

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 16, No. 4: December 2020 pp. 131-140

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2020.16.4.131>

## 광산란법을 이용한 국내 석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 측정 및 분석

신 동 호<sup>1,2)</sup> · 김 영 훈<sup>1,2)</sup> · 홍 기 정<sup>1)</sup> · 이 건 희<sup>1)</sup> · 박 인 용<sup>1)</sup> · 김 학 준<sup>1)</sup> · 김 용 진<sup>1)</sup> · 한 방 우<sup>1,\*</sup> · 황 정 호<sup>2,\*</sup>

<sup>1)</sup>한국기계연구원 환경기계연구실

<sup>2)</sup>연세대학교 기계공학부

(2020년 12월 11일 투고, 2020년 12월 23일 수정, 2020년 12월 23일 게재확정)

## Measurement and analysis of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> from chimneys of coal-fired power plants using a light scattering method

Dongho Shin<sup>1,2)</sup> · Younghun Kim<sup>1,2)</sup> · Kee-Jung Hong<sup>1)</sup> · Gunhee Lee<sup>1)</sup> · Inyong Park<sup>1)</sup> ·  
Hak-Joon Kim<sup>1)</sup> · Yong-Jin Kim<sup>1)</sup> · Bangwoo Han<sup>1,\*</sup> · Junggho Hwang<sup>2,\*</sup>

<sup>1)</sup>Department of Environmental Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon, South Korea

<sup>2)</sup>Mechanical Engineering, Yonsei University, 50 Yonsei-Ro, Seoul, South Korea

(Received 11 Dec 2020; Revised 23 Dec 2020; Accepted 23 Dec 2020)

### Abstract

Air pollutants emitted from chimneys of coal-fired power plants are considered to be a major source of fine particulate matter in the atmosphere. In order to manage fine particle in the chimney of a coal-fired power plant, it is necessary to know the concentration of fine particle emitted in real time, but the current system is difficult. In this study, a real-time measurement system for chimney fine particle was developed, and measurements were performed on six coal-fired power plants. Through the measurements, the mass concentration distribution according to the particle size could be secured. All six chimneys showed bimodal distribution, and the count median diameters of each mode were 0.5 and 1.1  $\mu$ m. In addition, it was compared with the gravimetric measurement method, and it was determined that the relative accuracy for PM<sub>10</sub> was within 20%, and the value measured using the developed measuring instrument was reliable. Finally, three power plants were continuously measured for one month, and as a result of comparing the concentration of PM<sub>10</sub> according to the amount of power generation, it was confirmed that the PM<sub>10</sub> discharged from the chimney increased in the form of an exponential function according to the amount of power generation.

**Keywords:** Dilutor, Optical particle counter, coal-fired power plant, power generation, PM<sub>10</sub>

---

\*Corresponding Author

Tel : +82-42-868-7068, +82-2-2123-2821

E-mail : bhan@kimm.re.kr, hwangjh@yonsei.ac.kr

## 1. Introduction

급격한 산업시설의 발달로 근래 국내 미세먼지에 대한 국민들의 우려가 지속되고 있다. 국내 미세먼지의 주요 원인으로 석탄화력발전소 및 산업시설에서 배출되고 있는 대기오염물질(Lee et al., 2011; Kim et al., 2016), 도심 속 디젤 엔진의 연소가스(Groves and Cain, 2000; Lewis et al., 1989), 난방시설(Fernandes and Costa, 2012) 등이 있다. 정부 차원에서 석탄화력발전소의 배출 미세먼지를 줄이고자 하는 노력으로 미세먼지가 고농도로 발생하는 시기에 발전 출력을 제한하거나(Lee, 2020) Repowering기술과 같은 배출가스의 양을 줄이는 기술에 대한 연구(Baek et al., 2019)가 진행되었고, 실제로 미세먼지 농도가 감소하는 것을 확인하였다. 더불어 석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는 미세먼지에 대한 정보를 실시간으로 확보할 수 있다면 배기가스 후처리 장치 이벤트에 따른 배출 미세먼지의 농도 확인을 통해 배기가스 후처리 장치에 대한 관리가 용이할 수 있다.

현재 연소시설의 먼지를 측정하는 방법으로 중량법과 광투과법이 있다. 중량법으로 미세먼지를 측정하는 방법으로는 사이클론으로 입자 크기에 따라 분리하여  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 를 측정하는 EPA Method 201A (USEPA, 1996; Goodarzi and Saneji, 2009)와 다단 임팩터로 입자를 크기 별로 분리하여  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 를 측정하는 ISO23210 (ISO-23210, 2009; Wada et al., 2016)이 있다. 중량법은 직접 질량을 측정한다는 점에서 미세먼지 측정의 표준이 되는 방법이다. 하지만 한 회 측정하는데 있어 시간이 오래 걸리고, 그 시간 동안 변화하는 농도에 대한 정보를 알 수가 없다. 또한 하나의 질량 데이터를 얻기 위해서는 수 일이 걸리기 때문에 연속적으로 측정하기 어렵다. Park et al. (2018), Kim et al. (2017)은 국내 석탄화력발전소에서 EPA, ISO 방식 등을 사용하여  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  농도를 제시하고 있지만, 발전 출력에 따라 배출되는  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 의 농도가 변화를 반영하지 못하고 있다.

광투과법은 굴뚝의 한쪽에서 빛을 투과하여 반대편에서 빛의 세기가 변하는 정도를 측정하여 먼지의 농도를 측정하는 방법이다(Moteki et al., 2019). 광투과 방식의 경우 연속적으로 측정이 가

능하나 먼지의 총 질량농도만을 측정할 뿐 입자 크기를 분류할 수 없어 미세먼지의 농도를 알 수 없다.

