

석탄 연소 시 배출되는 응축성 미세먼지의 유기 성분

박진, 이상섭*

충북대학교 환경공학과
28644 충청북도 청주시 서원구 충대로 1

(2023년 8월 16일 접수; 2023년 9월 26일 수정본 접수; 2023년 9월 26일 채택)

Organic Compounds in Condensable Particulate Matter
Emitted from Coal Combustion

Jin Park and Sang-Sup Lee*

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University
1 Chungdeae-ro, Seowon-gu, Cheongju 28644, Chungbuk

(Received for review August 16, 2023; Revision received September 26, 2023; Accepted September 26, 2023)

요약

석탄 연소 시 배출되는 미세먼지는 여과성 미세먼지(FPM)와 응축성 미세먼지(CPM)로 구분된다. CPM은 기존의 대기방지시설로 제어가 어려워 CPM의 특성을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다. 응축성 미세먼지(CPM)를 구성하는 성분은 크게 무기성분과 유기성분으로 나눌 수 있다. CPM의 무기성분 중에서 상당한 비율을 차지하는 이온성분에 대해서는 많은 정량분석 결과가 나와 있으나, 유기성분에 대해서는 알려진 바가 적다. 특히 유기성분에 대한 정량분석의 결과가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 실험실 규모 석탄 연소로에서 배출되는 CPM의 유기성분 중 방향족 탄화수소(toluene, ethyl benzene, m,p-xylene, o-xylene)와 탄소 수 10부터 30까지의 n-alkane을 정량분석하였다. 실험 결과 방향족 탄화수소 중에서는 toluene이 CPM 유기성분의 1.03%를 차지하여 가장 높았다. 그러나 ethyl benzene, m,p-xylene, o-xylene이 차지하는 함량은 각각 평균 0.11%, 0.18%, 0.51%로 낮은 값을 나타내었다. 반면에 n-alkane 중에서는 triacontane(C₃₀)이 2.64%, decane(C₁₀)이 2.05%로 높은 함량을 보여주었다. 다음으로 dodecane(C₁₂), tetradecane(C₁₄), heptacosane(C₂₇)의 순으로 함량이 높았는데, 이는 toluene 보다 높은 수준이었다. 농도가 검출된 n-alkane 물질들은 tetracosane(C₂₄)만 제외하고 ethyl benzene, m,p-xylene, o-xylene보다 높은 함량을 보였다.

주제어 : 석탄 연소, 응축성 미세먼지, 유기성분, n-알칸, 방향족 탄화수소

Abstract : Fine dust emitted from coal combustion is classified into filterable particulate matter (FPM) and condensable particulate matter (CPM). CPM is difficult to control with existing air pollution control devices, so research is being conducted to understand the characteristics of CPM. Components constituting condensable particulate matter (CPM) are divided into inorganic and organic components. There are many quantitative analysis results for the ionic components, which account for a significant proportion of the CPM inorganic components, but little is known about the organic components. Thus, there is a need for a quantitative analysis of CPM organic components. In this study, aromatic hydrocarbons (toluene, ethyl benzene, m,p-xylene, and o-xylene) and n-alkanes with 10 to 30 carbon atoms were quantitatively analyzed to understand the organic components of CPM emitted from a lab-scale coal combustor. Of the aromatic hydrocarbons, toluene accounted for 1.03% of the CPM organic components. On the other hand, the contents of ethyl benzene, m,p-xylene, and o-xylene showed low values of 0.11%, 0.18%, and 0.51% on average, respectively. Among the n-alkanes, triacontane (C₃₀) showed a high content of 2.64% and decane (C₁₀) showed a content of 2.05%. The next highest contents were shown with dodecane (C₁₂), tetradecane (C₁₄), and heptacosane (C₂₇), all of which were higher than that of toluene. The n-alkane substances that had detectable concentrations showed higher contents than ethyl benzene, m,p-xylene, and o-xylene except for tetracosane (C₂₄).

