

운전조건변경에 의한 미분탄화력의 미연분 저감

박호영* · 김영주* · 유근실* · 김춘근** · 김동훈**

Reduction of unburned carbon derived from coal-fired power plant by changing operating conditions

Ho Young Park*, Young Ju Kim*, Guen Sil Yu*
Chun Kun Kim**, Dong Hun Kim**

ABSTRACT

From the analysis of fly ash, which contains unburned carbon, collected from the coal-fired Yong Hung power station, most particles are turned out to be hollow cenosphere and agglomerated soot particles. The sooting potential from six coals used in the plant were investigated with CPD model. The results show that the higher potential presented to Peabody, Arthur, Shenhua coals rather than other coals. It is 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 yaw angle.

Key Words : Cenosphere, coal combustion, soot, SOFA, SEM

1. 서 론

석탄 화력발전소에서 생성되는 석탄재(ash)는 과거에 ash pond로 보내져 대부분 매립되고 있었으나 시멘트 제조시 적당량을 혼합함으로써 콘크리트의 강도를 높힐 수 있어 국내에서는 석탄재의 활용이 증대되고 있는 추세이다^{1,2)}. 실제로 석탄화력 발전소에서 발생하는 석탄재의 경우 발전소 현장에서 약 10,000원/톤에 판매되고 있다³⁾. 시멘트 제조시 석탄재중의 탄소성분은 약 5 wt.% 이하로 제한하고 있는데 이는 석탄재 중 다량의 미연분은 콘크리트 타설시 강도를 오히려 저하시키는 것으로 알려져 있기 때문이다⁴⁾.

한국남동발전(주)의 영흥화력발전소는 800MW급 초임계압 미분탄화력 발전소로서 국내 최대용량의 석탄발전소이며 최신의 설비와 운전

시스템을 구비하여 안정적이고 효율적인 운영으로 국내 발전소의 모델로 떠오르고 있다. 국내에 수입되는 유연탄은 과거와 같은 장기 구매 방식이 아닌 단기 구매 방식으로 도입되고 있으며 보일러의 설계탄 규격에서 벗어난 탄종이 일부 수입되고 있다. 이들 수입탄 중 문제가 되는 탄은 휘발분이 많거나 회용점 온도가 낮은 아역청탄 계열의 석탄이다.

본 연구에서는 영흥 화력발전소에서 발생된 미연분의 물리 화학적 특성을 분석하였다. 또한, 사용된 석탄에 대한 soot 발생가능량 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.

* 한국전력공사 전력연구원 연소열공학그룹

** 한국남동발전(주) 영흥화력본부

† 연락처, hypark@kepri.re.kr

2. 시료분석 및 시험방법

2.1 시료분석

본 연구는 영흥 화력발전소서 발생된 석탄재(ash)를 채취하여 미연분의 함량을 구하였으며 석탄재를 물에 침강시켰을때 부유된 물질을 따로 채취하여 ICP 분석, SEM 및 EDS 분석을 수행하였다. ICP 분석은 부유된 시료를 110°C 에서 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 Instrument 사의 INCA S-sight를 이용하였다. 또한, 범용 탈취발화 모델인 CPD모델로 tar 및 soot 의 발생 가능량을 분석하였으며 분석 대상 탄종의 주요 성상은 Table 1과 같다.

Table 1. coal properties analyzed in this study

		Pea -body	Shen -hua	Arth -ur	En- sham	San -seo	Elk Valley
발영량		6,771	7178	6,823	6,649	7,157	7,187
공업 분석 (wt. %)	수분	6.58	3.63	3.85	4.96	5.51	1.26
	회	12.29	7.71	15.82	16.34	9	13.49
	휘발 분	42.55	33.47	33.88	25.74	27.61	23.39
	F.C	38.58	55.19	46.45	52.96	57.88	61.86
원소 분석 (wt. %)	C	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

2.2 연소시험 방법

보일러 4개 층(A, B, C, D)의 각 버너별 연소공기량/미분탄의 양을 독일 Scallert 사의 SMG 10을 사용하여 측정하였다. 미연분 발생 저감을 위하여 통상의 운전 조건은 그대로 유지하면서 SOFA (Seperated Over-fired Air damper)의 yawing 각도를 변경하여 산화제와 미연분의 혼합을 최대로 하고자 하였으며 파잉공기량도 증가시켰다.