본 연구에서는 광산란법 측정장비를 사용하여 고온 다습의 환경인 석탄화력발전소 굴뚝에서 미세먼지를 측정하기 위해 개발한 희석장치(Shin et al., 2019) 사용하여 6곳의 석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  농도를 실시간으로 측정하였다. 측정 결과를 이용하여 각 발전소 별로 입자 크기에 따른 질량농도 분포를 비교하였고, 중량법을 이용한 측정방법으로 측정된  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  농도와 상대정확도를 비교하였다. 마지막으로 각 발전소 별 발전량에 따른  $PM_{10}$  농도를 비교함으로써 굴뚝에서 측정한  $PM_{10}$  농도와 발전량 간의 관계를 정리하였다.

## 2. Experimental setup and method

Fig. 1은 석탄화력발전소 굴뚝에서 중량법 장비와 개발측정기를 가지고 측정한 것에 대한 개략도이다. 석탄화력발전소 굴뚝의 경우 고온, 다습, 고속의 환경으로 일반 대기 미세먼지 측정용 계측기를 직접 사용할 수 없다. 굴뚝 내부의 공기가 대기 중으로 나올 때 급격한 온도하강으로 인한 입자 응축현상이 발생하고, 빠른 유속으로 인해 등속흡입 조건을 만족시키지 못할 경우 상대적으로 큰 입자에서 농도가 크게 측정되는 경우가 발생 할 수 있기 때문이다(Dennis et al., 1957). 이러한 문제를 방지하고 정확한 미세먼지의 농도를 측정하기 위하여 이젝터를 사용한 2단 희석 장치를 통해 굴뚝 내 먼지를 샘플링 하였다. 1차 희석공기는 이젝터로 공급하였고, 2차 희석공기는 다공튜브로 공급하였다. 압축공기는 압축기(NCP052-T50; Air Maker, Korea)로 발생시켜 이젝터에 공급을 하였고, 이 과정에서 Air dryer (SHD-10, SEHAN Dryer Co. Ltd., Korea)와 high-efficiency particulate air (HEPA) 필터를 중간에 설치하여 깨끗한 건공기를 공급할 수 있도록 하였다. 다공튜브에 공급하는 2차 희석공기는 고압을 요구하지 않아, 상대적으로 소비전력이 적은 Ring blower (KJB3-400, Kijeonsa, Korea)와 HEPA 필터를 사용하여 공급하도록 하였다. 별도

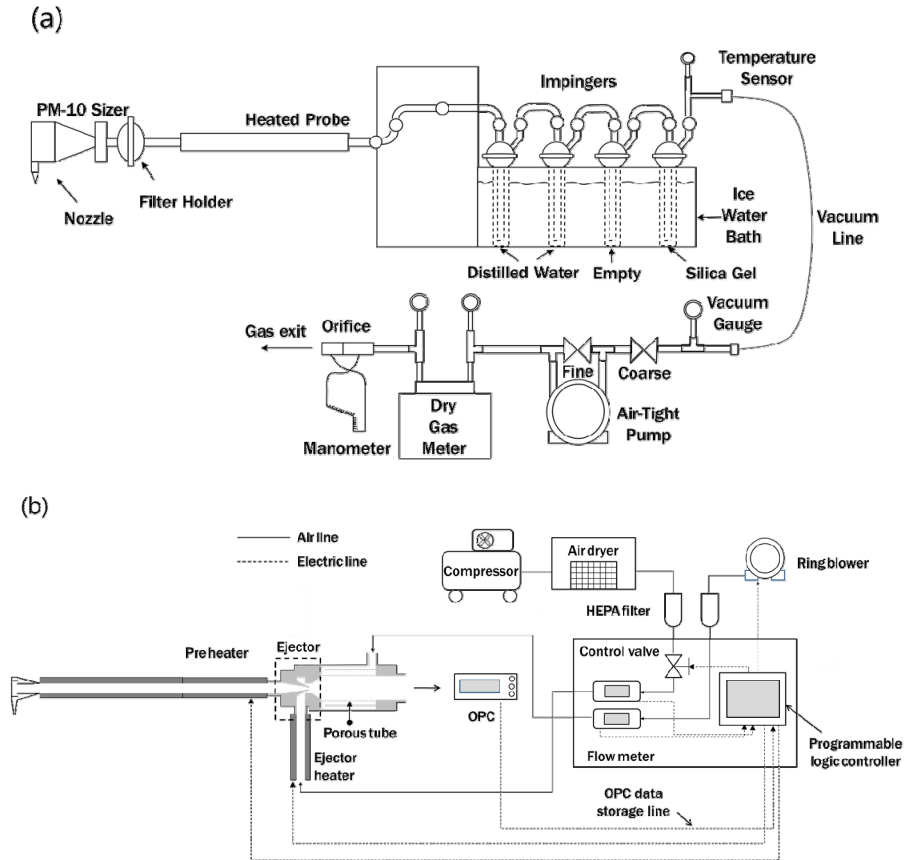


Figure 1. Schematic of (a) the gravimetric method measurement system and (b) the newly developed diluter system at coal-fired power plant chimneys.

의 Programmable Logic Controller (PLC)에 기반한 제어반을 제작하여 유량 및 온도제어를 하였다. 입자의 농도는 광산란 방식의 입자 개수기(OPC 1.109, Grimm, Germany)를 사용하여 실시간으로 측정하였다(Shin et al., 2020).

