온도 증가를 보였고, 10%일 경우에는 온도변화가 없었다. 이 결과 또한 B의 비율이 40% 이하일 경우에는 튜브 표면에 슬래킹 발생이 적어서 연소가스로부터 튜브로의 열전달에 방

해가 적어진다는 것을 알 수 있다.

최종 재열기(Final Reheater) 튜브의 혼탄비율에 따른 표면온도 변화는 Fig. 3-5와 같다. 이 경우는 B의 비율이 80%와 60%일 경우 각각 연소초기 표면온도는 598℃, 596℃이며, 21시간 후 표면온도가 587℃, 589℃로 약 11℃, 7℃ 온도 감소를 보였고, 그 외 B의 비율이 40%, 20%, 10%일 경우에는 오히려 각각 3℃, 2℃, 2℃의 온도 증가를 보였다. 이 결과는 B의 비율이 40% 이하일 경우에는 튜브 표면에 슬래킹 발생이 적어서 연소가스로부터 튜브로의 열전달에 방해가 없다는 것을 알 수 있다.

최종과열기(Final Superheater) 튜브의 혼탄비율에 따른 표면온도 변화는 Fig. 3-6과 같다. 이 경우는 B의 비율이 80%와 60%일 경우 각각 연소초기 표면온도는 592℃, 593℃이며, 21시간 후 표면온도가 597℃, 596℃로 약 5℃, 3℃ 온도 증가를 보였고, 그 외 B의 비율이 40%, 20%, 10%일 경우에는 온도변화가 나타나지 않았다. 이 결과 B의 혼탄비율에 관계없이 Final Superheater의 경우에는 슬래킹이 발생하지 않았음을 보여주고 있다.

