

## 발전용 보일러에서의 유, 무연탄 혼소시 연소 및 환경특성

박호영<sup>†</sup> · 김영주 · 박현주 · 김성철

한전전력연구원

(2008년 4월 11일 접수, 2008년 6월 17일 수정, 2008년 9월 18일 채택)

### Combustion and Emission Characteristics of Utility Boiler burning Anthracite-Bituminous Coal Blends

Ho Young Park<sup>†</sup>, Young Joo Kim, Hyun Joo Park and Sung Chul Kim

Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

(Received 11 April 2008, Revised 17 June 2008, Accepted 18 September 2008)

#### 요 약

유연탄, 무연탄, 그리고 두 탄종의 혼합 비율을 달리한 혼합탄에 대한 열중량 분석을 수행하여 연소반응성을 평가하였다. 무연탄과 유연탄의 혼합탄에 대한 무게 감소율이나 반응속도의 모양을 살펴볼 때 반응시 두 탄종간에 서로 영향을 미치지 않고 혼합 비율에 비례하여 두 탄종이 독립적으로 반응하는 것을 알 수 있었다. 그리고 A화력 발전소에서 유, 무연탄을 50% : 50%의 비율로 혼합하고 보일러 출력을 정격대비 약 65%인 134 MW부터 정격부하인 197 MW까지 증대시키면서 보일러 내의 연소상태, 운전특성을 분석하였다. A 화력발전소의 연소시험 결과 출력에 따른 보일러내의 연소상태는 전체적으로 양호한 것으로 나타났으며 출력이 증가함에 따라 공기에열기 출구의 배기가스 온도가 설계치인 430℃를 훨씬 상회하여 연소용 공기의 흡인방법을 변경하여 출구 가스 온도를 조절할 수 있었다.

주요어 : 유연탄, 무연탄, 연소반응성, 반응속도

**Abstract** — The combustion behaviors of the blends of Korean anthracite, bituminous coal and their blends were studied with a thermogravimetric analyzer. Concerning the burning profiles of the anthracite-bituminous coal blends in TGA, it has been observed the independent burning of two coals without any interaction between two coals. With the blends of 50% anthracite with 50% bituminous coal in weight basis, the combustion tests in a utility boiler have been carried out for the analysis of the combustion and operational characteristics by increasing the power output from 134 MW to 197 MW. The stable combustion has been observed in a boiler. With the increase of power output, the exhaust gas temperature was exceeded the design value of 430℃, so the combustion air was taken from atmosphere instead of the boiler penthouse.

**Key words** : Bituminous coal, Anthracite, Combustion reactivity, Reaction rate

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed  
Korea Electric Power Research Institute, 65 Munji-Ro  
Yuseong, Daejeon 305-380, Korea  
Tel : 82 42 865 5342  
E-mail : hypark@kepri.re.kr

#### 1. 서 론

석탄은 가채 매장량이 풍부하고 전 세계적으로 골고루 분포하는 풍부한 에너지 자원으로 2002년말의 확인된 가채 매장량과 사용량을 기준으로 가용 연한이 약 200년

으로 추정되고 있다<sup>1)</sup>. 다른 화석 연료 에너지 자원과 비교하여 가격변동이 상대적으로 크지 않으며 발전용 연료로서 그 수요가 계속 증가될 것으로 전망되고 있다. 국내의 부존 자원인 국내 무연탄은 그간 산업용 및 가정상업용 부문의 소비 증가에 힘입어 높은 증가세를 보였으나 80년대 이후 그 수요가 급격히 줄어들고 있으며 유연탄 수요는 발전용 및 산업용으로 꾸준한 수요 증가세를 보이고 있다.

적은 발열량과 다량의 회분을 함유한 국내 저품위 무연탄(3,500 kcal/kg)을 주 연료로 사용하는 국내 A화력발전소는 벙커-C유를 보조연료로 사용하는 연소하도록 설계되어있다. 통상적으로 국내 무연탄을 60%~70%, 벙커-C유를 30~40%의 비율로 혼소하여 왔으나 근래 국내 부존 에너지 자원인 무연탄의 공급이 원활치 않아 벙커-C유를 좀 더 많이 사용하고 있었다. 이러한 중유의 사용량 증가는 발전원가의 상승을 가져왔으며 그 결과 발전소의 가동율이 감소하게 되었다. 최근 2~3년 사이에 A화력발전소는 설비 이용을 증대와 발전원가 저감, 그리고 에너지 자원의 다각적인 이용을 위하여 연소성이 양호한 유연탄을 일정 비율로 중유와 함께 사용하기 시작하여 어느 정도 효과를 거두고 있다. 이러한 유연탄과 무연탄의 혼합탄 연소에 따라 석탄의 회성분이 화로 벽면에 용융되어 융착한 클링커가 자주 발생하게 되고, 배기 가스의 온도 상승, 송풍기(Draft fan)의 용량 부족등 안정적 운전을 저해하는 현상이 발생하고 있다.