중량법 측정은 EPA method 201A (이하 EPA)와 ISO-23210 (이하 ISO) 방법을 사용하였고, 두 방법 모두 입자를 분리하는 방식만 다를 뿐 등속흡입 샘플링, 건공기 흡입 유량 및 먼지 포집을 통한 질량 측정 방식은 동일하다. 에어 펌프를 이용하여 측정하고자 하는 굴뚝 내부의 건공기를 샘플링하고 PM sizer에서 입자를 크기 별로 분리해 필터 홀더로 먼지를 포집하였다. EPA방식에서 입경 분리는 싸이클론 방식을 사용하고 있고, 본 연구에서

는 굴뚝 샘플링 구경의 크기로 인해 PM<sub>10</sub> 싸이클론만 설치하여 측정하였다. ISO방식은 다단임팩터 방식을 사용하여 입경을 분리하는 방식으로 PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub> 먼지를 동시에 포집 할 수 있어, ISO를 통해 측정된 PM<sub>2.5</sub>를 사용하여 개발측정기에서 측정한 PM<sub>2.5</sub>농도와 비교하였다. 필터에 포집된 먼지는 저울을 이용하여 질량을 측정하고 에어 펌프에서 흡입한 건공기의 부피를 측정하여 질량농도로 환산하였다.

본 연구는 총 6 곳의 국내 각각 다른 지역에 위치한 석탄화력발전소 굴뚝에서 먼지를 측정하였다. Table 1은 측정을 수행한 석탄화력발전소 굴뚝의 특징을 나타내고 있다. 6개의 발전소 모두 유연탄을 사용하고 있고 설비용량은 D, E 발전소가 1000

Table 1. Measurement information of coal-fired power plant chimneys

	Number of Measurements	Coal	Installed capacity (MW)	Temperature (°C)
A	7	Bituminous	500	95
B	9	Bituminous	870	89
C	7	Bituminous	500	84
D	7	Bituminous	1000	82
E	6	Bituminous	1000	146
F	10	Bituminous	500	87

MW 급으로 가장 크고 B 발전소가 870 MW급 A, C, F 발전소가 500 MW급이다. 굴뚝 내부 온도는 A, B, C, D, F는 80-100 °C였고, E는 146 °C로 다른 발전소 굴뚝에 비해 높았다. 그 이유는 A, B, C, D, F는 보일러에서 발생하는 배기가스가 촉매 환원장치(Selective Catalyst Reactor, SCR) (Stolle et al., 2014), 전기집진기(Electrostatic Precipitator, ESP) (Meij and Winkel, 2004), 습식탈황장치(Wet Flue Gas Desulfurization, Wet-FGD) (Córdoba, 2015)를 거쳐 굴뚝을 통해 대기로 배출되고, E는 순환유동층 보일러를 사용하여 따로 탈황 및 탈질 설비를 두지 않고 연소 시에 보일러로 직접 탈황제와 탈질제를 주입함으로써 질소산화물과 황산화물을 동시에 처리하고 보일러 후단에 ESP만 설치하여 먼지를 제거한 후 굴뚝을 통해 대기로 배출되는 방식이기 때문이다(Basu, 1999).

본 연구에서는 각 발전소 굴뚝에서 OPC를 사용하여 실시간으로 측정된 입자에 대한 입경에 따른 질량농도 분포를 분석하였다. 질량 농도 분포에서 Mass median diameter (MMD), Geometry standard deviation (GSD), Count median diameter (CMD)를 구하고 각 발전소 별로 비교하였다. MMD는 질량 농도분포 그래프를 Lognormal 크기 분포 및 질량 누적 분포 그래프로 나타낸 후 질량의 전체 합 중 50%가 되는 지점의 입자 크기를 구해 도출하였다. GSD는 아래 식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_g = \frac{d_{84\%}}{d_{50\%}} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_g$ 는 GSD를 의미하고,  $d_{84\%}$ 는 질량 누적 분포에서 전체 질량의 84% 지점의 입자 크기를 의미하고,  $d_{50\%}$ 는 50% 지점의 입자 크기를 의미한다.

CMD는 아래 식을 사용하여 계산하였다.

$$\text{MMD} = \text{CMD} \times \exp(3 \times \ln^2 \sigma_g) \quad (2)$$

또한 각 발전소에서 중량법(EPA, ISO)과 OPC를 사용하여 측정된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 농도 비교를 상대 정확도로 나타냄으로써 객관적인 비교를 하였다. 상대정확도는 대기오염공정시험기준에 표기된 먼지-굴뚝배출가스에서 연속자동측정 방법(ES01810.1a, 2011)을 사용하였고, 아래 식을 통해 계산하였다.

$$\text{상대정확도}(\%) = \frac{\overline{|d|} + C.I_{95}}{\bar{X}} \times 100 \quad (3)$$

$$C.I_{95} = \frac{t_{,975}}{n \sqrt{n-1}} \sqrt{n(\sum di^2) - (\sum di)^2} \quad (4)$$

여기서  $\overline{|d|}$ 는 측정 오차의 평균,  $\bar{X}$ 는 중량법으로 구한 입자의 평균 질량농도,  $C.I_{95}$ 는 95%의 신뢰구간,  $di$ 는 각 측정치의 오차,  $n$ 은 측정횟수,  $t_{,975}$ 는 측정값이 참값의 95% 이내에 존재할 확률에 대한 t 값을 의미한다.

