

고정배출원의 먼지 크기별 (PM, PM₁₀, PM_{2.5}) 배출 특성 연구

The Characterization of PM, PM₁₀, and PM_{2.5} from Stationary Sources

김종호 · 황인조^{1)*}

한서대학교 환경공학과, ¹대구대학교 환경공학과

(2016년 9월 9일 접수, 2016년 11월 2일 수정, 2016년 11월 25일 채택)

JongHo Kim and InJo Hwang^{1)*}

Department of Environmental Engineering, Hanseo University

¹*Department of Environmental Engineering, Daegu University*

(Received 9 September 2016, revised 2 November 2016, accepted 25 November 2016)

Abstract

The objective of this study was to estimate the emission characteristics for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in the various stationary sources. The particulate matters collected in the various stationary sources such as power plants (Coal and B-C oil), incinerators (municipal and industrial waste), and glass furnaces. The PM and PM₁₀, PM and PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5} samples were collected using the cyclone type PM₁₀, PM_{2.5} samplers and 30 species (19 inorganic species, 9 ionic species, OC and EC) were analyzed by ICP, IC, and TOR/IMPROVE methods. The mass concentrations of PM, PM₁₀, PM_{2.5} from nine stationary sources ranged 0.63~9.58 mg/Sm³, 0.26~7.47 mg/Sm³ and 0.13~6.34 mg/Sm³, respectively. The level of PM₁₀, PM_{2.5} portion in PM calculated 0.63~0.99, 0.38~0.94, respectively. In the case of emission trend for species, power plant showed high concentrations for Al, Mg, Na, Si, V and SO₄²⁻, respectively. Also, Ca, Fe, K, Si, Cl⁻, and K⁺ showed high in incinerator. In the case of glass furnace, Na, Pb, K, Si, Na⁺ and SO₄²⁻ represented high concentrations. Power plant showed higher EC/OC concentrations than other sampling sites. These results suggest the possible role for complement establishment process of emission inventory and emission management for PM.

Key words : Stationary sources, PM, PM₁₀, PM_{2.5}, Emission inventory

1. 서 론

대기 중의 미세입자는 호흡을 통해 인체의 폐 속 깊숙이 유입되어 심각한 호흡기 질환을 일으킬 수 있으며, 중금속, 수용성 이온, 다환방향족탄화수소 등과 같

은 유해대기오염물질 (hazardous air pollutants, HAPs) 이 포함되는 경우에는 더 큰 악영향을 미칠 수 있다 (Oravisjarvi *et al.*, 2014; Seo *et al.*, 2014; Chow *et al.*, 2010; Pacyna, 2010). 또한 대기환경에는 시정거리 감소 (visibility impairment)를 일으킬 수 있고, 구름의 응결핵으로 작용하여 기상이변을 야기할 수도 있는 것으로 보고되고 있다 (Minguillon *et al.*, 2013; Hobbs,

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-850-6695, E-mail : ihwang@daegu.ac.kr

1993).

따라서 세계의 여러 국가와 도시들은 이렇게 유해성이 높은 미세먼지를 관리하기 위해 대기환경기준 항목에 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도를 설정하고, 이를 유지하기 위한 여러 가지 정책들을 시행하고 있다. 우리나라의 대기환경기준에도 1995년에 PM₁₀ 기준이, 2015년에는 PM_{2.5} 기준이 설정되어 있다.

대기환경 중의 오염물질 농도를 낮추기 위한 여러 가지 방법 중에 일반적인 수단은 발생원에 대한 배출허용기준(emission limit)을 설정하고 이를 준수하는 것인데, 이러한 배출허용기준은 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x) 등과 같은 기준성 오염물질뿐 아니라 납(Pb), 수은(Hg) 등과 같은 유해대기오염물질들에 대해서도 설정되어 있다. 그러나 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대해서는 그 유해성에 비해 배출허용기준이 대부분의 국가에서 설정되지 않은 실정인데, 이는 발생원에서 배출되는 먼지의 크기에 대한 기초자료가 부족한 것이 그 이유 중에 하나라고 보고되고 있다(Ehrlich *et al.*, 2007).

미국의 경우에는 발생원에서 배출되는 먼지를 그 존재 형태에 따라 여과성 먼지(filterable particulate matter, FPM)와 응축성 먼지(condensable particulate matter, CPM)로 구분하고, 크기별로는 PM₁₀과 PM_{2.5}로 구분하여 대기오염물질 배출시설의 허가서에 제시하기도 한다. 여기서 여과성 먼지는 여지에 채취되는 먼지를 의미하며, 그 크기에 따라 FPM, FPM₁₀, FPM_{2.5}로 나누어 측정한다. 응축성 먼지는 굴뚝에서 배출된 배기가스가 굴뚝 근처에서 수초 이내에 액체 혹은 고체 입자로 응축되는 물질로서 가스의 냉각과정에서 균일(homogeneous) 혹은 불균일(heterogeneous) 반응으로 생성되며, 대부분 CPM_{2.5}로 알려져 있다(Corio and Sherwell, 2000).

본 연구는 고정배출원에서 발생하는 여과성 먼지에 대하여 먼지를 크기별(PM, PM₁₀, PM_{2.5})로 시료를 채취하고, 구성 성분에 대해 무기원소, 이온성분, 탄소성분 등을 분석하였다. 이들 자료는 배출원의 효과적인 관리방안을 마련하는 데 기초가 될 것으로 판단된다.

2. 실험 방법

2.1 시료 채취

본 연구에서 시료 채취 지점은 먼지를 배출하는 고

정오염원 중에서 배출 규모가 크다고 판단되는 발전시설과 주거지역과 비교적 가깝다고 판단되는 소각시설, 그리고 공정연소 부분에서 유리용해시설을 선정하였다. 또한 발전시설은 고체연료인 유연탄 사용시설과 액체연료인 B-C유를 사용하는 시설을 대상으로 하였으며, 소각시설은 생활폐기물과 사업장폐기물을 소각하는 시설로 구분하여 측정하였다.