Keywords : Coal combustion, Condensable particulate matter, Organic component, n-Alkane, Aromatic hydrocarbon

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: slee@chungbuk.ac.kr; Tel: +82-43-261-2468; Fax: +82-43-264-2465

doi: 10.7464/ksct.2023.29.4.279 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근에 들어 미세먼지 저감을 위해 다양한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 본 연구에서 다루는 석탄 연소 시 배출되는 미세먼지는 입자상으로 배출되는 여과성 미세먼지(filterable particulate matter, FPM)와 기체상의 배출가스가 찬 공기와 만나 응결과정을 거쳐 생성되는 응축성 미세먼지(condensable particulate matter, CPM)로 구분된다[4-8]. 그 중 CPM은 1~2 μm 이하의 크기로 유해원소와 화합물이 쉽게 흡착되며 인체에 높은 유해성을 나타낸다고 알려져 있다[2]. 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지 중 CPM의 비율은 매우 높은 수준이다. CPM의 구성은 무기성분과 유기성분으로 구분할 수 있는데, 무기성분에는 염소이온(Cl⁻), 불소이온(F⁻), 암모늄이온(NH₄⁺), 황산이온(SO₄²⁻) 등의 이온성분이 다량 존재한다[9-12]. 그리고 유기성분에는 alkanes, esters, ketones, aromatics 종류의 화합물이 존재한다[13-15]. 특히 CPM은 기존의 대기방지시설로 제어가 어려운 것으로 알려져 있어, CPM의 특성을 파악하기 위한 연구가 진행되고 있다.

Song et al.[16]은 저온 전기집진시설(low-low temperature electrostatic precipitation, LLT-ESP), 습식탈황시설(wet flue gas desulfurization, WFGD), 습식전기집진시설(wet electrostatic precipitation, WESP)순으로 구성된 대기오염방지시설의 각 출구에서 배기가스를 측정된 결과 전체 PM_{2.5} 중 CPM 비율은 76.4~83.0%, CPM 중 유기성분의 비율은 평균 52.2%로 나타났다. 반면 Wu et al.[13]은 여과집진시설(bag house, BH), WFGD, WESP순으로 대기오염방지시설의 각 출구에서 배기가스를 측정된 결과 방지시설을 지남에 따라 총 미세먼지(total particulate matter, TPM)중 CPM의 비중이 2%, 88%, 92%로 급격히 증가하였으며, CPM 중 유기성분의 비율도 52%, 68%, 96%로 증가하는 모습을 나타냈다. 또한 WESP 출구의 배출가스 중 CPM의 유기성분을 분석한 결과 alkanes과 같은 포화 지방족 탄화수소가 61%로 비율이 가장 높았고, 그 다음으로는 esters, phenols의 비율이 높았다. Wang et al.[17]은 선택적환원촉매시설(selective catalytic reduction, SCR), BH, WFGD, WESP순으로 구성된 대기방지시설에서 BH, WFGD, WESP의 후단에서

배기가스를 측정된 결과 TPM 중 CPM 비율은 61.2%, 85.5%, 84.5%이며, CPM 중 유기성분의 비율은 평균 67.9%, 53.8%, 57.1%를 차지하였으며, 주요 유기성분으로는 alkanes, esters, amides이었고, 그 외에 organic acids, phenols, ketones, aromatics 등이 검출되었다. 반면에 실험실 규모의 연소로를 이용한 Choi et al.[9]의 연구에서는 두 종류의 석탄을 연소한 후 연소가스를 분석하였다. 이 연구는 대기방지기술을 적용하지 않은 연소가스를 분석하여서 CPM의 무기성분 농도가 유기성분 농도보다 4-6.5배 높은 결과를 보였다. 따라서 문헌의 결과들을 보면 CPM 중 유기성분 비율은 대기방지시설을 거치면서 대체로 증가하는 경향을 보이는데[11,18,19], 이는 CPM의 유기성분에 대한 전구물질들이 기존의 대기방지시설에서 쉽게 저감되지 않기 때문으로 보인다. 기존의 연구결과들을 보면 CPM의 무기성분 중에서 상당한 비율을 차지하는 이온성분에 대해서는 많은 정량분석 결과가 나와 있는 반면에, 유기성분에 대해서는 정성분석 결과만 보고되고 있다. 이로 인하여 CPM의 유기성분을 구성하는 각 물질의 농도가 알려져 있지 않아서, CPM의 생성과정을 이해하고, 거동특성을 파악하는데 제약이 따른다.