이와 같이 유연탄과 무연탄의 혼소시 보일러 내에서의 발생하는 여러 가지 현상은 두 연료의 성상과 연소 특성이 다르며 보일러에서의 체류 시간과 연소방식이 현저히 다르다는 점에서 기인하는 것으로 추정된다<sup>2)</sup>. 따라서 무연탄 전용 보일러에서 유연탄을 혼합하여 연소하는 경우 우선 유, 무연탄 단일 탄종에 대한 연소 반응성과 혼합시의 연소 반응성, 그리고 상호간의 영향을 평가하는 것이 필요하다. 이러한 기본적인 연소성 평가는 반응온도에 따른 열중량 분석(TGA : Thermogravimetric Analyzer)으로

부터 평가할 수 있다<sup>3-7)</sup>. 또한, 실제 보일러에서의 혼합탄 연소시 화로내의 연소상태, 보일러의 운전 상태, 그리고 보일러의 안정적 운전에 영향을 미치는 송풍기, 공기 예열기등 보조 기기에 대한 세밀한 검토가 필요하다<sup>8,9)</sup>. A화력발전소의 유무연탄 혼합연소는 보일러 화로내의 클링커 (Clinker) 생성, NOx 배출, 연소 배가스 온도 등에 큰 영향을 미치게 되며, 이로 인한 송풍기, 미분기, 공기 예열기등의 보조기기에 대한 운전성능을 면밀히 검토하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 먼저 유연탄, 무연탄에 대한 연료특성, 그리고 두 탄종의 혼합 비율에 따른 열중량 분석 결과, 그리고 A화력 발전소에서 수행한 유, 무연탄의 혼합탄에 대한 연소시험 결과를 살펴보고자 한다. 실제 연소시험에 사용한 무연탄과 유연탄에 대한 기본 연소반응성을 TGA (Thermogravimetric Analyzer)에서 평가하였다. A 석탄화력 발전소에서의 유무연탄을 50% : 50%의 비율로 혼합하고 보일러 출력을 정격대비 약 65%인 134 MW부터 정격이하인 197 MW까지 증대시키면서 보일러 내의 연소상태, 운전특성을 분석하였으며 각종 보일러 보조기기의 운전 상태도 검토하였다. 본 연구로부터 얻어진 기본 연소반응성 평가 결과, 그리고 출력 증가에 따른 실제 발전소에서의 연소 시험 결과는 성상과 등급이 완전히 다른 두 탄종의 보일러 혼합 연소시 발생하는 문제점을 파악하고 그 해결 방안을 마련하기 위한 기본 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

### 2-1. 연료 분석

A화력발전소에서 수행한 유, 무연탄의 혼합탄 연소시험시 사용한 것과 동일한 무연탄과 유연탄을 입수하여 연료 특성 분석과 열중량(TGA : Thermogravimetric Analyzer) 실험에 사용하였다. 유연탄은 호주에서 수입한 역청탄이며 무연탄은 A화력발전소에 주로 사용중인 국내 무연탄이

Table 1. Properties of bituminous coal and anthracite.

coal	HHV (kcal/kg)	Proximate Analysis (dry, wt. %)					Ultimate Analysis (dry, wt. %)				
		Moisture	VM*	FC**	Ash	C	H	N	S	O	
Anthracite	5234	5.18	8.31	57.53	28.98	67.83	1.07	0.268	0.501	4.751	
Bituminous	6478	4.11	18.53	58.21	19.15	68.27	4.87	1.72	0.44	6.855	
		SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	others
Anthracite	48.29	37.09	4.76	1.59	0.9	0.4	3.87	1.71	0.5	0.89	
Bituminous	49.91	28.36	5.37	5.96	1.29	1.43	2.27	1.05	2.86	1.5	

\* VM : Volatile Matter, \*\* FC : Fixed Carbon.

다. 두 탄종을 볼밀(Ball mill)에서 분쇄한 후 체(seive)를 이용하여 직경 63~75  $\mu\text{m}$  범위의 입자크기로 분류하여 TGA 연소반응성 실험에 사용하였다. 무연탄과 유연탄에 대한 공업, 원소분석 그리고 회성분 분석 및 발열량 등을 Table 1에 나타내었다. 사용한 미분탄에 대한 SEM (Scanning Electron Microscopy) 분석은 JEOL JSM 6360을 사용하였고 석탄종의 무기물질 성분 분석은 미국 Microbeam 사의 도움을 받아 수행하였다.

