

논문

## 미분탄 연소 시 PM<sub>2.5</sub> 배출특성

# Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Emitted from Pulverized Coal Combustion

박정민, 이상섭\*

충북대학교 환경공학과

Jeong-Min Park, Sang-Sup Lee\*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University,  
Cheongju, Republic of Korea

접수일 2021년 8월 6일  
수정일 2021년 9월 8일  
채택일 2021년 10월 14일

Received 6 August 2021  
Revised 8 September 2021  
Accepted 14 October 2021

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)43-261-2468  
E-mail : slee@chungbuk.ac.kr

**Abstract** Particulate matter less than 2.5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>) is emitted from coal-fired power plants in two forms: filterable particulate matter (FPM) and condensable particulate matter (CPM). FPM is called as the PM emitted in the form of particles, whereas CPM is called as the PM converted from gas in the atmosphere. Because CPM was reported to account for 80~93% of the total PM<sub>2.5</sub> emission, it is important to understand the characteristics of CPM emissions from pulverized coal combustion. Pulverized coal combustor was therefore designed and constructed in this study. Combustion flue gas was sampled using EPA Method 201A (Determination of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission from stationary sources) and EPA Method 202 (Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources). The average concentration of FPM<sub>2.5</sub> in the combustion flue gas was determined to be 217 mg/Nm<sup>3</sup>, whereas that of CPM was 70.5 mg/Nm<sup>3</sup>. However, the concentration of ionic components of CPM was more than twice higher than that of FPM<sub>2.5</sub>. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and Ca<sup>2+</sup> were the main ionic components of FPM<sub>2.5</sub>, whereas Cl<sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> were the main ionic components of CPM. As a result of semi-quantitative analysis, alkane components were found to account for approximately 65% of the total organic component of CPM.

**Key words:** Condensable particulate matter (CPM), PM<sub>2.5</sub>, Coal, Combustion

## 1. 서론

초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>, 공기 역학적 직경  $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )는 여러 유해성분을 함유하고 있어, 호흡기로 침투하여 인체에 심각한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Ju *et al.*, 2020). 석탄화력발전소는 이러한 미세먼지를 다량으로 배출하는 주요 발생원 중 하나이다. 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지는 여과성 미세먼지 (filterable particulate matter, FPM)와 응축성 미세먼지 (condensable particulate matter, CPM)로 구분된다 (Gong *et al.*, 2016). FPM은 입자 형태로 직접 배출된다. 반면, CPM은 가스상 형태로 배출된 후 대기 중에서 빠르게 입자 형태로 전환되는데, 핵 형성을 통해

입자를 생성하는 균일 반응 (homogeneous reaction)과 다른 입자 표면에 응축되는 불균일 반응 (heterogeneous reaction)에 의해서 형성된다 (Feng *et al.*, 2018; Corio *et al.*, 2000). CPM은 일반적으로 1.0  $\mu\text{m}$  이하의 입자 형태로 존재하며, 유해화합물에 대한 반응 부위를 쉽게 제공하여 대기질 악화에 기여할 수 있다 (Feng *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2019; Yu *et al.*, 2018). 따라서 국내의 규제 기준이 되는 FPM뿐만 아니라 CPM에 대한 연구도 시급한 상황이다.

최근 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지에 대해 조사한 선행 연구들이 있다. 석탄화력발전소는 주로 선택적환원촉매시설 (selective catalytic reduction, SCR), 전기집진시설 (electrostatic precipitation, ESP),

습식탈황시설(wet flue gas desulfurization, WFGD), 습식전기집진시설(wet electrostatic precipitation, WESP) 등의 배열로 대기방지시설을 운영한다. Li *et al.* (2017)의 연구 결과를 보면 SCR를 통과한 배기가스에서 FPM<sub>2.5</sub> 농도가 322.1 mg/m<sup>3</sup>, CPM 농도가 126.9 mg/m<sup>3</sup>을 나타낸 반면에, ESP와 WFGD를 모두 통과한 배기가스에서 FPM<sub>2.5</sub>와 CPM의 농도는 각각 3.1 mg/m<sup>3</sup>, 10.2 mg/m<sup>3</sup>을 나타내었다. 동일 저자의 2019년 연구 결과(Li *et al.*, 2019)에서는 방지시설을 거친 굴뚝 배출가스에서 FPM<sub>2.5</sub> 농도가 3.5~4.4 mg/m<sup>3</sup>, CPM이 35.2~48.7 mg/m<sup>3</sup>으로 측정되었다. Lu *et al.* (2019)의 연구 결과에서는 SCR, 여과집진시설(bag house, BH), 습식탈황시설을 통과한 배기가스에서 FPM<sub>2.5</sub>, CPM의 농도가 각각 1.9, 28 mg/m<sup>3</sup>을 나타내었다. 그리고 SCR, BH, WESP를 통과한 배기가스에서 FPM<sub>2.5</sub>, CPM의 농도가 각각 0.45, 12.7 mg/m<sup>3</sup>의 농도로 나타내었다. 또한, CPM의 농도는 WFGD를 통과하면서 14.5 mg/m<sup>3</sup>에서 16.8 mg/m<sup>3</sup>으로 증가한 결과도 있다(Wang *et al.*, 2020). 따라서 방지시설 전단에서는 FPM<sub>2.5</sub> 농도가 CPM보다 높으나, 방지시설 후단의 배출부에서는 CPM의 농도가 FPM<sub>2.5</sub>보다 훨씬 높으므로 CPM의 생성과정을 이해하고 제어전략을 수립하는 것이 중요함을 알 수 있다.