본 연구에서는 실험실 규모 연소로에서 석탄을 연소한 후 배출되는 CPM의 유기성분을 정량분석하였다. 많은 선행연구에서 CPM의 유기성분 중 가장 높은 비율을 차지하는 것으로 보고된 n-alkane에 대한 정량분석을 실시하였고, 석탄 연소가스에 존재하는 대표적인 휘발성 유기화합물인 방향족 탄화수소에 대해서도 정량분석을 실시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 석탄 연소 및 시료 채취

석탄이 연소하여 배출되는 미세먼지를 채취하기 위하여 Figure 1과 같은 실험실 규모의 연소시스템을 구축하였다. Figure 1에서 보는 바와 같이 실제 석탄 발전시설의 연소로와 동일하게 연료와 공기를 연소장치의 측면에서 주입하여 비산재와 바닥재가 분리되도록 하고, 비산재 중에서 미세먼지를 포집할 수 있도록 제작하였다. 역청탄 시료를 20~30% 과잉공기량으로 연

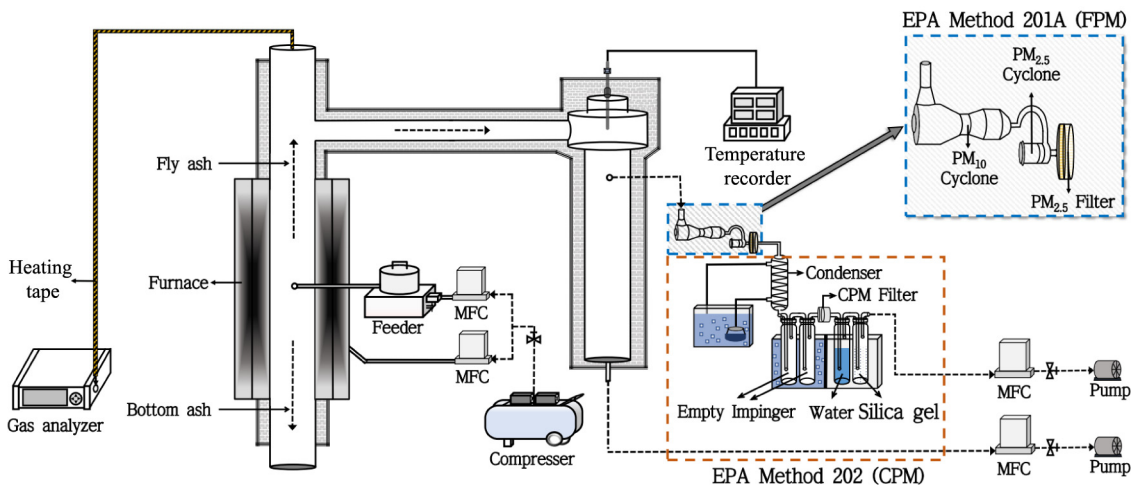


Figure 1. Experimental system.

소하였다. 연소를 위해 주입하는 공기의 유량은 상온에서 16.6 L/min이다. 연소로 외부의 온도를 950°C로 유지하여 연소로 내부의 온도가 석탄의 발화점 이상이 되도록 하였다. 연소의 안정도를 평가하기 위하여 석탄 연소 후 배출되는 가스 중 산소(O₂), 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO) 농도를 가스분석기(VarioPlus, MRU)로 분석하였다. 이를 통하여 완전연소 상태에서 미세먼지가 채취되도록 하였다. CO의 배출농도가 50 ppm 이하로 유지됨을 확인하였고, CO₂, O₂는 이론 배출농도에 근접함을 확인하였다. 시료 채취 시 FPM은 EPA Method 201A를 이용하였고, 본 연구에 관련한 CPM은 EPA Method 202에 따라 건조 임핀저법을 이용하여 시료를 포집하였다. 그림에서 보는 바와 같이 응축기, 임핀저, 여과지를 통하여 CPM을 포집한다.

