

이젝터-다공튜브 희석 샘플링과 ELPI를 이용한 석탄화력발전소 배출 미세먼지의 입자 크기에 따른 성분 분석

신 동 호^{1),2)} · 박 대 훈¹⁾ · 조 윤 희^{1),3)} · 김 영 훈^{1),2)} · 홍 기 정¹⁾ · 이 건 희¹⁾ · 한 방 우^{1),3)*} · 황 정 호^{2)*}

¹⁾한국기계연구원 지속가능환경연구실

²⁾연세대학교 기계공학과

³⁾과학기술연합대학원대학교 환경에너지기계공과

(2022년 4월 12일 투고, 2022년 7월 13일 수정, 2022년 7월 17일 게재확정)

Elemental components analysis according to the size of fine particles emitted from a coal-fired power plant using an ejector-porous tube dilution sampling and ELPI

Dongho Shin^{1),2)} · Daehoon Park¹⁾ · Yunhui Joe^{1),3)} · Younghun Kim^{1),2)} · Kee-Jung Hong¹⁾ ·
Gunhee Lee¹⁾ · Bangwoo Han^{1),3)*} · Jungho Hwang^{2)*}

¹⁾Department of Sustainable Environment Research, Korea Institute of Machinery & Materials

²⁾Mechanical Engineering, Yonsei University

³⁾Environment Energy Machinery, University of Science and Technology

(Received 12 Apr 2022; Revised 13 Jul 2022; Accepted 17 Jul 2022)

Abstract

In order to understand the characteristics of fine particles emitted from coal-fired power plant stacks, it is important to analyze the size distribution and components of particles. In this study, particle size distributions were measured using the ejector-porous tube dilution device and an ELPI system at a stack in a coal-fired power plant. Main elemental components of particles in each size interval were also identified through TEM-EDS analysis for the particles collected in each ELPI stage.

Particle size distributions based on number and mass were analyzed with component distributions from 0.006 to 10 μ m. The highest number concentration was about 0.01 μ m. The main component of the particles consisted of sulfur, which indicated that sulfate aerosols were generated by gas-to-particle conversion of SO₂. In a mass size distribution, a mono-modal distribution with a mode diameter of about 2 μ m was shown. For the components of PM_{1.0} (particles less than 1 μ m), the abundance order was F > Mg > S > Ca, and however, for the components of PM₁₀ (particles less than 10 μ m), it was in the order of Fe > S > Ca > Mg. The elemental components by particle size were confirmed.

Keywords: fine particles, ELPI, coal-fired power plant, elemental componets, TEM-EDS

*Corresponding authors.

Tel : +82-42-868-7068, Fax : +82-42-868-7284 (B.Han); Tel : 82-2-2123-7226; Fax : 82-2-312-2821 (J.Hwang)

Email : bhan@kimm.re.kr (B. Han), hwangjh@yonsei.ac.kr (J. Hwang)

1. 서론

산업의 발달로 인해 필연적으로 대기 중 미세먼지 농도가 높아지면서 국민들의 건강을 위협하고 있다(Lee et al., 2011). 미세먼지는 WHO에서 1급 발암물질로 지정되어 호흡기를 통해 침투하여 폐 질환과 호흡기 질환을 유발한다 (Kavouras and Chalbot, 2017; Peng et al., 2009). 특히 석탄화력발전소는 국내 미세먼지의 주요 발생원으로 꼽히고 있다 (Saarnio et al., 2014; Zheng et al., 2017). 이에 환경부에서는 배출오염허용기준을 마련하고 TMS (Telemonitoring System)를 통해 각 발전소 굴뚝을 관리하고 있다 (Ju and Youn, 2019). 관리 대상인 대기오염물질로는 암모니아, 일산화탄소, 염화수소, 황산화물, 질소산화물, 불소화합물 등 6개의 가스상 오염물질과 먼지 등 1개의 입자상 물질이 있다.

석탄화력발전소는 연소 시 발생하는 대기오염물질들을 줄이기 위해 보일러 후단에 저감장치를 설치하여 운영하고 있다. 선택적 촉매 환원 (Selective catalytic reduction) 장치 (Forzatti, 2001)를 통해 질소산화물을 저감하고, 전기집진기 (Electrostatic precipitator)를 통해 먼지를 집진하고 (Pudasainee et al., 2012), 배연탈황장치 (Flue Gas Desulfurization)는 황산화물 및 수용성 가스 물질을 저감하는 역할을 한다 (Córdoba, 2015). 연소가스는 이러한 저감장치를 거친 후 굴뚝을 통해 대기 중으로 배출된다.

