

유연탄 발전소에서의 PM 및 PM2.5 배출특성

Emission Characteristics of PM and PM2.5 from Bituminous Coal Combustion Power Plants

윤영식 · 김정훈 · Deepak Pudasainee · 손승욱 · 박광규¹⁾ · 박경일¹⁾ · 서용철*

연세대학교 환경공학부, ¹⁾한국전력공사 전력연구원

(2010년 1월 7일 접수, 2010년 3월 30일 수정, 2010년 4월 21일 채택)

Young-Sik Yoon, Jeong-Hun Kim, Deepak Pudasainee, Seung-Uk Son,
Gwang-Kyu Park¹⁾, Kyoung-Il Park¹⁾ and Yong-Chil Seo*

Department of Environmental Engineering, Yonsei University

¹⁾Korea Electric Power Research Institute

(Received 7 January 2010, revised 30 March 2010, accepted 21 April 2010)

Abstract

Particles emitted from three coal-fired power plants burning bituminous and sub-bituminous coals were examined for PM and size fractions PM_{>2.5} and PM_{2.5}. The ratio of PM_{2.5}/PM was ranged from 10 to 62%, and PM emission increased with the amount of coal feed, which was 7.23~15.66 kg/h. The emission range of PM_{2.5} from three power plants was 1.24~4.48 kg/h (dry), which was function of the mixed rate of viscous sub-bituminous coal in feed. Of course such effect should be examined by further tests in details. Based on the consumed coal and thermal load, the emission factors averaged were shown as 59.03 g-PM/ton-coal, 14.79 g-PM_{2.5}/ton-coal and 22.51 g-PM/MWh, 5.54 g-PM_{2.5}/MWh, respectively.

Key words : PM, PM_{2.5}, Bituminous coal, Sub-bituminous coal, Emission factor

1. 서 론

최근 선진국을 중심으로 PM_{2.5}의 건강위해성에 대한 관심이 높아지면서 규제와 관리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 대기오염 저감에 대한 비용편익분석에 있어서 대표적인 도시 대기오염물질인 오존(O₃)보다 미세먼지의 저감을 위한 투자가 훨

씬 큰 사회적 편익을 창출한다는 사실이 보고되어 있다(Krupnick and Portney, 2001). 이러한 미세먼지는 대기 중의 아황산가스와 복합적으로 작용하여 기침, 천식 등 각종 호흡기질환을 유발하거나 시정거리를 감소시키는 등, 다양한 사회적 비용을 유발하게 된다. 미세먼지는 다른 오염물질과는 달리 일정 수준 이하에서는 건강상의 영향이 없는 '문턱점'이 존재하지 않는 특징을 보이는데, 이는 아주 낮은 농도에서도 인체에 부정적 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 또한 기존의 연구결과에 의하면, PM₁₀ 기준치 이하 먼지

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)33-760-2438, E-mail : seoyc@yonsei.ac.kr

농도에서도 단기(1~5일 이하)와 장기(1~수년)노출에 따른 인체 건강상의 피해가 있음이 입증되었고, 조기사망, 어린이와 친식환자의 폐기능 감소, 허파조직과 구조 그리고 호흡기 계통의 방어기작의 이상변화를 지적하였다(Kim and Hong, 2004). 실제로 미국에서는 PM10과 PM2.5에 대한 일반 대기질 농도와 배출원별 농도를 측정하여 배출경향을 파악하고 저감방안을 마련하는데 노력하고 있다. 미세입자에 대한 인체에 미치는 유해한 영향뿐만 아니라 환경적 영향에 대해서도 관심을 갖고 있으며, 배출량 저감에 대한 노력을 기울인 결과 1993년부터 2002년까지의 에너지산업 연소 부분에서 PM10 배출량은 1,100 ton/yr에서 900 ton/yr 정도로 감소하였으며, PM2.5는 약 700 ton/yr에서 500 ton/yr로 감소하는 경향을 보였다(US EPA, 2003). 우리나라의 경우 국립환경과학원의 대기오염물질 배출량 통계에 1999년부터 2007년까지의 산업별, 연도별, 시도별 PM10 배출량자료가 명시되어 있다. 우리나라의 에너지산업 연소 부분에서의 배출량은 1999년에는 7,066 ton/yr으로 조사되었고, 2007년에는 2,951 ton/yr로 감소하였으며, 이러한 배출량의 관리를 위해 배출계수를 개발하여 대기오염제어 정책의 일환으로 활용하고 있다(Yoo *et al.*, 2002). 미세입자는 가시광선을 감소시키는 주요 원인이 되며, 입자들이 토양, 식물, 수체 등에 침적될 때 환경적인 문제가 발생된다. 예를 들어, 땅과 수체 위에 침적된 질소와 황을 함유한 입자들은 영양소의 균형과 이들 환경의 산도를 변화시키며, 생물종의 구성과 완충능력의 변화를 초래할 수 있다. 식물의 잎에 직접적으로 침적된 입자들은 화학적 성분에 따라 잎

의 표면을 부식시키거나 식물의 물질대사를 방해할 수 있으며, 결정적으로 문화적으로 중요한 건축물, 석상, 기념비 등을 오염시키고 부식을 유발한다.