본 연구에서 수행한 분석 및 실험내용을 정리하면 아래와 같다.

- 소비탄의 원소 및 공업분석, 석탄재 성분분석
- 부유물의 성분분석(ICP)
- 부유물의 SEM 분석
- 부유물의 EDS 분석
- CPD 모델 : tar/soot 발생 가능량 조사
- 보일러 버너별 미분탄 공급유량 측정
- 현장 연소시험

3. 결과 및 고찰

3.1 부유물의 ICP 분석

영흥 화력발전소에서 채취한 시료를 물에 침강시켰을때 물위에 뜨는 부유물의 ICP 분석 결과를 Table 2에 나타 내었다. 본 시료는 호주 Arthur 탄 연소시 발생된 회(fly ash)를 채집한 것으로 알루미늄실리케이트 (Alumino-silicate)의 양이 81.84% 검출 되었다. 이는 통상적인 구형회재 또는 일반 석탄재의 양보다 많은 양이지만 전형적인 Cenosphere의 양과 유사한 수치이다. 이처럼 알루미늄실리케이트의 비율이 높은 것은 알루미늄실리케이트(Alumino-silicate)가 용융과 가스 작용에 의해 Cenosphere가 형성되기 때문인 것으로 알려져 있다⁵⁾. 탄소의 함량이 6.73%인 것으로 보아 상당량의 미연분이 포함된 것을 알 수 있으며 이것이 시멘트의 콘크리트 타설시 검은 먼지의 주 원인으로 보여진다. 좀 더 자세한 분석을 위하여 채집된 샘플의 SEM 분석 결과를 살펴보는 것이 필요하였다.

3.2 부유물의 SEM/EDS 검사

Fig. 1은 부유물질을 30배한 SEM 사진으로 시료 전체의 분포를 명확히 알 수 있었다. 대부분은 중공 다공질의 Cenosphere(연두색 테두리)이며, 군데 군데 뭉친 형태의 미연분을 확인 할 수 있으며 이는 앞서 분석했던 부유물의 성분분석 결과와도 일치함을 알 수 있었다. Fig. 2는 Fig. 1의 주황색 테두리로 표시한 부분을 10,000배 확대한 그림으로 검은색의 여러 개의 Submicron 입자들의 뭉쳐진 상태를 볼 수 있었다. 그 크기와 형태상 carbon char이기 보다는 soot인 것으로 보여지며, Fletcher et al. (1997)⁶⁾의 연구에서 관찰된 soot의 모습과 유사함을 알 수 있었다. 한편 Veranth et al. (2000)⁷⁾의 연구에 의하면 carbon char의 경우 침강시험시 하부에, soot 성분은 위쪽 즉, 부유되는 물질로 보고하고 있어 본 연구의 미연분은 soot인 것으로 보여졌다. Fig. 2의 보라색으로 표시한 부분에 대한 EDS 분석 결과, 대부분이 탄소임을 알 수 있었다.

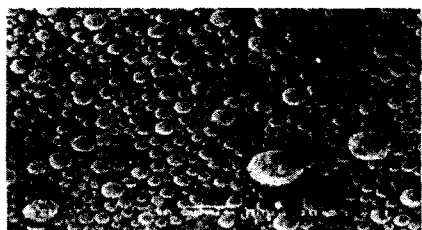


Fig. 1 SEM Photograph of a collected sample.

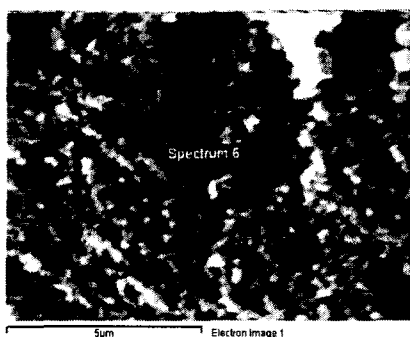


Fig. 2 Magnification of the sample shown in red circle of Fig. 1 (x 10,000).