석탄 연소에 의해 발생하는 입자는 여러 가지 성분으로 구성되어 있고 기본적으로 석탄의 구성 성분에 따라 달라진다. 또한 연소 시 발생하는 여러 가지 현상에 의해서 입자의 크기 및 성분이 결정되게 된다 (Kauppinen and Pakkanen, 1990; Ninomiya et al., 2004; Yoo et al., 2005). 석탄 연소 시 발생하는 입자는 탄소입자, 황산염, 질산염, 지각 입자, 이온 성분 입자 등으로 분류 할 수 있다. 입자 발생 메커니즘은 미세알과의 유착, 석탄의 파쇄, 배출 미세알의 파쇄, 무기물질의 증발/응축, 고유 내화재 금속의 고체화 등이 있다. 이에 따라 발생하는 입자의 입경이 달라지게 된다. 고유 내화재 금속의 고체화는 석탄 내 금속이 그대로 입자화하는 것으로 1 μm 이상의 입자를 형성한다 (Xu et al., 2011).

기존에 석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는 미세

먼지를 측정하는 방법인 중량법과 광투과법을 사용해서 입자의 크기 별 성분을 분석하는 것은 어렵다. 중량법을 통해 입경 분리는 가능하지만 크게 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} 만 구분하고 있고, 각 입자 크기에 따른 성분을 정확히 알 수는 없다 (Park et al., 2018; Youn et al., 2017). TMS방법의 경우 실시간 입자의 전체 농도는 알 수 있지만 입자의 크기에 대한 정보를 알 수 없다. 굴뚝에서 배출되는 미세먼지의 정확한 특성을 확인하기 위해서는 입자의 크기에 따른 농도를 측정하고, 크기 별로 입자를 분리하여 성분까지 분석하는 것이 필요하다. 기존에 석탄화력발전소 굴뚝에서 다단 임팩터를 사용하여 입자를 포집하여 크기 별 성분분석을 수행한 연구는 많이 존재하고 있다. 하지만 해당 연구들은 백 나노미터 이상의 입자에 대해서만 연구를 수행하였고, 핵생성과 관련된 수-수십 나노미터 영역의 입자 측정 및 분석은 거의 이루어 지지 않았다 (Coles et al., 1979; Gladney et al., 1976; McElroy et al., 1982; Saarnio et al., 2014).

본 연구에서는 연구진이 개발한 새로운 이젝터-다공튜브형 희석 샘플링 장치 (Shin et al., 2019a)와 Electrical Low Pressure Impactor (ELPI+, Dekati, Finland) 입자 계측기를 사용하여 화력발전소 굴뚝에서 배출되는 미세먼지의 입자 크기에 따른 농도를 측정하였고, 해당 장치의 Cascade Impactor의 각 단에 포집된 미세먼지를 Transmission electron microscope (TEM)-Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) 분석을 통해 공기역학적 크기별 입자 성분을 분석하였다.

2. 실험방법

석탄화력발전소 굴뚝과 같이 고온, 다습, 고유속 환경에서는 일반적인 대기 미세먼지 측정 장비로는 정확한 측정이 어렵다. 본 연구에서는 이젝터-다공튜브형 희석장치 (Shin et al., 2019b)를 사용하여 입자를 샘플링 하였고, 측정에 대한 과정은 그림 1에 자세히 묘사하였다. 샘플링된 배기가스의 급격한 온도 저하에 의한 입자 응축을 막기 위해 프리 히터의 온도를 200°C로 가열하여 샘플링 배관의 온도를 유지시켜 주었다. 이젝터에는 압축공기를 공급하여 입자를 샘플링하는 역할을 하는데