그리고 응축기, 임핀저 트레인, 연결관 등은 초순수, 아세톤(99.7%, HPLC Reagent, SAMCHUN), 헥산(95.0%, HPLC

Reagent, SAMCHUN)의 순서로 세척하여 CPM을 회수하였다. CPM 여과지는 건조 이후에 초음파기를 이용하여 무기성분과 유기성분을 추출하였다. 초순수로 회수한 것은 CPM의 무기성분으로 분류하고, 아세톤과 헥산으로 회수한 것은 CPM의 유기성분으로 분류하였다. 본 연구에서는 CPM의 유기성분에 대하여 정량분석을 실시하였다. 이 분석 흐름도는 Figure 2에 정리하여 나타내었다. 그리고 실험장치 및 방법에 대한 자세한 설명은 Choi et al.[9]의 논문에서 찾을 수 있다. 연소실험 및 분석은 6회 반복하여 수행하였다.

2.2 유기 성분 분석

CPM 유기성분으로 회수한 용액의 절반을 분취하여 분석에 사용하였다. 이 때 각 유기성분의 농도는 분석장비의 검출한계보다 낮아서 이 상태로는 분석을 할 수 없다. 따라서 본 연구에

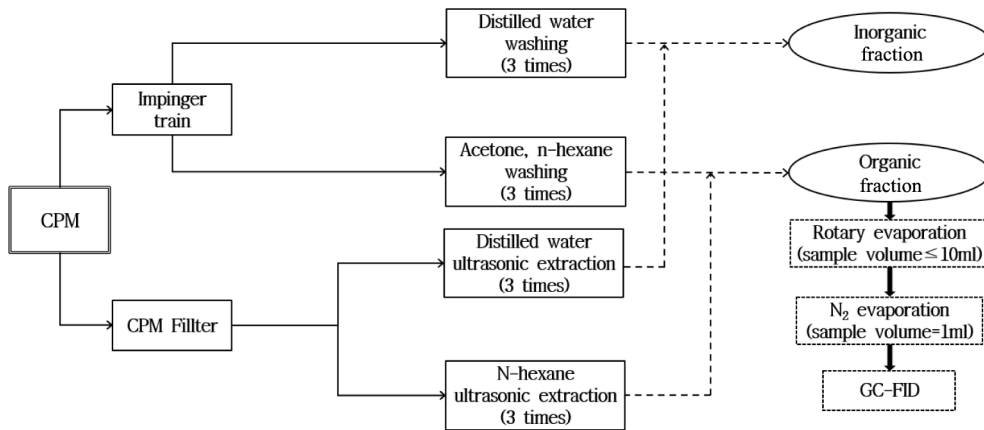


Figure 2. Summary of CPM analysis.

Table 1. Summary of GC-FID analysis conditions

Aromatic hydrocarbon	Column	DB-624UI, 30 m(L)×0.25 mm(I.D.)×1.4 μm(F.D.)		
	Run time	22 min		
	Oven	Temperature	50°C (7 min) → 80°C → 150°C	
		Temperature programing	5°C/min, 10°C/min	
	Spilt ratio	1 : 5		
	Carrier gas (Flow)	He 99.999%(2 mL/min)		
	Injector parameter	Air	300 mL/min	
		H ₂	35 mL/min	
		Temperature	230°C	
	Detector temperature	250°C		
n-Alkane (C ₁₀ -C ₃₀)	Column	VF-17ms, 30 m(L)×0.25 mm(I.D.)×0.25 μm(F.D.)		
	Run time	40 min		
	Oven	Temperature	40°C (5 min) → 300°C(6 min)	
		Temperature programing	10°C/min	
	Spilt ratio	1 : 5		
	Carrier gas (Flow)	He 99.999% (0.8 mL/min)		
	Injector parameter	Air	300 mL/min	
		H ₂	35 mL/min	
		Temperature	300°C	
	Detector temperature	330°C		