또한, CPM은 EPA Method 202에 따라 무기성분과 유기성분으로 나누어 회수하는데, 방지시설을 통과하여 대기 중으로 배출되는 CPM의 무기성분은 2.64~5.07 mg/m<sup>3</sup>의 범위를 나타내었고, 유기성분은 3.51~5.59 mg/m<sup>3</sup> 범위의 농도를 나타내어 무기성분과 유기성분의 비중이 서로 비슷한 것으로 보고되었다(Wang *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2017). Yang *et al.* (2021)의 연구 결과에서는 WFGD 전단에서 CPM의 무기성분과 유기성분 농도는 각각 19.63 mg/m<sup>3</sup>, 20.15 mg/m<sup>3</sup>이었던 것이 WFGD 후단에서는 6.96 mg/m<sup>3</sup>, 12.59 mg/m<sup>3</sup>로 변하고, WESP 후단에서는 6.33 mg/m<sup>3</sup>, 9.59 mg/m<sup>3</sup>로 변하는 것으로 보고되었다.

실험실 규모의 실험은 drop tube 형태의 반응기를 이용하여 대부분 진행되어 왔으며, 석탄의 종류가 변

함에 따라 CPM의 농도는 유사하지만, 유기, 무기 성분의 비율에서 차이가 난다는 연구 결과가 있다(Feng *et al.*, 2021). 또한 산소와 미분탄의 비율에 따라 유기 에어로졸의 형성이 변하는 것으로 보고되었다(Wang *et al.*, 2013). 그러나 drop tube 형태의 반응기에서는 바닥재와 비산재가 구분되지 않으므로 입자의 배출특성을 연구하는 데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 실공정의 미분탄 연소기와 같이 바닥재를 분리해 낸 이후, 비산재 중에서 미세먼지를 분석할 수 있도록 반응기를 제작하였고, 미분탄 연소 시 배출되는 FPM, CPM의 배출 특성을 이해하기 위해 농도 및 화학성분 분석을 수행하였다.

## 2. 실험 재료 및 방법

### 2.1 연소 가스 채취

본 연구의 실험 장치는 그림 1에 나타난 바와 같이, 미분탄 연소 장치와 미세먼지 채취 장치로 구성된다. 미분탄 연소 장치(내경: 8.2 cm, 길이: 100 cm)는 인코넬로 제작하였다. 연소장치 외부에 전기로를 설치하고, 전기로의 온도를 950°C로 유지하여 미분탄을 연소하였다. 실제 석탄발전 시설의 연소로와 같이 연료와 공기는 연소장치의 측면에서 주입하여 비산재와 바닥재가 분리되도록 하였다. 반응기에 안정적인 연료 공급을 위해 연료 공급 시스템(powder feeder-S06, DAEWON, Korea)을 이용하여 연료를 공기와 함께 연속 주입하였다. 본 연구에서 이용한 미분탄의 원소분석과 공업분석 결과는 표 1에 나타내었다. 미분탄의 평균 입경은 51.7 μm이다. 연소로 외부 온도는 950°C로 유지시키고 16.6 L/min(상온기준) 공기와 연료를

Table 1. Ultimate and proximate analysis of coal.

