

논문

석탄 성상에 따른 응축성 미세먼지 성분 특성

Characteristics of Condensable Particulate Matter Components with the Coal Property

최승진, 박정민¹⁾, 이상섭*

충북대학교 환경공학과, ¹⁾화학물질안전원 교육혁신팀

Seoung-Jin Choi, Jeong-Min Park¹⁾, Sang-Sup Lee*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University,
Cheongju 28644, Republic of Korea

¹⁾Education & Training Team, National Institute of Chemical Safety, Cheongju 28164,
Republic of Korea

접수일 2023년 5월 16일
수정일 2023년 5월 31일
채택일 2023년 6월 5일

Received 16 May 2023
Revised 31 May 2023
Accepted 5 June 2023

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

Abstract Particulate matter is classified into filterable particulate matter (FPM) and condensable particulate matter (CPM) depending on the formation process. CPM has a very small particle size and exists in the gaseous state in exhaust gas. Therefore, it is not easily removed from air pollution control devices, unlike FPM. Thus, proper management of particulate matter requires understanding of the formation process and factors affecting CPM. In this study, two types of coal were combusted and compared to investigate the composition and influencing factors of CPM. To simulate the actual process, pulverized coal injected into the combustion furnace was separated into bottom ash and fly ash after combustion. After stabilization of the combustion process, samples were collected by distinguishing between FPM and CPM from the fly ash. The experimental results showed that the organic component concentration of CPM was higher in coal with low volatile content and high fixed carbon content. In terms of ion components, SO_4^{2-} and Ca^{2+} had the highest concentrations in FPM, while Cl^- , F^- , and SO_4^{2-} were highest in CPM. In addition, there was a strong correlation between the fluoride and chlorine content of coal and the ion component concentration of CPM.

Key words: Condensable particulate matter, Filterable particulate matter, Coal, Combustion

1. 서론

미세먼지의 대표적인 고정배출원으로 석탄화력발전소가 있다. 석탄화력발전소에서 직접 배출되는 미세먼지는 여과성 미세먼지 (filterable particulate matter, FPM)와 응축성 미세먼지 (condensable particulate matter, CPM)로 구분할 수 있다 (Yuan *et al.*, 2021). FPM은 배출원에서 고체상 또는 액체상의 입자로 배출된다. 반면에 CPM은 배출원에서 기체상으로 배출되지만, 냉각 및 희석 과정에서 빠르게 입자로 전환된다 (Gong *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2014; Corio and Sherwell, 2000). CPM은 초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$) 영역의 직경

을 가지고 있는 것으로 알려져 있다 (U.S. EPA, 2017). 따라서 CPM은 호흡기와 심혈관계 질환을 유발하여 인체에 상당히 치명적일 수 있다 (Feng *et al.*, 2018; Pope *et al.*, 2004). CPM을 발생시키는 전구물질로는 염화수소 (HCl), 불화수소 (HF), 암모니아 (NH_3), 이산화황 (SO_2), 삼산화황 (SO_3) 등이 있고, 이 물질들로 인하여 CPM에는 염소이온 (Cl^-), 불소이온 (F^-), 암모늄이온 (NH_4^+), 황산이온 (SO_4^{2-}) 등이 존재한다 (Liang *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2022). 그리고 휘발성유기화합물과 다환방향족탄화수소류 등이 전구물질이 되어 CPM에는 다량의 유기성분이 존재한다 (Zhang *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*,

2017). 또한 FPM과는 달리 CPM은 배기가스에서 기체상으로 존재해 있어 여과막도 통과하고 대기오염방지시설에서 쉽게 제거되지 않는다(Wang *et al.*, 2022; Yuan *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021). 따라서 연소과정에서는 FPM 발생량이 CPM 발생량보다 많더라도, 대기오염방지시설을 지난 배출부에서는 CPM 농도가 FPM 농도보다 더 높은 결과가 여러 문헌에서 확인된다(Liang *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2021; Yang *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020; Zheng *et al.*, 2018). 선행 연구에서는 배기가스가 습식탈황장치를 거치면서 CPM의 농도가 증가한 결과도 있고, 여과집진장치와 습식전기집진기를 거치면서 CPM의 유기성분 농도가 증가한 결과도 있다. 따라서 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지를 제어하기 위해서는 CPM에 대한 제어방안이 마련되어야 한다. 이를 위해서는 CPM의 생성과정에 대한 이해와 영향인자에 대한 조사가 선행되어야 한다.