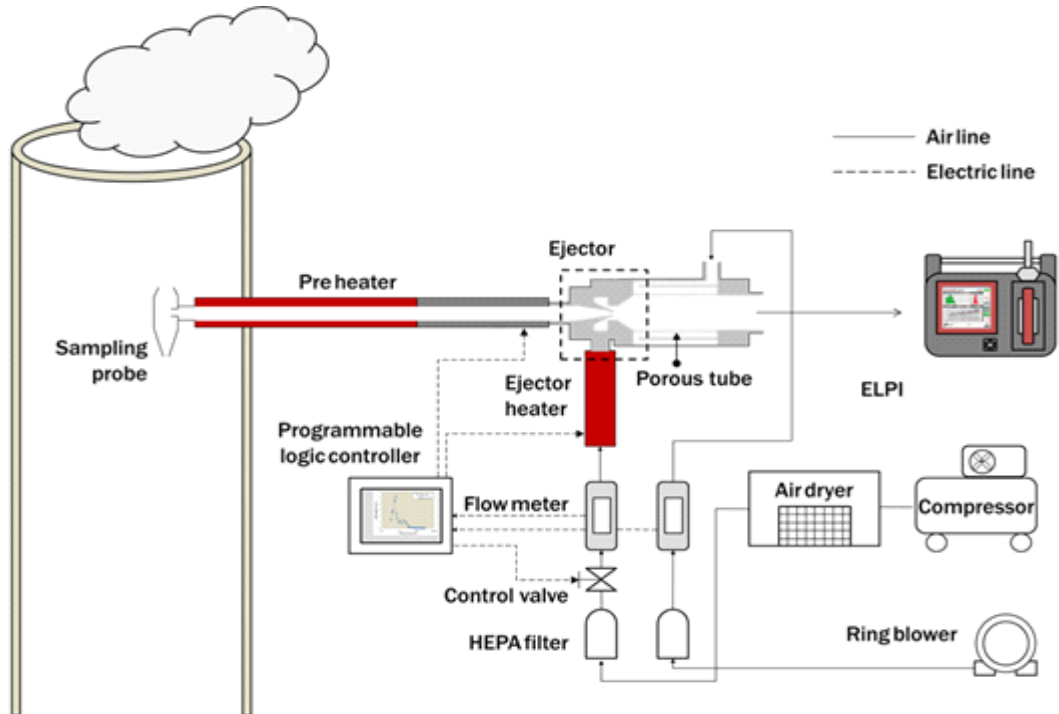


Figure 1 Schematic of particle measurement system using a developed dilution system and ELPI in the coal-fired power plant stack

이때, 이젝터 히터를 120 °C로 가열하여 고온의 압축공기를 이젝터에 공급하도록 하였다. 압축기 (NCP052-T50; Air Maker, Korea)에서 고압의 공기가 공기 건조기 (SHD-10, SEHAN Dryer Co. Ltd., Korea) 와 high-efficiency particulate air (HEPA) filter를 통과한 후 히터로 가열된 뒤 이젝터에 공급된다. 이때 유량계 (4043, TSI, USA)와 제어 밸브를 사용하여 공기의 유량을 조절하게 된다. 이젝터 후단의 다공튜브 관에는 블로워 (KJB3-400, Kijeonsa, Korea)를 통해 상온의 공기를 공급한다. 다공튜브에 공급하는 상온의 희석 공기는 이젝터

후단에서 발생하는 입자의 벽면 손실을 최소화하면서 샘플링된 배기가스의 온도를 입자 계측기가 측정 가능한 온도로 낮춰주는 역할을 한다 (Shin et al., 2019b). 블로워에서 공급되는 공기는 이젝터로 공급되는 1차 희석공기와 마찬가지로 HEPA 필터를 통과하여 충분히 깨끗한 공기를 공급하도록 하였다. 이젝터에 40 L/min, 다공튜브에 50 L/min의 공기를 공급하여 실험을 수행하였다. 입자 측정에는 ELPI 장비를 사용하였다. ELPI는 실시간으로 입자의 농도와 크기 분포를 측정할 수 있는 장치로 표 2는 ELPI에서 각 단별 분리되는 입자의 크

Table 1 Particle sizes separated for ELPI stages

Particle size (μm)	Particle size (μm)	Particle size (μm)	Particle size (μm)
Stage 1	0.01-0.02	Stage 5	0.10-0.17
Stage 2	0.02-0.03	Stage 6	0.17-0.26
Stage 3	0.03-0.06	Stage 7	0.26-0.40
Stage 4	0.06-0.10	Stage 8	0.40-0.64
		Stage 9	0.64-0.99
		Stage 10	0.99-1.61
		Stage 11	1.61-2.46
		Stage 12	2.46-3.97
		Stage 13	3.97-6.69
		Stage 14	6.69-10.2

Table 2 Weight% of each component (F, Na, Mg, Si, S, K, Ca, Ti, Fe, Cu, other) for ELPI stages