Ultimate analysis (%)				Proximate analysis (%)			
C	H	N	S	Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash
70.1	4.3	1.2	0.5	5.8	30.4	55.7	8.2

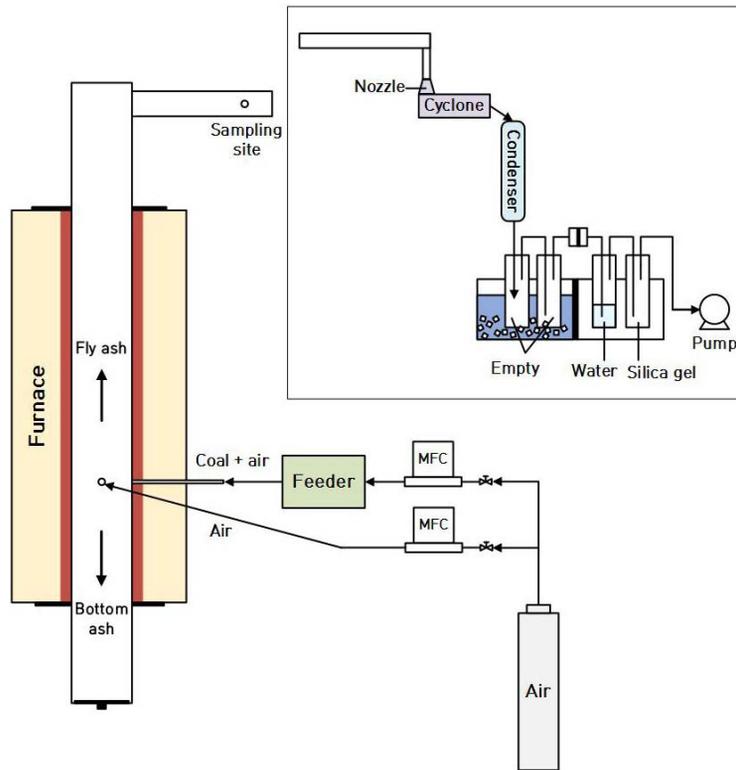


Fig. 1. Experimental system.

주입하며, 40분 동안 연소를 수행하였다. 연소 후 배출되는 가스를 가스분석기 (Vario Plus, MRU, Germany)를 통해 일산화탄소 (CO), 이산화탄소 (CO<sub>2</sub>), 오존 (O<sub>3</sub>), 황산화물 (SO<sub>x</sub>), 질소산화물 (NO<sub>x</sub>) 농도를 2초 간격으로 측정하여 연소를 평가하였다. 연소시작 10분 후, 연소가 안정화되었을 때, 미세먼지 채취 장치로 가스가 흐르도록 펌프를 작동시켰다. 미세먼지 채취는 U.S. EPA Method 201A와 202에 따라 FPM은 사이클론을 이용하여, CPM은 건조 임핀저법 (dry impinger method)을 이용하여 각각 포집하였다. FPM은 PM<sub>10</sub> 사이클론과 PM<sub>2.5</sub> 사이클론을 함께 이용하여 PM<sub>10</sub> 이상, PM<sub>2.5</sub>~PM<sub>10</sub>을 분리하고 PM<sub>2.5</sub> 필터 (여과지 홀더)를 이용하여 PM<sub>2.5</sub>를 채취하였다. CPM 포집장치 전까지는 열 테이프 (heating tape)를 감아서 해당 위치의 배출가스 온도와 동일하게 해주었다. 사이클론을 통

과한 CPM은 응축기 (condenser), 임핀저, 필터를 거치면서 포집된다. 미세먼지 포집 유량은 13 L/min (상온 기준)으로 총 30분 동안 채취를 수행하였다. 채취 직후, 임핀저에 용해된 SO<sub>2</sub>를 제거하기 위해 1시간 동안 질소 (99.999%)를 14 L/min으로 임핀저에 분사하였다. 실험은 총 6회 반복 수행하였다. 실험 전 CPM 채취에 이용되는 모든 초자기구와 유리기구는 초순수, 아세트, 헥산을 이용하여 3회씩 세척하였다. FPM과 CPM 필터는 데시케이터에서 24시간 동안 항량시킨 후, 이용하였다.

## 2.2 미세먼지 분석

그림 2는 미세먼지 분석 방법 흐름도를 나타낸다. 사이클론에서는 3가지 입경 분포로 포집되었다 ((1) 10 μm 이상, (2) 2.5 μm 초과~10 μm 미만, (3) 2.5 μm 이

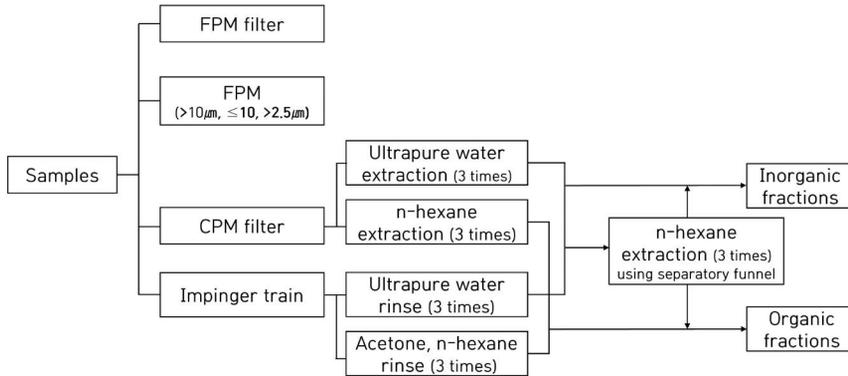


Fig. 2. Summary of CPM and FPM analysis.