굴뚝에서 먼지의 크기별 시료 채취는 “대기오염공정시험기준 ES 01317.1a, ES 01301.1”로 실시하였는데, 먼지를 크기별로 채취하는 방법은 “미국 EPA Method 201A”와 동일한 방법으로 Cyclone을 이용하여 PM₁₀, PM_{2.5}를 분리하여 채취하며, 배출가스의 온도가 260°C 이하의 경우에 적용이 가능하다(US EPA, 2014). 그림 1에 먼지 시료를 채취하는 과정에 대한 모식도를 나타내었다(NIER, 2015b).

또한, 본 연구는 먼지의 크기별(PM, PM₁₀, PM_{2.5}) 농도와 그 비율을 산정하는 것이 중요하다고 판단하여 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도를 동시에 측정하고자 하였다. 굴뚝에서 배출되는 먼지의 농도는 일정하게 배출되지 않는 경우가 있어서 측정구의 크기, 굴뚝의 전기용량 등 현장의 여건을 고려하여 2대의 굴뚝시료 채취장치를 이용하여 동시에 PM과 PM₁₀, PM과 PM_{2.5}, PM₁₀과 PM_{2.5}에 대해 시료를 채취하였는데, 각 항목에 대해 3회씩 시료를 채취하였다.

시료 채취 유량은 각 시설별 배출가스의 온도, 유속, 압력 등에 의해 다소 차이는 있으나 대부분 1~2Sm³로 채취하였다. 시료 채취에 사용한 여지는 수용성 이온과 금속성분을 분석할 여지는 Teflon 재질의 여지(Zefflour, Pall Science, USA)와 탄소성분을 분석하기 위해서는 Quartz 재질의 여지(QMA, Whatman Co., England)를 사용하였다. 탄소시료 채취 전에는 여지를 전기로에 넣은 후 850°C에서 90분간 전처리하여 여지상의 유기물을 완전히 제거한 후 실온의 데시케이터에 보관하여 사용하였다. 채취한 시료는 분석 전까지 영하 20°C의 냉동고에 보관하여 필터에서 입자들이 휘발 및 다른 영향을 최소화 시켰다.

2.2 성분분석

채취된 시료의 무기원소, 이온성분 분석을 위해서는 적절한 전처리가 필요하다. 무기원소 분석을 위한 전처리는 microwave(Mars 230/60, CEM Co.)의 PFA liner

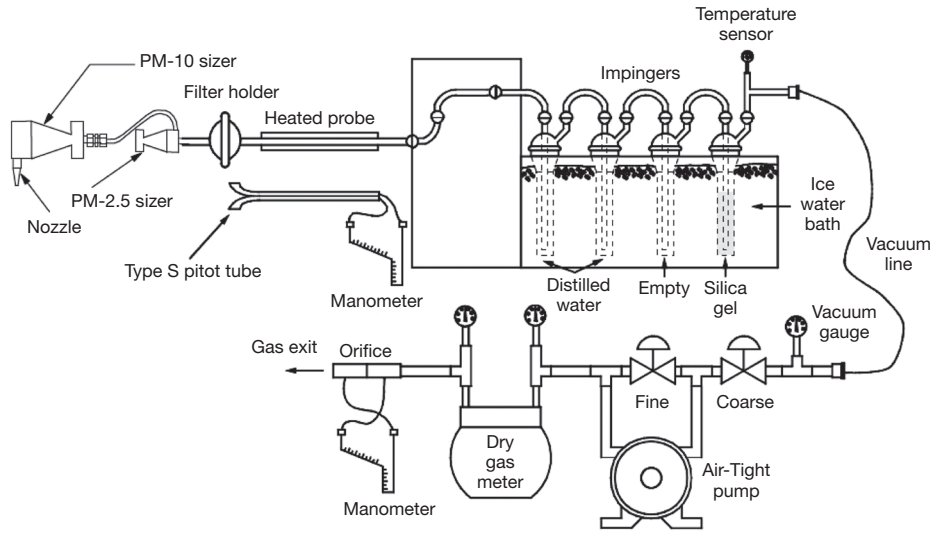


Fig. 1. Schematic diagram of particulate matter sampling in stack.

에 여지를 넣어 유해 중금속 측정용 61% 질산 7 mL와 35% 염산 3 mL를 가한 후 power 4와 3에서 각각 6분씩 가온하여 무기원소 성분을 추출하였다. 전처리가 완료된 시료는 폴리프로필렌 재질의 50 mL centrifuge tube (Corning Co., USA)에 담아 분석 전까지 냉장고에서 4°C로 보관하였다. 전처리가 완료된 시료는 ICP-AES 분석법 (DRE ICP, Leeman Labs Inc.)을 이용하여 Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Se, Si, Sr, V, Zn 등과 같은 총 19개 항목에 대한 분석을 수행하였다. 이온성분은 여지를 추출 용기에 넣고, 초순수 30 mL를 넣은 후 초음파 세척기에 넣어 30분간 초음파 추출하였다. 이 용액은 실린지 필터 (Acrodisc, PVDF, 0.2 µm, 25 mm, Pall Co.)를 이용하여 여과를 하고 50 mL centrifuge tube (Corning Inc., USA)에 담아 분석 전까지 냉장보관 후 이온크로마토그래피 (Model ICS-1000, Dionex Co., USA)를 이용하여 총 9개 이온 성분 (SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, F⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺)을 분석하였다.

탄소성분은 TOR/IMPROVE (thermal optical reflectance) 분석법에 의해 원소탄소 (elemental carbon, EC), 유기탄소 (organic carbon, OC)를 온도별 승온조건에 따라 8개 탄소성분 (OC1, OC2, OC3, OC4, OP, EC1, EC2, EC3)을 분석하였다. 자세한 내용은 다음의 문헌을 참고할 수 있다 (Jeong and Hwang, 2015).

