

## 저급탄 연소 석탄회의 미연물질 특성 분석

박호영<sup>†</sup> · 김영주 · 김태형 · 백세현 · 김경수 · 권달정

한전전력연구원 그린에너지연구소, \*남부발전 하동화력 연소기술센터  
(2012년 1월 10일 접수, 2012년 2월 28일 수정, 2012년 3월 15일 채택)

## Characteristics of Unburned Material Derived from Coal-fired Power Plant Burning Low Grade Coal

Ho Young Park<sup>†</sup>, Young Ju Kim, Tae Hyung Kim, Se Hyun Baek,  
Kyung Soo Kim, and Kwon Dal Jeoung\*

Green Energy Lab. Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

\*Combustion Technology Center, Hadong Thermal Power Division, Korea Southern Power

(Received 10 January 2012, Revised 28 February 2012, Accepted 15 March 2012)

### 요 약

국내 석탄화력발전소의 아역청탄과 역청탄의 혼소는 일반화되어 있으며 아역청탄의 비율이 무게 기준으로 50%가 넘는 경우도 있다. 저급탄인 아역청탄의 혼소 비율이 높아짐에 따라 연소 부산물인 비회에서 미연물질이 다량 발생하고 있으며 이는 콘크리트 혼화제로서의 비회 재활용을 가로막는 중요한 인자로 작용하고 있다. 본 연구에서는 아역청탄 혼소율이 높은 국내 500MW 표준 석탄화력발전소에서 미연물질이 포함된 비회를 입수하여 이에 대한 분석을 수행하였다. 이러한 미연물질은 석탄의 열분해 생성물인 검댕(soot)인 것으로 나타났으며 실제 석탄화력발전소에서 사용하고 있는 석탄과 혼탄의 정상 데이터와 CPD모형을 사용하여 혼탄별 검댕(soot)의 발생가능성을 분석하였다.

**주요어** : 보일러, 비회, 저급탄, 검댕

**Abstract** — Sub-bituminous coals have been used increasingly in coal-fired power plants with a proportion of over 50% in the blend with bituminous coals. As a result, the unburned material in fly ash has increased and is causing problems in utilizing the fly ash as an additive for concrete production. In this study, analysis of fly ash obtained from a 500 MWe power plant was carried out and unburned material in the fly ash found to be soot. The coals used in the plant were analyzed with CPD model to investigate the sooting potential depending on the coal type and blending ratio.

**Key words** : Boiler, Fly ash, Low grade coal, Soot

### 1. 서 론

석탄 화력발전소에서 생성되는 석탄 회(ash)는 시멘트 제조시 적당량을 혼합함으로써 콘크리트의 강도를 높이는 혼화제로 사용되고 있으며, 이와 같은 석

탄 회 재활용은 증대되고 있는 추세이다 [1,2]. 시멘트의 혼화제로 사용되기 위해서는 석탄 회 중의 탄소 성분을 약 5 wt.% 이하로 제한하고 있으며, 그 이상이 되는 경우 석탄 회 중의 미연분은 콘크리트 타설시 강도를 오히려 저하시키는 것으로 보고되고 있다 [3]. 국내 500MW 표준 석탄화력발전소에서는 저급탄의 사용 확대로 아역청탄의 혼소율이 50%를 초과하는 경우도 있으며 탄종과 혼탄비에 따라 석탄회 중

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
Korea Electric Power Research Institute KEPCO 105 Munji-Ro  
Yusung-Gu Daejeon 305-760 Korea  
Tel : 042-865-5602; E-mail : hypark@kepri.re.kr

의 미연물질이 다량 발생되기도 한다. 이러한 미연물질이 포함된 석탄 회를 콘크리트 혼화제로 사용하여 실제 건설현장에 타설하는 경우 표면에 검은 띠가 형성되어 석탄회 재활용이 불가능하게 된다 [4].