하). 사이클론에 포집된 여과성 미세먼지는 아세톤을 이용하여 회수하였고, FPM<sub>2.5</sub> 필터를 회수하여 24시간 동안 데시케이터에서 건조시킨 후 무게를 측정하였다. 시료 채취에 이용된 응축기, 임핀저, 연결부를 3차 증류수, 아세톤 (acetone, 99.7%, HPLC Reagent, SAMCHUN), 헥산 (n-hexane, 95.0%, HPLC Reagent, SAMCHUN)으로 3회씩 세척하여 회수하였다. 3차 증류수로 회수한 용액은 CPM의 무기성분, 아세톤과 헥산으로 세척한 용액은 CPM의 유기성분으로 구분하였다. 또한, CPM 필터는 데시케이터에서 24시간 동안 건조시킨 후, 초음파기를 이용하여 유기성분과 무기성분을 추출하였다. 무기성분 추출용액은 하나로 모아 105°C 오븐에서 약 10 mL로 증발시킨 후, 데시케이터에서 완전 건조 후 무게를 측정하였다. 유기성분 추출용액도 하나로 모은 후, 상온·상압 조건에서 건조 후, 데시케이터에서 완전 건조시켜 무게를 측정하였다. 전·후 무게 차를 통해 농도를 산정하였다.

### 2.3 성분 분석

본 연구에서는 FPM<sub>2.5</sub>와 CPM의 분석을 수행하였다. FPM<sub>2.5</sub>는 사이클론과 필터에 서 각각 포집되었다. 그러나 FPM<sub>2.5</sub>의 대략 90%가 필터에 포집되었고, 사이클론에 포집된 FPM<sub>2.5</sub>는 아세톤으로 회수한 후 건조시켜 분석에 어려움이 있으므로, FPM<sub>2.5</sub>는 필터에 포집된 입자에 대해서만 무기성분 분석을 실시하였

Table 2. Summary of GC/MSD analysis methods.

Inlet temperature	250°C
Ion source temperature	230°C
Transmission line temperature	280°C
Temperature program	Maintenance at 50°C for 3 min Increase to 300°C at 5°C/min Maintenance for 15 min
m/z scan range	30~600

다. FPM<sub>2.5</sub> 필터는 1/4로 자른 후, 초 순수 15 mL에 담고 그 초음파 추출기를 이용하여 15분 동안 무기성분을 추출하였다. FPM<sub>2.5</sub> 필터 추출 용액과 CPM 무기성분 회수 용액은 실린지 필터를 이용하여 여과시켜 부유물질을 제거한 후, 이온크로마토그래피 (Dionex Intergrion + Dionex Aquion, Thermo Fisher Scientific, U.S.)를 이용하여 7개의 성분 (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>)을 분석하였다. 또한 배경농도를 보정하기 위해 공 시료도 동일한 방법으로 수행하였다. CPM 유기성분 회수용액은 회전증발농축기를 이용하여 용액을 약 0.5 mL로 농축시킨 후, 실린지 필터에 여과시킨 후, 기체크로마토그래피/질량분석기 (Alilent 8890/5977B GC/MSD, Agilent, USA)를 이용하여 정성 분석을 수행하였다. 자세한 분석 조건은 표 2에서 보여준다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 연소 배출가스

미세먼지 채취 이전에 연소의 상태를 확인하기 위하여 연소가스 분석기로 시간에 따른 배출가스 농도를 확인하였다. 그림 3에 보는 바와 같이, 연료 주입 시작 후, CO<sub>2</sub> 농도는 급격하게 증가하여, 5분 내로 연소가 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 그리고, CO 농도도 10 ppm 이하로 유지되는 것을 확인하였다. 따라서 본 실험에서는 연소 시작 10분 후부터 미세먼지 포집을 시작하였다.

#### 3.2 미세먼지 농도

그림 4는 FPM과 CPM의 평균 농도 결과를 보여주고 그림 5는 각 각의 반복 실험 결과들을 보여준다. 6

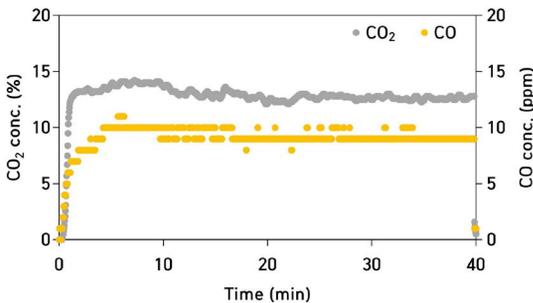


Fig. 3. Combustion test results.