3. 결과 및 고찰

3.1 먼지 농도

각 측정지점의 특성인 연료, 원료, 용량, 방지장치 등과 PM, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도와 PM 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율을 표 1에 나타내었다. 본 연구의 측정 대상 배출 시설들은 대기오염방지를 위하여 집진, 탈황, 탈질 장치가 설치되어 있었는데, 먼지제거와 관련하여 발전시설과 유리용해시설에는 전기집진장치 (Electrostatic Precipitator; ESP), 소각시설에는 여과집진장치 (Bag Filter; BF)가 설치되어 있었다. 또한 배연탈황장치인 흡수처리장치에서도 적은 양이지만 먼지가 제거되는 것으로 알려져 있으며 (Meij and Winkel, 2004), 측정기간 동안 모든 대기오염방지장치들이 적절하게 운전되고 있었다.

PM, PM₁₀, PM_{2.5}의 질량농도는 각각 3회 측정결과를 평균한 값이며, 표준산소농도 보정은 배출허용기준 (MOE, 2015)에서 제시한 것을 적용하였는데, 발전시설 중의 유연탄사용시설은 6%, 중유연소시설은 4%이고, 소각시설은 12%, 유리용해시설은 13%이다.

유연탄을 연료로 사용하는 발전시설은 2개 시설을 측정하였는데, 첫 번째 유연탄 (황 함유량 0.4%) 사용 시설의 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 3.66 mg/m³, 3.58 mg/m³, 2.52 mg/m³로 측정되었고, PM 중 PM₁₀과 PM_{2.5}

Table 1. Summary of sampling sites and mass concentration.

Plant	Fuel, material	Capacity	Prevention facilities	PM (mg/Sm ³)	PM ₁₀ (mg/Sm ³)	PM _{2.5} (mg/Sm ³)	PM ₁₀ /PM	PM _{2.5} /PM
Power plant	Coal	800 MW	SCR, ESP, FGD	3.66	3.58	2.52	0.98	0.69
		500 MW	SCR, ESP, FGD	5.50	4.14	—	0.75	—
	Heavy oil	350 MW	SCR, ESP, FGD	9.58	7.47	6.34	0.79	0.67
Incinerator	Municipal solid waste	12.5 ton/hr	SNCR, BF, WS	0.67	0.35	0.13	0.52	0.20
		6.3 ton/hr	WS, AD, BF, SCR	3.08	1.49	0.81	0.48	0.26
	Industrial solid waste	3.25 ton/hr	SNCR, BF, WS	5.79	4.27	3.12	0.74	0.54
3.14 ton/hr		SNCR, BF, WS	0.63	0.26	0.14	0.42	0.23	
Furnace	Glass, LNG	3.54 ton/hr	ESP	8.86	5.64	4.57	0.64	0.52
		6.25 ton/hr	ESP, SCR	7.46	5.96	2.61	0.80	0.35

ESP: Electrostatic precipitator, BF: Bag filter, FGD: Flue gas desulfurization, WS: Wet scrubber, AD: Adsorption tower, SCR: Selective catalytic reduction, SNCR: Selective non-catalytic reduction, Sm³: Standard condition (0°C, 1 atm)

의 비율은 각각 0.98, 0.69로 산출되었다. 또 다른 유연탄(황 함유량 0.5%) 발전시설의 PM, PM₁₀의 농도는 각각 5.50 mg/m³, 4.14 mg/m³로 측정되었고, PM 중 PM₁₀의 비율은 0.75로 나타났다. 이 시설에서 PM_{2.5} 농도는 측정하지 못했는데, 이는 본 연구에서 사용한 싸이클론 방식의 PM_{2.5} 측정기 크기(직경; 134 mm)가 굴뚝의 측정구(직경; 100 mm)보다 커서 측정기를 굴뚝 안으로 넣을 수 없기 때문이다. 따라서 측정기 크기에 맞는 측정기 개발이 필요하다.

또한 유연탄을 연료로 사용하는 발전시설에 대한 선행연구(NIER, 2010)에서 PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 1.54~6.16 mg/m³, 1.02~4.83 mg/m³ 등으로 나타내었으며, PM 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율은 각각 0.87~1.0, 0.66~0.68로 산출되었다. 본 연구결과와 비교해 보면 첫 번째 발전시설과는 유사하지만, 두 번째 발전시설의 경우 PM 중 PM₁₀ 비율이 낮게 측정되었다.

중유(황 함유량 2.5%)를 연료로 사용하는 발전시설에서 배출하는 PM, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도는 각각 9.58 mg/m³, 7.47 mg/m³, 6.34 mg/m³로 측정되었으며, PM 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율은 각각 0.79, 0.67으로 산출되었다. 중유를 연료로 사용하는 발전시설에 대한 선행연구는 찾지 못했으나, 대기오염물질 배출계수(NIER, 2015a) 자료에서 PM₁₀/PM, PM_{2.5}/PM를 추정하면 각각 0.80, 0.52이며, 본 연구 결과값은 이와 유사하거나 다소 높은 것으로 나타났다.

생활폐기물 소각시설도 2곳을 측정하였는데, 첫 번째 소각시설의 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 0.67 mg/

m³, 0.35 mg/m³, 0.13 mg/m³로 조사되었으며, PM 중 PM₁₀, PM_{2.5}의 비율은 각각 0.52, 0.20로 산출되었다. 또 다른 도시폐기물 소각시설의 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 3.08 mg/m³, 1.49 mg/m³, 0.81 mg/m³로 측정되었고, PM 중 PM₁₀, PM_{2.5}의 비율은 각각 0.48, 0.26로 산출되었다. 선행연구(NIER, 2013) 자료에서는 PM₁₀, PM_{2.5} 농도가 각각 0.57~1.43 mg/m³, 0.34~1.35 mg/m³이며, PM 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율은 각각 0.63~0.99, 0.38~0.94로 조사되었으며, 본 연구결과는 선행연구 결과와 비교하여 낮은 비율을 나타내는 것으로 조사되었다.