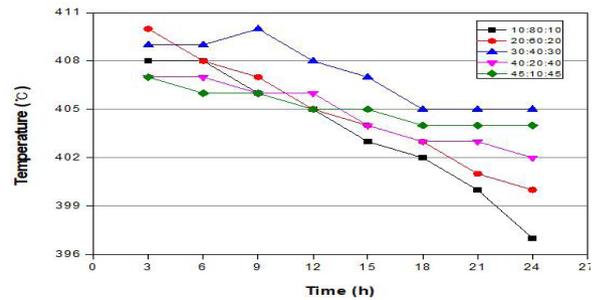


Fig. 3-2 water wall spiral tube surface temperature variation

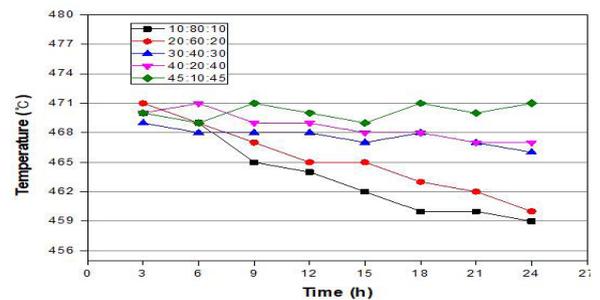


Fig. 3-3 Division superheater tube surface temperature variation

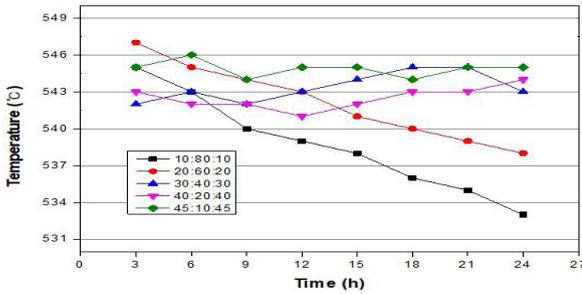


Fig. 3-4 Platen superheater tube surface temperature variation

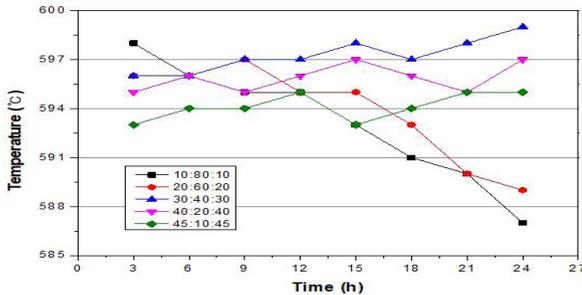


Fig. 3-5 Final reheater tube surface temperature variation

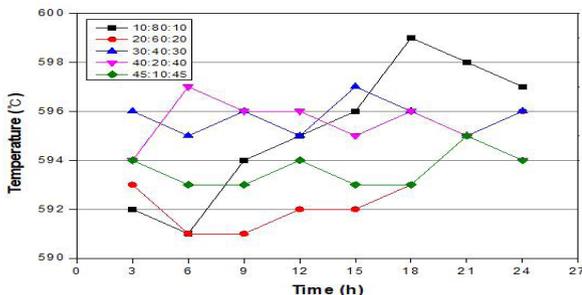


Fig. 3-6 Final superheater tube surface temperature variation

아역청탄의 혼탄비율을 변화시키면서 연소 시 보일러 노 출구에서의 연소가스의 온도변화는 Fig. 3-7과 같이 나타났다. B의 혼탄비율이 80% 일 경우 보일러 노 출구에서의 연소가스는 연소 시작 3시간 후에는 1120℃ 이었고, 21시간 후에는 1132℃ 로서 12℃ 상승하였고, 60% 일 경우는 11℃, 40% 일 경우는 5℃, 20% 일 경우는 6℃, 10% 일 경

우는 4℃ 가량 상승하였다. 이 결과는 아역청탄이 비율이 40% 이하일 경우에는 보일러 튜브 표면에 슬래깅 발생이 어려워 연소가스의 열이 튜브로 양호하게 전달됨을 보여준다.

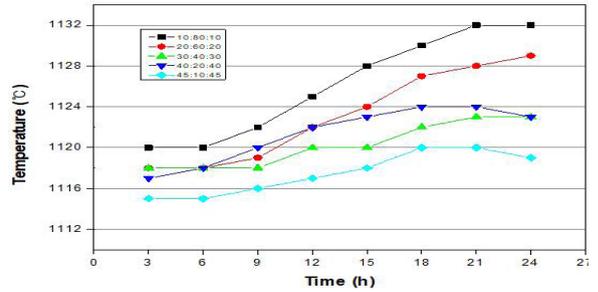


Fig. 3-7 Flue gas temperature variation at furnace exit

4. 결론

본 연구는 국내 인천시에 소재하는 초임계압 870 MW급 유연탄 화력발전소를 대상으로 하였고, 보일러 내 연소온도는 약 1,100℃에서 1,150℃ 정도이며, 발전기 출력, 연소조건, 통풍조건 등을 일정하게 유지하면서 역청탄 2종과 아역청탄 1종을 혼탄 시 혼탄 비율별 슬래깅성 지수, 회용점, 원소분석 및 공업분석 결과를 살펴보고, 혼탄 연소 시 보일러 노 출구 배기가스의 온도변화와 보일러 튜브의 표면온도를 측정하였다. 그 결과 보일러 성능에 심각한 영향을 주지 않는 혼탄 조건을 도출하였고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 역청탄 연소기준으로 설계된 대상 보일러에서 역청탄과 아역청탄을 혼탄하여 연소 시 연소 탄종에 따라 다를 수 있으나 아역청탄을 60% 이상 혼소하는 경우 보일러 내부 복사 열교환부인 수냉벽, 1차 과열기, 2차 과열기, 최종 재열기 튜브 표면에 슬래깅이 발생했다. 이로 인해 연소가스 열이 튜브 내부 유체에 전달이 어려워지고 이에 따라 노 출구 연소가스 온도가 증가하게 되었다.
2. 보일러 성능에 심각한 영향을 주지 않는 허용 가능한 혼탄 조건은 아역청탄은 40% 이하로 혼합하고, 회의 산성

연탄 화력발전소 보일러에서 다탄종 연소가 슬래깅 발생에 미치는 영향

분 대비 염기성분 비율은 0.4이하 또는 1이상, 총 알칼리는 3.5이하, 용점 슬래깅 지수는 1,345℃ 이상 이며, 회함량은 원소분석 시 13% 이하, 공업분석 시 15% 이하로 하고, 초기용융점은 최소 1,200℃ 이상이어야 한다.

참고문헌

- (1) Korea Energy Economics Institute, 2019, 2019 Long-term Energy Outlook
- (2) Kyeong-sam Kim, 2008, A Study of Combustion Characteristics for Mixed Sub-bituminous coal in 500MW Coal Firing Boiler of the Thermal Power Plant , Master's Degree, BPusan Nat'l University, pp. 10~12.
- (3) Ke-Ju An, 2013, Study on slagging characteristics of hybrid coals using the thermo-mechanical analysis, School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l University
- (5) A.F. Stam, W.R. Livingston, M.F.G. Cremers, G. Brem, 1995. "Review of Models and Tools for Slagging and Fouling Prediction for Biomass Co-combustion", pp.3-11