우리나라의 입자상 물질에 대한 규제는 일반대기질의 경우 PM10을 기준으로 관리되며, 배출원의 경우 총 먼지를 기준으로 관리하고 있다. PM2.5의 경우 점오염원에서 배출되는 입자상 물질의 크기 중에서 인체의 건강과 가장 관련이 깊다(Richards, 1996; US EPA, 1996). 하지만 그 위해성에 대한 인식은 있으나 국내 대형시설에서의 배출량에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 국내 점오염원 중에서 유연탄 연소시설의 PM2.5 배출특성을 연료의 연소 조건에 따라 측정 및 조사하여 향후 PM2.5에 대한 관리방안의 마련과 연구의 기반을 제공하고 자 한다.

2. 측정 및 분석 방법

2.1 측정 시설

국내 유연탄 발전소 중에서 규모가 큰 세 곳의 시설을 선정하여 측정하였다. 각 시설의 발전설계용량은 500MW로 동일하다. PM2.5와 PM의 측정은 각 시설별로 두 차례에 걸쳐 수행되었으며, 2차 측정부터 배출농도 데이터의 비교를 위해 각 발전시설의 발전전력량을 약 500MW로 유지하였다. 본 연구는 전력연구원에서 주관하는 과제의 일환으로 수행되었기 때문에 발전전력량을 약 500MW로 유지하는 것에 대한 요구사항의 협조를 얻을 수 있었다. 또한 측

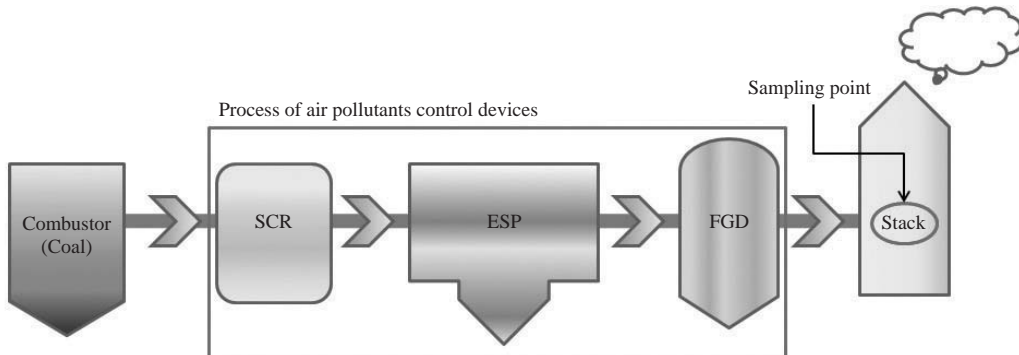


Fig. 1. Process of APCDs and sampling point.

정 시설로 선정된 유연탄 발전소 3개소는 모두 동일한 대기오염방지설비를 갖추고 있으며, 그 구성과 측정지점을 그림 1에 나타내었다. 각 발전시설의 대기오염방지설비는 탈질설비(SCR, selective catalytic reduction), 전기집진기(ESP, electrostatic precipitator), 탈황설비(FGD, flue gas desulfurization)로 구성되어 있다. 본 연구의 측정 대상 물질인 입자상 물질은(또는 PM과 PM2.5는) 전기집진기에서 제어되며 측정 대상 업체 모두 cold-type의 ESP를 설치하여 운영하고 있다. 배가스의 흐름은 유연탄 연소로에서 발생되어 대기오염방지시설인 SCR, ESP, FGD를 거쳐 Stack으로 배출되며, 측정은 각 시설의 Stack과 FGD 후단에서 이루어졌다. Stack에서의 측정이 불가능하거나 용이하지 않은 경우에 FGD 후단에서 측정하였다.

2.2 측정 방법

본 연구의 측정대상 물질인 PM, PM2.5는 모두 등

속흡인에 의한 측정방법을 사용하였다. 분석 대상 물질별 표준시험방법은 PM의 경우 US EPA Method 5를 참고하였으며 PM2.5는 US EPA Method 201 A를 기본 바탕으로 OTM 27을 적용하였다. PM>2.5의 경우 PM의 측정 결과에서 PM2.5를 제외한 나머지 농도로 나타내었다.

그림 2는 배출원의 측정지점에서 PM을 채취하기 위한 sample train의 구성이다. 측정에 사용된 여과지는 사전에 건조된 것이어야 하며 20±5.6°C의 온도와 대기 앞에서 최소 24시간 건조시켜 6시간마다 여과지의 무게를 측정해 무게의 전후 차이가 0.5 mg 이하가 되도록 한다. 대안으로 105°C에서 2~3시간 건조시킨 후 방냉하여 준비한다(US EPA, 1990a). 다음 그림 3은 PM2.5를 측정하기 위해 표준시험법을 조합하여 재구성한 방법을 보여주고 있다. US EPA Method 201A는 PM10과 10µm 이상의 입자상 물질을 측정하기 위한 시험방법이며, OTM 27의 경우 PM2.5