산업폐기물을 소각하는 소각시설도 2곳을 측정하였는데, 첫 번째 소각시설에서 배출되는 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 5.79 mg/m³, 4.27 mg/m³, 3.12 mg/m³로 조사되었고, PM 중 PM₁₀, PM_{2.5}의 비율은 각각 0.74, 0.54으로 계산되었다. 두 번째 소각시설에서 배출되는 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 0.63 mg/m³, 0.26 mg/m³, 0.14 mg/m³를 나타내었으며, PM 중 PM₁₀, PM_{2.5}의 비율은 각각 0.42, 0.23으로 계산되었다. 대기오염물질 배출계수(NIER, 2015a) 자료에서 PM₁₀/PM, PM_{2.5}/PM를 산출하면, 각각 0.72, 0.65인데, 본 연구 결과값은 첫 번째 시설에서는 유사하나, 다른 시설에서는 다소 높은 것으로 조사되었다.

유리용해시설은 연료로 LNG를 사용하는데, 배출되는 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 5.77 mg/m³, 5.64 mg/m³, 5.50 mg/m³이며, PM 중 PM₁₀, PM_{2.5}의 비율은 각각 0.64, 0.52로 산출되었다. 또 다른 유리용해시설도 LNG

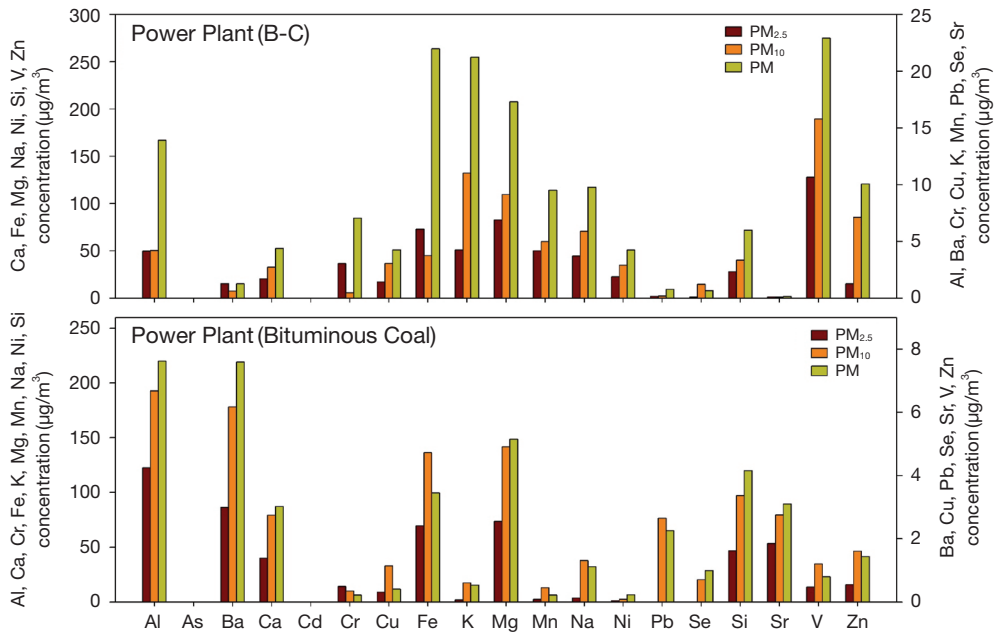


Fig. 2. Elemental concentrations for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in power plants.

를 연료로 사용하는데, 이 시설에서 배출되는 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 7.46 mg/m³, 5.96 mg/m³, 2.61 mg/m³로 조사되었고, PM중 PM₁₀, PM_{2.5}의 비율은 각각 0.80, 0.35로 계산되었다. 선행연구(Ehrlich *et al.*, 2007)에서 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도는 각각 3.0~5.1 mg/m³, 2.9~4.8 mg/m³, 1.6~2.3 mg/m³로 조사되었다. PM 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 비율은 각각 0.93~0.95, 0.45~0.54로 조사되어 본 측정결과와는 다소 차이가 있었으며, 이는 측정 배출시설에는 전기집진장치뿐 아니라 배연탈황장치로 설치되어 있었기 때문으로 사료된다.

3.2 무기원소 농도

각 측정장소(발전시설, 소각시설, 유리용해시설 등)에서 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 등과 같은 입자 크기별 무기원소의 농도를 분석하였다. 발전시설의 경우는 사용 연료 별로 구분하고 각 입자 크기별 무기원소의 농도를 그림 2에 나타내었다. B-C유 사용 발전시설의 경우 V가 PM에서 274.8 µg/m³, PM₁₀에서 189.2 µg/m³, PM_{2.5}에서 127.8 µg/m³로 조사되어 무기원소 중 가장 높은 농도를 나타내었다. 다음으로 Mg과 Fe이 높은 농도를 나타내었고 Na, Zn, Ca, Ni, K, Al, Mn 등의 순으로 각 입자

크기에서 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 유연탄 사용 발전시설의 경우 먼지 크기별 무기원소 농도는 Al가 PM에서 220.0 µg/m³로 나타났고, PM₁₀에서 192.7 µg/m³, PM_{2.5}에서 122.5 µg/m³로 조사되었다. 다음으로 Mg, Fe, Si, Ca, Na 등의 무기원소가 주로 배출되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 액체연료(oil)를 연소시켰을 때는 V, Na, Ni 등이 주로 배출되고, 석탄연료를 연소시켰을 때는 Fe, Al, Ca, Si 등이 높게 배출된다는 선행연구 결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다(Kang, 1998). 입자 크기별 배출 특성에서 PM은 B-C유 사용 발전시설의 경우 V, Mg, Fe, Na, Si 등이 높게 나타났고, 유연탄 사용 발전시설은 Al, Mg, Fe, Si, Ca 등이 높게 나타났다. PM₁₀은 B-C유 사용 발전시설의 경우 V, Mg, Zn, Na, Fe, Si 등이 높은 농도를, 유연탄 사용 발전시설은 Fe, Al, Mg, Si, Na, Ca 등이 높은 농도를 나타내었다. PM_{2.5}는 B-C유 사용 발전시설의 경우 V, Fe, Mg, Zn, Na, Si, Ca 등이 높게 조사되었고, 유연탄 사용 발전시설은 Al, Mg, Si, Fe, Ca 등이 높게 나타났다.