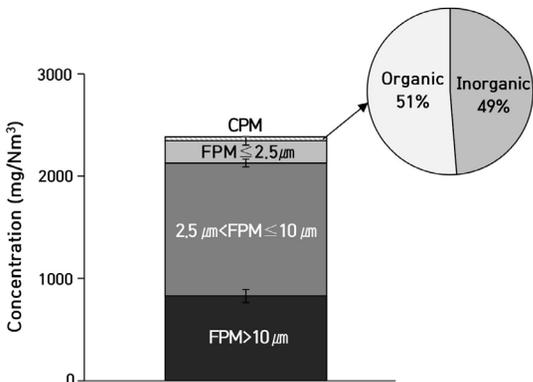


Fig. 4. Average PM concentrations.

회의 반복 실험 결과, 약간의 편차가 존재했지만, 반복적으로 재현 가능한 결과를 보여주었다. 사이클론에서 포집된 10 μm 이상의 FPM 농도는 평균 828.7 mg/Nm<sup>3</sup>, 2.5~10 μm 범위는 1299.1 mg/Nm<sup>3</sup>, 2.5 μm 이하는 23 mg/Nm<sup>3</sup>을 나타내었다. 그리고 FPM<sub>2.5</sub> 필터에 포집된 농도는 194.2 mg/Nm<sup>3</sup>를 나타내었다. 따라서 평균 FPM<sub>2.5</sub>의 농도는 217 mg/Nm<sup>3</sup>으로 나타났다. CPM은 평균 70.5 mg/Nm<sup>3</sup>의 농도를 나타내었다. 또한 CPM의 무기성분은 49%, 유기성분은 51% 비율로 유기성분이 약간 높게 나타났다. 이는 CPM에서 무기성분과 유기성분이 차지하는 비중이 비슷하면서, 유기성분이 더 높은 비중을 차지하였던 기존의 연구 결과와 유사하다 (Song et al., 2020; Wang et al., 2020; Li et al., 2019). 본 연구에서는 방지시설을 통과하지 않은 미분탄 연소 배출가스를 분석하였으므로, CPM보다 FPM이 훨씬 높은 농도를 나타내었다.

#### 3.3 미세먼지 성분

##### 3.3.1 이온 농도 분포

그림 6은 FPM<sub>2.5</sub>의 이온성분 평균농도를 보여주고, 그림 7은 각각의 반복 실험 결과들을 보여준다. FPM<sub>2.5</sub> 필터에서 분석된 7종 이온의 농도 합계 평균은 7.4 mg/Nm<sup>3</sup>이었다. 7종의 이온 성분은 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> > K<sup>+</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 순서로 FPM<sub>2.5</sub>에 기여하였다. 이 중 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 4.7 mg/Nm<sup>3</sup>, Ca<sup>2+</sup>는 1.8 mg/Nm<sup>3</sup>으로 나타났다. 기존의 연구 결과를 보면, 석탄 화력발전소 WESP 후단에서 음이온이 2.10 mg/Nm<sup>3</sup>, 양이온이 1.38 mg/Nm<sup>3</sup>으로 측정되며, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,

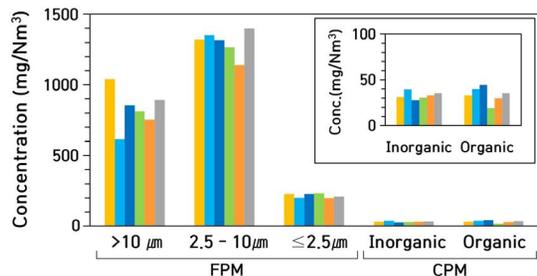


Fig. 5. PM concentrations.

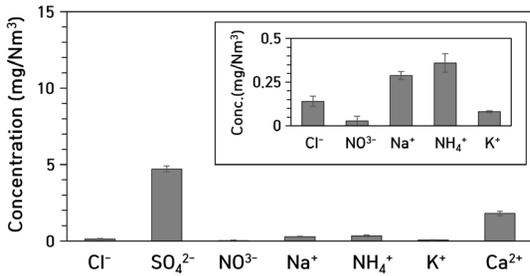


Fig. 6. Average concentrations of the ionic components of FPM<sub>2.5</sub>.

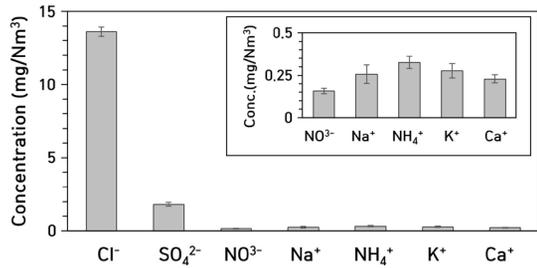


Fig. 8. Average concentrations of the ionic components of CPM.