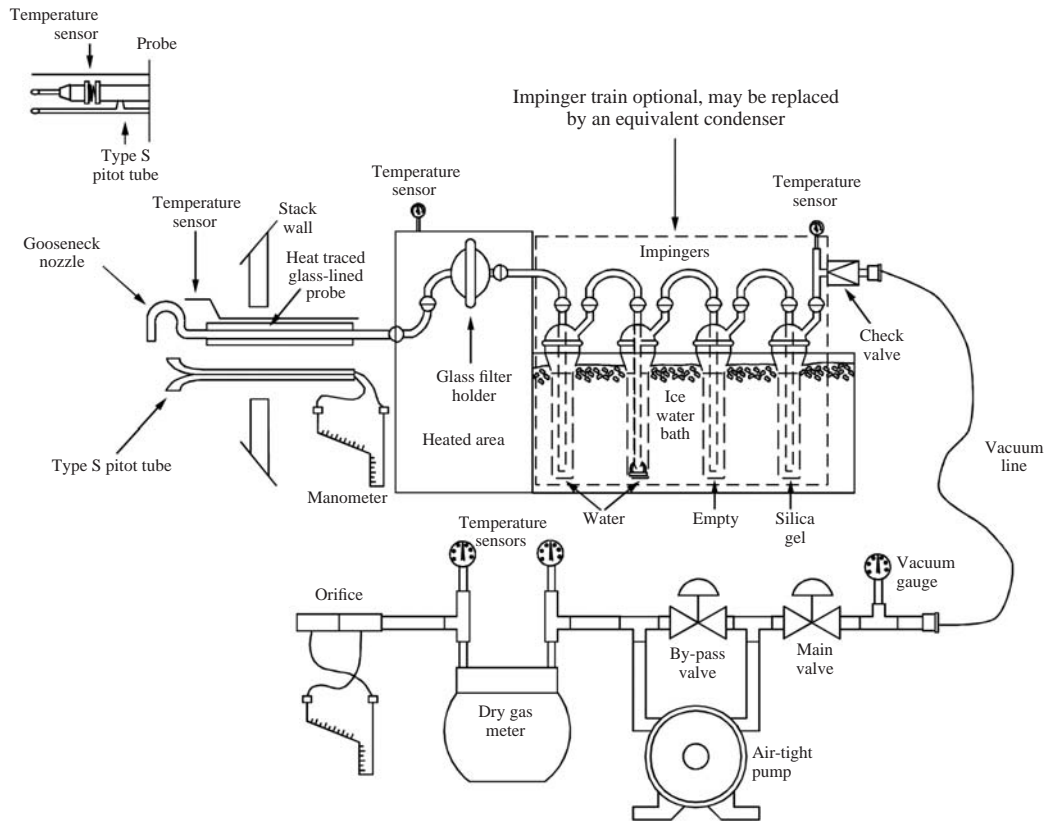
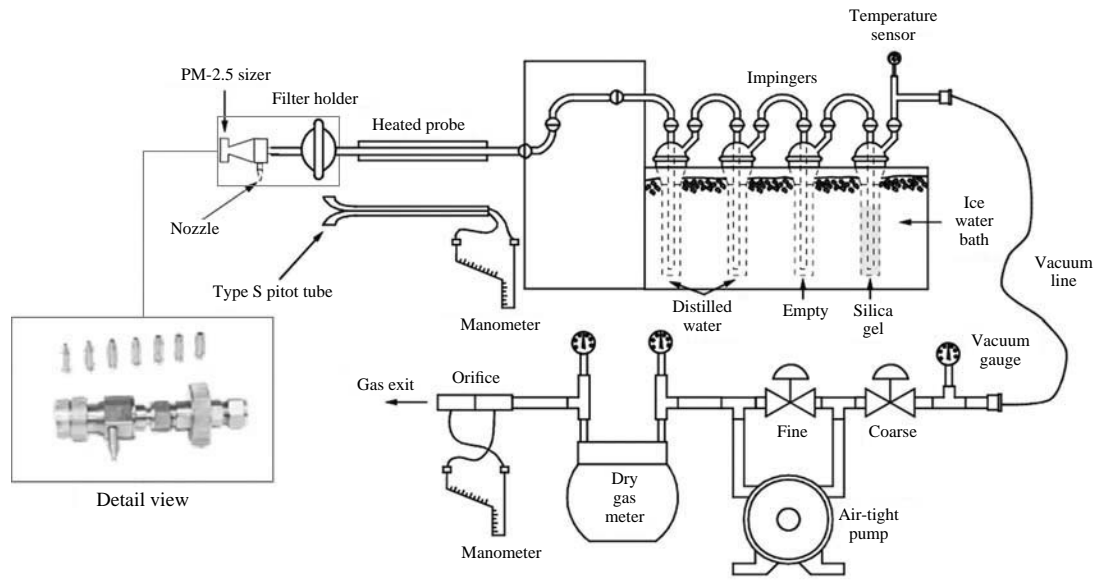


Fig. 2. US EPA Method 5 sample train.



USEPA OTM 27 sample train (modified to exclude PM10)

Fig. 3. US EPA OTM 27 sample train (modified to exclude PM10).

Table 1. Used pulverized coal blends.