일반적으로 석탄의 탈휘발화 과정 중 발생하는 휘발분의 약 절반 가량이 타르(tar) 성분으로 알려져 있으며 이 타르(tar)는 2차 탈휘발화 과정을 거쳐 탄소가 주성분인 검댕(Soot)을 발생시키는 것으로 알려져 있다 [5-7]. 휘발분이 많은 아역청탄의 혼소율이 높을 경우 검댕(soot)의 발생가능성이 높으며, 실제로 이러한 탄을 석탄화력발전소에서 연소하였을 때 석탄 회 중의 미연물질이 많이 발생하고 있다.

본 연구에서는 500MW 저급탄 연소 표준석탄화력발전소에서 발생한 석탄 회(fly ash) 중의 미연물질의 특성을 분석하였다. 실제 발전소에서 사용되고 있는 석탄의 성상 자료를 바탕으로 검댕의 발생 가능량(Sooting potential)을 범용 탈휘발화모델인 CPD(Chemical Percolation Devolatilization) 모델을 사용하여 분석하였다. 이들 결과는 탄종 및 혼탄에 따른 검댕 발생가능성을 파악하여 이들 미연물질의 발생을 방지할 수 있는 탄종 및 혼탄비율 선정 지침을 마련하고자 한다.

## 2. 석탄 회 중의 미연물질 분석

### 2-1. 석탄 회 중의 미연물질 분리 및 분석

500MW 표준석탄화력발전소에서 역청탄(ECM) 30%와 아역청탄(Indominco) 70%를 혼소하였을 때의 비회(fly ash)를 전기집진기 1단에서 채취하였다. Fig. 1은 채취된 석탄 회(fly ash)를 물에 넣었을 때 부유된 미연물질의 상태를 보여준다. 부유된 물질은 비회를 혼화제로 사용하여 타설된 콘크리트 표면에서의 검은 띠를 이루는 물질과 매우 비슷한 모양을 나타내 주고 있다. 부유 물질과 침강물질을 따로 분리, 채취하여 특성을 분석하였다. Table 1은 분리하여 채취된 시료에 대한 무게비를 보여준다. 부유물질과 침강물질은 각각 2.2%와 97.8%이었으며, 두 물질의 분리시에 어느 정도 유실(missing)되는 양이 존재함을 알 수 있었다.

전조된 침강, 부유물질에 대한 TEM(Transmission Electron Microscopy), EDS(Energy Dispersive Spectroscopy) 및 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석을 수행하였다. 시료의 SEM 분석을 위하여 JEOL JSM 6360을 사용하였으며 EDS 분석은 Oxford Instrument

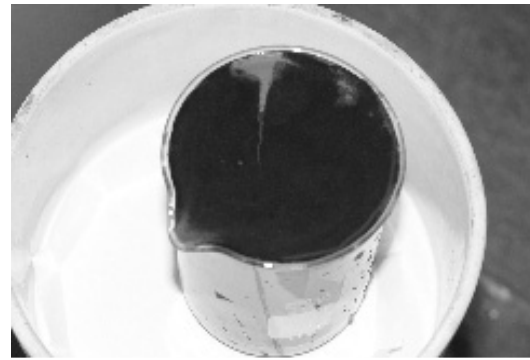


Fig. 1. Unburned material in a fly ash.

Table 1. Mass balance of sampled fly ash.

fly ash sample	
Initial mass (g)	73.6740
Floated mass (g)	1.5734
Precipitated mass (g)	70.2355
Sum (g)	71.8089
missing mass (g)	1.8651
Floated mass (%)	2.2
Precipitated mass (%)	97.8

사의 INCA S-sight를 이용하였다. TEM 분석은 FEI사의 FE-TEM (300KV)을 사용하였으며 입자 특성을 살펴보기 위하여 High Resolution 분석도 수행하였다.

