

## 석탄 화력발전소에서 발생하는 미연분의 특성분석 및 저감방법

박호영<sup>†</sup> · 김영주 · 유근실 · 김춘근\* · 김동훈\*

한전전력연구원 연소열공학그룹 · \*한국남동발전(주) 영흥화력

(2006년 6월 12일 접수, 2006년 10월 17일 채택)

### Characteristics of Carbonaceous Particles Derived from Coal-fired Power Plant and Their Reduction

Ho Young Park<sup>†</sup> · Young Ju Kim · Geun Sil Yu · Chun Kun Kim\* · Dong Hun Kim\*

Combustion & Thermal Engineering Group, Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

\*Nam Dong Power Generation Company, Yong Hung Power Station

**ABSTRACT** : The unburned carbon in fly ash, recently occurred in the coal-fired Yong Hung power station, caused some problems in ash utilization and boiler efficiency. This paper describes the analysis of unburned carbon and six coals, some tests performed at Yong Hung Boiler, and the results of combustion modification for the reduction of unburned carbon in fly ash. From the physical and chemical analysis of unburned carbon in fly ash, most particles were turned out to be hollow cenosphere and agglomerated soot particles. The sooting potential from six coals used in the plant were investigated with CPD(Chemical Percolation Devolatilization) model. The results showed that the higher potential was presented to Peabody, Arthur, Shenhua coals rather than other coals. It was necessary to measure the coal flow rates at each coal feeding pipe for four burner levels since they affect the extent of mixing of soot with oxidant, in turn, the oxidation rate of soot particles. The unbalance in coal flow rate was found in several coal pipes. We successfully reduced unburned carbon in ash by increasing the excess air and changing the SOFA's yaw angle.

**Key Words** : Cenosphere, Coal Combustion, Soot, SOFA, SEM

**요약** : 영흥 화력발전소 1호기 보일러에서 발생된 미연분은 석탄 회의 재활용 및 보일러 효율 측면에서 문제를 일으키고 있었다. 본 연구에서는 미연분 및 사용 석탄의 특성과 현장의 연소조건 분석을 수행하고 보일러 운전조건을 변경함으로써 보일러에서 발생하는 미연분을 저감하고자 하였다. 미연분의 물리, 화학적 분석 결과 대부분 중공(中空)형태의 Cenosphere와 뭉쳐진(Agglomerated) 형태의 Soot로 이루어져 있었다. 영흥 화력발전소에서 사용중인 6개 탄종에 대하여 Tar 및 Soot의 발생 가능량을 CPD(Chemical Percolation Devolatilization) 모델을 이용하여 조사한 결과, Sanseo, Ensham, Elk Valley 탄의 경우 그 발생 가능량이 비교적 적었으며 Peabody, Arthur, Shenhua 탄은 높았다. 영흥 화력발전소 1호기 보일러의 각 미분탄 공급관에서의 미분탄 공급량을 측정하였는데 코너 별로 공급되는 몇몇 버너에서 미분탄이 편중되어 공급되고 있음을 알 수 있었다. 이에 따라 soot가 주성분인 미연분의 산화율을 증가시키기 위하여 과잉공기량을 증가시키고 산화제와의 혼합정도를 높이기 위하여 SOFA(Separated Over Fire Air)의 yaw 각도를 적절히 조절함으로써 미연분의 발생량을 현저히 감소시킬 수 있었다.

**주제어** : Cenosphere, Coal Combustion, Soot, SOFA, SEM

### 1. 서론

석탄 화력발전소에서 생성되는 석탄 회(ash)는 과거에 회 저장조(ash pond)로 보내져 대부분 매립되고 있었으나, 최근 시멘트 제조시 적당량을 혼합함으로써 콘크리트의 강도를 높이는 효과가 있어 국내의 석탄 회 재활용이 증대되고 있는 추세이다.<sup>1,2)</sup> 실제로 석탄화력 발전소에서 발생하는 석탄 회의 경우 발전소 현장에서 약 10,000원/톤에 판매되고 있다.<sup>3)</sup> 시멘트 제조시 석탄재중의 탄소성분은 약 5 wt.% 이하로 제한

하고 있는데 이는 석탄 회 중에 다량의 미연분은 콘크리트 타설시 강도를 오히려 저하시키기 때문이다.<sup>4)</sup> 또한 석탄화력발전소에서 발생하는 석탄 회 중에는 Cenosphere라고 하는 속이 비어 있는 큰 구형의 입자도 포함되어 있다. Cenosphere는 콘크리트의 기포를 흡수하고 콘크리트 타설 후 표면에 부유되어 콘크리트의 품질을 저하시키며 미연분은 콘크리트의 화학적 혼화제를 흡수하여 콘크리트의 안정화를 저해하는 물질로 알려져 있다.

한국남동발전(주)의 영흥 화력발전소는 800 MW급 초임계압 미분탄화력 발전소로서 국내 최대용량의 석탄발전소이며 최신의 설비와 운전 시스템을 구비하여 안정적이고 효율적인 운영으로 국내 발전소의 모델로 떠오르고 있다. 한편,

<sup>†</sup> Corresponding author  
E-mail: hypark@kepri.re.kr  
Tel: 042-865-5483

Fax: 042-865-5489

국내에 수입되는 발전용 유연탄은 과거와 같은 장기 구매 방식이 아닌 단기 구매 방식으로 도입되고 있어 보일러의 설계단 규격에서 벗어난 탄종이 일부 수입되고 있으며 이들 수입탄 중 휘발분이 많거나 회용점 온도가 낮은 아역청탄 계열의 석탄은 화력발전소 보일러 운전에 이따금 장애를 일으키고 있다. 일반적으로 석탄의 탈휘발화 과정 중 발생하는 휘발분의 약 50%는 tar 성분으로 알려져 있으며 이 tar 성분은 2차 탈휘발화 과정을 거쳐 탄소가 주성분인 soot를 발생시키는 것으로 알려져 있다.<sup>5-8)</sup> 휘발분이 많은 아역청탄 계열은 tar의 발생, 즉 soot의 발생가능성이 많으며 이러한 탄을 영흥 화력발전소에서 연소하였을 때 회 중에 미연분이 포함된 것을 볼 수 있었다. 이렇게 미연분을 다량 포함한 회를 시멘트의 첨가물로 사용할 경우 콘크리트 타설시 표면에 검은 띠를 형성하고 다공성 물질인 cenosphere에 미세기포가 혼입하여 시공에 문제를 일으킨 예가 있었다.