### 3. Experimental result and discussions

Fig. 2는 6개의 석탄화력발전소에서 측정된 입자 크기에 따른 질량농도분포를 나타내고 있다. 이를 토대로 Mode 직경과 MMD, GSD를 산출하였고, 식 (2)를 이용해 CMD를 계산하여 Table 2에 나타내었다. Fig. 2의 A부터 F 발전소까지 모두 다봉분포(Bi-modal)의 형태로 나타나있다. 다봉분포 형태의 그래프에서 각 모드 마다의 MMD와 GSD를 구하기 위해서는 다봉분포 안에 존재하는 두개의 모드를 구분하여 계산하여야 한다. 본 연구에서는 Matlab의 Curve fitting 옵션을 활용하여 각 그래프의 다봉분포를 두 개의 단일분포 그래프를 나타내는 식의 합으로 계산하였고, 이를 이용하

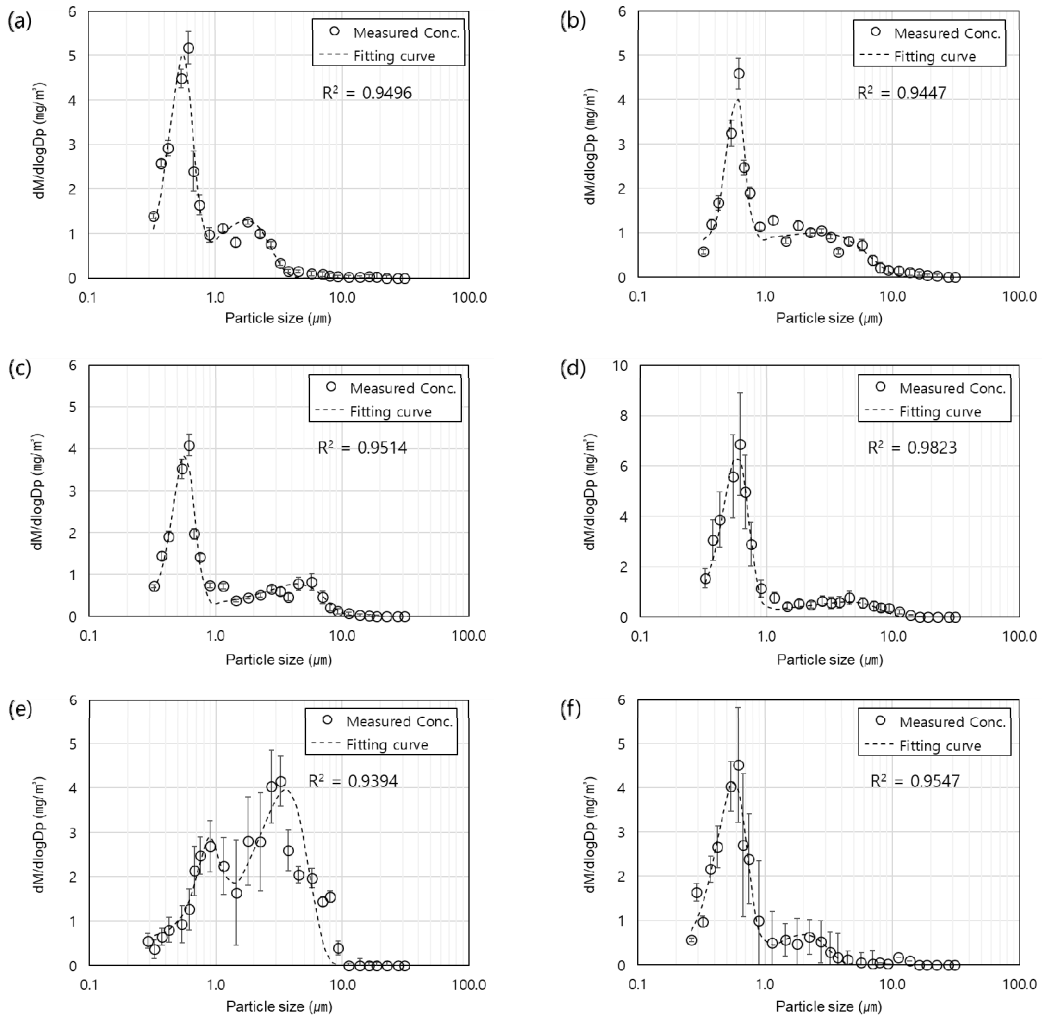


Figure 2. Particle size distributions in mass concentrations at coal-fired power plant chimneys. (a), (b), (c), (d), (e), (f) are from power plant A, B, C, D, E, F.

여 Fig. 2의 각 그래프마다 계산된 Fitting curve를 표시하였다. 이때, Least-Squares method를 사용하였고  $f(x) = a_1 \exp\left(-\frac{1}{2} \times \frac{(x - b_1)^2}{c_1^2}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{1}{2} \times \frac{(x - b_2)^2}{c_2^2}\right)$ 와 같은 가우스 함수의 형태로 나타내었다(Higham and Higham, 2016).

Fig. 2(a)는 A 발전소에서 중량법을 측정하는 동안 동시에 개발측정기를 사용하여 굴뚝 내 입경에 따른 질량농도 분포를 나타낸 것이다. 측정에 의해 나타난 질량농도 분포와 계산에 의해 나타난

Fitting curve가 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. A 발전소는 0.6, 1.8 μm 두 개의 모드 직경을 갖는 다분포를 나타내고 있다. 이 중 0.6 μm 모드의 질량농도는 5.2 mg/m<sup>3</sup>이고, 1.8 μm 모드의 질량농도는 1.3 mg/m<sup>3</sup>으로 A 발전소 굴뚝에서 1 μm 이하의 극초미세먼지가 더 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 0.62 μm 모드의 MMD는 0.51 μm, GSD는 1.31이고, 1.8 μm 모드의 MMD는 1.15 μm, GSD는 1.6이다. 이를 통해 CMD를 계산하면 0.49, 1.01 μm임을 알 수 있다.