	F	Na	Mg	Si	S	K	Ca	Ti	Fe	Cu	Other
Stage 1	0.0	0.0	0.0	63.7	36.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stage 2	0.0	0.0	0.0	79.8	20.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stage 3	0.0	0.0	0.0	78.0	22.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stage 4	0.0	0.0	0.0	48.0	52.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Stage 5	0.0	0.0	3.5	30.9	18.6	0.0	7.2	0.4	2.2	36.4	0.9
Stage 6	11.8	1.2	12.7	11.6	19.2	0.5	5.1	0.2	1.4	34.7	1.6
Stage 7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	82.4	11.8
Stage 8	20.2	1.9	16.2	32.9	10.1	1.6	3.9	1.1	11.8	0.0	0.4
Stage 9	24.1	2.0	13.1	24.1	11.8	1.6	11.0	3.0	5.4	0.0	3.8
Stage 10	0.0	0.0	7.4	28.2	28.5	1.4	24.2	0.0	10.2	0.0	0.0
Stage 11	4.3	1.4	5.9	56.3	6.0	2.7	4.8	2.1	13.9	0.0	2.6
Stage 12	0.0	0.0	5.5	63.0	5.6	3.0	2.8	2.1	10.4	0.0	7.4
Stage 13	0.0	1.4	5.5	47.5	12.8	2.3	1.2	0.7	11.0	16.3	1.3
Stage 14	0.0	2.9	4.3	41.4	15.6	3.4	3.3	0.4	8.4	19.5	0.9

기를 나타내고 있다. 본 연구에서는 각 스테이지마다 TEM grid를 두어 포집된 입자의 TEM-EDS 분석을 통해 입자의 크기에 따른 개수 및 질량농도 뿐만 아니라 굴뚝에서 배출된 입자의 형상 및 성분 분석을 동시에 수행하였다. 샘플링은 충분히 많은 양의 입자를 포집하기 위하여 약 4시간 동안 연속 측정 하였고, 이때 ELPI의 흡입유량은 9.8 L/min 이다.

3. 실험결과

석탄 연소에 의해 배출되는 원소는 석탄에 함유된 원소 성분과 후처리 시스템에 의해 결정된다. 본 연구진은 석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는 입자를 입자의 크기 별로 측정하였고, 이를 $PM_{2.5}$, PM_{10} 으로 환산하면 약 3, 5 mg/Nm³를 나타내었다. 표 2는 각 스테이지에서 EDS를 통해 측정된 입자 성분의 질량 비율을 나타내고 있다. 본 연구에서 원소는 F, Na, Mg, Si, S, K, Ca, Ti, Fe, Cu 및 그 외 원소들에 대해 정리하였다. O의 경우 모든 입자에서 다량 검출되었고, 이는 대부분 성분의 산화물 형태를 띄고 있기 때문에 성분 분석하는데 제외하였다. Si 성분은 대부분의 스테이지에서 가장 높은 비율로 나타났다. 이는 Si가 fly ash를 형성하

는 주요 성분이기 때문이다. 또한 0.1 μm 이하 입자(ultrafine particle, PM_{0.1})에서도 Si 성분이 다량으로 나타나는데 이는 석탄 연소 시 석탄에 함유된 SiO₂가 직접 증발하여 응축에 의해 작은 입자로 생성되어 나타나기 때문이다(Xu et al., 2014).

그림 2는 ELPI를 통해 석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는 먼지의 입자 크기에 따른 개수 및 질량 농도로 나타낸 후 TEM-EDS 분석을 통해 측정된 성분 분포를 나타낸 그래프이다. 금속성분은 대부분 산화된 상태로 입자화 되었지만 여기서는 금속 원소 상태로 분석하였다 (Saarnio et al., 2014; Yoo et al., 2005). 그림 2(a)는 입자 크기에 따른 개수 농도를 나타낸다. 개수농도 분포는 첫번째 스테이지인 0.01-0.02 μm 에서 1.0×10^5 #/cm³로 가장 높은 농도를 나타냈다. 수 나노미터 크기의 입자가 측정된 것은 굴뚝 내에서 가스 상 물질이 핵생성 및 응축 메카니즘에 의해 입자화되어 측정된 것으로서 Si 성분을 제외한 대부분 황(S)성분에 의해 핵성장 및 응축 생성된 것으로 나타났다.

그림 2(b)는 입자 크기에 따른 질량 농도를 나타내고 있다. 해당 그래프는 모드 직경이 2 μm 로 단일 모드를 나타내고 있다. 그림 2(a)의 수-수십 나노미터 입자 영역과는 달리 다양한 성분 분포를 나타내고 있다. 소량의 F와 함께 K, Mg, Na, Ca의