### 2-2. 분석 결과

분리된 침강물질과 부유물질에 대한 SEM과 TEM 분석 사진을 Fig. 2에 각각 나타내었다. Fig. 2(a)의 침강물질은 대부분 세노스피어(cenophere)이며 [4], 두 번째 그림의 EDS 분석 결과 회성분인 무기물질로 밝혀졌다. Fig. 2(b)의 검정색 구형물질은 세노스피어이며, 그 주위의 물질은 타르(tar) 혹은 검댕(soot)으로 추정된다. 거대한 띠를 형성하고 있으며 좀 더 확대하여 high resolution으로 분석한 결과 층간 간격이 3.5 - 4 Å(앙스트롬)으로 탄소 격자 간격임을 알 수 있어 이러한 물질은 검댕(soot)으로 보여진다. 구형의 진한 검정 물질은 세노스피어로서 그 표면에 대한 EDS 분석 결과를 Fig. 3(a)에, 주변의 검댕(soot)으로 추정되는 물질에 대한 EDS 분석 결과를 Fig. 3(b)에 나타내었다. Fig. 3(a)의 분석 결과는 탄소 성분이 약 10%이며 나머지는 수분과 무기물질이다. 10%의 탄소성

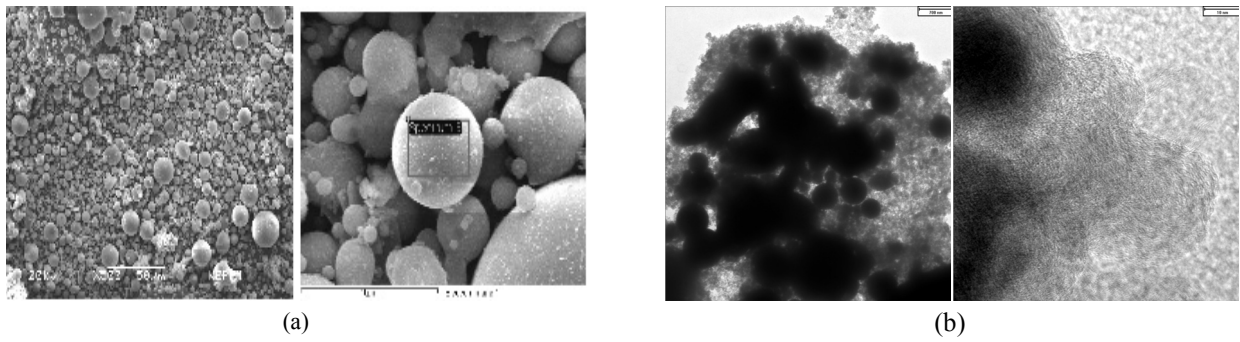


Fig. 2. (a) SEM images for precipitated materials, (b) TEM images for floated materials.