Table 2. Mode, MMD, GSD and CMD for mass concentration distributions measured from coal-fired power plant chimneys

	Mode ( $\mu\text{m}$ )	MMD ( $\mu\text{m}$ )	GSD	CMD ( $\mu\text{m}$ )
A_1st peak	0.62	0.51	1.31	0.49
A_2nd peak	1.80	1.15	1.60	1.01
B_1st peak	0.62	0.48	1.22	0.47
B_2nd peak	2.25	1.20	1.79	0.99
C_1st peak	0.62	0.46	1.33	0.44
C_2nd peak	4.50	1.30	1.70	1.11
D_1st peak	0.62	0.53	1.32	0.51
D_2nd peak	4.50	1.61	1.80	1.32
E_1st peak	0.90	0.55	1.25	0.53
E_2nd peak	2.80	1.60	1.67	1.38
F_1st peak	0.62	0.50	1.42	0.47
F_2nd peak	2.25	1.30	1.60	1.15

Fig. 2(b)는 B 발전소에서 개발측정기를 사용하여 굴뚝 내 입경에 따른 질량농도 분포를 나타내고 있다. A 발전소와 마찬가지로 다분포를 나타내고 있다. 0.62  $\mu\text{m}$ 와 2.3  $\mu\text{m}$ 의 모드 직경을 갖는 두 개의 분포로 나타나고, 각 모드 직경에서의 질량농도는 4.6, 1.0  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 0.62  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 0.48  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.22이고, 2.25  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 1.20  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.79이다. 두 모드의 MMD를 CMD로 환산하면 0.47, 0.99  $\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 2(c)는 C 발전소에서 개발측정기를 사용하여 굴뚝 내 입경에 따른 질량농도 분포를 나타내고 있다. 0.62  $\mu\text{m}$ 와 4.50  $\mu\text{m}$ 의 모드 직경을 갖는 두 개의 분포로 나타나고, 각 모드 직경에서의 질량농도는 4.1, 0.8  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 0.62  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 0.46  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.33이고, 4.5  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 1.3  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.7이다. 두 모드의 MMD를 CMD로 환산하면 0.44, 1.11  $\mu\text{m}$ 이다.

Fig. 2(d)는 D 발전소에서 개발측정기를 사용하여 굴뚝 내 입경에 따른 질량농도 분포를 나타내고 있다. 0.6  $\mu\text{m}$ 와 4.5  $\mu\text{m}$ 의 모드 직경을 갖는 두 개의 분포로 나타나고, 각 모드 직경에서의 질량농도는 6.9, 0.8  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 0.62  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 0.53  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.32이고, 4.5  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 1.61  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.8이다. 두 모드의 MMD를 CMD로 환산하면 0.51, 1.32  $\mu\text{m}$ 이다. 측정 기간 동안 D 발전소의  $\text{PM}_{10}$  농도가 1에서 5  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 다른 발전소에 비해 크게 변화했다. 그로 인해 각 입경에

따른 변화가 앞의 A, B, C 발전소에 비해 큰 것을 알 수 있고, 두 개의 모드 중 0.6  $\mu\text{m}$ 의 모드 분포에서의 질량농도 변화량이 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 2(e)는 E 발전소에서 개발측정기를 사용하여 굴뚝 내 입경에 따른 질량농도 분포를 나타내고 있다. 0.9  $\mu\text{m}$ 와 2.8  $\mu\text{m}$ 의 모드 직경을 갖는 두 개의 분포로 나타나고, 각 모드 직경에서의 질량농도는 2.7, 4.0  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 0.9  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 0.55  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.25이고, 2.8  $\mu\text{m}$  모드의 MMD는 1.6  $\mu\text{m}$ , GSD는 1.67이다. 두 모드의 MMD를 CMD로 환산하면 0.53, 1.38  $\mu\text{m}$ 이다. E 발전소는 다른 발전소와 공통적으로 다분포를 나타내고 있지만, 1  $\mu\text{m}$  이하의 모드에서 더 큰 질량농도를 보이는 다른 발전소와 다르게 1  $\mu\text{m}$  보다 큰 입자에서 더 큰 질량농도를 나타내고 있다. E 발전소가 다른 발전소와 다른 점은 보일러 이후에 배기가스 처리 방식이 다르다는 것이다. 굴뚝 전단에 FGD가 존재하는 A, B, C, D, F 발전소와 달리 E 발전소는 굴뚝 전단에 ESP가 위치하고 있다. FGD의 유무에 따라 굴뚝에서 배출되는 1  $\mu\text{m}$  이상 입자의 농도가 달라질 수 있고, 이는 ESP에서 재비산하는 먼지가 존재하고 FGD에서 이를 걸러내는 역할을 하고있다고 판단된다. E 발전소도 D 발전소와 마찬가지로 오차 막대를 통해 질량농도의 변화가 큰 것을 알 수 있는데, 측정기간 동안 E 발전소의  $\text{PM}_{10}$ 은 2.5에서 5  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 큰 변화폭을 가지고 있다. 하지만 D 발전소와 달리 1  $\mu\text{m}$  보다 큰

입자에서의 변화량이 더 크게 나타났고, 이는 E 발전소의 굴뚝에서 발생하는 먼지의 주요원은 1 μm 보다 큰 입자로 판단할 수 있다.

Fig. 2(f)는 F 발전소에서 개발측정기를 사용하여 굴뚝 내 입경에 따른 질량농도 분포를 나타내고 있다. 0.62 μm와 2.25 μm의 모드 직경을 갖는 두 개의 분포로 나타나고, 각 모드 직경에서의 질량농도는 4.5, 0.7 mg/m<sup>3</sup>로 나타났다. 0.62 μm 모드의 MMD는 0.5 μm, GSD는 1.42이고, 2.25 μm 모드의 MMD는 1.3 μm, GSD는 1.6이다. 두 모드의 MMD를 CMD로 환산하면 0.47, 1.15 μm이다.