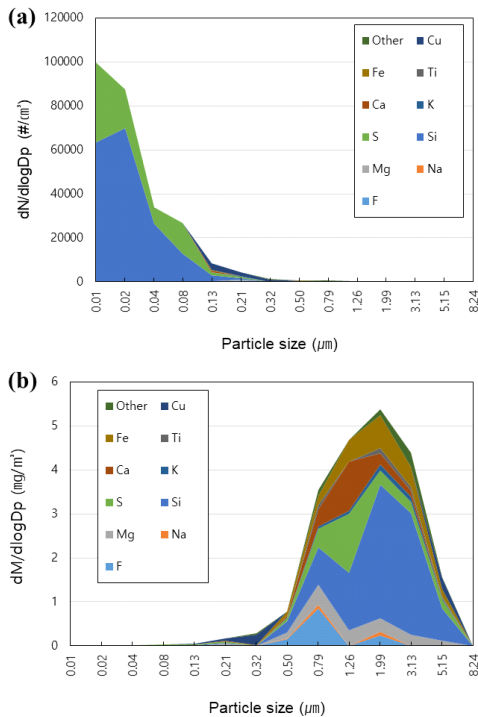


Figure 2 The elemental composition of particles as a function of particle size from coal fired power plant stack, (a) is number concentration and (b) is mass concentration

미네랄 및 Fe와 같은 금속 성분이 측정되었다. 플루오린(F)은 석탄 연소 시 석탄에 함유되어 있던 플루오린이 가스 상태로 발생하고 이는 대부분 HF와 같은 물에 녹을 수 있는 불화화합물이다. 또한 석탄 연소 시 금속산화물들 (i.e., CaO, Fe₂O₃, Al₂O₃ and MgO)이 발생하는데, 이와 같은 금속산화물들이 가스상의 플루오린과 반응하여 CaF₂, MgF₂, FeF₃, AlF₃와 같은 insoluble fluoride를 생성한다 (López-Vilariño et al., 2003). 이를 통해 약 0.5-3.13 μm 스테이지에서 플루오린 성분이 검출되었다.

한편 기존 연구 및 측정 결과를 살펴보면 0.3 μm에서 10 μm까지의 영역을 32채널로 측정 가능한 optical particle counter (OPC, 1.109, Grimm, Germany)로 측정했을 때 질량농도 분포가 이중 모드 (bi-modal) 분포를 나타내었고, 이때 mode diameter가 0.6 μm, 2.5 μm로 나타났다 (Shin et al.,

2022). 하지만 본 연구결과에서 ELPI를 통해 측정된 입자의 질량농도 분포는 단일모드 (mono-modal)로 나타났고 이때 mode diameter는 약 2 μm이다. 이는 ELPI의 경우 0.006 μm에서 10 μm의 매우 넓은 입자 영역을 14채널로 분류하여 측정함으로써 두 개의 모드를 구분하지 못하고 단일 모드로 나타난 것처럼 보인다. 실제로 ELPI로 측정된 단일모드 범위 안에 OPC로 측정된 이중 모드의 분포가 포함되는 것을 볼 수 있다.

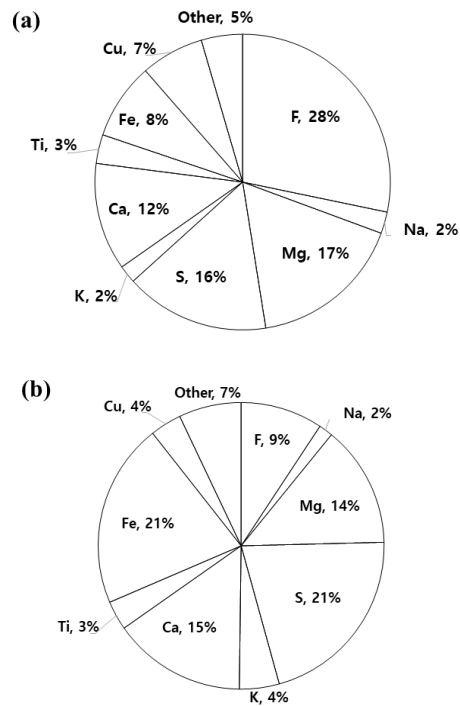


Figure 3 Analyzed elemental composition of PM1.0(a) and PM10(b) from exhaust particle in the coal fired power plant stack

그림 3은 전체 질량 중 각 성분이 차지하는 비율을 나타낸 그래프이다. 전체 스테이지에서 가장 높은 비율을 차지하는 Si 성분을 제외하고 정리를 하였다. 그림 3(a)는 1.0 μm 이하 입자들의 성분 비율을 나타내고 있고, 그림 3(b)는 10 μm 이하 입자에 해당하는 성분 비율이다. 그림 3(a)에서 가장 큰 비율을 차지하는 것은 28%로 F 성분이고 Mg, S, Ca, Fe 순으로 높게 나타났다. 1.0 μm 이하 입자