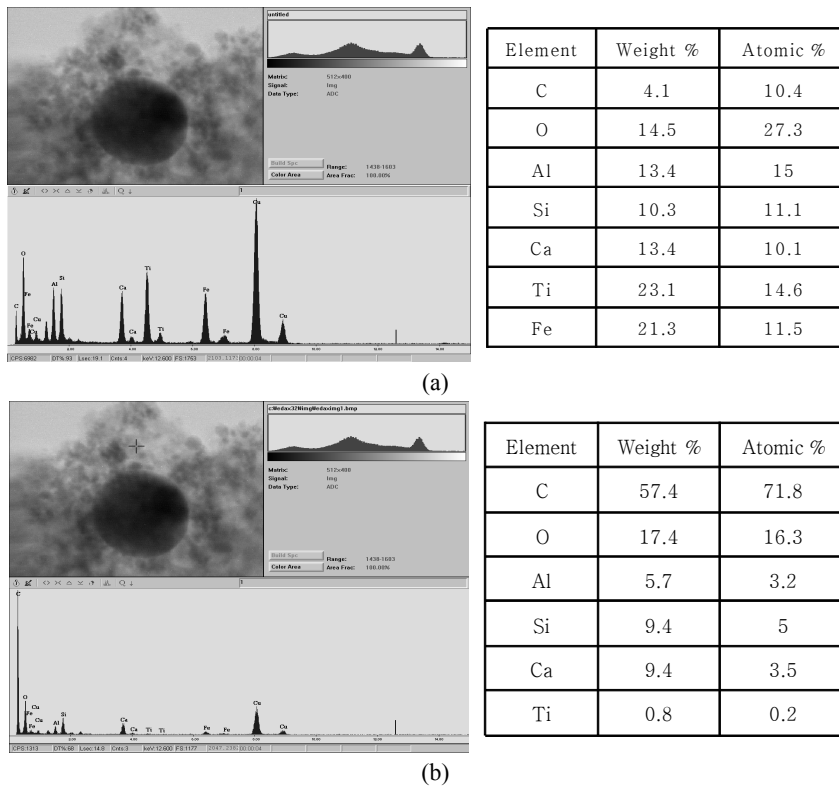


Fig. 3. (a) EDS analysis on the surface of cenosphere, (b) EDS analysis on the surface of unburned material.

분은 세노스피아 표면에 위치한 검댕(soot)의 탄소성분에 의한 것으로 보인다. Fig. 3(b)의 검댕(soot)으로 추정되는 물질에 대한 EDS 분석결과는 탄소성분이 약 72%이며 16.3%의 수분과 소량의 무기물질로서 이 물질은 탄소가 주성분인 검댕(soot)으로 보여진다.

### 3. 석탄화염내 검댕(soot)생성 및 산화과정 고찰

미분탄의 탈휘발화는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 석탄으로부터 타르(tar)와 1차 휘발분가스, 그리고 좌

(char)를 생성하는 1차 탈휘발화 과정과 검댕(soot)과 2차 휘발분 가스를 생성하는 2차 탈휘발화과정으로 나눌 수 있다 [8]. 검댕(soot)은 석탄의 1차 열분해 생성물인 타르(tar)의 2차 열분해 후 남게 되는 잔류물로서 Fig. 4에서와 같이 1차 휘발분 중 가스 상으로부터 생성되기도 하며 좌(char)로부터도 발생할 수 있다.

석탄 화염의 경우 검댕(soot)은 주로 타르(tar)로부터 발생되며 일부는 가스상 (특히, 아세틸렌 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)으로부터 발생되는 것으로 알려져 있다. Lau and Niksa

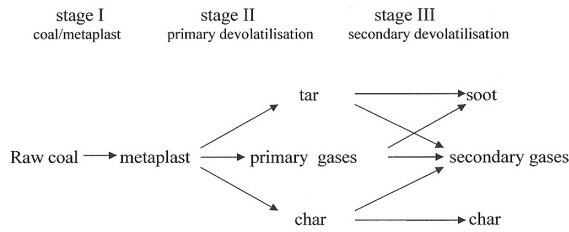
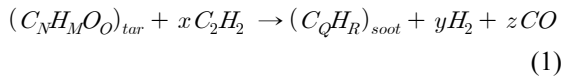


Fig. 4. Coal devolatilization scheme.

는 다음과 같은 검댕(soot) 발생 반응식을 사용하였다 [9].



석탄화염에서의 검댕(soot)의 생성과정에 관한 연구로는 Seeker 등 [10]의 메탄-공기 flat flame 하향 버너, Nenniger 등 [11]의 층류반응로(Laminar flow furnace), Timothy 등 [12]의 고속카메라와 two colour optical pyrometer를 사용한 연구가 있다. Ma 등 [13]은 fuel rich 조건의 CH<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>-air 혼합물과 6개의 탄종에 대하여 flat flame 버너에서 검댕(soot) 생성실험을 수행하여 검댕(soot) 입자를 채집하였다. 개개의 검댕(soot) 입자 크기는 25~60 nm 었음을 볼 수 있었고 뭉쳐진(agglomerated) 검댕(soot) 덩어리는 10~30 μm 인 것으로 측정되어졌다. 검댕(soot)의 산화에 관한 연구는 그리 많은 편이 아니다. Brown and Fletcher [14]는 검댕(soot)의 연소반응율(oxidation rate), R<sub>s</sub> (kg m<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>)를 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 체적당 검댕(soot) 입자의 표면적 (m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)이며 T는 가스온도, P<sub>O<sub>2</sub></sub>는 가스중 산소의 분압이며, 검댕(soot)의 산화율은 입자의 표면적에 비례함을 알 수 있다.