Table 2. Analysis for standard solutions

	Component	S.D.	D.L.	L.O.Q
Aromatic hydrocarbon	Toluene	0.4531	1.42	4.53
	Ethyl benzene	0.2398	0.75	2.40
	m,p-Xylene	0.4131	1.30	4.13
	o-Xylene	0.3989	1.25	3.99
n-Alkane	Decane(C ₁₀)	0.1362	0.43	1.36
	Undecane(C ₁₁)	0.1659	0.52	1.66
	Dodecane(C ₁₂)	0.3749	1.18	3.75
	Tridecane(C ₁₃)	0.2026	0.64	2.03
	Tetradecane(C ₁₄)	0.1168	0.37	1.17
	Pentadecane(C ₁₅)	0.3256	1.02	3.26
	Hexadecane(C ₁₆)	0.2855	0.90	2.86
	Heptadecane(C ₁₇)	0.0430	0.14	0.43
	Octadecane(C ₁₈)	0.1640	0.51	1.64
	Nonadecane(C ₁₉)	0.1445	0.45	1.44
	Eicosane(C ₂₀)	0.2380	0.75	2.38
	Henicosane(C ₂₁)	0.1905	0.60	1.90
	Docosane(C ₂₂)	0.1656	0.52	1.66
	Tricosane(C ₂₃)	0.0945	0.30	0.94
	Tetracosane(C ₂₄)	0.1366	0.43	1.37
	Pentacosane(C ₂₅)	0.2666	0.84	2.67
	Hexacosane(C ₂₆)	0.1484	0.47	1.48
	Heptacosane(C ₂₇)	0.1841	0.58	1.84
	Octacosane(C ₂₈)	0.1089	0.34	1.09
	Nonacosane(C ₂₉)	0.1236	0.39	1.24
Triacotane(C ₃₀)	0.2849	0.89	2.85	

*S.D.: Standard Deviation, D.L.: Detection limit, L.O.Q: Limit of quantification

서는 이 용액을 실린지 필터에 여과시킨 후 회전 감압농축기(Rotary evaporator, IKA RV 10)로 서서히 감압하여 약 10 mL가 될 때까지 농축하고, 다시 N₂ 농축기를 이용하여 정확히 1 mL까지 농축하였다. 이 용액을 CPM 시료용액으로 하고 불꽃이온화 검출기(Flame ionization detector, FID)가 장착된 기체크로마토그래피(YL6500-GC, Young in chromass)에 1 µL 주입하여 방향족 탄화수소(toluene, ethyl benzene, m,p-xylene, o-xylene)와 탄소수 10부터 30까지의 n-alkane을 정량 분석하였다. 분석에 사용된 GC 컬럼은 방향족 탄화수소의 경우 DB-624UI(30 m×0.25 mm×1.4 µm)을 사용하였고, n-alkane의 경우 VF-17ms(30 m×0.25 mm×0.25 µm)을 사용하였다. GC-FID의 분석조건은 안정된 바탕선을 가지며 분석 물질의 peak가 겹치지 않도록 Table 1과 같이 결정하였다.

검량선 작성을 위하여 바탕시료용액과 표준용액을 제조하였다. 바탕시료용액으로는 CPM의 유기성분 회수 시 사용하는 용액인 아세톤 50 mL와 헥산 50 mL를 혼합하였고, CPM 시료용액을 제조하는 것과 동일한 방법으로 1 mL로 감압 농축하여 사용하였다. 방향족 탄화수소 표준용액은 toluene(99.9%, Guaranteed Reagent, DAEJUNG), ethyl benzene(98.0%,