**2-2. 열중량분석기(TGA : Thermogravimetric Analyzer)**

유연탄과 무연탄, 그리고 이들의 혼합탄에 대한 연소성 평가를 위하여 TA Instrument 사의 SDT 2910 TGA를 이용하였다. 무연탄과 유연탄을 63~75  $\mu\text{m}$ 의 크기로 분류한 시료(약 10 mg)를 사용하였으며 공기 분위기하 (100 ml/min)에서 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 의 승온율로 750 $^{\circ}\text{C}$ 까지 승온하면서 무게 변화율과 반응속도를 관찰하였다. 유연탄, 무연탄의 단일 탄종에 대한 TGA 실험을 먼저 수행한 후 무연탄중 유연탄의 비율을 20, 40, 60, 80%로 증가 시키면서 연소성 평가 실험을 수행하였다.

**2-3. A화력발전소 보일러**

A화력발전소의 보일러는 수직 연소식으로서 화로 상부의 아치(arch) 부에 버너를 설치하여 연료를 하향으로 분사시켜서 연소하는 방식이다. 화염은 “W”자 모양으로 길게 유지되면서 연소가 이루어진다. Fig. 1는 보일러 화로에 대한 3차원 개략도를 보여주며 Fig. 2는 화로 내부의 화염의 개략도, 버너 및 전열관군의 위치를 간략하게 보여준다.

보일러의 화로 형상은 가로길이 13.4 m, 폭 14.6 m 그리고 높이 35 m의 크기를 갖는다. 화로의 하단부분은 회(ash)와 크링커(clinker)가 배출되는 출구가 있으며, 슬로프 튜브(slope tube)가 지면과 50 $^{\circ}$ 의 각도로 기울어져 있다. 화로의 중간부분에는 보조연료로 사용되는 부하 조정용 중유 오일버너(LOB, Load carrying Oil Burner)가 전면과 후면에 각각 10개씩 있으며, 부하 조정용 오일버너의 상부에는 화로(Furnace) 내부로 연소용 공기를 공급하고 화염의 형상을 “W”형으로 모아주는 2차 공기구멍(secondary air port)이 3단으로 총 352개가 있다. 아치(arch)부의 천정벽(roof wall)은 지면과 15 $^{\circ}$ 의 각도를 이루면서 기울어져 있으며, 주연료인 미분탄과 미분탄 운송용 공기인 1차 공기(primary air)가 혼합되어 분사되는 미분탄 버너와 석탄연소용 공기인 3차 공기가 나오는 공기구멍(tertiary air port)이 미분탄 버너를 감싸고 있으며, 이는 연소로의 전면과 후면에 각각 16쌍이 있다. 미분탄 버너는 버너 배치상으로 수직형 버너이며, 저휘발성의 국내 무연탄 연

소를 위하여 화로 상부에 수직방향으로 설치되어 있다. 또한, 보조연료를 사용하는 화염 안정용 오일버너(SOB, Stabilizing Oil Burner)가 2개의 미분탄 분사버너의 중간 사이에 위치하고 오일버너를 감싸고 선회류가 유입되며, 화로의 전면과 후면에 각각 8개씩이 설치되어 있다. 보일러의 화로 상부는 과열기, 재열기 및 절탄기등 각종 전열관군이 설치되는 보일러 대류 전열부와 연결된다.

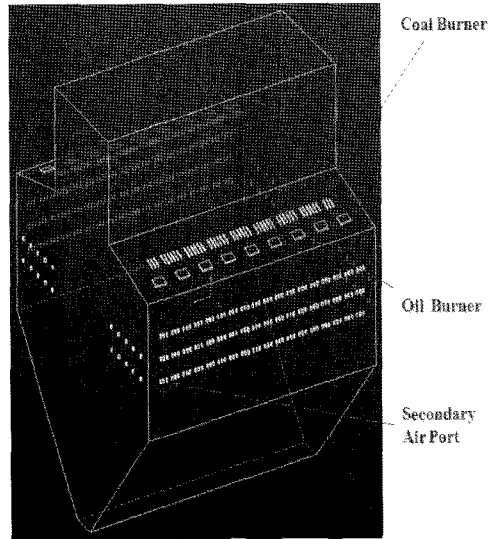


Fig. 1. Overview of the furnace.