본 연구에서는 영흥 화력발전소에서 발생한 미연분의 물리, 화학적 특성을 분석하고 사용된 석탄에 대한 soot 발생 가능량 분석, 그리고 현장에서의 운전조건, 미분탄 공급 분포 등에 대한 분석을 수행하였다. 또한 미연분 발생이 보고된 3개의 탄종에 대하여 과잉공기량, SOFA(Separated Over Fire Air)의 yaw 각도 조정 등 현장 연소시험을 통하여 미연분 발생을 최소화할 수 있는 운전조건을 얻고자 하였다.

## 2. 시료분석 및 시험방법

영흥 화력발전소에서 발생한 석탄 회(ash)를 채취하여 미연분의 함량을 구하였으며 석탄재를 물에 침강시켰을 때 부유된 물질을 따로 채취하여 ICP(Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer) 분석, SEM(Scanning Electron Microscope) 및 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 수행하였다. ICP 분석은 부유된 시료를 110°C에서 건조하여 일정량을 취한 다음 왕수(염산과 질산의 혼산)로 용해하여 시료로 만들고, 시료 중 화학성분은 검정 곡선법에 의하여 각 성분원소를 정량화하였다. 시료의 SEM 분석을 위하여 JEOL JSM 6360을 사용하였으며 EDS 분석은 Oxford Instrument사의 INCA S-sight를 이용하였다.

분석에 사용된 시료는 호주의 Athur 탄종을 사용한 경우에 채집된 부유물이다. 또한 Shenhua 탄과 Peabody 탄의 혼소 중에도 미연분이 발생하고 있음을 알 수 있으며 Esham, Sanseo, Elk Valley 탄을 사용한 경우 미연분이 통상의 범위를 벗어나지 않는 적은 양이었다. 이들 6개 탄종의 공업분석, 원소분석 및 회재분석 등을 수행한 결과를 Table 1에 나타내었다. 이들 분석결과로부터 CPD(Chemical Percolation Devolatilization) model<sup>9)</sup>을 이용하여 탄종별 tar와 soot 발생 가능량을 분석하였다. CPD 모델<sup>9)</sup>은 석탄의 열분해 시 휘발분의 양을 석탄의 화학적 구조, 즉 NMR data를 이용하여 고속가열을 하에서 열분해 가스의 조성을 구할 수 있는 범용 모델이다.

보일러 내 미분탄 연소시 미연분의 발생은 통상 각 층별 연소상태의 균일성, 산화제와의 혼합상태에 큰 영향을 받고 있다. 따라서 본 연구에서는 보일러 4개 층(A, B, C, D)의 각 버너별 연소공기량/미분탄의 양을 독일 Scallert 사의 SMG 10을 사용하여 측정하였다. 측정 원리는 pitot tube 형태의 유동 프로브를 미분탄 이송관에 삽입하고 유동단면을 대칭적으로 48개 분할면으로 나누고 각 분할면마다 순차적으로 기-고 혼합물을 샘플링한 후 각 단면에서의 측정값을 가중평균하여 전체의 미분탄량, 공기량, 유속 등을 측정하는 방법이다. 이 방법은 이송관의 직각방향으로 가로질러 총 16개 포인트를 측정하는 ASTM D-197 방법보다 더 정확한 방법으로 알려져 있다.<sup>10)</sup>

SOFA는 보일러 화로의 버너 위쪽에 설치된 공기 port로서 화로 하부에서는 연소조건이 약간의 fuel-rich 상태로서 NOx 발생이 적게 되고 그때 발생한 미연분 및 CO는 보일러 상부의 SOFA에서 공급 되는 공기와 반응하여 연소시키는 시스템이다. 본 연구에서는 통상의 운전 조건은 그대로 유지하면서 산화제와 미연분의 혼합을 증대시키기 위하여 SOFA의 yaw 각도를 변경하고 보일러로 공급되는 과잉공기량을 증가시켜 미연분 발생을 저감하고자 하였다. 이는 보일러의 운전 상태, 플랜트 출력 등을 고려하여 기존의 운전조건을 가능한 한 변경시키지 않고 최소의 운전조건을 변경하여 문제를 해결하고자 한 것이다. 연소 조정 전, 후에 석탄 회(ash)를 각각 채집, 분석하여 미연분의 저감 여부를 확인하였다. 본 연구에서 수행한 분석 및 실험내용을 정리하면 다음과 같다; 1) 석탄의 원소/공업분석 및 석탄 회 성분분석, 2) 시료의 ICP 분석, 3) 시료의 SEM 및 EDS 분석, 4) CPD 모델을 이용한 tar/soot 발생 가능량 조사, 5) 보일러 버너별 미분탄 공급유량 측정, 6) 현장 연소시험.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 석탄의 성분분석

본 연구와 관련하여 영흥 화력발전소에서 사용한 6개 탄종의 원소 및 공업분석, 그리고 회재분석 결과를 Table 1에 나타내었다. Arthur, Peabody, Shenhua 탄은 휘발분이 비교적 많으나, Sanseo, Ensham, Elk Valley 탄은 휘발분 함량이 비교적 적은 것을 알 수 있다. 본 분석 결과는 Tar & Soot 발생가능량 분석시 입력 데이터로 사용되어졌다.