모든 발전소에서 1 μm 전후로 두개의 모드를 갖는 다중분포 그래프로 나타났고 각 입경 별 질량농도의 차이만 있을 뿐 GSD, CMD가 거의 유사하였다. 공통적으로 1 μm 이하의 입자들의 GSD가 평균적으로 1.33으로 1 μm 이상 입자의 GSD인 1.68 보다 작았고, CMD 또한 0.5, 1.1 μm로 모든 발전소에서 유사하게 나타났다. 0.5 μm 입자들은 석탄 연

소 시 입자 발생 메커니즘 중 무기물질의 증발 응축에 의한 것으로 판단되고, 1.1 μm 모드의 입자들은 석탄 내 고체 입자상 물질이 석탄 내에서 그대로 입자화에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 3은 각 석탄화력발전소에서 중량법과 개발측정기를 사용하여 측정된 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도를 비교한 그래프를 나타내고 있다. 각 발전소 별로 평균 8회씩 측정하였고, 전체 49회를 측정하였다. Fig. 3(a)는 PM<sub>10</sub> 농도를 EPA method 201A 방식을 사용하여 측정된 농도와, ISO-23210 방식을 사용하여 측정된 농도를 비교한 결과이다. 각 발전소 별로 EPA방식과 ISO방식의 농도 변화가 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 각 발전소 별 상대정확도를 분석해보면, B 발전소는 16.8%, C 발전소는 26.8%, D 발전소는 20.3%, E 발전소는 24.1%, F 발전소는 18.4%이다. A 발전소의 경우 ISO방식을 통한 중량법 측정을 하지 못하였다. 전체 발전소에 대해 상대정확도를 계산하면 21.3%로 EPA방식으로

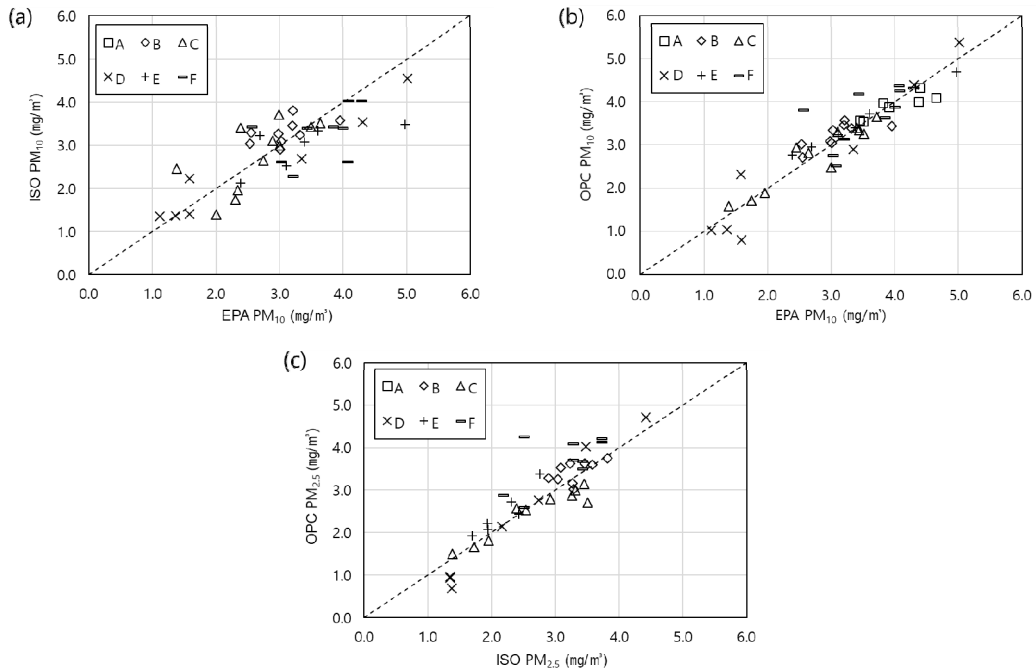


Figure 3. Comparison between OPC PM and gravimetric PM measured using EPA and ISO methods at each coal-fired power plant chimney. (a) is PM<sub>10</sub> measured using EPA and ISO, (b) is PM<sub>10</sub> measured using EPA and OPC and (c) is PM<sub>2.5</sub> using ISO and OPC.

측정한 농도와 ISO방식으로 측정한 농도가 유사한 것을 통해 본 연구에서 측정한 중량법 측정 결과에 대해 신뢰할 수 있다고 판단된다. Fig. 3(b)는 EPA 방식을 사용하여 측정한 PM<sub>10</sub>과 개발측정기를 사용하여 측정한 PM<sub>10</sub>을 비교한 결과이다. 각 발전소 순서대로 9.3, 12.7, 11.3, 19.8, 7.4, 17.3%의 상대정확도를 나타내고 있고, 전체적으로 상대정확도는 13.0%이다. 전체적으로 상대정확도가 20% 내로 개발 측정기로 측정한 결과와 중량법 결과가 잘 맞다고 할 수 있다. EPA와 ISO를 비교한 결과보다 더 농도가 잘 맞는 것을 확인할 수 있는데, 이는 중량법의 경우 측정 후 농도를 산출하는 과정에서 오차가 발생할 확률이 더 높기 때문이다. 그 이유로 중량법의 경우 직접 먼지를 필터에 포집하는 방식으로 포집 후 측정을 위해 저울까지 가는 동안 필터에서 먼지가 떨어질 수 있고, 저울 측정 시 그 주변의 습도, 온도, 및 필터의 하전 정도에 따라 측정 오차가 발생할 수 있기 때문이다. 하지만 개발 측정기를 사용할 경우 현장에서 직접 농도를 측정하는 방법이기 때문에 측정과정에서 오차가 발생할 확률이 적어진다. Fig. 3(c)는 ISO방식과 개발 측정기를 사용하여 PM<sub>2.5</sub> 농도를 비교한 결과이다. EPA 방식을 사용하여 PM<sub>2.5</sub>를 측정하기 위해서는 넓은 크기의 굴뚝 샘플링 포트가 필요한데, 본 연구에서