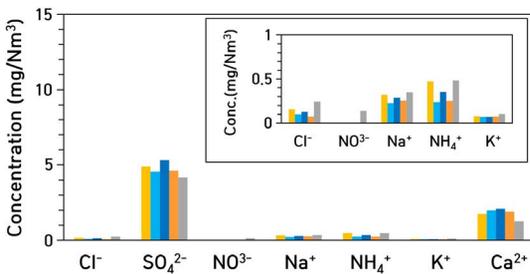


Fig. 7. Concentrations of the ionic components of FPM<sub>2.5</sub>.

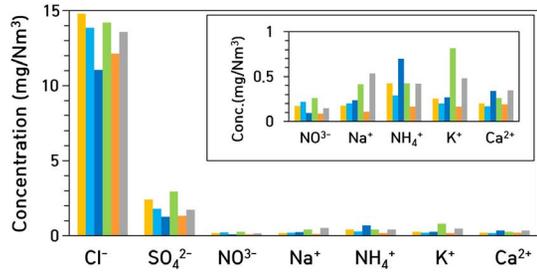


Fig. 9. Concentrations of the ionic components of CPM.

Na<sup>+</sup>가 주요 이온 성분으로 나타났다(Zheng *et al.*, 2018). 또한 SCR-ESP-WFGD 배열의 방지시설을 통과하여 배출되는 FPM<sub>2.5</sub>에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(1.4 mg/Nm<sup>3</sup>)와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(0.6 mg/Nm<sup>3</sup>)가 주요 이온 성분으로 나타났다(Lu *et al.*, 2019). 따라서 FPM<sub>2.5</sub>의 이온 농도 수준은 기존의 연구 결과와 유사하였으나, 주요 이온 성분에 있어서는 차이를 보였다. 이는 기존의 연구 결과가 실 공정에서 방지시설을 거친 후의 분석결과이고, 본 연구에서는 방지시설을 거치기 전의 연소 배기가스를 분석하였기 때문으로 판단된다.

그림 8은 CPM의 이온성분 평균농도를 보여주고, 그림 9는 각각의 반복 실험 결과들을 보여준다. 그림 6과 8을 비교해 볼 때, CPM은 FPM<sub>2.5</sub>과 다른 농도 분포를 보임을 알 수 있다. 또한, CPM의 이온성분 농도 합계는 16.7 mg/Nm<sup>3</sup>으로, FPM<sub>2.5</sub> 필터에서 이온성분 농도 합계의 2배 이상을 나타내었다. 연소가스 중 CPM의 농도는 70.5 mg/Nm<sup>3</sup>으로 FPM<sub>2.5</sub> 필터에서 농도 194.2 mg/Nm<sup>3</sup>의 1/3 정도에 불과하였음을 고려할

때, CPM의 형성에 이온 성분의 기여도가 높음을 확인할 수 있다. 각 이온성분은 Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 순서로 CPM에 기여하였다. 문헌의 결과들을 보면 SCR을 통과한 연소가스의 CPM에서는 4 mg/m<sup>3</sup> SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 3.3 mg/m<sup>3</sup> Cl<sup>-</sup>가 주요 성분으로 검출되었다(Li *et al.*, 2017). SCR-BH-WFGD를 설치한 석탄 및 석유 보일러 시설에서는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>가 CPM의 주요 성분이고, SCR-ESP-WFGD를 설치한 석탄 화력발전소에서는 Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>가 CPM의 주요 성분으로 나타났다(Lu *et al.*, 2019). 따라서 본 연구 결과도 선행 연구들과 유사한 수준임을 알 수 있다. 그러나 각 성분의 비율에 있어서는 연구마다 차이가 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서 나타난 주요 이온 성분들 중에서 Cl<sup>-</sup>는 석탄에서 NaCl, CaCl<sub>2</sub> 등 주로 무기 형태로 존재하는데, 고온에서 HCl로 배출되며, 쉽게 응축되어 CPM으로 전환된다(Zheng *et al.*, 2018). 그리고 연도가스 내 SO<sub>3</sub>는 수분과 결합하여 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 증기를 형성시키는데,

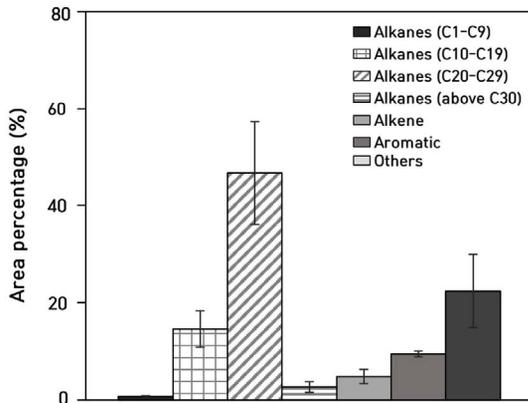


Fig. 10. Area percentage of CPM organic fraction.