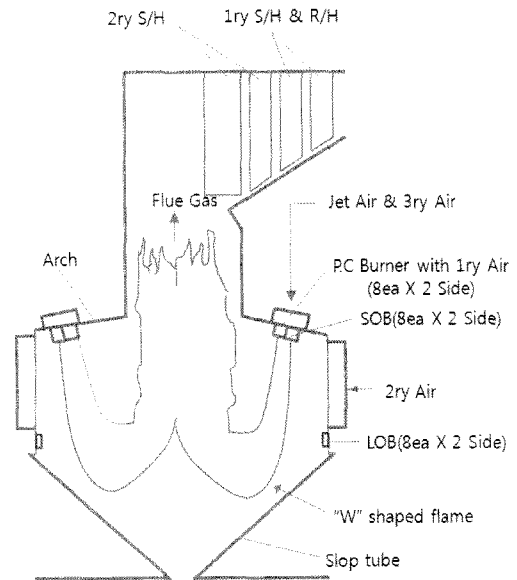


Fig. 2. Schematic diagram of the furnace.

2-4. 보일러 연소시험 조건

A 화력발전소에서의 연소시험은 증유를 사용하지 않고 유연탄과 무연탄의 혼소비율을 50% : 50%로 고정하고 발전소 출력을 134, 151, 182, 196 MW로 증가시키면서 연소시험을 수행하였다. 유연탄과 무연탄의 혼합 비율은 미분기로 향하는 Conveyor Belt에서의 상탄량으로 조정하였다. 유, 무연탄 혼소시험은 2007년 2월중 2일에 걸쳐 수행되었으며 각 출력에서 약 3시간씩을 유지하면서 필요한 데이터를 취득하였다. 연소시험시의 출력, 연료와 연소용 공기의 공급량등 주요 운전 변수를 Table 2에 나타내었으며, 시험 당시 대기온도는 약 5°C에서 10°C 사이로 유지되었다.

3. 결과 및 고찰

3-1 시료의 물리적 특성 분석

Fig. 3 (a)와 (b)는 무연탄과 유연탄에 대한 Morphology 분석사진과 성분 분석을 위치를 보여준다. 각 그림의 분석 지점에 대한 분석 결과는 Table 3과 4에 주어졌다. 일반적으로 무기물질은 석탄과는 따로 떨어져 있거나(excluded

mineral) 석탄의 유기 물질과 함께 결합되어 있는(included mineral) 형태로 존재하며 Fig. 5에서는 흰색으로 나타난다<sup>[10]</sup>. Fig. 3(a)의 1, 2, 5 지점과 Fig. 3(b)의 1, 2, 5 지점의 무기물질은 석탄내에 독립적으로 존재하는 무기물질을 나타내며 Fig. 3 (a)와 (b)의 3, 4 지점의 무기물질은 석탄과 유기적으로 결합되어 있는 무기물질을 나타낸다. 반면 두 그림의 6 지점에 있는 무기물질은 석탄과는 따로 떨어져 있는(excluded mineral) 형태를 나타낸다. Table 3과 4에서 보는 바와 같이 무기성분은 주로 Al, Si로 이루어져 있으며 철 (Fe) 성분이나 Ca, K 성분도 석탄내에 존재함을 알 수 있다. Table 1의 회성분 분석치에서와 같이 무연탄과 유연탄의 무기물질 성분은 큰 차이를 보이지는 않았다. 석탄내의 이러한 무기물질은 clay ( $Al_4Si_4O_{10}\{OH\}$ ), Quartz ( $SiO_2$ ), Pyrites ( $SiO_2$ ), Carbonates ( $CaCO_3$ ),  $BaSO_4$ ,  $TiO_2$ 와 같은 형태로 존재하게 되며 석탄의 연소 과정을 거쳐 대부분  $Char$ 에 남게 된다. 이러한 무기물질들은 연소과정중에 복잡한 물리, 화학적 과정을 거쳐 Table 1에서와 같은  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ 등의 회 성분으로 변환된다<sup>[11]</sup>.

Table 2. Experimental conditions for the boiler.

Item	Unit	Test I	Test II	Test III	Test IV
Power output	MW	134.17	151.15	182.15	196.67
Feed water flow	T/H	407.08	458.63	550.91	566.79
Total air flow*	%	49.90	58.87	72.88	73.12
Total Fuel Flow	T/H	21.94	26.38	32.61	32.98
A/H inlet air temperature (A)	°C	39.09	38.23	25.29	26.52
A/H inlet air temperature (B)	°C	37.45	36.98	16.07	18.02
ECO. outlet gas O2 concentration	%	1.87	1.88	2.59	1.71

\* Total air flow : 보일러 제어 로직(logic)상 %로 표시되어짐.

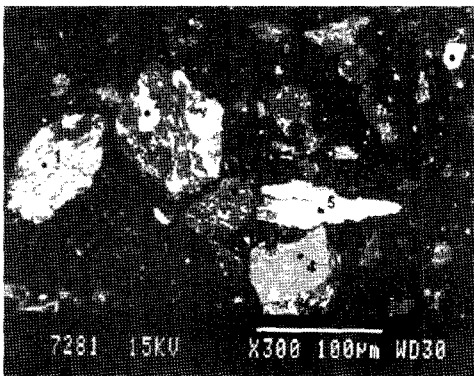


Fig. 3(a) Morphology of anthracite.