3.3 탄종 별 Tar와 Soot의 발생 가능량

이상에서 살펴 본 바와 같이 영흥 화력발전소에서 발생된 미연분은 carbon char라기 보다는 soot 인 것으로 판단되어지며 사용된 탄종에 대하여 soot 발생가능성을 살펴보는 것이 필요하였다. 먼저 석탄화염 내 soot의 발생과정, 산화과정에 대하여 간략히 살펴보고 6개 탄종에 대한 tar 발생가능량을 CPD(Chemical Percolation Devolatilization) model⁸⁾을 통하여 분석하였다. 이로부터 soot의 가능 발생량을 atomic balance로부터 추정하여 탄종별로 비교하였다. tar로부터 soot의 가능 발생량 (sooting potential)은 tar의 원소분석치가 원탄과 매우 유사하며 2차 열분해가스를 CO, H₂, H₂S, HCN 으로 가정하면 Merrick (1983)⁹⁾의 atomic balance를 사용하여 soot의 량을 추정할 수 있다. Table 1의 6개 탄종에 대하여 CPD model⁸⁾로부터 구한 tar의 발생량을 Table 2에 나타내었다.

soot의 조성은 앞서 살펴본 바와 같이 대부분이 탄소이며 미량의 수소를 포함하며 Lau and Niksa (1993)¹⁰⁾가 사용하였던 대로 soot를 C₂₇H₃로 가정하기로 한다. 또한 가스상(C₂H₂등)으로부터의 soot 발생은 고려하지 않고 순수히 타르로부터 생성되는 것으로 가정하고 Merrick(1983)⁹⁾

의 방법으로 soot 량을 구하면 Table 3과 같다.

Table 2. Amounts of tar from CPD model

coal	Pea-body	Shen-hua	Ar-thur	En-sham	산서	ELK
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

Table 3. Amounts of soot from atomic balance

coal	soot	CO	H ₂	HCN	H ₂ 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	8.49	0.35	0.38	0.24	0.04	13.66

Table 3에서 보는 바와 같이 영흥 화력발전소에서 미연분이 발생된 것으로 보여지는 Peabody, Shenhua, Arthur 탄에서 soot 발생 가능량이 높은 것을 볼 수 있었다. 반면 Elk Valley, Ensham, Sanseo 탄은 미연분 발생 가능성은 비교적 낮은 것으로 보였다. 전체적으로 볼때 고회탈분 탄은 soot로 인한 미연분의 발생 가능성이 높은 것으로 볼 수 있다. 이러한 미연분은 연소 조건과도 관련이 있으므로 보일러 연소환경에 대한 검토가 필요하였다.

3.4 버너 별 미분탄 공급유량 추정

영흥화력 1호기의 각 층별 연소상태가 균일한지를 파악하기 위하여 보일러 각 층별, 버너별로 미분탄/공기량을 추정하였다. 영흥화력 보일러의 A, B, C, D 층의 각 버너별로 미분탄/공기 공급량을 SMG 10을 사용하여 측정된 결과를 Table 5에 나타내었다. 측정시 발전소 출력은 760MW이었으며 사용한 탄종은 Arthur탄이었다. 일반적으로 각 버너별 유량은 발전소 건설 시 동일 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 그 결과를 아래에 나타내었다.

- 미분기 #A : 편차(%) -5.2 ~ +38.6%

- 미분기 #B : 편차(%) -13.6 ~ +14.5%
- 미분기 #C : 편차(%) -4.8 ~ +6.5%
- 미분기 #D : 편차(%) -11.7 ~ +31.8%

결과에서 알 수 있듯이 이러한 상태가 지속될 시 보일러 내 Fire Ball이 형성되지 않아 연소 상태 불안정, 불완전 연소 유발 등 연소 관리상에 문제가 발생될 수 있음을 알 수 있었다.