### 3.2. 시료의 ICP 분석

영흥 화력발전소에서 채취한 시료를 물에 침강시켰을 때 물위에 뜨는 부유물의 ICP 분석 결과를 Table 2에 나타내었다. 본 시료는 호주 Arthur 탄 연소시 발생한 회(fly ash)를 채집한 것으로 알루미늄실리케이트(Alumino-silicate)의 양이 81.84% 검출되었다. 이는 통상적인 구형회재 또는 일반 석탄재의 양보다 많은 양이지만 전형적인 Cenosphere의 양과 유사한 수치이다. 이처럼 알루미늄실리케이트의 비율이 높은 것

**Table 1.** Properties of six coals used in Yong Hung power plant

Item	coal	unit	Peabody	Shenhua	Arthur	Ensham	Sanseo	Elk Valley
Heating value(dry)		kcal/kg	6,771	7178	6,823	6,649	7,157	7,187
Proximate Analysis (dry)	moisture	Wt.%	6.58	3.63	3.85	4.96	5.51	1.26
	ash		12.29	7.71	15.82	16.34	9	13.49
	volatile matter		42.55	33.47	33.88	25.74	27.61	23.39
	Fixed carbon		38.58	55.19	46.45	52.96	57.88	61.86
Ultimate Analysis (dry)	C	wt.%	69.58	77.09	70.81	70.59	76.05	78.72
	H		5.55	4.74	5.03	4.35	4.31	4.31
	O		10.31	9.03	5.22	5.58	8.56	1.8
	N		0.93	1.04	1.76	1.60	0.97	1.15
	S		0.47	0.1	0.73	0.69	0.59	0.36
	ash		13.16	8	16.45	17.19	9.52	13.66
Hard Groove Index		HGI	41.73	63.28	51.41	65.07	54.67	106.97
Ash fusion temperature	IDT	°C	1,285	1,121	1,379	1,232	1,361	1,416
	ST		1,535	1,178	1,556	1,271	1,380	1,461
	HT		1,572	1,181	1,595	1,288	1,400	1,481
	FT		1,609	1,185	1,595	1,301	1,404	1,503
Ash Analysis	SiO <sub>2</sub>	wt.%	62.18	34.69	64.72	61.09	62.58	60.15
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		27.73	15.69	24.99	22.55	20.26	24.76
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		2.04	9.28	3.54	6.7	9.03	2.89
	CaO		2.13	27.42	1.41	3.01	2.59	3.84
	MgO		1.36	1.12	0.78	1.00	0.5	0.76
	Na <sub>2</sub> O		1.26	1.07	0.31	0.53	0.57	0.49
	K <sub>2</sub> O		0.36	0.93	1.04	1.24	1.09	0.71
	TiO <sub>2</sub>		1.61	0.63	1.40	1.18	0.79	1.69
	SO <sub>3</sub>		0.73	8.05	0.43	1.35	1.27	2.93
	other		0.60	1.12	1.38	1.35	1.32	1.78

**Table 2.** Results of ICP analysis of a collected sample

No.	item	wt. %	No.	item	wt. %
1	Si as SiO <sub>2</sub>	59.11	9	Ni as NiO	nd
2	Al as Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.73	10	Zn as ZnO	nd
3	Na as Na <sub>2</sub> O	0.86	11	P as P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20
4	Ca as CaO	3.95	12	V as V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	nd
5	K as K <sub>2</sub> O	1.88	13	Ti as TiO <sub>2</sub>	1.64
6	Mg as MgO	0.36	14	Pb as PbO <sub>2</sub>	nd
7	Mn as MnO	nd	15	S as SO <sub>3</sub>	0.40
8	Fe as Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	2.14	16	carbon	6.73

nd : not detected

은 석탄중의 Si와 Al 성분이 용융과 가스 작용에 의해 Cenosphere로 형성되기 때문인 것으로 알려져 있다.<sup>11)</sup> 탄소의 함량이 6.73%인 것으로 보아 상당량의 미연탄소가 포함된 것을 알 수 있으며 이것이 시멘트의 콘크리트 타설시 검은 띠의 주원인으로 보여진다. 좀 더 자세한 분석을 위하여 시료의 SEM 분석 결과를 살펴보는 것이 필요하였다.

**3.3. 시료의 SEM/EDS 검사**

Fig. 1은 시료를 30배한 SEM 사진으로 시료 전체의 분포를 명확히 알 수 있었다. 대부분은 증공 다공질의 Cenosphere (연두색 테두리)이며, 군데군데 뭉친 형태의 미연분을 확인할 수 있으며 이는 앞서 분석했던 시료의 ICP 분석 결과와도 일치하는 것이었다. Fig. 2와 3은 Fig. 1의 가운데 원으로 표시한 부분을 각각 500배, 950배 확대한 사진이다. 이 그림들에서 좀더 명확히 Cenosphere의 전형적인 형태를 확인할 수 있었으며 Fig. 4와 5는 Fig. 1의 좌측하단의 원으로 표시한 부분을 10,000배 확대한 그림으로 검은색을 띤 Submicron 입자들이 서로 엉겨 붙은 상태임을 볼 수 있었다. 그 크기와 형태상 carbon char이기 보다는 soot인 것으로 보이며, Fig. 4와 5는 Fletcher<sup>12)</sup>의 연구에서 관찰된 soot의 모습과 유사함을 알 수 있었다. 한편 Veranth<sup>13)</sup>에 의하면 carbon char의 경우 침강 시험시 하부에, soot 성분은 위쪽 즉, 부유되는 물질로 보고하고 있어 본 연구의 미연분은 soot인 것으로 보여졌다. Fig. 5의 가운데 사각형 표시한 부분에 대한 EDS 분석 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 이 성분의 대부분이 탄소임을 알 수 있었다.

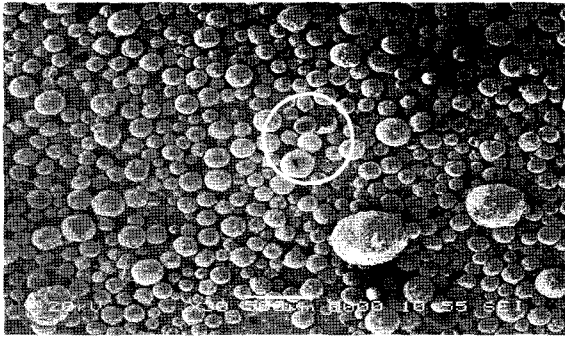


Fig. 1. SEM Photograph of a collected sample.