Zou *et al.* (2023)은 석탄의 염소(Cl) 함량이 CPM 농도에 미치는 영향을 알아보기 위해 DTF (drop tube furnace) 장치를 이용하였다. Cl 함량이 0.51, 5.63, 9.70 mg/g인 석탄을 연소하였을 때 발생하는 CPM의 Cl 농도는 대략 5.7, 6.9, 7.6 mg/m³으로 나타났다. Yu *et al.* (2018)은 CPM의 전구물질 중 하나인 SO₂의 영향을 알아보기 위해 소형 경유보일러를 이용하여 실험하였다. 연소로 내 SO₂의 농도가 0, 50, 80, 120 ppm으로 존재할 때 CPM의 농도는 2.72, 6.10, 8.38, 13.34 mg/m³으로 증가하였다. Feng *et al.* (2021)의 연구는 갈탄, 역청탄, 무연탄을 DTF에서 연소하였을 때 발생하는 CPM의 성분을 분석하였다. 갈탄, 역청탄, 무연탄을 연소하였을 때 발생하는 CPM 중에서 유기성분의 농도는 문헌의 그래프 결과로부터 약 22, 38, 58

mg/Nm³으로 나타났다. 이외에 CPM에는 불소화합물, 황산화물, 질소산화물 등 다양한 물질들이 존재하는 것으로 보고되고 있다(Zou *et al.*, 2023; Park and Lee, 2021; Lu *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2018). 그러나 CPM 성분의 비율은 문헌에 따라 서로 다른 결과를 나타내고 있어, CPM의 농도 및 구성성분을 결정하는 영향인자를 제대로 이해하기 어렵다.

본 연구에서는 두 종류의 석탄을 연소하여 배출되는 CPM의 구성성분을 비교하여 CPM 발생의 영향인자를 이해하고자 하였다. 그리고 FPM 중 2.5 μm 이하의 입자들을 분석하여 CPM의 특성과 비교하였다. 특히 실공정 연소로를 모사할 수 있도록 바닥재와 비산재가 분리되고, 비산재와 함께 배기가스 시료가 채취되도록 연소장치를 설계하였다. 그리고 FPM과 CPM을 구분하여 채취한 후 성분 분석을 실시하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서는 두 종류의 석탄을 이용하였다. 석탄의 공업분석은 열중량분석기(SDT Q600, TA Instrument, New Castle, DE)를 이용하였고 원소분석은 유기원소분석기(Vario MICRO cube, Elementar, Germany)를 이용하였다. 석탄 내 할로겐족(Cl, F)은 EN 14582A에 따라 Oxygen Bomb Ion Chromatography 분석법을 사용하였다. 각 석탄에 대하여 원소분석과 공업분석을 실시한 결과는 표 1과 같다. 두 석탄의 원소분석 결과를 비교해 보면 석탄 (A)는 석탄 (B)보다 황(S)의 함량이 조금 높다. 그리고 석탄 (A)는 석탄

Table 1. Elementary analysis and proximate analysis results of coal samples.

	Elementary analysis						Proximate analysis (%)			
	%				mg/kg		Moisture	Volatile matter	Fixed carbon	Ash
	C	H	N	S	Cl	F				
Coal (A)	70.1	4.3	1.2	0.5	160	88	5.8	30.4	55.7	8.2
Coal (B)	66.8	4.7	1.4	0.3	31	204	3.6	37.3	49.6	9.5

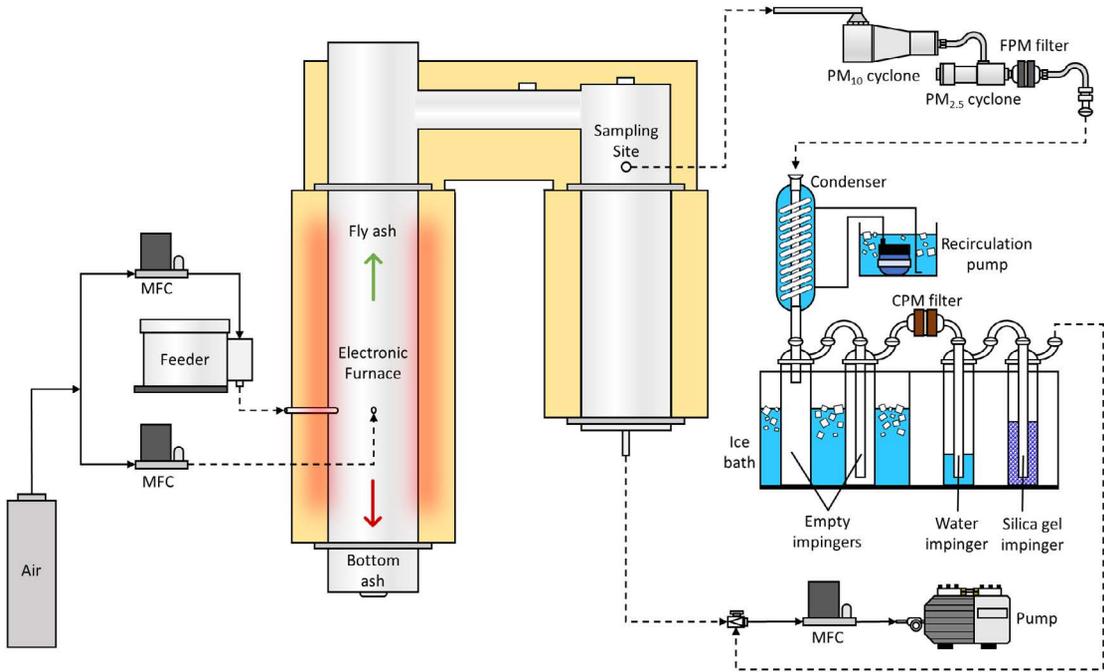


Fig. 1. Experimental system.