	Plant 1		Plant 2		Plant 3	
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Temp. (°C)	90.9	84.0	94.6	85.0	90.9	83.3
DGM* (Sm ³)	2.983	2.819	2.962	2.564	2.486	2.365

*Dry Gas Meter

를 추가적으로 측정할 수 있는 시험방법이다(US EPA, 2008, 1990b). 본 연구에서는 PM2.5의 데이터를 얻기 위해 probe의 앞부분에 PM2.5 cyclone (Apex, Model PM2-K Cyclone kit)으로 측정하였다. PM2.5의 filter 또한 사전에 준비하였으며, 준비 과정 및 방법은 위의 Method 5와 동일하다. 배가스 중에 포함된 입자상 물질은 노즐을 거쳐 Cyclone을 통과하면서 입자직경 2.5µm 이상은 그림 3의 PM2.5 Sizer 부분에 포집되고, 2.5µm보다 작은 크기의 입자들은 filter holder 내부의 47 mm GF/C filter에 포집된다(US EPA, 2008). 표 1은 측정 당시 Stack에서의 온도와 건조기준 포집 가스량(DGM)을 나타낸 것이다.

2.3 분석 방법

PM과 PM2.5 배출농도를 측정하기 위해 각 시설의 측정에 사용된 filter의 질량을 건조된 상태에서 측정한다. 그 다음 측정 전의 filter와 측정 후 filter의 질량의 차이와 건조배출가스량으로 산정한다(US EPA 2008, 1990a, b).

2.4 Pulverized coal data

표 2는 세 곳의 유연탄 연소시설에서 측정 당시 사용된 유연탄의 종류와 투입량을 나타낸 것이다. 모든 유연탄 연소시설에서 혼합탄을 사용하였으며 유연탄 상품명과 함께 혼합비율을 %로 나타내었다. 각 발전소의 건조되지 않은 유연탄 투입량은 4,205~4,952 ton/day로 조사되었다. 혼합탄은 역청탄(Bituminous coal)과 아역청탄(Sub-bituminous coal)을 섞은 분말탄이며 아역청탄이 섞이는 비율은 30~50%로 시설별로 약간의 차이가 있었다. 역청탄과 아역청탄의 차이점은 탄화도(고정탄소 함유량), 휘발분 함유량, 발열량, 점결성 등으로 구분할 수 있으며 보통 아역청탄보다 역청탄의 탄화도와 발열량이 높고 휘발분 함유량과 점결성이 적다. 또한 석탄 소비량과 함께 각 시설에

Table 2. Used pulverized coal blends.

Used pulverized coal		Test 1			Test 2		
Plant 1	Coal (%)	Bit.-1 (28)	Bit.-2 (42)	Sub-bit. (30)	Bit.-1 (36)	Bit.-2 (20)	Sub-bit. (44)
	Feed (ton/d)	1,165.0	1,778.0	1,262.0	1,551.6	862.0	1,896.4
	Total (ton/d)	4,205.0			4,310.0		
Plant 2	Coal (%)	Bit. (60)	Sub-bit. (40)	—	Bit. (50)	Sub-bit. (50)	—
	Feed (ton/d)	2,869.2	1,912.8	—	2,476.1	2,476.1	—
	Total (ton/d)	4,782.0			4,952.2		
Plant 3	Coal (%)	Bit. (70)	Sub-bit. (30)	—	Bit. (62)	Sub-bit.-1 (32)	Sub-bit.-2 (6)
	Feed (ton/d)	3,236.1	1,386.9	—	2,767.1	1,428.2	267.8
	Total (ton/d)	4,623.0			4,463.0		

Note) Bit.: Bituminous coal, Sub-bit.: Sub-bituminous coal

Table 3. Properties of feed coal.

Property	Plant 1		Plant 2		Plant 3	
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Moisture as analyzed (wt%)	12.41	15.63	14.27	12.75	15.58	15.38
Proximate analysis, dry (wt%)						
Ash	14.62	13.58	12.73	10.24	13.30	11.07
Volatile	31.01	31.35	34.95	35.48	28.66	31.44
Fixed carbon	54.37	55.07	52.32	54.28	58.04	57.49
Heatind value, dry						
Gross calorific value (cal/g)	6,835.0	6,732.6	6,500.0	6,842.0	6,916.0	6,901.0
Gross calorific value (MWh/t)	7.949	7.830	7.560	7.957	8.043	8.026

서 사용된 탄종과 혼탄비율을 나타내었다. 석탄의 종류에 따라 발열량과 수분함유량이 다르기 때문에 발전용량이 비슷한 수준이라 할지라도 일일 석탄소비량의 차이를 보일 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Properties of feed coal

입자상 물질의 배출과 유연탄 연소시설에서 사용된 석탄의 상관관계를 알아보기 위해 공업분석(TGA, Thermogravimetric analysis)과 발열량 분석을 하였으며 표 3에 나타내었다(US EPA, 2005). 각 시설에서 사용된 석탄시료에 대한 분석 항목은 수분(Moisture), 재(Ash), 휘발분(Volatile), 고정탄소(Fixed carbon), 발열량(Heating value)으로 각 시설의 시료를 비교하였다. 공업분석에 사용된 측정 장비는 공업분석기(Leco, Model TGA-601)이며, 시험방법은 ASTM

E 2402-05를 적용하였다. 분석결과를 보면 모든 시설에서 비슷한 결과를 보였다. 수분은 12.41~15.63%로 Plant 1의 Test 1에서 가장 낮은 값을 나타냈으며, Plant 1의 Test 2에서 가장 높은 값을 보였다. Ash 함량은 10.24~14.62%, Volatile 함량은 28.66~35.48%, Fixed carbon 함량은 52.07~58.04%로 나타났다. 발열량의 경우 단일열량계(Leco, Model AC-350)를 사용하여 혼합 미분탄의 발열량을 측정하였으며, 6,500.0~6,916.0 cal/g로 나타났다.