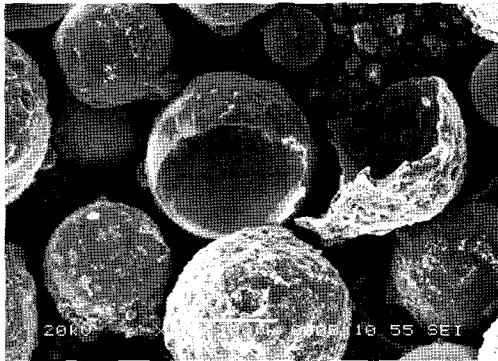


Fig. 2. Magnification of the sample shown in green circle of Fig. 1( $\times 500$ ).

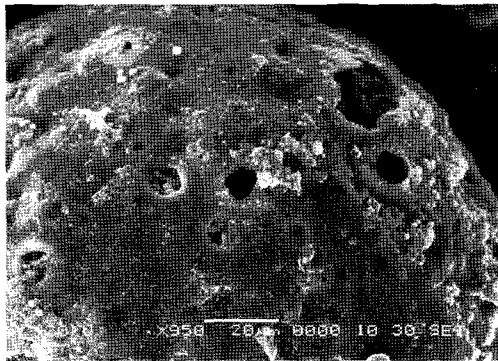


Fig. 3. Magnification of the sample shown in green circle of Fig. 1( $\times 950$ ).

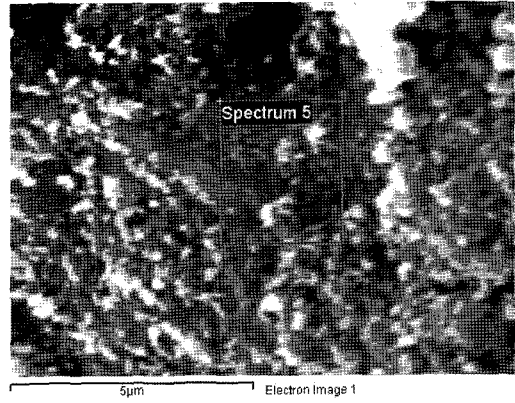


Fig. 4. Magnification of the sample shown in red circle of Fig. 1( $\times 10,000$ ).

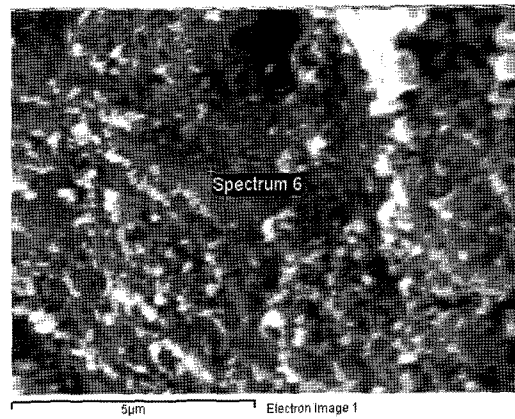


Fig. 5. Magnification of the sample shown in red circle of Fig. 1( $\times 10,000$ ).

### 3.4. 탄종 별 Tar와 Soot의 발생 가능량 조사

이상에서 살펴 본 바와 같이 영흥 화력발전소에서 발생된 미연분은 carbon char라기 보다는 soot인 것으로 판단되어지며 사용된 탄종에 대하여 soot 발생가능성을 살펴보는 것이 필요하였다. 먼저 석탄화염 내 soot의 발생과정, 산화과정에 대하여 간략히 살펴보고 6개 탄종에 대한 soot 발생가능량을 분석하였다.

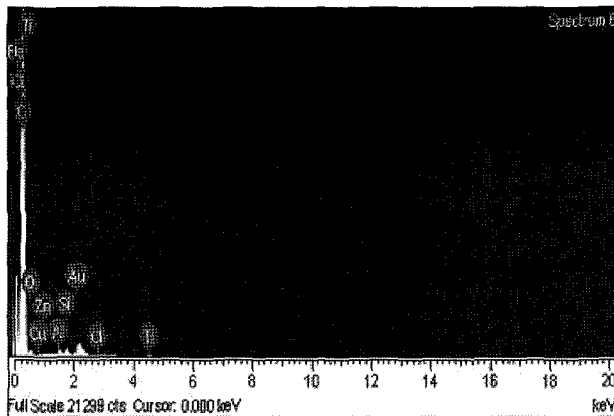


Fig. 6. EDS analysis of the sample shown in purple rectangular in Fig. 5.

Element	Weight%	Atomic%
C	92.60	97.46
O	2.12	1.68
Al	0.37	0.17
Si	0.41	0.19
Cl	0.14	0.05
Ti	0.20	0.05
Cu	0.57	0.11
Zn	0.43	0.08
Au	3.15	0.20
Total		100

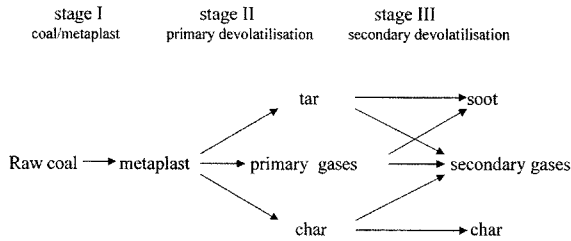


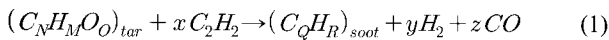
Fig. 7. Schematic diagram of coal devolatilization.

3.4.1. 석탄화염 내 soot의 형성과 산화과정에 대한 고찰

석탄화염의 soot는 미분탄의 열분해시 휘발분의 약 50% 내외를 차지하는 tar 성분의 2차 열분해 과정을 통하여 주로 생성되는 것으로 알려져 있다. Solomon et al.(1992)<sup>5)</sup>은 석탄의 열분해과정을 Fig. 7과 같이 3단계로 나누어 설명하였다.

- Stage I : 석탄 입자의 온도가 증가하면 입자 내부의 화학적 결합이 파괴되고 석탄 입자가 물러지면서(softening) metaplast의 상태가 된다.
- Stage II : 이후 입자 온도가 더 증가되면서 입자내부의 결합이 더욱 파괴되어 1차 열분해의 생성물로서 고분자 탄화수소계열의 tar와 CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, HCN 등의 light 가스 등이 방출되고 회와 잔류탄소로 이루어진 char가 생성된다.
- Stage III : 1차 열분해 생성물인 tar는 다시 2차 열분해과정을 통하여 다시 CO, H<sub>2</sub> 등의 가스와 잔류물인 soot를 생성하게 된다.