(B)보다 CI의 함량은 크게 높고, 불소(F)의 함량은 크게 낮다. 또한 공업분석 결과를 비교해 보면 석탄(A)는 석탄(B)보다 휘발분 함량이 조금 낮고, 고정탄소 함량이 조금 높으며, 재의 함량이 조금 낮은 것으로 나타났다.

2.2 실험 장치

그림 1과 같이 실험실 규모의 연소 반응기를 사용하였다. 실험 장치는 세 단계의 구성으로 시료 주입부, 미분탄 연소 장치, 시료 채취 장비로 이루어져 있다. 시료 주입부는 안정적인 연료 공급을 위해 고정밀 연속 정량공급장치(ROVO feeder, FINE TECHNICS, Korea)를 이용하여 미분탄을 공기와 함께 연소로에 주입하였다. 연소로는 내경: 8.2cm, 길이: 100cm의 인코넬로 제작하였다. 주입된 미분탄은 연소 후 비산재와 바닥재로 분리되고, 비산재와 함께 배기가스 시료가 채취되도록 연소장치를 설계하였다. 그리고 연소 영역 이후에도 반응기를 단열재로 감싸주어, 석탄화

력발전소에서 연소 후 배기가스 온도가 감소하는 구간을 모사하였다. 배기가스 채취는 그림 1에서 보는 바와 같이 100°C 이상의 온도 지점에서 실시하였다. FPM은 EPA Method 201A에 따라 사이클론을 통해 포집하였고, 두 개의 사이클론을 이용하여 미세먼지의 입경을 PM₁₀과 PM_{2.5}를 기준으로 나누었다. PM_{2.5} 사이클론을 거친 나머지 FPM은 석영재질의 여과지(Tissuquartz 2500QAT-UP, 47 mm, USA)에 모두 포집시켰다. 또한 시료 채취 지점에서 FPM 여과지까지 배기가스 온도가 떨어지는 것을 방지하고자 열테이프(heating tape)를 감아 시료 채취 지점의 배기가스 온도를 유지하였다. CPM은 EPA Method 202에 따라 건조 임핀저법(dry impinger method)을 이용하여 시료를 포집하였다. FPM 여과지를 거치고 나온 배기가스는 응축기(condenser)와 임핀저 트레인을 지나 최종적으로 테플론재질의 여과지(PTR, PVDF, 25 mm, 0.45 µm, GVS)를 거치도록 하여 CPM을 포집하였다.

2.3 실험 방법

연소로의 온도를 950°C로 유지하여 연소 반응기 내부의 온도가 석탄의 발화점 이상이 되도록 유지하였다. 주입되는 공기의 부피유량은 상온기준에서 16.6 L/min으로 설정하였고, 과잉공기량은 20~30% 수준에서 연소하였다. 연소의 안정도를 평가하기 위해서 배기가스 중 산소(O₂), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂) 농도를 가스분석기(VarioPlus)를 통하여 6초간격으로 분석하였다. 연소가 안정화된 것을 확인한 이후에 미세먼지 채취를 실시하였다. 시료 채취를 위해 흡입되는 유량은 13 L/min으로 30분간 진행하였다. 시료 채취 종료 직후 SO₂와 같은 용해성 가스의 영향을 제거할 수 있도록 질소(99.999%)를 1시간 동안 CPM 시료 채취 장비에 분사하였다.

실험에 사용되는 모든 초자기구는 초순수, 아세톤(acetone, 99.7% HPLC Reagent, SAMCHUM), 헥산(n-hexane, 99.5% HPLC Reagent, SAMCHUM)의 순서로 3회씩 세척 후 이용하였다. FPM과 CPM 여과지는 데시케이터에 24시간 동안 건조하여 무게를 0.01 mg까지 칭량하였다. FPM은 아세톤으로 사이클론을

세척하여 입경(10 µm 초과, 2.5 µm 초과~10 µm 이하, 2.5 µm 이하)에 따라 나누어 회수하였다. 회수된 FPM은 여과지를 포함하여 모두 데시케이터에서 24시간 건조시킨 후 무게를 측정하여 농도를 산정하였다. CPM은 응축기, 임핀저 트레이, 연결관 등을 초순수, 아세톤, 헥산의 순서로 3회씩 세척하여 회수하였다. CPM 여과지는 데시케이터에서 24시간 건조 후 초음파기를 이용하여 유기성분과 무기성분을 추출하였다. 초순수로 세척한 회수 용액은 CPM의 무기성분으로 분류하고, 아세톤과 헥산으로 세척한 회수 용액은 CPM의 유기성분으로 분류하였다. CPM 무기성분 용액은 105°C에서 증발시키고 CPM 유기성분 용액은 상온·상압 조건에서 증발시켰다. 이후 CPM 유기성분과 무기성분 용액은 데시케이터에서 완전 건조 후 무게를 측정하여 농도를 산정하였다. FPM과 CPM의 회수 흐름도는 그림 2에 나타내었다.