Guaranteed Reagent, WAKO), xylene(98.5%, ACS Reagent, DAEJUNG) 각각을 헥산으로 희석한 용액 50 mL와 아세톤 50 mL를 혼합하여 제조하였다. 이 때 toluene, ethyl benzene, m,p-xylene, o-xylene 각 물질에 대하여 농도가 2.5, 5, 10, 25 ppm이 되도록 제조하였다. 그리고 이 용액을 1 mL로 감압 농축하여 분석하였다. n-alkane 표준용액도 마찬가지로 alkane 표준액(1,000 mg/L C₇-C₃₀, Supelco)을 헥산으로 희석한 용액 50 mL와 아세톤 50 mL를 혼합하여 제조하였다. 이 때 n-alkane의 각 성분 농도가 2.5, 5, 10, 25 mg/L이 되도록 하였고, 이 용액을 1 mL로 감압 농축한 후 분석하였다. 제조한 표준용액은 Table 1의 조건을 이용하여 분석한 후 검량선을 작성하였다. 그리고 CPM 시료용액을 GC-FID로 분석하고, 검량선을 이용하여 각 CPM 유기성분 농도를 결정하였다. Table 2는 방향족 탄화수소 표준용액 10 ppm과 n-alkane 표준용액 5 mg/L 각각의 시료 7개에 대한 표준편차, 검출한계, 정량한계를 나타내고 있다.

2.3 바탕 시험

CPM의 유기성분을 회수하는데 사용되는 아세톤, 헥산과 감

압 농축의 전처리 과정이 분석 대상 물질에 미치는 영향이 있는지 확인하기 위하여 바탕시험을 실시하였다. 그 결과는 Figure 3, 4에 나타내었다. Figure 3의 위 그림은 바탕시료를 방향족 탄화수소 분석조건(Table 1)에 따라 GC-FID로 분석한 결과이고, Figure 3의 아래 그림은 방향족 탄화수소 표준용액 중 10 ppm의 농도를 가지는 시료의 결과이다. 그리고 Figure 4의 위 그림

은 바탕시료를 n-alkane 분석조건(Table 1)에 따라 GC-FID로 분석한 결과이고, Figure 4의 아래 그림은 n-alkane 표준용액 중 10 mg/L의 농도를 가지는 시료의 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 benzene은 hexan peak와 겹쳐서 정량분석을 수행하지 않았다. 또한 탄소수 7, 8, 9의 n-alkane은 hexan과 peak가 겹쳤다. 그리고 CPM 유기성분을 정성분석한 문헌의 결과[15,21]에