연도가스의 온도가 감소함에 따라 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 증기는 쉽게 응축되어 입자상 물질로 전환된다 (Feng *et al.*, 2018).

### 3.3.2 유기 성분

그림 10은 CPM의 유기성분에 대한 정성분석 결과를 보여준다. 6개의 시료 중 3개 시료에 대해 분석을 수행하였다. 모든 유기물질을 정량적으로 분석하기에는 어려움이 있기 때문에, 검출된 물질을 전체 피크 면적에 대한 백분율 (area normalization)로 나타내었다. 기체크로마토그래피/질량분석기를 이용한 분석결과 한 개의 시료당 100개 이상의 피크가 검출되었고, 기체크로마토그래피/질량분석기의 라이브러리에서 찾은 유기물질들을 작용기 (alkane, alkene, aromatic, others)로 구분하여 결과를 정리하였다. 전체 면적 중 alkane이 차지하는 비율은 약 65%로 CPM의 유기성분 중 가장 높은 비율을 나타내었다. CPM에서 검출된 alkane의 최소 탄소 수는 6이며, 최대 탄소 수는 39로 나타났으며 주로 C<sub>20</sub>~C<sub>29</sub> 범위에 분포되었다. 시료 3개에서 모두 검출된 alkane은 C<sub>10</sub>~C<sub>19</sub> 범위에서는 4개 성분 Dodecane, Tridecane, Teterdecane, Cycloheptasiloxane, tetradecamethyl-이었고, C<sub>20</sub>~C<sub>29</sub> 범위에서는 Tetracosane, Tricosane, Pentacosane, Cyclodecasiloxane, eicosamethyl-이 모두 검출되었다. 그 다음

으로는 방향족이 약 9.4%로 높은 비율을 보여주었다. 방향족에서 검출된 유기물질 중 Toluene과 Benzene, 1,3-bis(1,1-dimethylethyl)-이 3개 시료 중 2개 시료에서 검출되었다. 그 외에 Others로 분류한 항목에는 alcohol, ether, esters, ketone, carboxylic acid 등이 포함되어 있다. 실공정의 SCR - ESP - WFGD - WESP 방지시설을 통과한 CPM의 유기성분 결과도 본 연구와 유사하게 주로 alkane (70~80%)으로 구성되며, 주로 탄소 수 10~30 범위에서 분포하고 있었다 (Peng *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2018).

## 4. 결 론

미분탄 연소 시 발생하는 FPM<sub>2.5</sub>와 CPM의 배출 특성을 조사하기 위해 실험실 규모의 미분탄 연소기를 제작하여 실험을 수행하였다. FPM<sub>2.5</sub>의 평균 배출 농도는 217 mg/Nm<sup>3</sup>이었고, CPM은 70.5 mg/Nm<sup>3</sup>으로 방지시설을 거치지 않는 배기가스에서는 FPM<sub>2.5</sub>의 농도가 훨씬 높게 나타났다. 그러나 이온 성분의 농도는 CPM이 FPM<sub>2.5</sub>보다 2배 이상 높게 나타나 CPM의 형성에 이온 성분의 기여도가 높음을 확인할 수 있었다. FPM<sub>2.5</sub>와 CPM의 이온 성분을 분석한 결과, FPM<sub>2.5</sub>는 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Ca<sup>2+</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > Cl<sup>-</sup> > K<sup>+</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 순으로 농도 분포를 나타내었고, CPM은 Cl<sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 순서로 나타내었다. 기존의 연구 결과와 비교할 때, 각 이온 성분의 농도 수준은 유사하였으나, 각 이온 성분의 비율에 대해서는 많은 차이를 보였다. 이는 대기방지시설을 거치면서 각 이온 성분의 거동에 차이가 있기 때문으로 판단되며 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

CPM의 무기성분은 49%, 유기성분은 51% 비율로 유기성분이 약간 높게 나타났다. CPM의 유기성분 분석 결과, alkane이 65%로 구성되어 있었고, 주로 C<sub>20</sub>~C<sub>29</sub> 범위에 분포되었다. 그 다음으로는 톨루엔과 벤젠이 포함된 방향족화합물이 9.4% 비율로 구성되

었다. CPM 유기성분을 파악하기 위해서는 평균적으로 약 74%의 비율을 나타내는 알칸과 방향족에 대한 정량분석이 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2018R1D1A1A09083083).