FPM과 CPM은 무기시료 용액에서 이온성분(Cl⁻, F⁻, PO₄²⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Ca²⁺)을 이온 크로마토그래피(ECO Methrohm, Switzerland)를 이용하여 분석하였다. FPM의 경우 사이클론 후단의 여

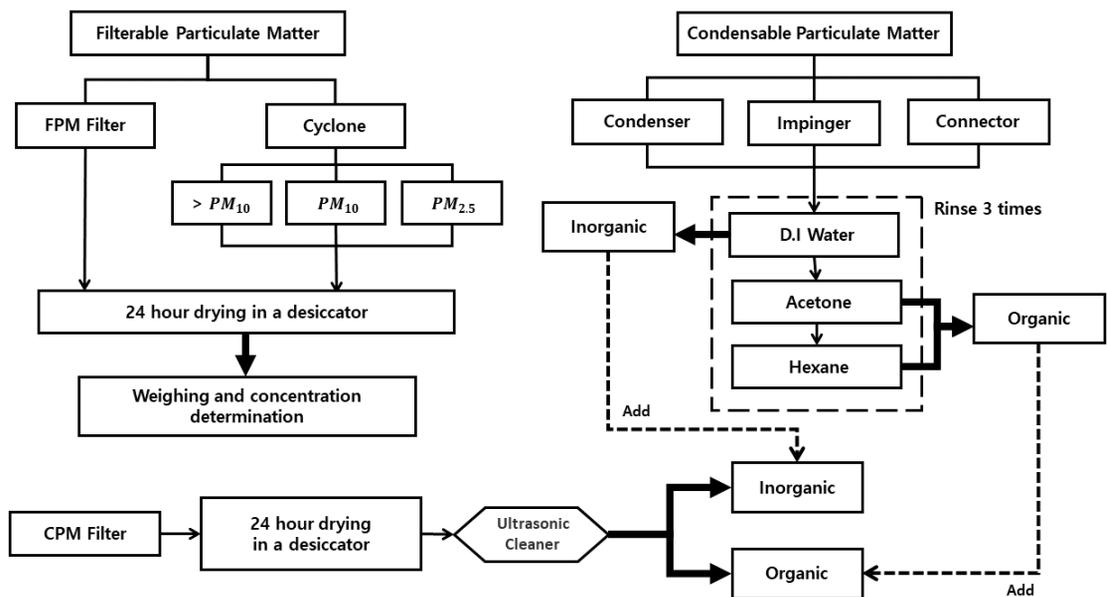


Fig. 2. Flow chart for the recovery of FPM and CPM.

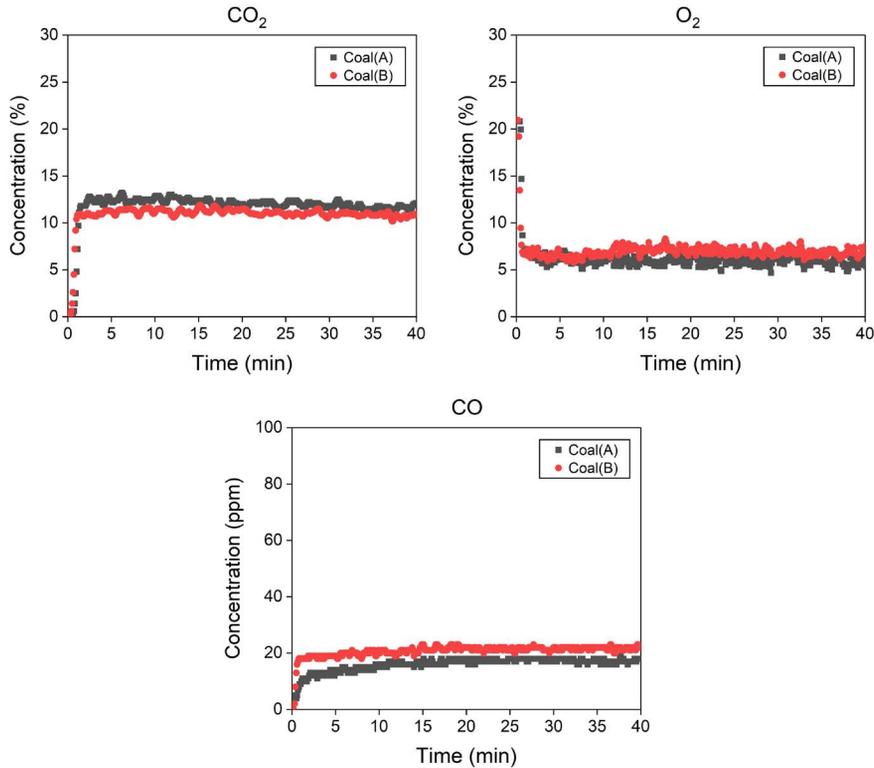


Fig. 3. Concentrations of CO₂, O₂, and CO in the flue gas.