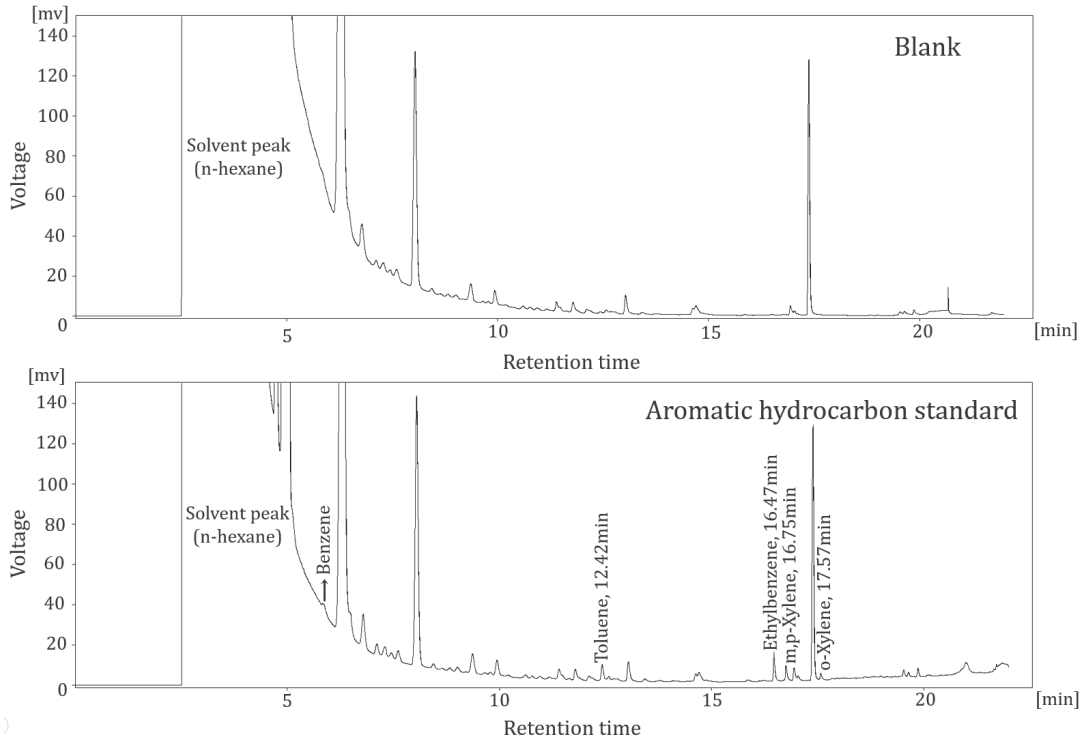


Figure 3. Blank test results for aromatic hydrocarbons.

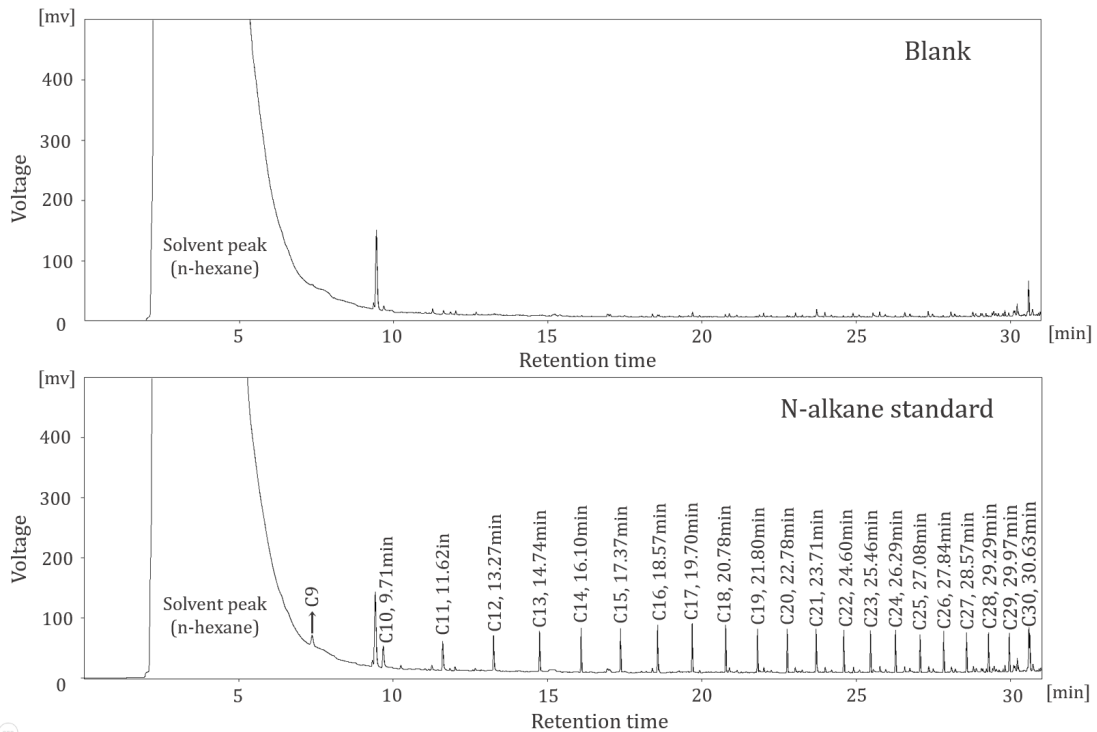


Figure 4. Blank test results for n-alkane.

서는 탄소수 10 미만의 alkane 농도가 낮은 것으로 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 탄소수 10~30의 n-alkane에 대한 정량분석을 실시하였다.

Figure 3, 4에 나타난 바와 같이 바탕시료의 크로마토그램에서는 분석 대상 물질의 peak가 나타나지 않았고, 표준용액 시료와 바탕시료의 크로마토그램을 비교할 때, 분석 대상 물질의 peak 이외에는 크로마토그램이 서로 유사하였다. 이를 통하여 전처리 과정이 분석 대상 물질에 미치는 영향은 없는 것을 확인하였다.