위의 그림에서와 같이 soot는 1차 휘발분 중 가스상(특히, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)으로부터 발생할 수 있으나 석탄 화염의 soot는 주로 tar로부터 발생된다. Lau and Niksa<sup>14)</sup>는 다음과 같은 soot 발생 반응식을 사용하였다.



석탄 열분해 생성물인 tar의 원소 분석치는 H의 함량이 원탄의 H 함량보다 약간 더 높기는 하지만 원탄의 원소분석치와 매우 유사한 것으로 알려져 있다.<sup>15)</sup> 2차 열분해시 tar의 산소성분은 CO로 모두 방출되며 H 성분은 H<sub>2</sub>로 방출되고 일부가 잔류물인 soot에 남게 된다. Lau and Niksa<sup>14)</sup>는 soot의 C/H는 분위기 온도에 따라 2~10 정도이며 O성분은 없는 것으로 보고하였다. 또한 pittsburgh #8 석탄 등 4종의 미국산 석탄으로부터 발생된 soot의 분자량(molecular mass)은 300~430의 범위내에 있으며 화학식을 C<sub>24.7</sub>H<sub>3.0</sub>-C<sub>35.6</sub>H<sub>3.9</sub>로 나타내었다. soot의 분자식에서 알 수 있듯이 주 성분은 탄소이다.

석탄화염에서의 soot의 생성과정과 관련하여 Timothy<sup>16)</sup>은 소규모 반응로내 석탄의 열분해시 석탄이 휘발되면서 석탄 주위를 둘러싸는 휘발분의 후류(wake)에서 soot가 발생하는 것을 관찰하였다. 이러한 soot의 발생을 개략적으로 나타내면 Fig. 8과 같다.<sup>6)</sup>

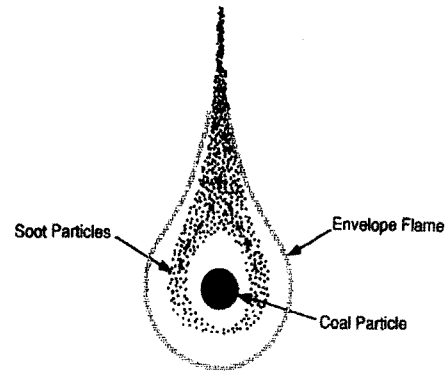


Fig. 8. Schematic diagram of soot formation.

이러한 soot는 분위기 온도가 높거나 석탄의 체류시간이 길수록 그 발생량이 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>12)</sup> Ma<sup>17)</sup>은 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-air flat flame burner에서 Pittsburgh #8과 Illinois #6 석탄의 soot 발생량이 13~16 wt.%인 것을 확인하였다. 샘플링된 개개의 soot 입자크기는 25~60 nm이었으며 떠 모양으로 뭉쳐진(agglomerated) soot 덩어리는 10~30 μm인 것으로 측정되어졌다.

soot의 산화에 관한 연구는 그리 많은 편이 아니다. 석탄화염 내 soot입자는 생성, 산화, 뭉쳐짐(agglomeration)이 반복 발생되므로 반응 표면적을 산정하기가 어렵다. 일반적으로 soot 입자의 산화는 O<sub>2</sub>와의 반응이 주를 이루나 산소를 포함하는 radical인 O, OH와도 반응하는 것으로 알려져 있다.<sup>17,19,20)</sup> Brown and fletcher<sup>18)</sup>는 soot의 산화율(oxidation rate), R<sub>s</sub>(kg m<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>)을 아래의 식으로 표현하였다.

$$R_s = A_s \frac{P_{O_2}}{T^{0.5}} \times 10,900 \times \exp(-19,786/T) \quad (2)$$

여기서 A<sub>s</sub>는 단위 체적 당 soot 입자의 표면적(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)이며 T는 가스온도, P<sub>O<sub>2</sub></sub>는 가스중 산소의 분압이다. 식 (2)에서 보는 바와 같이 산소의 분압, 즉 산소의 농도가 높을수록 산화(연소)가 빨리 일어남을 알 수 있다.

3.4.2. 대상 탄종의 soot 발생 가능량 비교

앞 절에서 살펴 본 바와 같이 석탄화염에서의 soot는 주로 tar로부터 생성되므로 석탄의 열분해 시 tar의 발생량을 알면 soot의 발생 가능량에 대한 추정이 가능하다. 즉, tar는 2차 열분해를 통하여 CO, H<sub>2</sub> 등의 가스가 방출되고 soot가 남기 때문에 atomic balance로부터 이의 추정이 가능하다. 고속 열분해시 CPD model<sup>9)</sup>을 사용하여 얻어진 6개 탄종의 tar의 량을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Amounts of tar expected from CPD model

coal	Peabody	Shenhua	Arthur	Ensham	Sanseco	ELK Valley
yield(wt.%)						
tar yield(daf)	0.2787	0.2575	0.2886	0.2435	0.2108	0.1101
tar yield(dry)	0.2420	0.2369	0.2411	0.2016	0.1907	0.0951

daf : dry ash-free

**Table 4.** Amounts of soot expected from atomic balance

dry basis	soot	CO	H <sub>2</sub>	HCN	H <sub>2</sub> S	ash
Peabody	17.17	5.03	1.36	0.50	0.14	13.16
Shenhua	18.04	4.07	1.03	0.52	0.03	8.00
Arthur	19.04	2.64	1.23	0.98	0.22	16.45
Ensham	15.98	2.38	0.87	0.75	0.18	17.19
Sanseo	14.64	3.16	0.75	0.39	0.13	9.52
ELK valley	8.49	0.35	0.38	0.24	0.04	13.66

Tar의 원소분석치가 원탄과 매우 유사하며 2차 열분해 가스를 CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCN으로 가정하고 soot의 조성을 Lau and Niksa<sup>14)</sup>가 사용하였던 C<sub>27</sub>H<sub>3</sub>로 가정하면 Merrick<sup>21)</sup>이 사용한 바 있는 atomic balance로부터 soot의 발생 가능량을 구할 수 있으며 이를 Table 4에 나타내었다. 이 값들은 가스상(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 등)으로부터의 soot 발생은 고려하지 않고 순수히 tar로부터 생성되는 것으로 가정하고 구한 것이다.