측정한 각 석탄화력발전소 굴뚝의 샘플링 포트의 크기는 150A (165.2 mm)로 측정이 불가능하여, PM<sub>2.5</sub>는 ISO의 측정 결과와 비교하였다. Fig. 3(a)에서 ISO와 EPA의 PM<sub>10</sub> 농도가 유사한 것을 통해 ISO의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 신뢰할 수 있다고 판단하였다. 각 발전소 별로 ISO 대비 PM<sub>2.5</sub>의 상대정확도는 B 발전소에서 F 발전소 순으로 15.7, 15.7, 18.5, 17.3, 17.8%이고, 전체 상대정확도는 17%로 PM<sub>2.5</sub> 농도 또한 개발측정기를 사용하여 측정한 농도가 신뢰할 수 있다고 판단된다.

Fig. 4는 D, E, F 발전소에서 개발 측정기를 사용하여 한달 동안 실시간으로 측정한 PM<sub>10</sub> 농도와 발전량을 비교한 결과이다. PM<sub>10</sub>은 1분 간격으로 연속 측정하였고, 각 데이터를 30분 간 평균으로 정리하여 시간에 따른 발전량 데이터와 비교하였다. D 발전소의 해당 발전기에서 780 MWh에서 1100 MWh의 발전량을 생산했고, 굴뚝에서 배출되는 PM<sub>10</sub>의 농도는 1.02에서 5.93 mg/m<sup>3</sup>까지 배출되었다. E 발전소의 해당 발전기에서 약 720 MWh에서 980 MWh 만큼 발전량을 생산했고, 배출되는 PM<sub>10</sub>의 농도는 1.3에서 6.3 mg/m<sup>3</sup>까지 배출되었다. F 발전소의 해당 발전기에서 약 340에서 500 MWh 만큼 발전량을 생산했고, 배출되는 PM<sub>10</sub>의 농도는 2.4에서 4.8 mg/m<sup>3</sup>까지 배출되었다. 발전량 대비 발

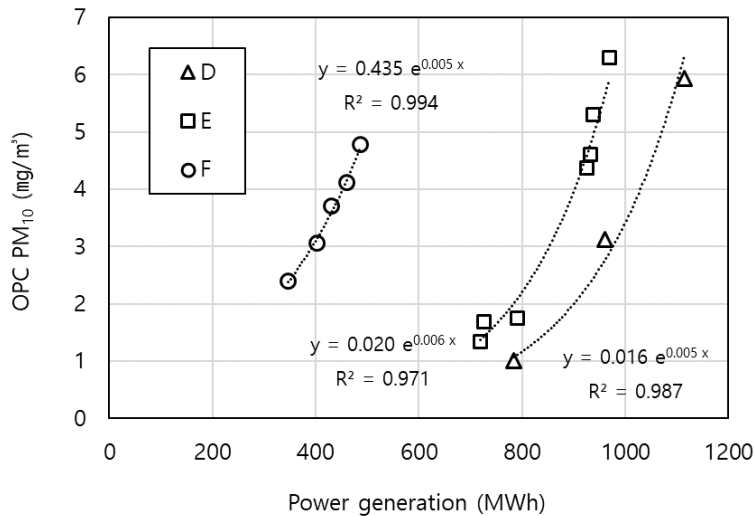


Figure 4. Relation between power generations and OPC PM<sub>10</sub> measured for 1 month continuously at D, E and F coal-fired power plants.



생 PM<sub>10</sub> 농도를 비교하면 D, E, F 발전소 순으로 PM<sub>10</sub> 발생 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있다. D 발전소의 해당 발전기는 2015년에 가동을 시작하였고, E 발전소의 발전기는 2016년에 가동을 시작하였고, F 발전소의 발전기는 2009년에 가동을 시작하였다. F 발전소의 가동 기간이 가장 길어 발전량 대비 PM<sub>10</sub> 농도가 높은 것으로 판단된다. 또한 E 발전소의 경우 D 발전소와 준공 년도가 비슷하지만 굴뚝이 전기집진기 후단에 바로 위치하고 있어, 전기집진기에서 포집된 Fly ash가 주기적인 추타에 의해 떨어질 때 재비산하는 2.5-10 μm 입자가 바로 굴뚝으로 배출되기 때문에 전기집진기와 굴뚝 사이에 FGD가 존재하는 D 발전소에 비해 높은 PM<sub>10</sub> 농도가 측정되는 것으로 판단된다. 세 발전소 모두 발전량 대비 PM<sub>10</sub>이 지수 함수에 따라 변화하는 것을 알 수 있고 이를 통해 발전량에 따른 PM<sub>10</sub> 발생량을 예상할 수 있다.

#### 4. Conclusion

석탄화력발전소 굴뚝 미세먼지를 광산란 계측기를 사용하여 실시간으로 측정하기 위하여 2단 회석 장치를 개발하였고, 이를 활용하여 국내 6곳의 석탄화력발전소에서 실시간으로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 측정하였다. 입경 크기에 따른 질량농도분포를 비교한 결과, 측정 굴뚝 모두 Bi-modal 분포를 나타내었고, CMD를 계산한 결과 조금씩은 차이가 있지만 0.5, 1.1 μm로 거의 유사하였다. 중량법 측정 방법과 비교한 결과 모든 발전소의 상대정확도가 20% 내로 개발측정기를 사용하여 측정한 결과를 신뢰할 수 있는 수준으로 판단된다. 마지막으로 연속적으로 장기간 측정하였고, 이를 발전량 변화에 따른 PM<sub>10</sub>으로 표현하였을 때 발전량에 따라 지수적으로 PM<sub>10</sub>의 농도가 증가하는 현상이 3곳의 발전소에서 나타나는 것을 확인하였다.