발열량 분석 결과를 통해 소비되는 석탄에 대한 순수 발전량을 산정해본 결과 1 ton당 약 8 MWh의 열량이 생산되는 것으로 나타났으며, 측정 시설의 발전 효율이 약 40%임을 감안한다면 일일 석탄소비량과 효율을 통해 시간당 전력생산량을 추정할 수 있을 것이다. 이에 대한 내용을 표 4에 나타내었다. 각 시설별 발전 용량은 500 MW로 동일하며 측정 당일의 평균 발전 전력을 한 시간 평균으로 나타내었다. 평균 발전량은 486.3~519.2 MW이며, 1차 측정에서는 시

Table 4. Power generating results by plant.

Power generating results by plant	Plant 1		Plant 2		Plant 3	
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Generating facilities (MW)	500	500	500	500	500	500
Average load (MW)*	486.3	501.8	506.0	501.4	519.2	501.1
Gross generation (GWh)**	4,112.8	4,181.6	4,351.9	4,351.9	4,132.7	4,312.0

Note) *: Average of one hour, **: Gross generation per annum (2008)

설별로 차이가 약간씩 있지만 2차 측정에서는 보다 정확한 데이터의 확보를 위해 약 500 MW로 발전 전력량을 유지하였다.

2008년에 생산된 각 시설별 전력량 또한 표 4에 나타내었다. 통계자료에서 산정된 자료이며, 4,112.8~4,351.9 GWh로 약간의 차이를 보였다. 연간 발전량의 차이는 시설의 가동률에 따라 차이가 날 수 있으나 일일 평균 발전량은 거의 동일하다.

3. 2 PM 배출특성

입자상 물질의 배출특성을 알아보기 위해 Stack에서의 PM, PM2.5의 농도를 측정하였으며, 각 시설에서 사용된 석탄의 특성을 분석하였다. 이러한 자료를 바탕으로 유연탄 연소시설에서의 입자상 물질 배출량을 산정하여 배출특성에 대한 경향을 알아보고, 배출계수를 도출할 수 있을 것이다. 앞서 언급한 배출계수는 당해 배출시설의 단위연료 사용량, 단위제품 생산량, 단위연료 사용량, 단위폐기물 소각량 또는 처리량당 발생하는 대기오염물질량을 말한다. 본 연구에서는 각 시설별 배출특성을 연구하기 위해 배출농도를 측정하여 발전량과 석탄소비량을 기준으로 배출계수를 도출하였으며, 연구결과를 총괄하여 표 4에 정리하였다.

본 연구와 유사한 연구사례인 Yoo *et al.* (2005)에서는 대기오염방지시설을 거치지 않은 상태에서의 입자상배출특성에 대해 연구하였으며, 석탄에 함유된 재의 비율이 높을수록 PM, PM10, PM2.5의 배출량이 증가한다고 하였다. 사용된 석탄의 Ash 함유량이 높을 경우, PM 배출농도가 증가할 것으로 예측하였으나 실험의 결과에서 Ash의 함유량이 높은 Plant 1과 3이 오히려 낮은 PM 배출농도를 보였다. Stack으로 배출되는 PM의 농도는 석탄의 Ash 함유량보다는 입자상 물질을 제어하는 ESP의 운전효율과 연소특성에서 영향을 받을 수 있으며, 비록 각 시설의 연소공정이 유

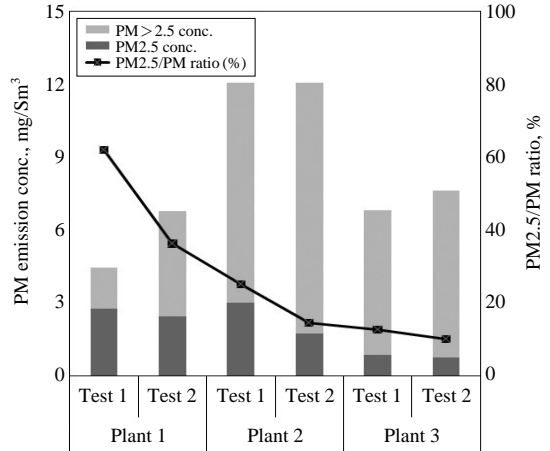


Fig. 4. PM emission concentration.

사하고 동일한 종류와 순서의 대기오염방지시설비를 운영하고 있다고 하더라도 연소조건과 특성, 집진설비의 효율에 따라 다를 수 있다 (Kim *et al.*, 2004). 연소 특성 및 집진설비의 효율과 PM의 배출특성에 대한 상관관계를 규명하기 위해서는 집진설비의 운전조건과 연소로에 유입되는 미분탄의 입자크기 분포에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Stack에서 측정된 O₂, CO₂, NO_x, SO_x의 농도에서 측정 당시의 연소특성을 예측할 수 있다. Plant 2는 다른 시설에 비해 과잉공기량이 많거나 연소효율이 낮은 것으로 사료되며, 연소효율이 낮을 경우 연료에 포함된 Ash 성분 이외에 미연분이 분진으로 배출될 가능성이 높으며, 높은 과잉공기비로 인한 연소로 내에서의 NO_x 발생량이 다른 시설에 비해 높을 것으로 예측된다.