과지의 1/4을 잘라 초음파 추출기를 이용하여 만들어진 무기시료 용액으로 이온성분을 분석하고, CPM은 초순수로 회수한 무기성분 용액과 CPM 여과지로부터 추출한 무기성분 용액을 모아 이온성분 분석을 실시하였다. 이와 같은 연소실험 및 분석은 석탄 (A)에 대하여 12회, 석탄 (B)에 대하여 7회 반복하여 결과를 얻었다.

3. 실험 결과

3.1 연소 안정도

본 연구에서는 각 석탄의 연소가스 중 CPM 성분을 조사하기 위하여 연소가 안정화된 상태에서 배기가스를 채취하였다. 그림 3은 각 석탄의 연소가스 중 CO₂, O₂, CO 농도를 시간에 따라 나타내었다. 그림에서 보

는 바와 같이 석탄 (A), 석탄 (B) 모두 낮은 CO 농도를 유지하였고, CO₂의 농도는 이론 배출농도와 유사하였다. 석탄 주입을 시작해서 5분 이내에 CO₂, O₂, CO 농도가 일정하게 유지되었다. 그리고 석탄 (A)와 석탄 (B)는 서로 매우 유사한 배출가스 농도를 나타내었다. 따라서 석탄 (A)와 석탄 (B) 모두 안정한 완전연소 상태에서 배기가스 시료를 채취하였음을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 석탄 주입 후 10분 뒤부터 미세먼지 분석을 위한 배기가스 시료 채취를 시작하였다.

3.2 여과성 미세먼지의 입경별 농도 분포

각 석탄의 연소 배기가스 채취 후 FPM과 CPM의 농도를 구하였다. FPM은 그림 4와 같이 입경별 농도로 나타내었다. 2.5~10 μm, 10 μm 이상의 입경을 가진 비산먼지는 사이클론을 통해 직접 회수된 양을 농도로 나타내었다. 2.5 μm 이하의 입경을 가진 여과성 미

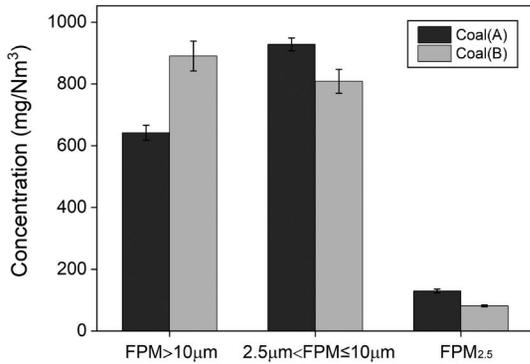


Fig. 4. Average FPM concentrations in the flue gas with the diameter of FPM.

세먼지 (FPM_{2.5})는 사이클론을 통해 회수된 미세먼지의 양과 FPM의 여과지에 포집된 미세먼지 양의 합으로 농도를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 석탄 (A)는 10 μm 이상의 입경에서 석탄 (B)보다 낮은 농도를 보이지만, 2.5~10 μm 범위의 입경과 2.5 μm 이하의 입경에서는 석탄 (A)가 석탄 (B)보다 높은 농도를 나타내었다. 공업분석 결과에서 석탄 (B)는 석탄 (A)보다 조금 높은 재 함량을 보였는데, 이는 10 μm 이상의 입경을 가진 비산먼지 농도가 높은 결과로 나타났다.

3.3 응축성 미세먼지 농도 분포

FPM은 연소 이후 석탄의 무기성분 중에서 가볍고 입경이 작은 입자가 배기가스에 존재하는 것이다. 그러므로 FPM에 유기성분이 있다면 그것은 주로 미연탄소분에 의한 것으로 볼 수 있다. 반면에 CPM은 전구물질이 되는 가스상 유기성분과 무기성분이 응축하여 생성되는 입자이다. 따라서 본 연구에서는 CPM에 대해서만 유기성분 농도를 분석하였다. 그림 5는 CPM 중 유기성분 농도와 무기성분 농도를 각각 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 석탄 (A)는 석탄 (B)보다 유기성분과 무기성분 모두 높은 농도를 나타내었다. 먼저 유기성분 농도 결과를 보면 석탄 (A)의 CPM 유기성분 농도는 8.6 mg/Nm³이고, 석탄 (B)는 4.7 mg/Nm³이다. CPM의 유기성분과 관련한 연구로 Feng *et al.* (2021)의 연구를 들 수 있다. 이 문헌에서는 갈탄, 역청탄, 무연탄으로 서로 다른 석탄의