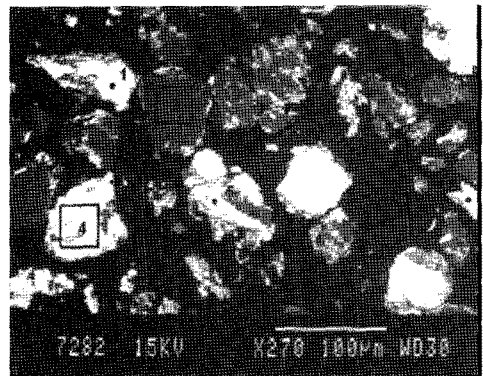


Fig. 3(b) Morphology of bituminous coal.

**Table 3.** Results of morphology analysis for anthracite.

point	Description	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Ba	O
1	mineral in coal	0.00	0.00	17.95	28.02	0.00	0.00	5.65	0.81	0.00	0.00	1.12	46.65
2	mineral in coal-iron	0.00	6.46	0.00	0.88	0.00	0.00	0.46	3.38	0.00	71.56	0.00	17.26
3	coal matrix	0.00	0.00	19.03	46.46	29.65	0.00	0.00	4.87	0.00	0.00	0.00	0.00
4	coal matrix	0.00	3.67	6.18	4.25	0.00	1.54	2.70	75.68	0.00	5.98	0.00	0.00
5	mineral in coal	0.00	0.00	18.35	43.21	0.00	0.00	7.19	0.68	1.13	2.63	2.68	24.13
6	excluded mineral-iron	0.00	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	99.63	0.00	0.00

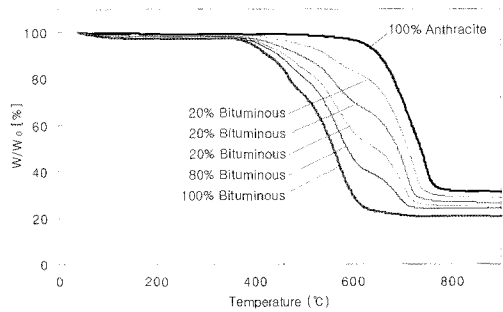
**Table 4.** Results of morphology analysis for bituminous coal.

point	Description	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe	Ba	O
1	mineral in coal	0.00	0.00	19.15	24.23	0.00	0.45	8.40	0.54	0.00	0.00	0.00	47.25
2	mineral in coal-iron	0.00	0.00	20.00	61.82	0.00	0.00	0.00	18.18	0.00	0.00	0.00	0.00
3	coal matrix	0.00	0.00	13.06	28.33	0.00	0.00	0.66	0.00	0.00	0.49	0.00	57.46
4	coal matrix	0.00	0.00	18.08	24.20	0.00	0.00	3.68	0.40	2.43	1.87	0.00	49.34
5	mineral in coal	0.00	0.00	16.98	20.34	0.00	0.42	5.84	0.00	0.00	0.00	0.00	56.42
6	excluded mineral-iron	0.71	0.00	19.14	25.15	0.00	0.00	7.99	0.00	0.00	0.00	0.00	47.00

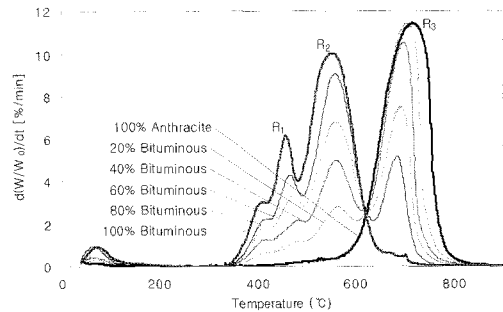
**3-2. TGA Burning Profile**

Fig. 4와 5는 무연탄, 유연탄 그리고 혼합탄의 공기분 위기하에서의 무게 감소율과 그 속도를 나타낸다. 유연탄의 경우 반응온도가 증가됨에 따라 수분의 증발, 열분해과정과 탄소로 이루어진 화의 반응이 진행되어 무게가 빠르게 감소되는 것을 볼 수 있다. 초기 약 110℃까지는 수분의 증발에 의한 무게 감소(약 3.48%)를 보여주며 이후 약 389℃에서 다시 무게 감소가 시작된다. 열분해와 화의 연소반응으로 인한 무게 감소가 약 640℃ 까지 계속적으로 일어나며, 최종적으로 약 19.0%의 회가 남게 된다. 한편, 무연탄의 경우 무게 감소가 약 420℃에서 나타나기 시작하여 약 620-780℃ 사이에서 대부분의 반응이 일어난다. 무연탄의 무게 감소는 주로 석탄의 고정 탄소성분의 연소에 의한 것으로 공업분석에서와 같이 휘발분의 반응에 따른 무게 감소는 상대적으로 적은 것을 볼 수 있다.