그림 4는 Stack에서 측정된 입자상 물질의 배출농도와 PM2.5/PM 비를 나타낸 결과이다. 각 시설에서의 Test 1과 2를 보면 PM, PM2.5 배출농도, PM2.5/PM

Table 5. Estimation results of PM emission.

Property	Plant 1		Plant 2		Plant 3	
	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2	Test 1	Test 2
Ash content of feed coal (wt%, dry)	14.62	13.58	12.73	10.24	13.30	11.07
Bit. content of feed coal (%)	70	56	60	50	70	62
Sub-bit. content of feed coal (%)	30	44	40	50	30	38
PM emission conc.						
PM conc. (mg/Sm ³)	4.45	6.76	12.05	12.06	6.81	7.61
PM>2.5 conc. (mg/Sm ³)	1.69	4.31	9.03	10.31	5.95	6.85
PM2.5 conc. (mg/Sm ³)	2.76	2.45	3.02	1.75	0.86	0.76
PM2.5/PM ratio (%)	61.95	36.25	25.07	14.51	12.69	10.02
PM emission rate						
Flue gas flow rate (Sm ³ /min)	27,062	25,809	21,667	21,205	23,975	20,701
PM emission rate (kg/h)	7.23	10.47	15.66	15.35	9.79	9.45
PM>2.5 emission rate (kg/h)	2.75	6.67	11.73	13.12	8.55	8.50
PM2.5 emission rate (kg/h)	4.48	3.80	3.93	2.23	1.24	0.95
PM emission factor						
Feed coal (g/ton-coal)						
PM	41.25	58.33	78.61	74.38	50.82	50.81
PM>2.5	15.70	37.19	58.90	63.59	44.37	45.72
PM2.5	25.55	21.14	19.71	10.79	6.45	5.09
Generation (g/MWh)						
PM	14.86	20.88	30.96	30.61	18.86	18.86
PM>2.5	5.65	13.31	23.20	26.17	16.47	16.97
PM2.5	9.21	7.57	7.76	4.44	2.39	1.89
Stack gas emission						
O ₂ (%)	3.8	4.8	6.3	6.7	4.5	6.1
CO ₂ (%)	9.9	9.9	15.2	15.0	14.3	6.7
NO _x (ppm)	63.2	64.6	78.7	85.0	56.4	51.7
SO ₂ (ppm)	23.9	38.4	32.3	42.7	22.1	34.7

비가 유사한 경향을 보이고 있다. 하지만 이는 같은 시설의 분석결과에만 해당되며 시설끼리의 비교에서는 어떠한 경향성도 찾을 수 없다. Plant 1의 경우 다른 시설에 비해 PM 배출농도는 가장 낮지만 PM2.5의 배출농도는 세 시설 중에서 가장 높은 결과를 보였다. Plant 2의 경우 가장 높은 PM 농도를 나타냈으며 Plant 3은 가장 낮은 PM2.5 배출농도를 보였다.

각 시설의 PM 배출농도 측정결과는 그림 4의 왼쪽부터 4.45 mg/Sm³, 6.76 mg/Sm³, 12.05 mg/Sm³, 12.06 mg/Sm³, 6.81 mg/Sm³, 7.61 mg/Sm³ 마찬가지로 PM2.5의 배출농도 측정결과는 2.76 mg/Sm³, 2.45 mg/Sm³, 3.02 mg/Sm³, 1.75 mg/Sm³, 0.86 mg/Sm³, 0.76 mg/Sm³로 조사되었다. PM의 배출농도(mg/Sm³)와 배가스량(Sm³/min)으로 각 시설별 PM 배출량(kg/h)을 산정하여 표 5에 나타내었다. 배가스량은 온도와 압력이 보정된 건조가스량이며 각 시설별 입자상 물질의 배출량은 PM의 경우 그림 5의 시설 순서대로

7.23 kg/h, 10.47 kg/h, 15.66 kg/h, 15.35 kg/h, 9.79 kg/h, 9.45 kg/h로 조사되었으며 PM2.5의 경우 4.48 kg/h, 3.80 kg/h, 3.93 kg/h, 2.23 kg/h, 1.24 kg/h, 0.95 kg/h로 산정되었다.

그림 5는 각 시설에서 사용된 혼합 분말탄의 아역청탄 비율과 PM의 배출특성에 대한 연관성을 보여주는 결과이다. 측정 당시 세 곳의 유연탄 연소시설은 역청탄(Bit. coal)과 아역청탄(Sub-bit. coal)이 혼합된 연료를 사용하고 있었으며 각 시설의 혼합 비율은 30~50% 범위로 조사되었다.