#### 4. 탄종별 검댕(soot) 발생가능성 (Sooting potential)

본 연구에서는 500 MW 표준 석탄화력발전소에서 다량의 검댕(soot) 발생이 보고된 혼탄 6종과 검댕(soot) 발생이 없는 혼탄 6종에 대한 석탄 성상 자료

를 입수하여 타르(tar)와 검댕(soot)의 발생가능성을 계산하였으며 그 결과를 Van Krevelen 선도에 나타내어 탄종별 특성을 분석하였다.

열분해 전용 모델인 미국 BYU (Brigham Young University)의 CPD (Chemical Percolation Devolatilization) 모델 [15]로부터 검댕(soot)의 precursor인 타르(tar)에 대한 탄종별 생성량을 구하였다. 이 모델에서 석탄은 Tar precursor와 무기물질을 연결하는 화학다리(chemical bridge)의 단순격자(simplified lattice)로 이루어져 있으며, 석탄이 가열되면 화학다리가 절단되면서 석탄이 찰 (char), tar precursor, 탄화수소가스 등으로 분해되는 것으로 가정된다. 화학다리 절단율(속도)은 반응속도식을 사용하여 정의되며, 이 반응속도식의 관련변수들은 Percolation Lattice Statices를 이용하여 석탄성상으로부터 유도된다. CPD 모델은 석탄의 열분해시 휘발분의 양을 석탄의 화학적 분자구조, 즉 NMR(Nuclear Magnetic Resonance Spectrometer) 데이터가 필요하다. CPD 모델에서는 석탄의 공업 원소분석치와 NMR 데이터의 상관관계식을 알 수 있어 이 관계식을 이용함으로써 고가의 분석비용을 절감할 수 있다. 한편, Xu and Tomita [16]는 갈탄에서부터 무연탄까지의 총 17종의 석탄을 사용하여 Flash pyrolyzer에서 타르(tar) 발생량에 대한 아래의 상관관계식을 제시하였다.

$$[Tar] = 0.48 [\text{total volatile matter}] \quad (3)$$

본 연구에서는 CPD 모델과 Xu and Tomita의 상관관계식을 사용하여 타르(tar)의 생성량을 계산하였다. 앞에서 살펴 본 바와 같이 석탄화염에서의 검댕(soot)은 주로 타르(tar)로부터 생성되므로 석탄의 탈휘발화시 타르(tar)의 발생량을 알면 검댕(soot)의 발생 가능량에 대한 추정이 가능하다. 즉, 타르(tar)는 2차 열분해를 통하여 CO, H<sub>2</sub>등의 가스가 방출되고 검댕(soot)이 남기 때문에 atomic balance로부터 이의 추정이 가능하다. 타르(tar)의 원소분석치가 원탄과 같고, 2차 탈휘발화가스를 CO, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, HCN 으로 가정하고 검댕(soot)의 조성을 Lau and Niksa [9]가 사용하였던 C<sub>27</sub>H<sub>3</sub>로 가정하면 atomic balance로부터 검댕(soot)의 발생량을 구할 수 있다.

검댕(soot) 발생이 적은 혼탄종과 많은 혼탄종에 대한 성상분석치를 Table 2와 3에 각각 나타내었다. 여기서 발열량, 공업분석, 원소분석치는 혼탄시 두 탄

종의 성분분석치를 혼합비율대로 산술평균한 값이다. 단탄종에 대한 성분분석치는 생략하였다.