Table 4에서 보는 바와 같이 영흥 화력발전소에서 미연분이 발생된 것으로 보고된 Peabody, Shenhua, Arthur 탄에서 soot 발생 가능량이 높은 것을 볼 수 있었다. 반면 Elk Valley, Ensham, Sanseo 탄은 미연분 발생 가능성은 비교적 낮은 것을 알 수 있다. 전체적으로 볼때 고 휘발분 탄은 soot로 인

한 미연분의 발생 가능성이 높은 것으로 볼 수 있으나 이러한 미연분은 연소 조건과도 관련이 있으므로 보일러 연소환경에 대한 검토가 필요하였다.

**3.5. 버너 별 미분탄 공급유량의 측정 결과**

영흥 화력발전소 1호기의 각 층별 연소상태가 균일한지를 파악하기 위하여 보일러 각 층별, 버너별로 미분탄/공기량을 측정하였다. 영흥 화력발전소 보일러의 A, B, C, D 층의 각 버너별로 미분탄/공기 공급량을 SMG 10을 사용하여 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. 측정시 발전소 출력은 760 MW이었으며 사용한 탄종은 Arthur탄이었다. 일반적으로 각 버너별 유량은 발전소 건설 시 동일량의 미분탄이 공급되도록 설계되어 있으나 미분기(Mill) 출구의 오리피스스의 마모등 여러 조건 변화에 따라 버너별 유량 편차가 발생할 수 있다.

4개 층별/4개 코너별로 총 16개 Coal Pipe의 측정자료 검토 결과 코너별 Coal Flow가 ±5%내 범위인 Coal Pipe는 4개에 지나지 않았으며, 3개 Coal Pipe는 허용범위에 근접하고 나머지 Coal Pipe는 7.8~38.6%까지 벗어나고 있었다. Corner별 Coal Flow를 측정된 결과 각 Pipe마다 차이가 심하며 버너 레벨 #A의 편차는 -5.2~+38.6%, #B의 편차(%)는 -13.6~+14.5%, #C의 편차는 -4.8~+6.5%, #D의 편차(%) -11.7~

**Table 5.** Measurements of coal flow rates

Measured value		Burner level	Level A				Level B			
			1CNR	2CNR	3CNR	4CNR	1CNR	2CNR	3CNR	4CNR
Velocity(m/s)	measured		24.1	24.8	24.6	23.8	23.1	23.7	22.1	24.0
Coal Flow (t/h)	designed		53.8				53.1			
	measured		50.3				49.3			
	measured at corner		11.10	17.41	11.91	9.84	10.79	13.29	10.85	14.39
	deviation at orner(%)		-1.465	+4.845	-0.655	-2.725	-1.54	+0.960	-1.480	+2.060
	deviation(%)		-11.7	+38.6	-5.2	-21.7	-14.1	+5.8	-13.6	+14.5
PA Flow (t/h)	designed		129				124			
	measured at corner		137.1				131.0			
	deviation at orner(%)		33.92	35.01	34.72	33.49	32.54	33.41	31.19	33.83
	deviation(%)		-0.365	+0.725	+0.435	-0.795	-0.203	+0.668	-1.553	+1.088
measured value		Mill	Level C				Level D			
			1CNR	2CNR	3CNR	4CNR	1CNR	2CNR	3CNR	4CNR
Velocity(m/s)	measured		22.6	23.0	23.2	24.0	23.8	23.3	24.4	24.0
Coal Flow (t/h)	designed		53.4				53.2			
	measured		44.0				49.7			
	measured at corner		10.47	11.72	10.82	10.98	11.86	14.50	12.29	11.05
	deviation at orner(%)		-0.527	+0.723	-0.178	-0.018	+2.075	+2.075	-0.135	-1.375
	deviation(%)		-4.8	+6.6	-1.6	-0.2	+7.8	+31.8	-11.7	-0.5
PA Flow (t/h)	designed		126				125			
	measured at corner		130.8				135.1			
	deviation at orner(%)		31.85	32.40	32.74	33.85	33.54	32.84	34.44	34.29
	deviation(%)		-0.86	-0.31	+0.03	+1.14	-0.237	-0.937	+0.662	+0.512

PA : Primary Air(coal transporting air to the burner)  
CNR : Corner

+31.8%인 것으로 나타났다. 결과에서 알 수 있듯이 이러한 상태가 지속될 시 보일러 내 Fire Ball의 형성이 불안정하여 않아 연소 상태 불안정, 불완전 연소 유발 등 연소 관리상에 문제가 발생될 수 있음을 알 수 있었다.

3.6. 현장 연소시험 결과

영흥 화력발전소 1호기 보일러의 운전조건을 변화시켜 미연분 발생량을 줄이기 위한 시험을 약 18일간에 걸쳐 수행하였다. 시험탄종은 그간 미연분 발생량이 많았던 Shenhua, Peabody, Arthur 탄을 적용하였다. Shenhua 탄과 Peabody 탄을 50% 비율로 섞은 혼합탄과 Arthur 탄을 100% 사용한 두 경우에 대하여 미연분을 측정하였다. 통상의 운전조건에서 혼합탄의 미연분을 측정한 후, SOFA(Separated Over Fire Air)의 yaw 각도(좌우 각도)를 변경하고 과잉공기량을 증가시킨 후의 미연분을 측정하여 이를 연소조정전의 값과 비교하였다. SOFA의 yaw 각도 변화는 미연분과 산화제의 혼합을 증가시키기 위한 것이며 과잉 공기량의 증가는 식 (2)에서 보는 바와 같이 산소의 분압을 높이는 효과를 나타낸다. SOFA의 yaw 각도 변화는 아래의 Table 6과 Fig. 9와 같으며 과잉공기량을 3.28%에서 통상적인 운전 범위를 벗어나지 않는 범위인 3.48%로 증가시켰다.