생활폐기물 소각시설은 Fe가 PM에서 258.7 µg/m³로 조사되었고, PM₁₀에서 230.6 µg/m³, PM_{2.5}에서 31.1

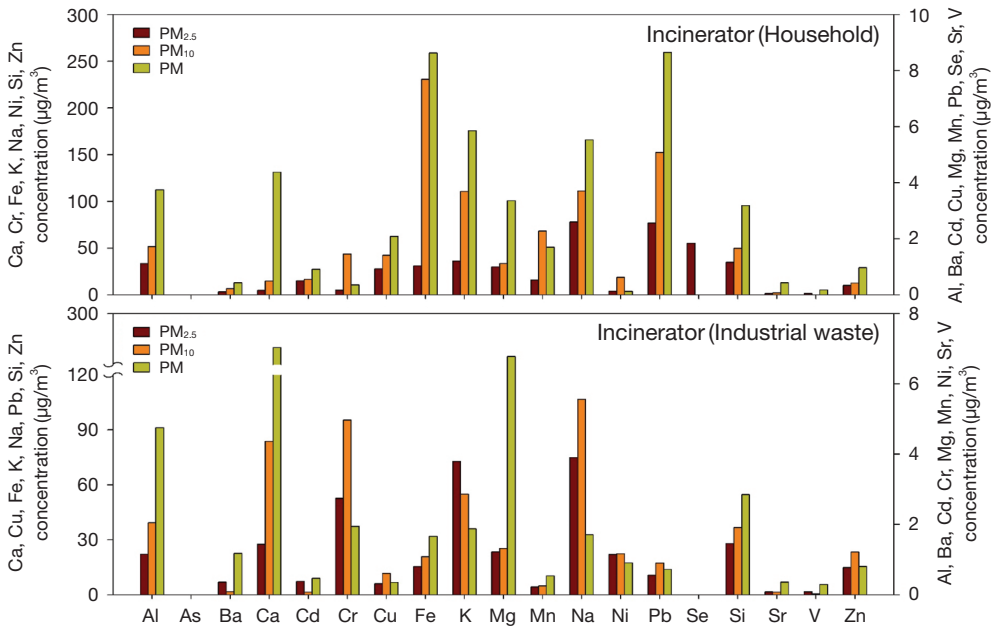


Fig. 3. Elemental concentrations for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in incinerators.

µg/m³로 가장 높게 검출되었다. 다음으로 Na, K, Si, Ca 등의 순으로 조사되었다. 사업장폐기물 소각시설의 경우는 Ca이 PM에서 233.1 µg/m³, PM₁₀에서 83.7 µg/m³, PM_{2.5}에서 27.5 µg/m³로 조사되었다. 다음으로 Na, K, Si, Zn, Pb 등이 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다(그림 3). 입자 크기별 배출 특성에서 생활폐기물 소각시설의 PM에서는 Fe, K, Na, Ca, Si 등이 높게 나타났고, 사업장폐기물 소각시설에서는 Ca, K, Na, Si, Zn 등이 높은 농도를 나타냈다. 생활폐기물 소각시설의 PM₁₀에서는 Fe, K, Na, Si 등이, 사업장폐기물 소각시설에서는 Si, Fe, Ca, Pb 등이 높은 것으로 조사되었다. 생활폐기물 소각시설의 PM_{2.5}에서는 Na, Si, K, Fe, Zn 등이, 사업장폐기물 소각시설에서는 Na, K, Ca, Si, Fe 등이 높게 나타났다. 소각시설에서는 Ca, Fe, K, Na, Si, 그리고 Zn 등이 주로 배출되는 것으로 조사되었으며(Hopke, 1985), 소각 폐기물 성상 등의 차이로 배출되는 무기원소 역시 차이가 있는 것으로 판단된다.

유리용해시설의 입자 크기별 무기원소 농도는 Na이 PM에서 374.8 µg/m³로 나타났고, PM₁₀에서 159.7 µg/m³, PM_{2.5}에서 336.4 µg/m³로 검출되었다. 다음으로 K, Pb, Si, As 등의 순으로 나타났다(그림 4). 유리용해시

설의 경우 특히 Na가 높은 농도를 나타냈는데, 이는 유리의 주성분이 SiO₂, Na₂O, CaO 등으로 Na 및 Si가 높게 나타난 것으로 판단된다(US EPA, 2016; Hopke, 1985). 전기아크로시설의 입자 크기별 무기원소 농도는 Zn가 PM에서 147.6 µg/m³로, PM₁₀에서 135.8 µg/m³, PM_{2.5}에서 39.3 µg/m³로 조사되었다. 다음으로 Fe, Si, Pb, K 등의 순으로 나타났다(그림 4).

3.3 이온성분 농도

각 측정지점에서 무기원소의 경우와 마찬가지로 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 등과 같은 입자 크기별 이온성분(양이온 5개 항목, 음이온 4개 항목)의 농도 분석을 수행하였다. B-C유 사용 발전시설의 입자 크기별 이온성분 농도는 SO₄²⁻가 PM에서 4,469.3 µg/m³, PM₁₀에서 4,373.7 µg/m³, 그리고 PM_{2.5}에서 4,541.4 µg/m³로 조사되어 이온성분 중 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 다음으로 Mg²⁺, NH₄⁺가 높게 나타났으며, Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻ 등의 순으로 조사되었다. 유연탄 사용 발전시설의 입자 크기별 이온성분 농도는 SO₄²⁻가 PM에서 761.8 µg/m³, PM₁₀에서 1,171.6 µg/m³, PM_{2.5}에서 696.0 µg/m³로 조사되어 PM₁₀에서 가장 높은 농도를 나타내었다.