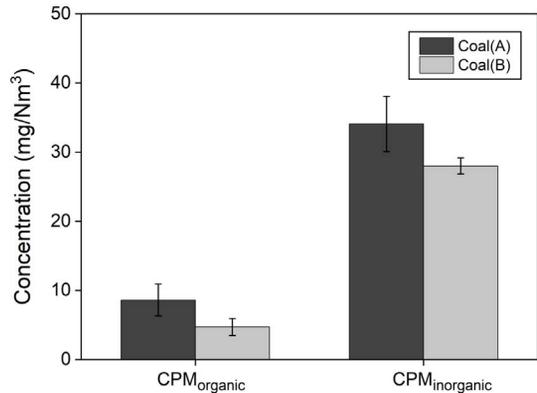


Fig. 5. Average concentrations of organic and inorganic components of CPM.

종을 사용하면서, 휘발분과 고정탄소의 변화 값이 큰 석탄 시료를 선택하였다. 이때 휘발분 함량이 낮고 고정탄소 함량이 많은 무연탄이 가장 높은 CPM 유기성분 농도를 나타내었다. 우리의 연구에서도 휘발분 함량이 더 낮고, 고정탄소 함량이 더 높은 석탄 (A)가 더 높은 CPM 유기성분 농도를 나타내었다는 점에서는 유사하다. 그러나 Feng *et al.* (2021)의 연구에서 갈탄, 역청탄과 같이 휘발분과 고정탄소 값의 차이가 크지 않은 시료에 대해서는 다른 경향을 나타내고 있어 해석을 일반화하기 어렵다. 특히 CPM의 유기성분과 관련하여 기존에 보고된 연구 결과가 매우 적어서, 문헌 결과를 통한 해석은 어려운 상황이다. 따라서 CPM의 유기성분에 대한 영향인자를 분석하기 위해서는 정성분석 및 정량분석과 각 유기성분의 가스상 농도에 대한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3.4 여과성 미세먼지와 응축성 미세먼지의 성분 분석

각 석탄 CPM의 무기시료 용액 중에서 이온성분의 농도를 분석하였고, 그 결과는 그림 6에 나타내었다. 그리고 FPM의 무기시료 용액 중에서 이온성분의 농도 와도 비교하였다. FPM 시료 중에서는 CPM과 비슷한 입경분포라고 할 수 있는 입경 2.5 μm 이하의 FPM_{2.5} 시료를 분석하였고, 결과는 그림 7에 나타내었다.

그림 6의 CPM 이온성분 농도 결과에서는 석탄 시

료에 따라 서로 다른 결과를 나타내었다. 석탄 (A)의 CPM은 Cl^- 농도가 10.5 mg/Nm^3 으로 가장 높았던 반면에, 석탄 (B)의 CPM은 F^- 농도가 8.6 mg/Nm^3 으로 가장 높았다. 그리고 석탄 (B)의 CPM 중 Cl^- 농도는 3.3 mg/Nm^3 으로 석탄 (A)보다 매우 낮았고, 석탄 (A)의 CPM 중 F^- 농도는 3.0 mg/Nm^3 으로 석탄 (B)보다 매우 낮았다. 이는 표 1의 원소분석 결과에서 보는 바와 같이 석탄 (A)의 Cl 함량이 석탄 (B)보다 매우 크고, 석탄 (B)의 F 함량이 석탄 (A)보다 매우 크기 때문에 판단된다. 이는 석탄의 원소 함량이 미세먼지의 이온성분 함량에 크게 영향을 미침을 보여주는 결과이기도 한다. Zou *et al.* (2023)의 연구에서도 석탄 Cl 함량이 높을수록 CPM의 Cl^- 농도가 높은 것을 확인하였다. 그러나 Zou *et al.* (2023)의 연구에서는 석탄의 Cl 함량 변화에 비하여 CPM의 Cl^- 농도 변화는 크지 않았다. 반면에 본 연구에서는, 석탄 (A)의 Cl 함량은

석탄 (B) Cl 함량의 5.2배이고, 석탄 (A)의 CPM 중 Cl^- 농도는 석탄 (B)의 CPM 중 Cl^- 농도의 3.2배이다. 또한, 석탄 (B)의 F 함량은 석탄 (A)의 F 함량의 2.3배이고, 석탄 (B)의 CPM 중 F^- 농도는 석탄 (A)의 CPM 중 F^- 농도의 2.7배이다. 이는 CPM의 이온성분 농도에 있어 석탄의 원소 함량이 중요한 영향인자가 될 수 있음을 보여주는 결과이다.