Table 6. Changes in SOFA's yaw Angle

Corner Modification	Corner # 1	Corner # 2	Corner # 3	Corner # 4
Before modification	-15%	+15%	-15%	+15%
After modification	-15%	+15%	-15%	-15%

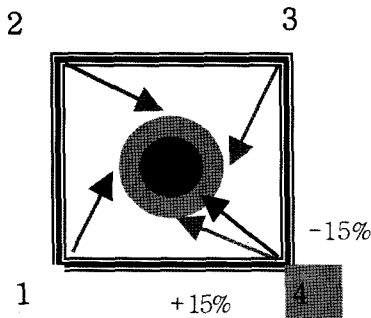


Fig. 9. Schematic diagram of SOFA's yaw angle.

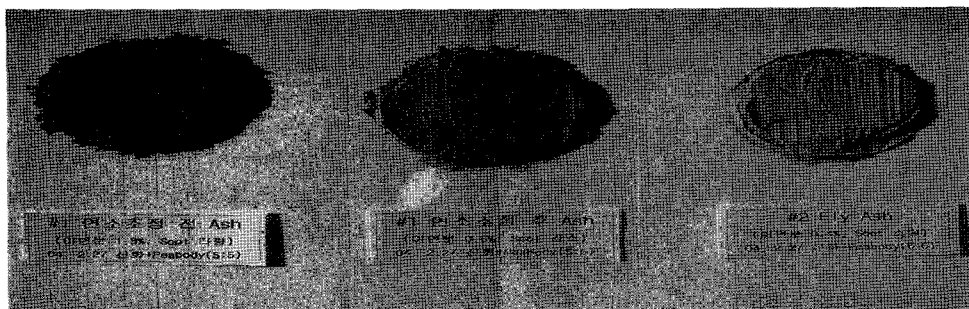


Fig. 10. Reduction of unburned carbon in ash.

Fig. 10은 Shenhua 탄과 Peabody 탄의 혼합탄 연소시 연소 조정 전, 후에 채취한 시료(석탄 회)의 사진을 보여준다. 연소조정 전의 시료는 미연분이 포함되어 있는 검은색이며 연소 조정후 시료의 검은 색이 현저히 줄어든 것을 볼 수 있었다. 연소 조정 전후의 미연분은 각각 1.3%, 0.6% 이었다. 또한, 연소시험중에 채집한 시료를 물에 부유시켜 미연분의 양을 서로 비교하여 보았다. Fig. 11은 연소 조정 전의 미연분의 양을 나타내 주고 있는데 3-5 mL의 검은 띠, 즉 미연분이 발생되고 있음을 보여주었다. 연소 조정 후에는 Fig. 12에서 보는 바와 같이 1 mL 이하로 현저히 줄어든 것을 볼 수 있었다. 과거 미연분이 발생되었던 Arthur 탄을 100% 전소한 경우에도 연소조건 변경 후의 미연분은 Fig. 13에서 보는 바와 같이 1 mL 이하로 저감 된 것을 볼 수 있었다. CO 농도는 계측기가 공기예열기(Air Pre-heater) 후단에 위치하고 있어 공기 누설등의 영향으로 연소조정 전, 후의 변화 추이를 정확히 판단 할 수 없었다. 절탄기(Economizer) 후단에 설치 되어있는 NOx 계측기의 경우 비교적 신뢰성있는 결과를 보여 주고 있었다. Shenhua 탄과 Peabody 탄의 혼합탄 사용시 연소조정 전의 NOx 농도는 110~120 ppm 정도이었으나 조정후에는 120~140 ppm을 보이고 있어 SOFA의 yaw 각도 변경이나 과잉공기량의 증가에 따라 약간 상승하기는 하지만 이는 탈질설비에서 약 40 ppm까지 저감할 수 있는 통상적인 NOx 값을 보여주었다.

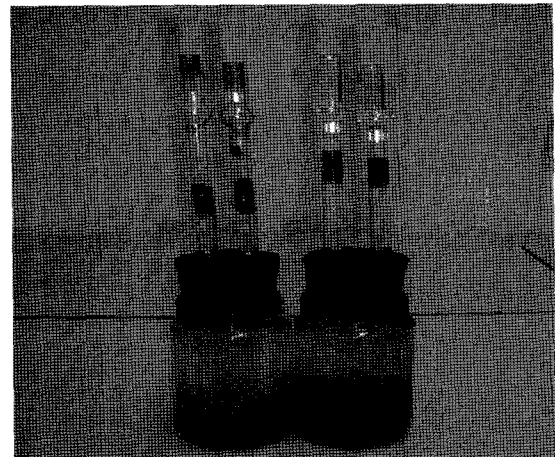


Fig. 11. Unburned carbon in ash before modification of combustion condition for blended coal(Shenhua+Peabody) : 5 mL and 3 mL.

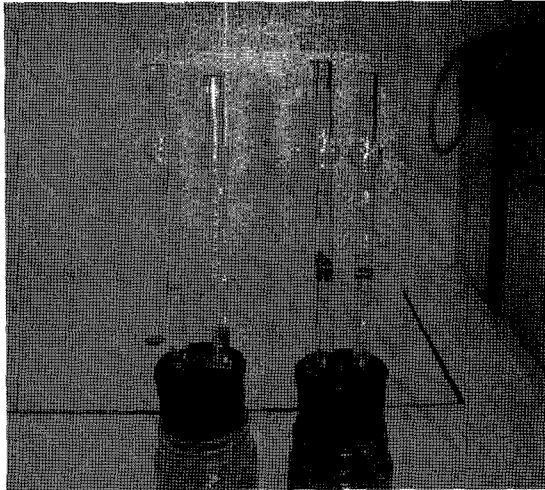


Fig. 12. Unburned carbon in ash after for modification of combustion condition for blended coal(Shenhua + Peabody) : 0.1 mL and 0.3 mL.