들은 가스에서 입자로의 상변화에 의한 생성된 입자이거나 혹은 석탄 연소 시 미네랄 성분들이 증발 응축 과정에 의해 형성된 입자로 판단된다. 앞에서 설명한 바와 같이 금속산화물들이 가스 상 플루오린과 반응하여 생성된 insoluble fluoride로 입자상 물질로 나타났다. 그림 3(b)는 10 μm 이하 입자에 대한 성분의 비율을 나타내고 있다. Fe, S, Ca, Mg 순으로 그림 3(a)와 달리 금속 성분의 비율이 높은 것을 확인 할 수 있다. Fe, Ca 등 성분은 Fly ash의 주요 성분으로 석탄 연소 시 발생하는 석탄 연소 입자로 ASTM C618에 의하면 fly ash의 성분에 따라 class를 나누는데 해당 fly ash는 Fe 성분이 다량 함유된 것으로 보아 class C fly ash로 분류 할 수 있다 (Henry et al., 1999). 그림 3(a), (b) 모두 황 성분이 높은 비율로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 황 성분은 핵생성 및 응축을

통한 입자화 과정을 거쳐 생성된 입자인데, 여기서 생성된 입자는 수-수십나노미터로 매우 작은 입자들이다. 하지만 1 μm 이상에서도 높은 비율로 나타나고 있는데, 그 이유는 이미 형성된 큰 입자 주변에서 이질 응축 (heterogeneous condensation)에 의해 입자화되어 큰 입자에 붙어 발생한 것으로 보인다.

그림 4는 ELPI에서 가장 높은 농도를 나타내는 입경의 스테이지에 대한 TEM 이미지 및 EDS 분석을 통해 원소들의 비율을 이미지로 나타내고 있다. 그림 4(a)는 첫번째 스테이지의 0.01 μm에서 0.02 μm의 입자에 해당하는 TEM 이미지로서 굉장히 작은 입자들이 모여서 이미지로 나타난 것을 확인할 수 있다. 이때 성분 분석에 의하면 대부분 황 성분인 것을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 13번째 스테이지의 4.0 μm에서 6.7 μm의 입자에 영역에서 포착된 구형 입자의 이미지이다. 여기서 측정된 원

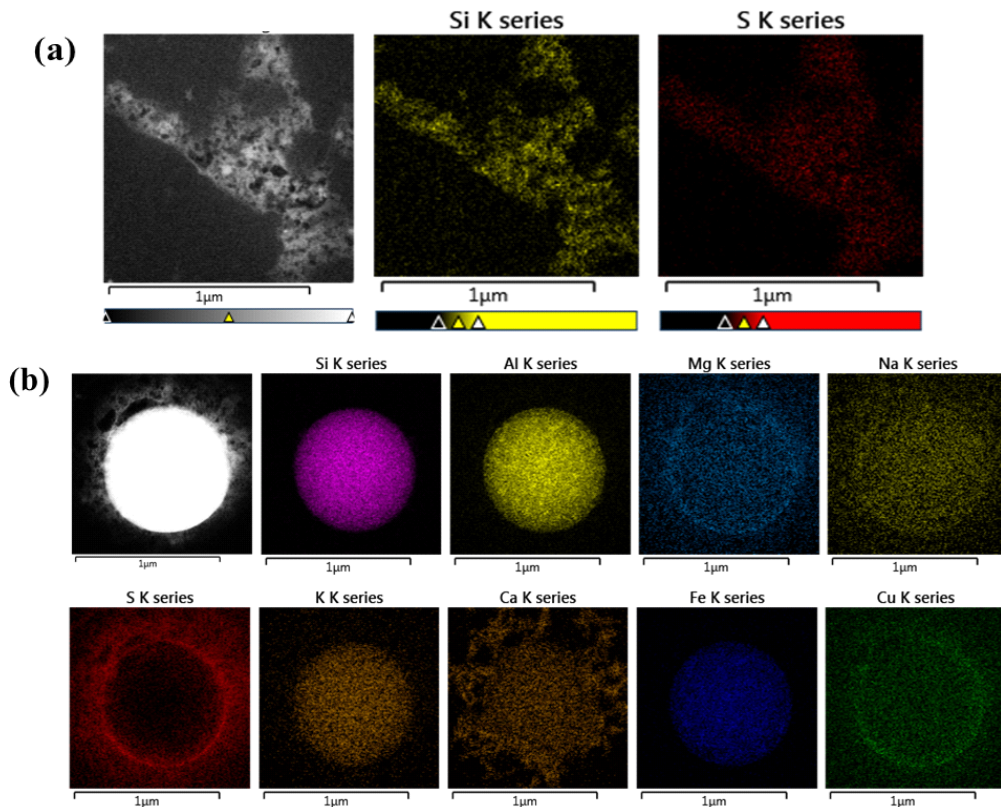


Figure 4 TEM images and elemental components images of typical particles in 1st stage (a) and 13th stage (b)