혼합 비율은 각 시설별로 차이가 날 뿐만 아니라 동일한 시설에서의 Test 1과 2도 차이를 보이고 있어서 PM 배출량의 변화에 대한 경향을 분석할 수 있다. 각 측정 시설의 Test 1과 2를 비교하면 아역청탄의 혼합비율이 높아질수록 PM2.5의 배출량이 감소하는 경향을 보였다. Plant 1의 경우 아역청탄의 혼합비율은 Test 1-30%, Test 2-44%로 혼합비율이 높은

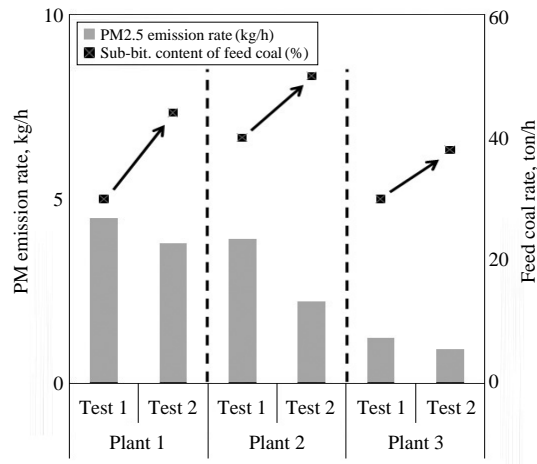


Fig. 5. PM emission rate as Sub-bit. content.

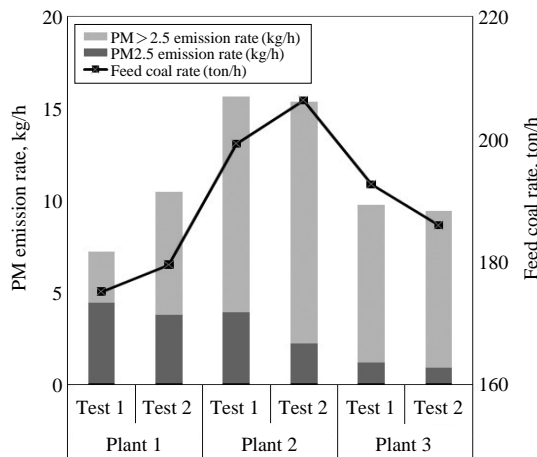


Fig. 6. PM emission rate as feed coal rate.

측정 시기에 PM의 배출량은 증가하였으나 오히려 PM2.5의 배출량은 줄어들었다. 다른 시설들도 마찬가지로 아역청탄의 혼합비율이 높아질수록 PM2.5의 배출량이 줄어드는 경향을 보였으며 이는 점결성이 높은 아역청탄의 혼탄비율이 높아졌기 때문인 것으로 사료된다. 석탄의 점결성은 연소로 내에서의 입자 형성에 영향을 미칠 수 있으며 점결성이 큰 아역청탄의 경우 연소로에서 조대입자를 형성하여 미세입자(PM2.5)의 배출량이 감소하는 영향을 미치는 것으로 판단된다(Chon and Kim, 1994). 또한 연소로에

Table 6. PM emission factor.

PM emission factor	Plant 1	Plant 2	Plant 3	Avg.
Feed coal (g/ton-coal)				
PM	49.79	76.50	50.82	59.03
PM2.5	23.35	15.25	5.77	14.79
Generation (g/MWh)				
PM	17.87	30.79	18.86	22.51
PM2.5	8.39	6.10	2.14	5.54

투입되는 미분아역청탄의 입자크기의 분포도 영향을 미칠 수 있으며, 이에대한 추가적인 연구가 필요하다.

그림 6은 시간당 석탄 사용량과 PM의 배출량에 대한 관계를 나타낸 것으로 Plant 2에서의 PM 배출량이 다른 시설에 비해 높은 이유를 설명한다. 측정 당시 Plant 2의 일일 석탄 소비량이 다른 시설에 비해 약 200~800 ton 가량 많은 것을 표 2에서 확인할 수 있다. 또한 석탄 사용량에 비례하여 PM 배출량이 증가하였으며 이로써 PM의 배출량에 가장 직접적으로 영향을 미치는 요인이 석탄의 사용량임을 알 수 있다. 하지만 PM2.5의 배출량에 영향을 미치는 주요 인자는 석탄의 소비량보다 앞서 언급한 아역청탄의 혼합비율이 관련이 있는 것으로 사료된다.

3.3 PM emission factor

배출계수는 두 가지 방법으로 산정하였는데, 하루 평균 소비되는 석탄의 양에 대한 PM의 배출량(g/ton-coal)과 각 시설별 평균 부하량에 대한 PM의 배출량(g/MWh)으로 산정하였다. 이렇게 두 가지 방법으로 산정한 이유는 석탄의 사용량이 PM 배출량에 영향을 미치는 주요 원인이기도 하지만 발전시설과 같이 유사한 설계구조와 연소조건에 대한 배출계수의 산정도 중요하다고 사료되기 때문이다. 표 6은 각 Test 별로 산정된 배출계수를 시설에 대해서 평균한 결과이다. 석탄 사용량에 대한 PM과 PM2.5의 배출계수는 각각 평균 59.03 g/ton-coal (49.79~78.50), 14.79 g/ton-coal (5.77~23.35)이며 평균 부하량에 대한 PM과 PM2.5의 배출계수는 각각 평균 22.51 g/MWh (17.87~30.79), 5.54 g/MWh (2.14~8.39)로 조사되었다.