## References

- Corio, L.A., Sherwell, J. (2000) In-stack condensable particulate matter measurements and issues, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(2), 207-218. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464002>
- Feng, Y., Li, Y., Cui, L. (2018) Critical review of condensable particulate matter, *Fuel*, 224, 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.118>
- Feng, Y., Li, Y., Zhang, X., Zhang, Z., Dong, Y., Ma, C. (2020) Characteristics of condensable particulate matter discharging from a one-dimensional flame furnace firing lignite, *Fuel*, 277, 118198. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118198>
- Feng, Y., Li, Y., Zhang, X., Su, S., Zhang, Z., Gan, Z., Dong, Y. (2021) Comparative study on the characteristics of condensable particulate matter emitted from three kinds of coal, *Environmental Pollution*, 270, 116267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116267>
- Gong, B.J., Kim, J.H., Kim, H.R., Lee, S.B., Kim, H.C., Jo, J.H., Kim, J.H., Kang, D.I., Park, J.M., Hong, J.H. (2016) A Study on the Characteristics of Condensable Fine Particles in Flue Gas, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(5), 501-512, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.5.501>
- Ju, S., Yu, G.H., Park, S., Lee, J.Y., Lee, S., Jee, J., Lee, K., Lee, M. (2020) Pollution Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Measured during Fall at a Seosan Site in Chungcheong Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36, 329-345, (in Korean with English abstract).
- Li, J., Qi, Z., Li, M., Wu, D., Zhou, C., Lu, S., Yan, J., Li, X. (2017) Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant, *Energy & Fuels*, 31(2), 1778-1785. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02919>
- Li, X., Zhou, C., Li, J., Lu, S., Yan, J. (2019) Distribution and emission characteristics of filterable and condensable particulate matter before and after a low-temperature electrostatic precipitator, *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 12798-12806. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04570-y>
- Lu, C.M., Dat, N.D., Lien, C.K., Chi, K.H., Chang, M.B. (2019) Characteristics of fine particulate matter and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons emitted from coal combustion processes, *Energy & Fuels*, 33(10), 10247-10254. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02201>
- Peng, Y., Shi, N., Wang, T., Wang, J., Zhang, Y., Chen, W.Y., Sajjadi, B., Pan, W.P. (2021) Investigating the effect of flue gas temperature and excess air coefficient on the size distribution of condensable particulate matters, *Fuel*, 298, 120866. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120866>
- Song, J., Lu, S., Wu, Y., Zhou, C., Li, X., Li, J. (2020) Migration and distribution characteristics of organic and inorganic fractions in condensable particulate matter emitted from an ultralow emission coal-fired power plant, *Chemosphere*, 243, 125346. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125346>
- Yang, F., Li, Z., Liu, H., Feng, P., Tan, H., Zhang, S., Lu, X. (2021) Emission characteristics of condensable particulate matter and sulfur trioxide from coal-fired power plants, *Journal of the Energy Institute*, 94, 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.12.003>
- Yang, H.H., Gupta, S.K., Dhital, N.B., Lee, K.T., Hsieh, Y.S., Huang, S.C. (2019) Establishment of indicator metals for filterable and condensable PM<sub>2.5</sub> emitted from important stationary emission sources, *Energy & Fuels*, 33(11), 10878-10887. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b02889>
- Yu, J.H., Lim, S.G., Song, J., Lee, D.Y., Yu, M.S., Kim, J.H. (2018) A Study on the Change of Condensable Particulate Matter by the SO<sub>2</sub> Concentration among Combustion Gases, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(5), 651-658, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.5.651>
- Wang, K., Yang, L., Li, J., Sheng, Z., He, Q., Wu, K. (2020) Characteristics of condensable particulate matter before and after wet flue gas desulfurization and wet electrostatic precipitator from ultra-low emission coal-fired

- power plants in China, *Fuel*, 278, 118206. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118206>
- Wang, X., Williams, B.J., Tang, Y., Huang, Y., Kong, L., Yang, X., Biswas, P. (2013) Characterization of organic aerosol produced during pulverized coal combustion in a drop tube furnace, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(21), 10919-10932. <https://doi.org/10.5194/acp-13-10919-2013>
- Zheng, C., Hong, Y., Liu, S., Yang, Z., Chang, Q., Zhang, Y., Gao, X. (2018) Removal and emission characteristics of condensable particulate matter in an ultralow emission power plant. *Energy & Fuels*, 32(10), 10586-10594, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02464>

### Authors Information

박정민 (충북대학교 환경공학과 박사과정)  
이상섭 (충북대학교 환경공학과 교수)