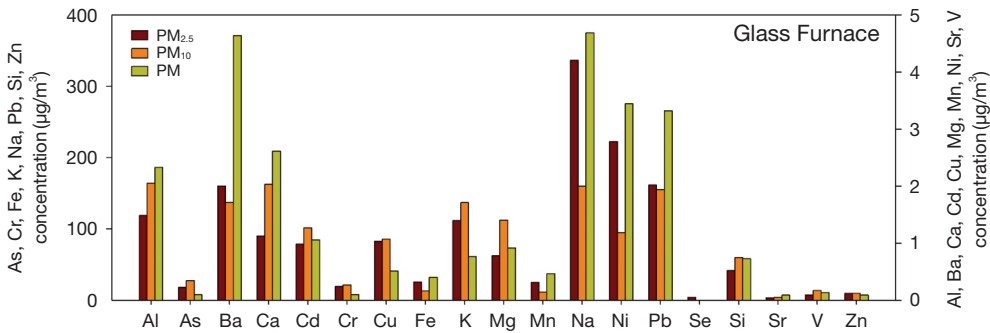


Fig. 4. Elemental concentrations for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in glass furnaces.

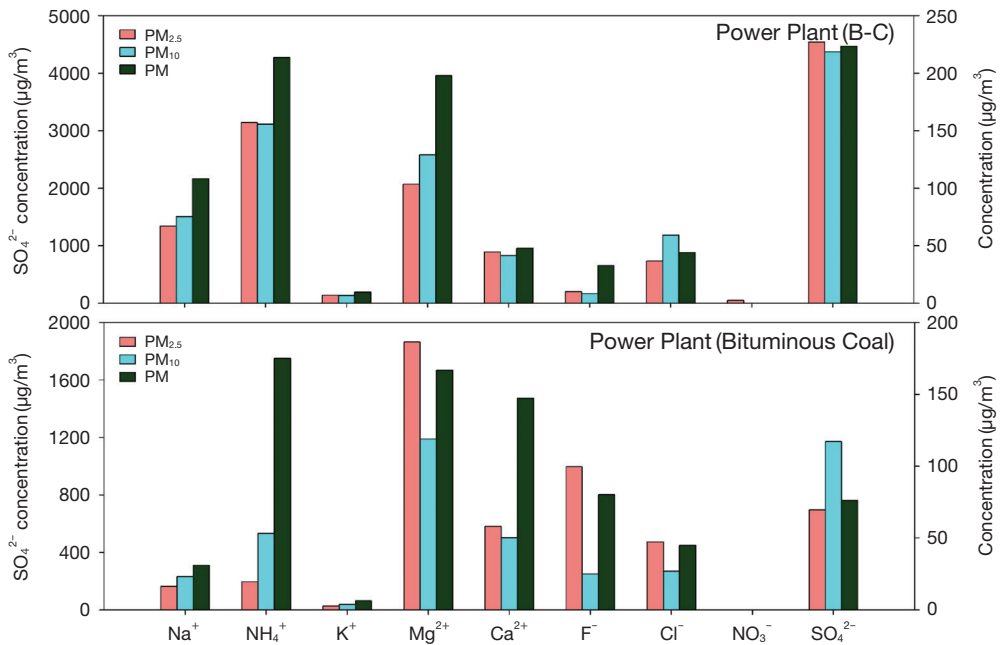


Fig. 5. Ionic species concentrations for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in power plants.

다음으로 Mg²⁺, Ca²⁺, NH₄⁺ 등의 순으로 조사되었고, NO₃⁻는 검출되지 않았다(그림 5).

생활폐기물 소각에 의한 이온성분의 배출농도 경향의 경우, Cl⁻가 PM에서 303.5 µg/m³, PM₁₀에서 227.5 µg/m³, PM_{2.5}에서 131.6 µg/m³로 가장 높게 배출되는 것으로 조사되었다. 다음으로 Na⁺, K⁺, SO₄²⁻, Ca²⁺ 등의 순으로 높은 농도를 나타내었다. 사업장폐기물 소각에 의한 이온성분 농도는 Cl⁻이 PM에서 263.9 µg/m³, PM₁₀에서 23.1 µg/m³, PM_{2.5}에서 10.6 µg/m³로 조사되

었으며 Ca²⁺, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺ 등의 순으로 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다(그림 6). 특히 Cl⁻의 경우는 석탄 연소시설 및 폐기물 또는 도시 쓰레기의 소각 등에서 주로 배출되는 것으로 알려져 있어 본 연구결과와 잘 일치하는 것으로 판단된다(Kumar *et al.*, 2015; Hwang *et al.*, 2008; Chow, 1995; Germani and Zoller, 1994).

유리용해시설의 이온성분 농도는 입자 크기에 상관없이 SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, NH₄⁺, Cl⁻ 등의 농도가 높게 나타

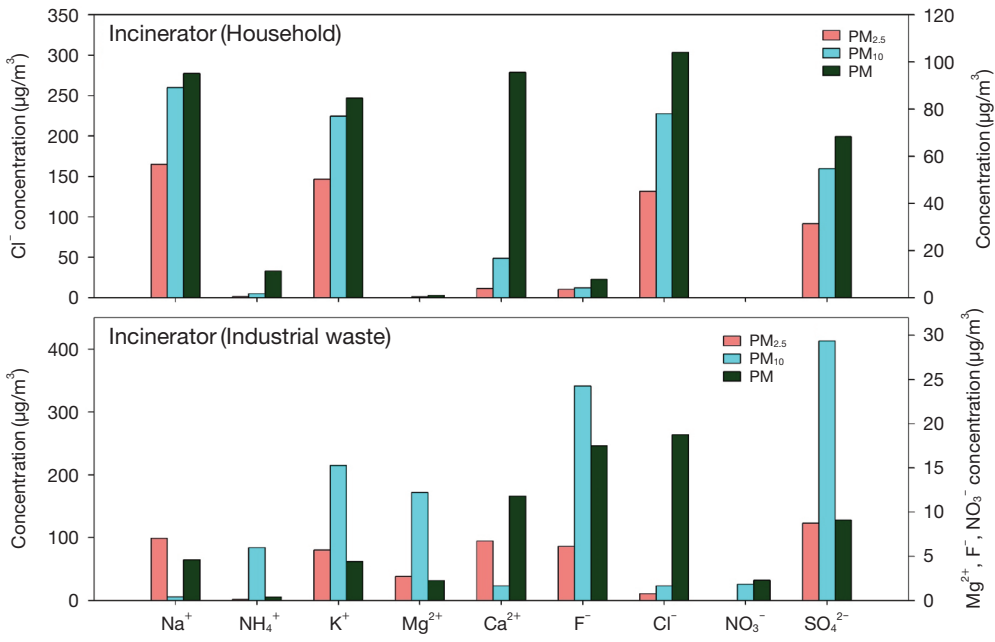


Fig. 6. Ionic species concentrations for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in incinerators.