US EPA의 AP-42에서 산정된 PM의 배출계수는 40 g/ton-coal, PM2.5의 배출계수는 12 g/ton-coal로

조사되었으며, 본 연구결과와 비교할 때 유사한 것으로 나타났다(US EPA, 1995).

4. 결 론

유연탄 연소시설의 PM2.5와 PM 배출특성을 연구하기 위해 총 두 차례에 걸쳐 세 곳의 시설을 측정하였으며, 배출 특성은 석탄의 분석결과와 소비량, 발전 전력량, 배가스 분석을 통한 연소효율 예측을 바탕으로 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

PM2.5/PM의 비율은 10.02~61.95%로 나타났다. 석탄의 소비량은 PM의 배출량에 가장 큰 영향을 미치며 상대적으로 석탄소비량이 많은 Plant 2의 PM 배출량이 가장 높은 것으로 조사되었으며, 각 시설별 배출농도의 차이는 연소조건과 방지시설의 효율에 따른 차이로 사료된다. 각 시설별 배출량의 범위는 7.23~15.66 kg/h로 산정되었다.

배가스 중의 O₂농도가 가장 높은 Plant 2는 다른 시설에 비해 과잉공기비율이 높거나 연소효율이 비교적 낮은 것으로 사료되며, 이로 인해 다른 시설에 비해 PM의 농도가 높은 것으로 나타났다.

각 시설별 PM2.5 배출량은 0.95~4.48 kg/h의 범위를 보였다. Plant 1의 Test 1에서 가장 높았으며 Plant 3의 Test 2에서 가장 낮았다. PM2.5의 배출에 영향을 미칠 수 있는 요인은 역청탄보다 점결성이 높은 아역청탄의 혼합비율로 예상되며 신뢰성 있는 연구결과를 위해서는 보다 세밀한 연구가 필요하다.

소비석탄 기준 PM의 배출계수는 59.03 g/ton-coal, PM2.5는 14.79 g/ton-coal이다. 평균 부하량 기준 배출계수는 PM의 경우 22.51 g/MWh, PM2.5는 5.54 g/MWh로 산정되었으며, US EPA의 PM과 PM2.5의 배출계수와 비교할 때 유사한 것으로 조사되었다. 배출계수를 산정하는 데 있어서 비록 충분한 신뢰도를 확보할 만큼 측정 횟수가 많지는 않았지만 향후 유연탄화력발전소의 입자상물질 배출특성 연구에 있어서 국가 배출량 산정과 관리방안의 마련에 기초가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2008년 한전전력연구원의 지원을 받아

수행된 연구(제CX73-08-0055)의 결과이며, 폐기물에너지특성화 사업단의 대학원생 지원에도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Chon, H.-T. and M.-K. Kim (1994) A study on the physical and the geochemical properties of coals from hambaek and eunseong coal mines, The Korean society for geosystem engineering, 31(6), 565-574. (in Korean with English abstract)
- Kim, D.-G., Y.-S. Eom, J.-H. Hong, S.-J. Lee, K.-S. Seok, D.-G. Lee, E.-J. Lee, and S.-A. Bang (2004) A study on the estimation of air pollutants emission factors in electric power plants, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 20(3), 281-290. (in Korean with English abstract)
- Kim, W.-S. and Y.-S. Hong (2004) Study on PM10 emission inventories and management strategies in Seoul, Seoul development institute, 188pp.
- Krupnick, A. and P. Portney (2001) Controlling urban air pollution: A benefit-cost assessment, Science, 252(5005), 522-528.
- Richards, J.R. (1996) Test protocol: PCA PM10/PM2.5 emission factor and chemical characterization testing, Portland Cement Association. PCA R&D # 2081, 33pp.
- US EPA (1990a) 40 CFR part 60, Appendix A, Method 5-Determination of particulate matter emission from stationary source.
- US EPA (1990b) 40 SFR part 51 Appendix M, Method 201A-Determination of PM10 emission.
- US EPA (1995) Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I-Stationary Point and Area Source 5th Edition, Chapter 1, 1.1-15.
- US EPA (1996) Air quality criteria for particulate matter. National center for Environ Assessment, Office of Research and Development, Research Triangle Park, Chapter 11, 96-102.
- US EPA (2003) National air quality and emission trends Report-2003 Special studies edition, Chapter 2, 34pp.
- US EPA (2005) ASTM E 2402-05, Standard Test Method for Mass Loss and Residue Measurement Validation of Thermo gravimetric Analyzers.
- US EPA (2008) Other Tset Method (OTM) 27-Determining PM10 and PM2.5 Emissions from Stationary Sour-

- ces.
- Yoo, J.-I., K.-H. Kim, H.-N. Jang, Y.-C. Seo, K.-S. Seok, J.-H. Hong, and M. Jang (2002) The development of PM emission factor for small incinerators and boilers, *Environmental Technology*, 23(12), 1425-1433.
- Yoo, J.-I., Y.-C. Seo, and T. Shinagawa (2005) Particle-size distributions and heavy metal partitioning in emission gas from different coal-fired power plants, *Environmental Engineering Science*, 22(2), 272-279.