연소반응 시작온도( $T_0$ )와 종료온도( $T_f$ )는 무게 변화 속도, 즉 반응속도인  $d(W/W_0)/dt$  [%/min]이 최초 0.3 [%/min]을 초과할 때와 반응이 진행된 후 다시 0.3%로 떨어질 때의 온도로 정의하면, 유연탄의 각각의 온도는 353℃, 706℃이며, 무연탄은 각각 523℃와 805℃ 임을 보여준다. 이는 유연탄은 열분해에 의하여 약 350℃ 전후에서 반응이 시작되나 무연탄은 휘발성분이 상대적으로 작고 주로 고정탄소의 반응이 주를 이루기 때문이다. 무연탄에 유연탄의 함량을 20, 40, 60, 80%로 증가시키면 Fig. 4에서



**Fig. 4.** TG curves of anthracite, bituminous coal and the blends.



**Fig. 5.** DTG curves of anthracite, bituminous coal and the blends.

와 같이 유연탄의 함량이 비례하는 무게 감소를 보여준다. 혼합탄의 영향을 좀 더 자세히 살펴보기 위해서는 무게 감소 속도, 즉 반응속도,  $d(W/W_0)/dt$  [%/min]를 살펴보는 것이 편리하다.

Fig. 5는 무연탄과 유연탄 그리고 혼합탄의 반응속도,  $d(W/W_0)/dt$  [%/min]을 보여준다. 유연탄의 경우 온도가 증가함에 따라 459°C, 550°C에서 두개의 최대 반응속도,  $R_1$ ,  $R_2$ 를 보여준다. 이는 역청탄 계열의 석탄에서 자주 보이는 경향으로  $R_1$ 은 휘발화,  $R_2$ 는 고정탄소의 반응에 의한 것으로 보인다. 한편, 무연탄의 경우 최대 반응 속도는 718°C에서 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이렇게 반응속도가 매우 다른 두 탄종을 혼합하였을때의 반응속도는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유연탄의 함량 비율에 비례하는 반응속도 그래프를 보여준다. 620°C를 경계로 그 이하의 낮은 온도 영역에서 유연탄의 함량에 비례하는 반응속도 모양이 나타나고 있으며 그 이상의 온도 영역에서는 무연탄의 반응속도 모양을 보이고 있다.

Fig. 4와 5로부터 무연탄과 유연탄의 혼합시 무게 감소율이나 반응속도의 모양을 살펴볼때 반응시 두 탄종간에 서로 영향을 미치지 않고 혼합 비율에 비례하여 독립적으로 반응하는 것처럼 보인다. 이는 Cumming (1989)<sup>[3]</sup>의 연구에서 나타난 것과 같은 경향을 보여주고 있다.

### 3-3. 보일러에서의 연소 및 운전특성

유연탄과 무연탄의 혼합 비율을 50% : 50%로 고정하고 출력을 134, 151, 183, 196MW로 변경하면서 2일에 걸쳐 3시간씩 연소시험을 수행하였다. 연소시험시 플랜트 효율, 주증기 및 재열증기의 유량, 온도 및 압력, 미분탄/공기 공급량, 로내 온도, 연소용 공기/연소가스 온도 및 주요 가스농도등 보일러 운전 및 연소상태량에 대한 측정이 수행되어졌다. 시험기간중 측정된 보일러 상태량을 Table 5에 나타내었으며 그중에서 주증기 유량, 공기 예열기의 입구 가스온도 및 출구 공기온도, 주증기 spray water, 재열증기 압력을 Fig. 6에 출력에 따라 나타내었다.

보조 연료인 중유를 사용하지 않은 상태에서도 출력에 따른 보일러내의 연소상태는 보일러내의 화염상태를 로내 화염 감시 카메라와 관찰창에서 살펴 본 육안 점검결과 화로 후단부의 버너에서 화염이 짧고 휘날리는 현상이 가끔 발생하였으나 중유와의 혼소시와 비교하여 전체적인 화염 안정성과 연소상태는 양호한 것으로 관찰되었다. 연소상태를 나타내는 CO 발생량은 비교적 높게 유지되면서 간혹 1,000 ppm이상의 심한 변동을 나타내고 있었다.