소들은 크게 3가지로 분류할 수 있다. Si, Al, Fe 등 원소들은 구형 입자 내부에만 존재하고 있다. 이를 통해 이 구형 입자는 Al-Si-Fe 합금으로 fly ash 입자이다. Mg, Na, K, Ca, Cu 등의 원소들은 구형 입자 내부 및 외부에서 모두 검출되었다. 마지막으로 S는 구형 입자의 표면에서만 그 성분이 검출되었다. 이를 통해 우선 알 수 있는 것은 앞에서 언급한 바와 같이 S성분은 큰 입자 주변에서 이질 응축에 의해서 생성되는 것을 확인하였다.

4. 결 론

석탄화력발전소 굴뚝에서 배출되는 먼지의 농도 및 입경에 따른 성분 분석을 위해 개발한 이젝터-다공튜브 희석 장치와 ELPI를 사용하였다. 개발한 이젝터-다공튜브형 희석장치를 통해 고온, 고농도, 고수분 환경에서의 배기가스를 입자의 응축 및 큰 입자 손실을 최소화 하면서 상온, 저농도, 저수분의 환경으로 전환시켜줌에 따라 ELPI 측정장치를 굴뚝 환경에서도 사용할 수 있도록 하였다. ELPI에서는 각 stage 별 포집된 입자를 TEM-EDS 분석을 통해 성분을 확인하였고, 크기에 따른 입자의 성분을 분석함으로써 석탄화력발전소에서 배출되는 먼지의 특성을 확인 할 수 있었다. S 성분은 전 입경 영역에서 두루 검출되었는데, 작은 입자의 경우는 황 성분에 의해 핵생성 및 균질 응축으로 생성된 입자이고 큰 입자의 경우는 이미 존재하는 다른 큰 입자들 표면에서 이질 응축에 의해 황성분이 응축되어 형성된 것으로 보인다. 1 μm 이상 입자에서 금속 성분이 다량 검출되었고, 이는 대부분 Fly ash 입자로 판단된다. 그 외에 미네랄 성분들로 입자를 구성하고 있다.

본 연구를 통해 새로운 희석장치와 ELPI를 이용하여 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지의 입자 크기 별 성분 특성을 분석하였고, 해당 입자들의 발생 원인을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “미세먼지 사각지대 해소 및

관리 실증화 기술개발 사업”으로 지원받아 수행하였고, 이에 감사드립니다. (grant no. 2020003070002)

References

- Coles, D.G., Ragaini, R.C., Ondov, J.M., Fisher, G.L., Silberman, D., and Prentice, B.A. (1979). Chemical Studies of Stack Fly Ash from a Coal-Fired Power Plant, *Environmental Science and Technology*, 13, 455-459.
- Córdoba, P. (2015). Status of Flue Gas Desulphurisation (FGD) systems from coal-fired power plants: Overview of the physico-chemical control processes of wet limestone FGDs, *Fuel*, 144, 274-286.
- Forzatti, P. (2001). Present status and perspectives in de-NO_x SCR catalysis, *Applied Catalysis A: General*, 222, 221-236.
- Gladney, E.S., Small, J.A., Gordon, G.E., and Zoller, W.H. (1976). Composition and size distribution of in-stack particulate material at a coal-fired power plant, *Atmospheric Environment*, 10, 1071-1077.
- Henry, A.F., Thomas, L.R.I., James, C.H., and Uschi, M.G. (1999). Characterization of fly ash from Israel with reference to its possible utilization, *Fuel*, 78, 215-223.
- Ju, J., and Youn, D. (2019). Statistically Analyzed Effects of Coal-Fired Power Plants in West Coast on the Surface Air Pollutants over Seoul Metropolitan Area, *Journal of the Korean earth science society* 40, 549-560.
- Kauppinen, E.I., and Pakkanen, T.A. (1990). Coal Combustion Aerosols: A Field Study, *Environmental Science and Technology*, 24, 1811-1818.
- Kavouras, I.G., and Chalbot, M.C.G. (2017). Influence of ambient temperature on the heterogeneity of ambient fine particle chemical composition and disease prevalence, *International Journal of Environmental Health Research*, 27, 27-39.
- Lee, S., Ho, C.H., and Choi, Y.S. (2011). High-PM10