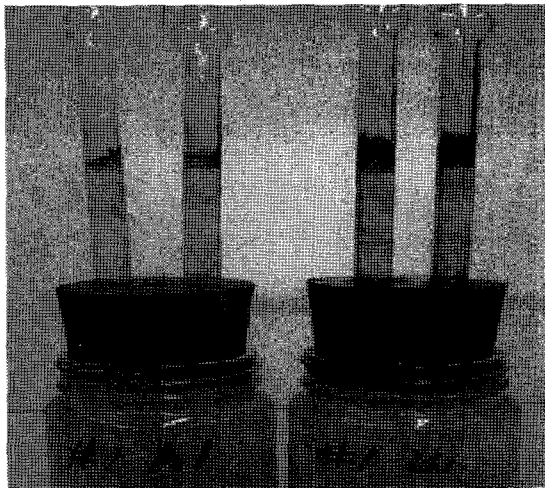


Fig. 13. Unburned carbon in ash after modification of combustion condition for Arthur coal : 0.1 mL and 0.9 mL.

### 5. 결론

영흥 화력발전소에서 발생된 석탄 회의 부유 물질은 분석결과 대부분은 중공 형태의 다공질 Cenosphere와 뭉쳐진 (Agglomerated) 형태의 Soot로 이루어져 있었다. Cenosphere는 석탄 보일러에서 발생되는 전형적인 형태를 보여 주었으며 미연분은 주로 soot인 것으로 판단되어 졌다. 6개 탄종에 대한 Tar 및 Soot의 발생 가능량(Tar & Sooting Potential)을 조사한 결과 Shenhua, Peabody 그리고 Arthur 탄의 경우 Tar 및 Soot 발생 가능량이 저 휘발분 탄에 비해 높게 나타났다. 보일러의 코너별로 공급되는 몇몇 버너에서 미분탄이 편중되어 공급되고 있었으며 이로 인한 연료와 산화제의 혼합이 상대적으로 불균일하리라 예측되어 졌다. 미연분의 저감을 위하여 과잉 공기율을 증가시키고 보일러 화로 상부에서의 공기와 미연분의 혼합을 증가시키기 위한 SOFA(Separated

Over Fire Air)의 yaw 각도를 조정하는 등 운전적 측면에서의 연소조정을 수행하였다. 그 결과 미연분의 발생량이 현저히 저감되는 것을 확인하였다. 따라서 영흥 화력발전소에서 발생된 미연분은 연소환경을 조정함으로써 해결될 수 있음을 보여주었다. 근래에 화력발전소에 입하되는 탄종은 고 휘발분 탄종을 일부 포함하고 있어 Soot의 발생가능성이 종전 보다 늘어나고 있으나 이는 연소설비의 운전 조건을 적절하게 변경함으로써 해결이 가능함을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

1. 한국전력공사, “석탄회 이용가치와 재활용 기술”(1994).
2. 여수대학교 환경문제연구소, “석탄회의 재활용 타당성 조사”(2000).
3. 김재관, Private communication(2006).
4. 대한 주택공사 주택연구소, “플라이애쉬 콘크리트의 특성 및 적용성에 관한 연구”(1999).
5. Solomon, P. R., Serio, M. A., and Suuberg, E. M., “Coal Pyrolysis: Experiments, Kinetic Rates and Mechanisms,” *Progress in Energy and Combustion Science*, **18**, 133(1992).
6. Ma, J., Fletcher, T. H., and Webb, B. W., “Conversion of coal tar to soot during coal pyrolysis in a post-flame environment,” *Twenty-sixth Symposium(International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh, pp. 3161(1996).
7. Bradley, D., Lawes, M., Park, H. Y., and Usta, N., “Modeling of laminar pulverized coal flames with speciated devolatilization and comparisons with experiments,” *Combustion and Flame*, **144**, 190~204(2006).
8. Solomon, P. R. and Hamblen, D. G., “Chemistry of Coal Conversion,” Edited by Schlosberg, R. H., pp. 121~251, Plenum, New York(1985).
9. Smoot, L. G., “Fundamentals of coal combustion,” pp. 196~237, Elsevier, New York(1993).
10. 한국전력공사 기술연구원, “석탄화력 최적연소를 위한 미분탄 배분조정연구”(1991).
11. 이정연, 이재근, “석탄화력발전소에서 생성되는 석탄회에서 Cenosphere 입자의 특성에 관한 연구,” *대한환경공학회지*, **22**, 1881~1891(2000).
12. Fletcher, T. H, Ma, J., Rigby, J. R., Brown, A. L., and Webb, B. W., “Soot in coal combustion system,” *Progress in Energy and Combustion Science*, **23**, 283(1997).
13. Veranth, J. M., Fletcher, T. H., Pershing, D. W., Sarofim, A. F., “Measurement of soot and char in pelverized coal fly ash,” *Fuel*, **17**, 1067~1075(2000).
14. Lau, C. W. and Niksa, S., “The impact of soot on the combustion characteristics of coal particles of various types,” *Combustion and Flame*, **95**, 1(1993).



15. Freihaut, J. D., Proscia, W. M., and Seery, D. J., "Chemical characteristics of Tars produced in a novel low-severity, entrained-flow reactor," *Energy and Fuel*, **3**, 692(1989).
16. Timothy, L. D., Froelich, D., Sarofim, A. F., and Beer, J. M., "Soot formation and burnout during the combustion of dispersed pulverised coal particles," Twenty-First Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1141(1986).
17. Ma, J., Fletcher, T. H., and Webb, B. W., "Conversion of coal tar to soot during coal pyrolysis in a post-flame environment," Twenty-sixth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 3161 (1996).
18. Brown, A. L. and Fletcher, T. H., "Modeling soot in coal combustion flames," Western states section of the Combustion Institute, Los Angeles, CA(1996).
19. Bradley, D., Dixon-Lewis, G., El-Habik, S., and Mushi, E. M. J., "The Oxidation of Graphite Powder in Flame Reaction Zones," Twentieth Symposium(International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburgh, 931 (1984).
20. Pederson, L. S., Glarborg, P., Dam-Johansen, K., Hepburn, P. W., and Hessel, M. G., "A chemical Engineering model for predicting NO emissions and burnout from pulverised coal flames," *Combustion Science and Technology*, **132**, 251(1998).
21. Merrick, D., "Mathematical Models of the Thermal Decomposition of Coal 1. The Evolution of Volatile Matter," *Fuel*, **62**, 535(1983).