그림 6과 7에서 보는 바와 같이 FPM에서는 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 농도가 가장 높은 반면에, CPM에서는 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 농도가 상대적으로 낮았다. 특히 표 1에서 석탄 (A)의 S 함량이 더 높았는데, 이것은 FPM의 SO_4^{2-} 함량에 작용한 것으로 보인다. 그리고 석탄 (A)의 CPM 중 SO_4^{2-} 농도는 석탄 (B)보다 조금 낮은 값을 보였다. 석탄 내 존재하는 S 은 연소과정에서 SO_2 로 배출되고, 그중 일부는 SO_3 로 전환된다. 그리고 SO_3 는 H_2SO_4 를 형성하여 FPM에 포함되어 배출될 수 있다 (Yang *et*

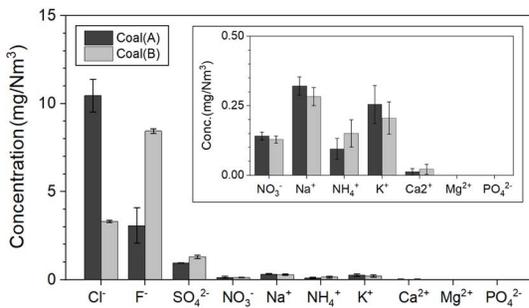


Fig. 6. Average concentrations of the ionic components of FPM.

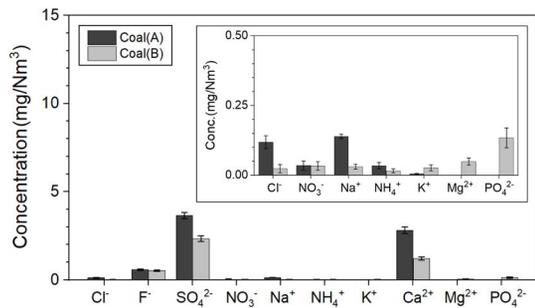


Fig. 7. Average concentrations of the ionic components of $\text{FPM}_{2.5}$.

Table 2. Summary of the concentrations of filterable particulate matter and condensable particulate matter.

		Coal (A) (mg/Nm^3)	Coal (B) (mg/Nm^3)
FPM	$\text{FPM} > 10 \mu\text{m}$	642 ± 24	891 ± 48
	$2.5 \mu\text{m} < \text{FPM} \leq 10 \mu\text{m}$	928 ± 21	808 ± 39
	$\text{FPM}_{2.5}$	129.6 ± 6.1	81.5 ± 32
CPM		Ion 7.4 ± 0.3	Ion 4.4 ± 0.3
	$\text{CPM}_{\text{organic}}$	8.6 ± 2.3	4.7 ± 1.2
		34.1 ± 4.0	28.0 ± 1.2
	Ion 15.3 ± 0.5	Ion 13.8 ± 0.2	

al., 2021; Corio and Sherwell, 2000). 반면에 Zou et al. (2023)의 연구에서 석탄의 Cl 함량이 증가함에 따라 CPM 중 SO_4^{2-} 농도가 감소한다는 결과가 보고되었다. 그러나 이 문헌에서 사용한 석탄은 Cl 함량이 증가함에 따라 S의 함량이 감소하였기 때문에 이에 대해서는 추가적인 연구가 필요하겠다. 본 연구에서 얻은 FPM과 CPM의 분석 결과들은 표 2에 정리하여 나타내었다.

4. 결 론

석탄 성상에 따른 CPM 특성을 조사하기 위해서 실험실 연소로에서 두 종류의 석탄을 각각 연소한 후 배출되는 CPM과 FPM의 성분을 분석하였다. CPM의 유기성분 평균 농도는 각각 8.6 mg/Nm^3 , 4.7 mg/Nm^3 으로 석탄 시료에 따라 서로 다른 농도를 나타내었다. 그러나 CPM의 유기성분과 관련하여 기존에 보고된 연구 결과가 매우 적어서, 문헌 결과를 통한 해석이 어려운 상황이다. 따라서 CPM의 유기성분에 대한 정성분석 및 정량분석을 통해 추후 영향인자 조사가 필요하겠다. CPM은 가스상의 전구물질들이 수증기와 반응한 후 응축하여 생성되기 때문에, 유기성분, Cl^- , F^- , SO_4^{2-} 를 상대적으로 많이 포함하는 것으로 나타났다. 반면에 FPM은 이온성분으로 SO_4^{2-} , Ca^{2+} 를 상대적으로 많이 포함하고 있었다. CPM과 FPM에 각각 포함된 SO_4^{2-} 는 서로 다른 경향을 나타내었는데, 연료의 S 함량이 높은 석탄을 연소하였을 때, FPM의 SO_4^{2-} 함량은 증가하였고, CPM의 SO_4^{2-} 함량은 조금 감소하였다. 또한 Cl 함량이 높은 석탄 시료에서 CPM의 Cl^- 농도가 높았고, F 함량이 높은 석탄 시료에서 CPM의 F 농도가 높았다. 비록 이 결과들이 석탄 두 종류의 실험으로 얻은 한계점은 있으나, 석탄의 성상과 CPM 성분의 연관성을 보여주었다는 점에서 의미가 있고, 추후 연구 방향을 다음과 같이 제안할 수 있게 되었다. 첫 번째로 석탄에 포함된 각 원소에 대한 거동 특성 연구이다. 석탄에 각 원소의 함량에 따라 미세먼지의 성분 함량이 증가하므로, 바닥재, 비산재,