출력증가에 따라 연료인 석탄 사용량과 연소 공기량이 증가되었으며 이에 따라 고압터빈으로 공급되는 주증기량이 Table 5에서와 같이 392 Ton/hr에서 584 Ton/hr로

Table 5. Major plant data at various power output

Item	Unit	Test I	Test II	Test III	Test IV
Power output	MW	134.17	151.15	182.15	196.67
Main steam flow	T/H	392.84	448.87	541.97	584.27
Main steam pressure	kg/cm <sup>2</sup>	158.15	168.63	168.69	169.01
Main steam temperature	°C	541.79	539.86	538.35	541.50
Reheater steam pressure	kg/cm <sup>2</sup>	18.77	21.62	26.27	28.52
Reheater steam temperature	°C	540.63	540.99	538.88	541.40
Furnace gas temperature	°C	802.56	871.93	854.13	907.30
S/H spray water flow	T/H	10.01	26.08	32.73	62.26
A/H inlet air temperature(A)	°C	39.09	38.23	25.29	26.52
A/H inlet air temperature(B)	°C	37.45	36.98	16.07	18.02
A/H outlet air temperature(A)	°C	370.89	385.21	382.45	399.78
A/H outlet air temperature(B)	°C	369.84	386.04	380.22	400.55
A/H inlet gas temperature(A)	°C	399.86	418.90	422.23	437.42
A/H inlet gas temperature(B)	°C	402.99	423.49	426.57	445.56
A/H outlet gas temperature(A)	°C	183.09	184.28	171.57	185.32
A/H outlet gas temperature(B)	°C	173.12	174.79	151.76	167.29
ECO. outlet O <sub>2</sub> concentration	%	1.87	1.88	2.59	1.71

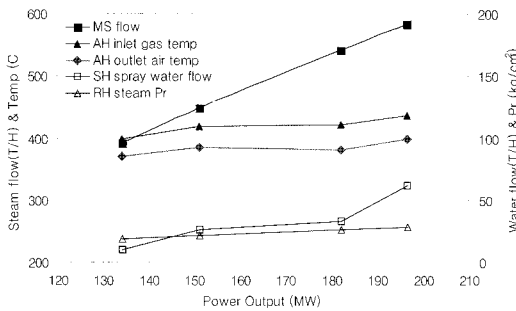


Fig. 6. Variation of major operation data depending on the power output.

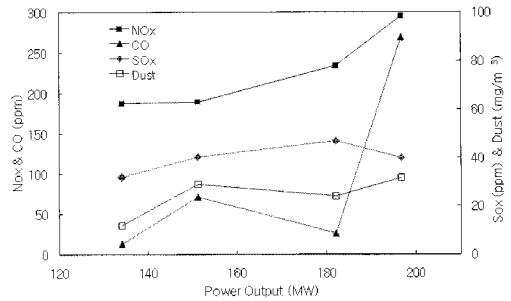


Fig. 7. Variation of emission data depending on the power output.

증가되는 것을 볼 수 있다. 화로 출구에서 측정된 가스 온도도 802°C에서 907°C까지 증가한 것을 볼 수 있다. 출력이 증가함에 따라 S/H Spray Water가 증가되는 것을 Table 5에서 볼 수 있는데 이는 연소가스량과 화로 출구의 가스온도가 상승하게 되며 이는 화로 출구에 설치되어 있는 후부전열면, 특히 과열기(Superheater)에서의 열흡수량이 크게 증가하기 때문이다.

본 시험의 대상 보일러는 연소용 공기를 보일러 외부에서 흡입하도록 설계되었으나 연소 효율증대를 위하여 보일러 상부의 Penthouse에서 흡입하도록 변경 운영하고 있다. Table 5에서 출력 134, 151 MW에서 A/H 입구의 공기온도는 36~39°C로서 이는 A/H 입구측 공기 온도가 설계 대비 약 20~30°C 높게 유지되고 있는 것이다. 이때 A/H 출구의 가스 온도는 173~183°C로 설계치 이내로 운전된다. 그러나 출력이 증가함에 따라 A/H 출구의 배기가스 온도가 설계치인 430°C를 훨씬 상회하게 된다. 따라서 182, 196 MW에서의 연소용 공기를 16~25°C의 대기에서 흡입하여 A/H 배기 가스온도를 430°C 내외로 맞추었다. 이는 출력 증대에 따라 공기 및 가스량이 증가되고 A/H 출구 측 가스 온도가 설계치 대비 약 40°C이상 높게 상승되어 효율 저하뿐만 아니라 온도 상승에 따른 비체적 상승으로 가스량이 증가되기 때문이다. 이로 인한 흡인 송풍기(ID fan)의 용량 부족등의 문제점이 발생되었으며 180, 197 MW에서는 송풍기의 용량 부족이 더욱 가중될 것이 예상되었기 때문에 유입 공기온도를 낮추어 시험을 실시하였다. 동절기에는 이와 같은 방법이 어느 정도 가능할 수 있으나 대기온도가 높은 하절기에는 큰 어려움이 예상되고 특히 장기간 유, 무연탄 혼소에 따른 전열면 오염 등으로 배기 가스온도가 상승할 경우 이러한 현상은 더욱 심화될 것으로 판단된다.