Fig. 5, 6, 7은 검댕(soot) 발생 혼탄과 미발생 혼탄에 대한 Van Krevelen 선도, O/C와 H/C에 대한 휘발분을 각각 나타낸 것이다. 각각의 그림으로부터 석탄회중에 검댕(soot)이 발생하는 범위는 O/C는 0.13 이상, H/C는 0.81 이상에서 발생하며 혼탄의 휘발분이 약 35% 이상인 경우에 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 발전소별, 운전조건별로 달라질 수 있는 값이지만 통상 표준화력의 운전조건이 크게 변하지 않는 상황이므로 발전소별 탄종에 대한 이와 같은 분석 데이터를 계속 축적한다면 검댕(soot) 발생에 대한 탄종별, 혼탄비별 DB 구축이 가능할 것이다.

Table 2와 3의 혼탄 성상에 대하여 CPD 모델과

Xu & Tomita의 상관관계식으로부터 얻은 타르(tar) 발생량과 검댕(soot)의 량을 계산하여 Fig. 8과 9에 나타내었다. 미연물질 발생 혼탄과 미발생 혼탄의 타르(tar)량의 계산 결과는 실제 발전소에서의 검댕(soot) 발생정도와 서로 일치하고 있다. 즉, Table 2의 혼탄에 대한 타르(tar)량은 작게 나타났으며 Table 3의 혼탄에 대한 타르(tar)량은 상대적으로 높게 나타났다.

Xu & Tomita의 상관관계식은 총 휘발분량의 약 48%가 타르(tar)이다. CPD 모델로부터 얻어진 타르(tar)의 양은 Xu and Tomita의 예측량보다 전반적으로 높은 값을 보여주고 있다. Fig. 9의 검댕(soot) 량의 경우도 Xu & Tomita 관계식으로부터 얻은 검댕(soot)의 양보다도 CPD 모델로 얻어진 검댕(soot)의 양이 더 많은 것을 볼 수 있다. 본 연구에서 Xu &

**Table 2.** Properties of blended coal which has no soot in the fly ash.

Blended coal (wt. %)		Felix65 +ECO35	Xstrata55 +PCC45	Peabody70 +Mac.30	Rolle85 +Lanna15	Flame65 +ECO35	ECM80 +LG20
Heating value (as-rec., kcal/kg)		5,386	5,410	5,669	5,693	5,441	5,667
proximate analysis (wt.%)	Moisture	10.0	8.6	6.8	11.5	10.1	5.4
	Volatile	32.3	30.7	31.8	32.0	30.7	31.8
	Ash	14.9	14.1	16.1	8.5	12.1	18.3
	Fixed carbon	42.8	46.5	45.3	48.0	47.1	44.5
Ultimate analysis (wt.%)	C	65.69	67.50	66.19	71.39	68.81	66.09
	H	4.42	4.13	4.39	4.56	4.23	4.44
	O	11.09	10.41	9.19	11.39	11.11	7.49
	N	2.26	2.19	2.28	2.43	2.11	2.02
	S	0.52	0.71	0.95	0.69	0.56	0.97
	Ash	16.02	15.06	17.00	9.55	13.19	19.01

**Table 3.** Properties of blended coal which has soot in the fly ash.

Blended coal (wt. %)		Valley30 +Berau70	Valley30 +Indo.70	ECM50 + TMJ50	ECM30 +Indo.70	Tugn.30 +Indo.70	ECM30 +Indo.70
Heating value (as-rec., kcal/kg)		5,411	5,886	5,405	5,974	5,891	5,921
proximate analysis (wt.%)	Moisture	13.1	8.8	8.8	8.6	9.2	7.9
	Volatile	37.8	38.6	35.9	37.3	38.5	37.2
	Ash	6.7	8.1	10.2	9.3	8.4	9.8
	Fixed carbon	42.4	44.4	45.1	44.8	43.9	45.1
Ultimate analysis (wt.%)	C	67.08	69.13	67.55	69.14	69.06	69.93
	H	4.97	4.86	5.14	4.89	4.93	4.83
	O	18.43	15.05	14.00	13.50	14.46	12.26
	N	1.29	1.34	1.41	1.55	1.59	1.62
	S	0.68	0.74	0.97	0.89	0.79	0.88
	Ash	7.55	8.87	10.94	10.03	9.17	10.48