FPM, CPM, 가스상 물질에 존재하는 성분 농도를 분석하여 거동 특성을 이해할 수 있다. 두 번째로 석탄의 각 원소 함량 비율에 따른 CPM의 성분 변화이다. 본 연구에서는 석탄의 Cl 함량과 S 함량이 모두 증가하였을 때, CPM 중 Cl^- 는 크게 증가하였으나, SO_4^{2-} 가 오히려 조금 감소하는 결과를 나타내었다. 따라서 석탄의 원소 함량 비율에 따른 CPM의 성분 특성 변화를 조사할 필요가 있다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2018R1D1A1A09083083), 환경부 폐자원에너지·재활용 전문인력양성사업, 2022학년도 충북대학교 학술연구영역 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- Corio, L.A., Sherwell, J. (2000) In-stack condensable particulate matter measurements and issues, *Journal of 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., Su, S., Zhang, Z., Gan, Z., Dong, Y. (2021) Comparative study on the characteristics of condensable particulate matter emitted from three kinds of coal, *Environment Pollution*, 270, 116267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116267>
- 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>
- Gong, B., Kim, J., Kim, H., Lee, S., Kim, H., Jo, J., Kim, J., Gang, D., Park, J.M., Hong, J. (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>

- 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>
- Liang, B., Bai, H., Tan, B., Bai, D. (2023) Sources apportionment of water-soluble inorganic salts in CPM from coal-fired power plants with different emission control technologies, *Fuel*, 334, 126786. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126786>
- Liu, S., Wu, Y., Xu, Z., Lu, S., Li, X. (2022) Study on characteristics of organic components in condensable particulate matter before and after wet flue gas desulfurization system of coal-fired power plants, *Chemosphere*, 294, 133668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133668>
- 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>
- Park, J.-M., Lee, S.-S. (2021) Characteristics of PM_{2.5} Emitted from Pulverized Coal Combustion, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(5), 803-811, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.5.803>
- Pope, C.A., 3rd, Burnett, R.T., Thurston, G.D., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Godleski, J.J. (2004) Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution: epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease, *Circulation*, 109(1), 71-77. <https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000108927.80044.7F>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2017) Method 202 - Dry Impinger Method for Determining Condensable Particulate Emissions From Stationary Source (Federal Information & News Dispatch, Issue).
- 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, L., Li, Y., Li, J., Zhang, H., Zhang, Z., Ran, W. (2022) The state of the art of condensable particulate matter, *Fuel*, 325, 124807. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124807>
- Wu, Y., Xu, Z., Liu, S., Tang, M., Lu, S. (2021) Emission characteristics of PM(2.5) and components of condensable particulate matter from coal-fired industrial plants, *Science of The Total Environment*, 796, 148782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148782>
- 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., Lee, K.-T., Hsieh, Y.-S., Luo, S.-W., Li, M.-S. (2014) Filterable and Condensable Fine Particulate Emissions from Stationary Sources, *Aerosol and Air Quality Research*, 15(3), 776-785. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.08.0175>
- Yu, J., Lim, S., Song, J., Lee, D., Yu, M., Kim, J. (2018) A Study on the Change of Condensable Particulate Matter by the SO₂ 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>
- Yuan, C., Wang, Z., Cheng, H., Liang, S., Hu, Y., Dong, X., Wu, J. (2021) Characteristics of water-soluble ions in condensable particulate matter emitted from stationary sources in Wuhan, *Fuel*, 295, 120626. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120626>
- Zhang, Z., Li, Y., Zhang, X., Zhang, H., Wang, L. (2021) Review of hazardous materials in condensable particulate matter, *Fuel Processing Technology*, 220, 106892. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106892>
- 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>
- Zou, Y., Liu, X., Wu, K., Zhai, Y., Li, Y. (2023) Role of sulphur and chlorine in condensable particulate matter formation during coal combustion, *Journal of Hazardous Materials*, 443(Pt B), 130317. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130317>

Authors Information

최승진 (충북대학교 환경공학과 석사과정)
(tmdwlsd19801@naver.com)

박정민 (화학물질안전원 교육혁신팀 환경연구사)
(jeongmin11@korea.kr)

이상섭 (충북대학교 환경공학과 교수)
(slee@chungbuk.ac.kr)