- concentration episodes in Seoul, Korea: Background sources and related meteorological conditions, *Atmospheric Environment* 45, 7240–7247.
- López-Vilariño, J.M., Fernández-Martínez, G., Turnes-Carou, I., Muniategui-Lorenzo, S., López-Mahía, P., and Prada-Rodríguez, D. (2003). Behavior of fluorine and chlorine in Spanish coal fired power plants with pulverized coal boilers and fluidized bed boiler, *Environmental Technology*, 24, 687–692.
- McElroy, M.W., Carr, R.C., Ensor, D.S., and Markowski, G.R. (1982). Size distribution of fine particles from coal combustion, *Science*, 215, 13–19.
- Ninomiya, Y., Zhang, L., Sato, A., and Dong, Z. (2004). Influence of coal particle size on particulate matter emission and its chemical species produced during coal combustion, *Fuel Processing Technology* 85, 1065–1088.
- Park, H.S., Lee, D.A., Yang, J.G., Jang, S.G., Kim, H.B., and Kim, D.S. (2018). Emission Characteristics of PM10 and PM2.5 in Thermal Power Plants Using Different Fuel Types, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34, 534–541.
- Peng, R.D., Bell, M.L., Geyh, A.S., McDermott, A., Zeger, S.L., Samet, J.M., Dominici, F., Thurston, G.D., Burnett, R.T., Turner, M.C., Shi, Y., Krewski, D., Lall, R., Ito, K., Jerrett, M., Gapstur, S.M., Diver, W.R., and Iii, C.A.P. (2009). Components of U. S. Fine Particle Air Pollution, *Environmental Health Perspectives* 124, 957–963.
- Pudasainee, D., Kim, J.H., Yoon, Y.S., and Seo, Y.C. (2012). Oxidation, reemission and mass distribution of mercury in bituminous coal-fired power plants with SCR, CS-ESP and wet FGD, *Fuel*, 93, 312–318.
- Saarnio, K., Frey, A., Niemi, J. V., Timonen, H., Rönkkö, T., Karjalainen, P., Vestenius, M., Teinilä, K., Pirjola, L., Niemelä, V., Keskinen, J., Häyrynen, A., and Hillamo, R. (2014). Chemical composition and size of particles in emissions of a coal-fired power plant with flue gas desulfurization, *Journal of Aerosol Science*, 73, 14–26.
- Shin, D., Kim, Y.H., Hong, K.J., Kim, H.J., Kim, Y.J., Han, B., Lee, G.Y., Chun, S.N., and Hwang, J. (2019a). Verification of dilution ratio of the newly developed ejector-porous tube diluter for measurement of fine dust in coal-fired power plant stack, *Particle and Aerosol Research*, 15, 105–113.
- 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. (2019b). 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 PM10 and PM2.5 concentration in coal-fired power plant stacks using a newly developed diluter and optical particle counter, *Fuel*, 269, 117445.
- Shin, D., Kim, Y., Hong, K.J., Lee, G., Park, I., Kim, H.J., Kim, Y.J., Han, B., and Hwang, J. (2022). Measurement and Analysis of PM10 and PM2.5 from Chimneys of Coal-fired Power Plants Using a Light Scattering Method, *Aerosol and Air Quality Research*, 22, 210378.
- Xu, M., Yu, D., Yao, H., Liu, X., and Qiao, Y. (2011). Coal combustion-generated aerosols: Formation and properties, *Proceedings of the Combustion Institute*, 33, 1681–1697.
- Xu, Y., Liu, X., Zhou, Z., Sheng, L., Wang, C. and Xu, M. (2014). The role of steam in silica vaporization and ultrafine particulate matter formation during wet oxy-coal combustion, *Applied Energy*, 133(15), 144–151.
- Yoo, J.I., Seo, Y.C., and Shinagawa, T. (2005). Particle-size distributions and heavy metal partitioning in emission gas from different coal-fired power plants, *Environmental Engineering Science*, 22, 272–279.
- Youn, J.S., Han, S., Jung, Y.W., and Jeon, K.J. (2017).

Comparison of Measurement Methods and Size Fraction of Fine Particles (PM10, PM2.5) from Stationary Emission Source Using Korean Standard and ISO: Coal Power Plant and Refinery, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33, 342-350.

Zheng, C., Wang, L., Zhang, Y., Zhang, J., Zhao, H., Zhou, J., Gao, X., and Cen, K. (2017). Partitioning of Hazardous Trace Elements among Air Pollution Control Devices in Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Plants, *Energy and Fuels*, 31, 6334-6344.