화력발전소 굴뚝에서 개발 회석장치를 이용하여 연속적으로 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 측정하는 것이 가능함을 확인하였고, 실시간으로 배출되는 미세먼지 측정을 통해 굴뚝 배출 미세먼지에 대한 특성을 확인함으로써 환경설비의 운용 및 관리에 많은 정보를 제공할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

이 연구는 환경부의 미세먼지 사각지대 해소 저감 실증화사업의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사드립니다(grant no. 2020003070002).

#### Reference

- Baek, S., Jang, J., and Kim, Y. (2019). A study on repowering of 500 MW standard coal-fired power plant for performance improvement and emission reduction, *Journal of The Korean Society of Combustion*, 24(4), 37-44.
- Basu, P. (1999). Combustion of coal in circulating fluidized-bed boilers: a review, *Chemical Engineering Science*, 54, 5547-5557.
- Córdoba, P. (2015). Status of flue gas desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physic-chemical control processes of wet limestone FGDs, *Fuel*, 144, 274-286.
- Fernandes, U., and Costa, M. (2012). Particle emissions from a domestic pellets-fired boiler, *Fuel Processing Technology*, 103, 51-56.
- Goodarzi, F., and Sanei, H. (2009). Plerosphere and its role in reduction of emitted fine fly ash particles from pulverized coal-fired power plants, *Fuel*, 88(2), 382-386.
- Groves, J., and Cain, J.R. (2000). A survey of exposure to diesel engine exhaust emissions in the workplace, *The Annals of Occupational Hygiene*, 44(6), 435-447.
- Higham, D.J., and Higham, N.J. (2016). *MATLAB guide* (3rd ed.), Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, p. 177.
- ISO 23210 (2009). Stationary source emissions determination of PM10/PM2.5 mass concentration in flue gas measurement at low concentrations by use of impactors.
- Kim, H.C., Kim, S., Son, S.W., Lee, P., Jin, C.S., Kim, E., Kim, B.U., Ngan, F., Bae, C., Song, C.K., and Stein, A. (2016). Synoptic perspectives on

- pollutant transport patterns observed by satellites over East Asia: Case studies with a conceptual model, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 1-30.
- Kim, H.B., Kim, D.S., Youn, J.S., Han, S., Jeon, Y.W., and Jeon, K.J. (2017). Comparison of measurement methods and size fraction of fine particles (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) from stationary emission source using Korean standard and ISO: coal power plant and refinery, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33, 342-350.
- Lee, H. (2020). 5 Power Generation Companies, "We will reduce fine dust with the best possible": Suspension of coal-fired power plants and promotion of upper limit restrictions... Reduction of 2,108 tons of fine dust emissions compared to the previous year\_5 power generation companies, investment in eco-friendly facilities and promotion of indoor storage of outdoor storage facilities, *Journal of Electrical World Monthly Magazine*, 5, 38-40.
- Lee, S., Ho, C.H., and Choi, Y.S. (2011). High-PM<sub>10</sub> concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, *Atmospheric Environment*, 45(39), 7240-7247.
- Lewis, T.R., Green, F.H., Moorman, W.J., Burg, J.A., and Lynch, D.W. (1989). A chronic inhalation toxicity study of diesel engine emissions and coal dust, alone and combined, *Journal of the American College of Toxicology*, 8(2), 345-75.
- Nobuhiro, M., Yutaka, K., Tomoki, N., Kazuyuki, K., Lokesh, K.S., Takuya, I., Takeshi, K., and Yutaka M. (2010). Radiative transfer modeling of filter-based measurements of light absorption by particles: Importance of particle size dependent penetration depth, *Journal of Aerosol Science*, 41(4), 401-412.
- Park, H.S., Lee, D.A., Yang, J.G., and Jang, S.G. (2018). Emission characteristics of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in thermal power plants using different fuel types, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 534-541.
- Richard, D., William, R.S., David, M.A., and Leslie S. (1957). Isokinetic sampling probes, *Industrial and Engineering Chemistry*, 49(2), 294-302.
- Meij, R., and Winkel, B. (2004). The emissions and environmental impact of PM<sub>10</sub> and trace elements from a modern coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD, *Fuel Processing Technology*, 85, 641-656.
- Ministry of Environment (2011). Particulate matter-automated measuring method in flue gas, *Air Pollution Process Test Standard*, ES01810.1a.
- Shin, D., Woo, C.G., Hong, K.J., Kim, H.J., Kim, Y.J., Lee, G.Y., Chun, S.N., Hwang, J., and Han, B. (2019). Development of a new dilution system for continuous measurement of particle concentration in the exhaust from a coal-fired power plant, *Fuel*, 257, 116045.
- Shin, D., Woo, C.G., Hong, K.J., Kim, H.J., Kim, Y.J., Han, B., Hwang, J., Lee, G.Y., and Chun, S.N. (2020). Continuous measurement of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentration in coal-fired power plant stacks using a newly developed diluter and optical particle counter, *Fuel*, 269, 117445.
- Stolle, R., Koeser, H., and Gutberlet, H. (2014). Oxidation and reduction of mercury by SCR DeNO<sub>x</sub> catalysts under flue gas conditions in coal fired power plants, *Applied Catalysis B: Environmental*, 144, 486-497.
- U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) (1996). Air quality for particulate matter, National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC, Report No: EPA/600/p-95/001CF.
- Wada, M., Tsukada, M., Namiki, N., Szymanski, W.W., Noda, N., Makino, H., Kanaoka, C., and Kamiya, H. (2016). A two-stage virtual impactor for in-stack sampling of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in flue gas of stationary sources, *Aerosol and Air Quality Research*, 16, 36-45.