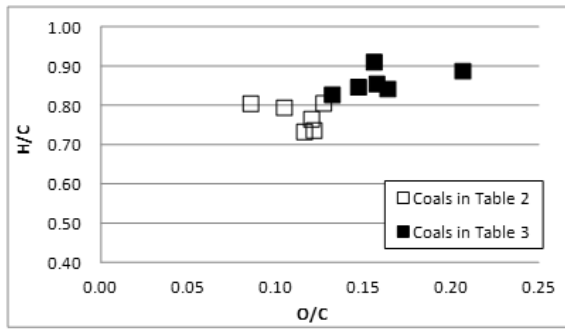


Fig. 5. Van Krevelen diagram for coals in Table 2 and 3.

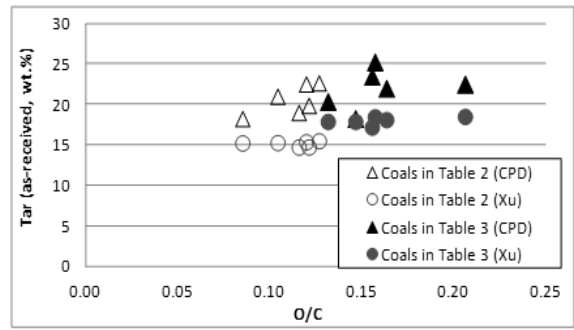


Fig. 8. Tar vs. O/C for coals in Table 2 and 3.

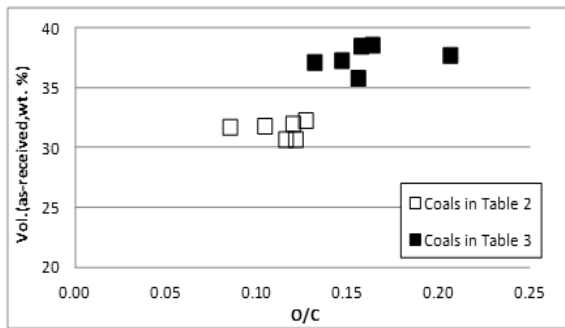


Fig. 6. Volatile vs. O/C for coals in Table 2 and 3.

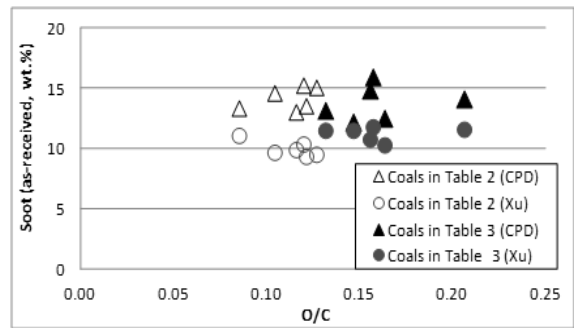


Fig. 9. Soot vs. O/C for coals in Table 2 and 3.

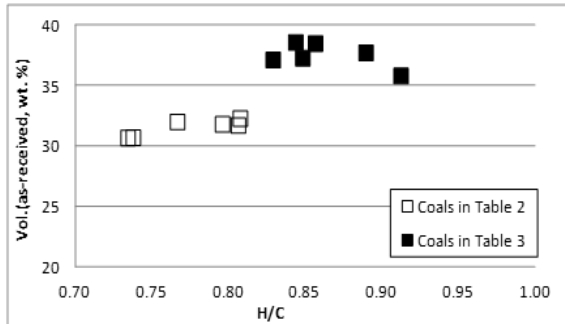


Fig. 7. Volatile vs. H/C for coals in Table 2 and 3.

## 5. 결론

본 연구에서는 저급탄 연소 500 MW 표준 석탄화력발전소에서 발생된 석탄 회 중의 미연물질 특성을 분석하였다. 검댕(soot)으로 추정되는 물질이 세노스피아와 엉겨붙어 있으며 EDS 분석결과 탄소가 주성분이었다. High resolution 분석으로부터 층간 간격이 3.5~4 Å으로 전형적인 탄소 격자 구조임을 보여주고 있어 부유된 미연물질은 탄소가 주성분인 검댕(soot)으로 판단된다.