3.5 현장 연소시험 결과

영흥화력 1호기 보일러의 연소조건을 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-Fired Air)의 yaw 각도(좌우 각도)를 변경하고 과잉공기량을 증가시킨 후의 미연분을 측정하여 이를 연소조정 전의 값과 비교하였다. SOFA는 보일러 화로의 버너 위쪽에 설치된 공기 port로서 화로 하부의 연소조건이 약간의 fuel-rich 상태에서 NOx 발생이 적게 되고 그때 발생된 미연분을 보일러 상부에서 연소하는 시스템이다. SOFA Yaw의 각도 변화는 미연분과 산화제의 혼합을 증가시키기 위한 것이며 과잉 공기량의 증가는 산소의 분압을 높이는 효과를 나타낸다. SOFA의 각도 변화는 아래의 Table 4와 같으며 과잉 공기량을 3.28%에서 3.48%로 증가시켰다.

Table 4. Changes in SOFA Yaw's Angle

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

Fig. 3은 Shenhua 탄과 Peabody 탄의 혼소 시 연소 조정이 없는 경우와 연소 조정 후 채취한 시료의 사진을 보여준다. 연소조정 전의 시료는 미연분이 포함되어 있는 검은색이며 연소 조정후 회색의 검은 색이 현저히 줄어든 것을 볼 수 있었다. 연소 조정 전후의 미연분은 각각 1.3%, 0.6% 이었다. 연소시험시 채집한 시료를 물에 부유시켜 그 량을 서로 비교하여 보았다. Fig. 4는 연소 조정 전의 미연분의 양을 나타내 주고 있는데 3-5 ml의 검은 띠, 즉 미연분이 발생되고 있음을 보여주었다.



Fig. 3 Reduction of unburned carbon in ash.

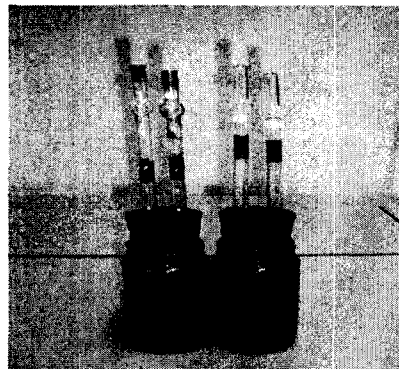


Fig. 3 Unburned carbon in ash before modification of combustion condition for blended coal (Shenhua + Peabody) : 5ml and 3ml.Reduction of unburned carbon in ash.

4. 결론

영흥 화력발전소에서 발생된 석탄회의 부유실함으로부터 얻어진 부유물질은 분석결과 대부분은 중공(中共)형태의 다공질 Cenosphere와 뭉쳐진 (Agglomerated) 형태의 Soot로 이루어져 있었다. Cenosphere는 석탄 보일러에서 발생하는 전형적인 형태를 보여 주었으며 미연분은 주로 soot 인 것으로 판단되어 졌다. 5개 탄종에 대한 Tar 및 Soot의 가능 발생량(Tar & Sooting Potential)을 조사한 결과 Shenhua, Peabody 그리고 Arthur 탄의 경우 Tar 및 Soot 가능발생량이 저 휘발분 탄에 비해 높게 나타났다. 보일러의 몇몇 버너에서 코너별로 공급되는 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) Yaw의 각도를 조정하는 등 운전적 측면에서의 연소조정을 수행하였다. 그 결과 미연분의 발생량이 현저히 저감되는 것을 확인하였다. 따라서 영흥화력에서 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 적절한 혼탄과 연소설비의 운전 조건을 적절하게 변경함으로써 해결이 가능할 것으로 보여졌다.

참고문헌

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. 이정언, 이재근, "석탄화력발전소에서 생성되는 석탄회에서 Cenosphere 입자의 특성에 관한 연구". 대한 환경공학회 논문집 22, 1881-1891 (2000).
6. 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).
7. 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).
8. Smoot, L.G., "Fundamentals of coal combustion", 196-237, Elsevier, New York (1993).
9. Merrick, D., "Mathematical Models of the Thermal Decomposition of Coal 1. The Evolution of Volatile Matter", Fuel, 62, 535 (1983).
10. 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).