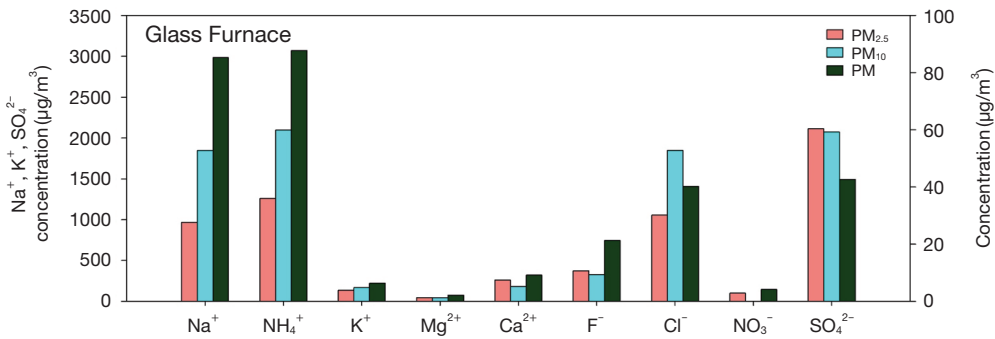


Fig. 7. Ionic species concentrations for PM, PM₁₀, and PM_{2.5} in glass furnaces.

났으며(그림 7), 특히 SO₄²⁻과 Na⁺이 높게 나타났는데 이는 유리의 품질 향상을 위하여 주원료인 규사(SiO₂) 이외에 Na₂SO₄를 첨가함에 따라 SO₄²⁻, Na⁺ 등이 높게 나타나는 것으로 판단된다(Kim, 1998).

3.4 탄소성분 농도

각 측정지점에서 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 등과 같은 입자 크기별 EC/OC의 농도를 분석하였으며 이 결과를 표 2에 나타내었다. 탄소성분 농도의 경우, 발전시설이 다른

측정장소에 비해 EC 및 OC에서 월등히 높은 농도를 나타내고 있었다. B-C유 사용 발전의 경우, EC와 OC 농도는 PM₁₀에서 각각 898.8 µg/m³, 703.4 µg/m³로 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 유연탄 사용 발전시설의 경우도 EC 농도는 PM_{2.5}와 PM에서 각각 138.0 µg/m³, 112.5 µg/m³, OC의 농도는 PM에서 104.5 µg/m³로 가장 높은 농도를 나타내었다. 발전시설은 탄소성분 중 OC보다는 EC가 더 많이 배출되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 탄소성분 중 EC는 주

Table 2. The EC and OC concentrations of PM, PM₁₀, and PM_{2.5} each sampling site.

		EC (µg/Sm ³)			OC (µg/Sm ³)		
		PM	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM	PM ₁₀	PM _{2.5}
Power Plant	Coal	112.54	94.86	137.99	104.54	29.78	32.14
	Heavy oil	428.16	898.75	465.26	621.23	703.43	378.90
Incinerator	Municipal waste	1.43	0.84	1.58	41.88	2.76	0.83
	Industrial waste	5.15	3.65	0.64	45.20	50.94	4.00
Furnace	Glass, LNG	—	0.05	—	2.13	6.15	11.43

로 탄소성분이 포함된 화석연료 등의 불완전 연소과정에서 배출된다는 여러 연구결과와 잘 일치한다(Pio *et al.*, 2011; Plaza *et al.*, 2011). 소각시설 및 유리용해시설에서의 탄소성분 농도는 발전시설의 농도와 비교하면 매우 작은 양이 배출되는 것으로 조사되었다. 특히, 소각시설, 유리용해시설의 경우는 발전시설과는 다르게 EC보다는 OC가 더 많이 배출되는 것으로 조사되었다.

4. 결 론

본 연구는 먼지배출시설 중에서 발전시설, 소각시설, 유리용해시설 등에 대해 그 배출 특성 및 현황 등을 분석하기 위하여 PM, PM₁₀, PM_{2.5}를 동시에 채취하였으며, 채취된 시료들은 적절한 전처리 과정을 거쳐 입자 크기별 무기원소, 이온성분, 탄소성분들을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

측정을 실시한 9개 시설에 대한 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 무게 농도는 각각 0.63~9.58 mg/Sm³, 0.26~7.47 mg/Sm³, 0.13~6.34 mg/Sm³로 파악되었으며, 전체 먼지 농도 중에 PM₁₀, PM_{2.5} 무게 농도가 차지하는 비율은 각각 0.42~0.98, 0.20~0.69로 산출되었다.

측정지점에 대한 입자 크기별 배출 특성에서, PM의 경우는 유리용해시설에서 8.86 mg/m³로 가장 높은 농도를 나타내었고, 발전시설의 경우는 6.25 mg/m³, 소각시설에서 2.50 mg/m³로 조사되었다. PM₁₀의 경우도 유리용해시설(5.80 mg/m³) > 발전시설(5.06 mg/m³) > 소각시설(1.59 mg/m³)의 순으로 조사되었다. PM_{2.5}의 경우는 발전시설이 4.43 mg/m³로 가장 높았고, 유리용해시설이 3.59 mg/m³, 소각시설이 1.05 mg/m³의 순으로 조사되었다.