저급탄을 혼소하는 500MW 석탄화력발전소에서 미연물질이 발생한, 그리고 발생하지 않은 혼탄에 대한 성상 데이터, CPD 모델과 Xu and Tomita의 상관관계식을 사용하여 혼탄별 검댕(soot)의 발생가능성을 분석하였다. 분석에 사용된 12종의 혼탄에 대한 Van Krevelen 선도, 휘발분 - O/C 선도, 휘발분 - H/C 선도로부터 미연물질의 발생조건을 알 수 있었다. 석탄화력발전소에서 탄종별 검댕(soot) 발생조건을 DB화하여 혼탄시 탄종 및 혼탄비 선정 기준을 구축하는 것이 필요하다. 혼탄별 CPD 모델과 Xu and Tomita의 상관관계식으로부터 혼탄별 타르(tar)와 검댕(soot)

Tomita의 타르량 계산시 총 휘발분량을 공업분석 휘발분으로 가정하였다. 반면, CPD 모델은 10<sup>4</sup>°C/s의 입자 가열율하에서 타르의 량을 계산한 것이다. 고속 가열율에서의 탈휘발화 생성량은 저속 가열율에서보다 더 높은 것으로 알려져 있으며 [17] 본 결과도 이와 일치하는 결과, 즉 CPD 모델의 타르량이 Xu & Tomita의 타르량보다 더 높게 나타나고 있다. CPD 모델의 경우 공개 코드가므로 실제 발전소 현장에서는 Xu & Tomita의 관계식과 함께 이 모델의 적용이 가능할 것이다.

의 발생량을 구하였으며 실제 발전소의 검댕(soot) 발생 정도와 어느 정도 일치하는 경향을 보였다. 향후, 탄종별, 혼탄비율에 따른 검댕(soot) 발생 정도와 가능성에 대한 좀 더 정확한 분석이 필요할 것이다.

## 후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2011T100200203)입니다.

## 참고문헌

1. 한국전력공사, “석탄회 이용가치와 재활용 기술” (1994).
2. 여수대학교 환경문제연구소, “석탄회의 재활용 타당성 조사” (2000).
3. 대한 주택공사 주택연구소, “플라이애쉬 콘크리트의 특성 및 적용성에 관한 연구” (1999).
4. 박호영, 김영주, 유근실, 김춘근, 김동훈, “석탄화력발전소에서 발생하는 미연분의 특성분석 및 저감방법”, 대한 환경공학회 논문집 28, 1065-1073 (2006).
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. 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. Bradley, D., Lawes, M., Ho Young Park, Usta, N., “Modeling of laminar pulverized coal flames with speciated devolatilization and comparisons with experiments”, Combustion and Flame 144, pp. 190-204 (2006).
8. Serio, M.A., Hamblen, D.G., Markham, J.R., Solomon, P.R., “Kinetics of volatile product evolution in coal pyrolysis: Experiment and theory”, Energy and Fuels, 1, 138 (1987).
9. 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).
10. Seeker, W.R., Samuelson, G.S., Heap, M.P., Ptolinger, J.D., “Thermal decomposition of pulverized coal particles”, 18th symposium (International) on combustion, The combustion institute, Pittsburgh, 1213 (1980).
11. Nenniger, R.D., Howard, J.B., Sarofim, A.F., “Sooting potential of coals, International conference on coal science, Pittsburgh, 521 (1983).
12. 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).
13. 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).
14. Brown, A.L., Fletcher, T.H., “Modeling soot in coal combustion flames”, Western states section of the combustion institute, Los angeles, CA (1996).
15. Smoot, L.D., “Fundamentals of coal combustion for clean and efficient use”, Elsevier Science, Amsterdam (1993).
16. Xu, W. and Tomita, A., “Effect of coal type on the flash pyrolysis of various coals”, Fuel, 66, 632 (1987).
17. 김상돈, “석탄에너지변환기술”, 민음사 (1985).