### 3-4. 보일러에서의 오염물질 배출 및 환경 특성

Fig. 7은 출력에 따른 보일러 출구에서 측정된 NOx,

SOx, CO 농도 및 먼지(Dust)의 농도를 나타내었다. 먼지(dust)의 농도와 SOx는 출력 증가에 따라 큰 변화를 보여주지 않았으나 NOx 배출량의 경우 고 출력에서 높은 수치를 보여주고 있다. 이는 연료 공급량의 증가와 화로내의 온도가 증가한 때문이며, 또한 무연탄에 질소함유량이 약간 높기 때문에 증가된 것으로 볼 수 있다. 134, 151, 182, 197 MW의 경우 보일러 출구에서의 산소 농도는 각각 1.87, 1.88, 2.59, 1.71% 이었다. 본 200 MW급 상용 보일러의 시험결과로부터 과잉공기량 감소에 따라 NOx 발생량이 감소하는 일반적인 경향을 살펴볼 수는 없었다. CO의 경우 182 MW까지는 100 ppm 이하의 값을 보여주었으나 197 MW에서는 약 300 ppm의 값을 보여주었다. CO 농도 측정값은 간헐적으로 1,000 ppm 이상의 높은 값을 보여주고 있었으며 로내 후단부의 화염이 휘날리는 현상을 가끔 관찰할 수 있었다.

## 4. 결 론

유연탄과 무연탄에 대한 열중량 분석 결과 유연탄의 주 반응영역은 약 400~600°C, 무연탄은 약 600~800°C로 나타났으며 무연탄과 유연탄의 혼합탄에 대한 무게감소율이나 반응속도의 모양을 살펴볼 때 반응시 두 탄종간에 서로 영향을 미치지 않고 혼합 비율에 비례하여 두 탄종이 독립적으로 반응하는 것으로 보인다.

무연탄 전용 발전보일러에서 유연탄과 무연탄의 혼합 비율을 50% : 50%로 고정하고 출력을 134, 151, 183, 196MW로 변경하면서 연소시험을 수행하였다. 연소시험시 보일러의 연소 및 운전상태량을 분석한 결과 출력에 따른 보일러내의 연소상태는 전체적으로 양호한 것으로 나타났으나 CO 농도의 경우 간헐적으로 1,000 ppm까지 큰 폭으로 변동함을 관찰할 수 있었다. 출력이 증가함에 따라 공기예열기(Air Heater) 출구의 배기가스 온도가 설계치인 430°C를 훨씬 상회하여 연소용 공기의 흡

인방향을 변경하여 출구 가스 온도를 조절할 수 있었다. 그러나 장기간 유, 무연탄 혼소시의 전열면의 오염, 혹은 하절기의 경우 배기가스 온도 상승에 따른 설비상의 대책이나 운전측면의 대비가 필요할 것이다. 본 연구는 200MW급 무연탄 보일러를 대상으로 유, 무연탄 혼소시 보일러의 연소, 운전상의 문제점, 그리고 환경특성을 분석한 자료로서 향후의 연소특성이 다른 두 종류의 석탄을 장기간 사용할 경우에 대비하여 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 참고문헌

1. World Energy Outlook 2004, International Energy Agency, 2004.
2. 한국전력공사, “연소관리실무”, 1998, 67-70.
3. Cumming, J.W. *Thermochimica Acta*, 1989, 155, 151-159.
4. Rubiera, F.; Arenillas, A.; Arias, B.; Pis, J.J. *Fuel Processing Technology*, 2002, 77, 111-118.
5. Pisupati, S.V.; Scaroni, A.W., *Proceedings ICCS'97*, 1997, 1151.
6. Artos, V.; Scaroni, A.W. *Fuel*, 1993, 72, 927-931.
7. Artos, V.; Scaroni, A.W., 9th Annual International Pittsburgh Coal Conference, 1992, 659.
8. Carpenter, A.M., *Coal blending for power stations*, IEA/81, IEA Coal research, London, 1995.
9. Su, S.; Pohl, J.H.; Holcomb, D.; Hart, J.A.; *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27, 75-99.
10. Smoot, L.D. *Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use*, Elsevier Science, 1993, 10-15.
11. Benson, S.A.; Steadman, E.N.; Zygaricke, C.J.; Erickson, T.A. *Ash formation, deposition, corrosion and erosion in conventional boilers*, Plenum Press, New York, 1996.