각 측정지점에 대한 무기원소의 배출 특성의 경우,

발전시설은 Al, Ca, Fe, Mg, Na, Si, V 등이, 소각시설은 Ca, Fe, K, Na, Si 등이, 유리용해시설은 Na, Pb, K, Si 등이 주로 배출되는 것으로 조사되었다. 이온성분 배출 특성의 경우, 발전시설은 입자 크기에 상관없이 SO₄²⁻가 가장 높은 농도를 나타내었으며, 소각시설의 경우는 Cl⁻, K⁺ 등이, 유리용해시설은 Na⁺와 SO₄²⁻가 주로 배출되는 것으로 조사되었다. 탄소성분의 배출 특성은 발전시설이 다른 측정장소에 비해 EC 및 OC에서 월등히 높은 농도를 나타내고 있었으며, 탄소성분 중 OC보다는 EC가 더 많이 배출되는 것으로 조사되었다.

이와 같은 연구결과와 더불어 추후 좀 더 다양한 대기오염물질 배출원에 대한 먼지 배출 특성 현황을 조사하고 각 사업장의 먼지 배출 성분비 등에 대한 연구가 더 진행된다면 오염원 기여도 추정 연구의 오염원 분류표 확보 및 각 사업장에 대한 효율적인 먼지 배출 관리방안을 마련하는 데 좋은 자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

- Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *Journal of Air and Waste Management Association*, 45(5), 320-382.
- Chow, J.C., J.G. Watson, D.H. Lowenthal, L.-W.A. Chen, and N. Motallebi (2010) Black and organic carbon emission inventories: Review and Application to California, *Journal of Air and Waste Management Association*, 60, 497-507.
- Corio, L.A. and J. Sherwell (2000) In-stack condensable particulate matter measurement and issues, *Journal of Air and Waste Management Association*, 50(3), 207-218.

- Ehrlich, C., G. Noll, W.-D. Kalkoff, G. Baumbach, and A. Dreiseidler (2007) PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}-Emissions from industrial plants-Results from measurement programmes in Germany, *Atmospheric Environment*, 41, 6236-6254.
- Germani, M.S. and W.H. Zoller (1994) Solubilities of elements on in-stack suspended particles from a municipal incinerator, *Atmospheric Environment*, 28(8), 1393-1400.
- Hobbs, P.V. (1993) *Aerosol-Cloud-Climate Interaction*. Academic Press, Inc., 75-93.
- Hopke, P.K. (1985) *Receptor Modeling in Environmental Chemistry*, John Wiley & Sons, New York.
- Hwang, I.J., P.K. Hopke, and J.P. Pinto (2008) Source apportionment and spatial distributions of coarse particles during the Regional Air Pollution Study, *Environmental Science and Technology*, 42, 3524-3530.
- Jeong, Y.J. and I.J. Hwang (2015) Source apportionment of PM_{2.5} in Gyeongsan using the PMF model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(6), 508-519. (in Korean with English abstract)
- Kang, B.W. (1998) Source apportionment of PM_{2.5} using a CMB receptor model: in Chongju area, Ph.D. thesis, Konkuk University.
- Kim, B.H. (1998) *Glass technology*, Cheong moon gak Publishing Co.
- Kumar, S., S.G. Aggarwal, P.K. Gupta, and K. Kawamura (2015) Investigation of the tracers for plastic-enriched waste burning aerosols, *Atmospheric Environment*, 108, 49-58.
- Meij, R. and H. te Winkel (2004) The emission and environmental impact of PM₁₀ and trace elements from a morden coal-fired power plant equipped with ESP and wet FGD, *Fuel Processing Technology*, 85, 641-656.
- Minguillon, M.C., M. Viana, and X. Querol (2013) Particulate matter; Environmental monitoring and mitigation, Future Science Ltd. 9-20.
- Ministry of Environment (MOE) (2015), Enforcement Rule of the Clean Air Conservation ACT.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2010) A Study for Establishing the Speciate of the Air Pollutants from Anthropogenic Sources in Korea (III).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) A Study on the Speciation and Control Measures of PM_{2.5} from Large Stationary Emission Source.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015a) Air Pollutants Emission Factors.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015b) Fine Particulate Matter (PM-10 and PM-2.5) in Flue Gas.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) National Air Pollutants Emission 2013.
- Oravisjarvi, K., M. Pietikainen, J. Ruuskanen, S. Niemi, M. Lauren, A. Voutilainen, R.L. Keiski, and A. Rautio (2014) Diesel particle composition after exhaust after-treatment of an off-road diesel engine and modeling of deposition into the human lung, *Journal of Aerosol Science*, 69, 32-47.
- Pacyna, J.M., K. Sundseth, E.G. Pacyna, W. Jozewicz, J. Munthe, M. Belhaj, and S. Astrom (2010) An assessment of costs and benefits associated with mercury emission reductions from major anthropogenic sources, *Journal of Air and Waste Management Association*, 60, 302-315.
- Pio, C., M. Cerqueira, R.M. Harrison, T. Nunes, F. Mirante, C. Alves, C. Oliveira, A.S. Campa, B. Artinano, and M. Matos (2011) OC/EC ratio observations in Europe: Re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon, *Atmospheric Environment*, 45(34), 6121-6132.
- Plaza, J., B. Artinano, P. Salvador, F.J. Gomez-Moreno, M. Pujadas, and C.A. Pio (2011) Short-term secondary organic carbon estimations with a modified OC/EC primary ratio method at a suburban site in Madrid (Spain), *Atmospheric Environment*, 45(15), 2496-2506.
- Seo, S.J., Y.K. Seo, Y.J. Hwang, D.H. Jung, and S.O. Back (2014) Application of adsorption sampling and thermal desorption with GC/MS analysis for the measurement of low-molecular weight PAHs in ambient air, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(4), 362-377. (in Korean with English abstract)
- US EPA (2014) Method 201A-Determination of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from stationary sources (<https://www3.epa.gov/ttn/emc/method201a.html>).
- US EPA (2016) SPECIATE Ver. 4.4, <https://www.epa.gov/ttn/chief/software/speciate>