2.4 검량선

다음 과정으로 각 분석 대상 물질에 대한 검량선(calibration curve)을 작성하였다. 앞서 설명한 바와 같이 각 분석 대상 물질의 농도가 2.5, 5, 10, 25 ppm이 되도록 표준용액을 제조하였다. 그리고 각 농도의 시료를 GC-FID로 3회 반복하여 분석하고, 각 분석대상 물질의 면적 값으로 검량선을 작성하였다. Table 3은 그 결과를 정리하여 나타낸 것으로 방향족 탄화수소와 n-alkane 각 물질의 시간(retention time)과 상관계수(R²) 값을 보여주고 있다. 표에서 보는 바와 같이 모든 분석 대상 물질의 상관계수는 0.99 이상으로 매우 양호한 검량선을 확인할 수 있었다.

Table 3. Calibration results for the standard solutions of aromatic hydrocarbons and n-alkanes

	Compounds	Retention time (min)	R ²
Aromatic hydrocarbon	Toluene	12.42	0.9989
	Ethylbenzene	16.47	0.9991
	m,p-Xylene	16.75	0.9986
	o-Xylene	17.57	0.9968
N-alkane	Decane(C ₁₀)	9.71	0.9936
	Undecane(C ₁₁)	11.62	0.9926
	Dodecane(C ₁₂)	13.27	0.9933
	Tridecane(C ₁₃)	14.74	0.9955
	Tetradecane(C ₁₄)	16.10	0.9949
	Pentadecane(C ₁₅)	17.37	0.9969
	Hexadecane(C ₁₆)	18.57	0.9903
	Heptadecane(C ₁₇)	19.70	0.9907
	Octadecane(C ₁₈)	20.78	0.9931
	Nonadecane(C ₁₉)	21.80	0.9948
	Eicosane(C ₂₀)	22.78	0.9957
	Henicosane(C ₂₁)	23.71	0.9945
	Docosane(C ₂₂)	24.60	0.9949
	Tricosane(C ₂₃)	25.46	0.9958
	Tetracosane(C ₂₄)	26.29	0.9961
	Pentacosane(C ₂₅)	27.08	0.9960
	Hexacosane(C ₂₆)	27.84	0.9965
	Heptacosane(C ₂₇)	28.57	0.9962
	Octacosane(C ₂₈)	29.29	0.9974
	Nonacosane(C ₂₉)	29.97	0.9961
	Triacosane(C ₃₀)	30.63	0.9990

3. 결과 및 고찰

3.1 CPM 유기성분 정량 분석 결과

본 연구에서는 석탄 연소 및 CPM 시료 채취를 6회 반복하여 실시하였고, 평균과 표준오차로 각 결과를 나타내었다. 석탄 연소가스에서 채취한 CPM은 유기성분과 무기성분으로 나누어 회수하였고, Figure 5는 무기성분과 유기성분의 농도를 각각 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 유기성분의 평균농도는 4.2 mg/Nm³이고, 무기성분의 평균농도는 28.8 mg/Nm³으로 무기성분의 농도가 약 7배 높게 나타났다. 석탄 연소 가스에서 CPM의 무기성분과 유기성분의 비율은 문헌의 결과마다 다르게 나타나고, 문헌을 통해 보고된 결과의 양도 부족하여 일반화하여 해석하기는 어렵다. 그러나 문헌의 결과들을 보면 대기오염방지시설을 거치면서 CPM의 유기성분 비율은 대체로 증가하는 경향을 보인다. 이는 CPM의 무기성분 전구물질들이 유기성분의 전구물질들보다 대기오염방지시설에서 상대적으로 쉽게 포집되기 때문으로 판단된다. 본 연구는 석탄 연소 후 바로 배출되는 가스를 분석한 결과이므로 CPM의 무기성분 비율이 비교적 높게 나타났다고 볼 수 있다. 그리고 CPM의 무기성분을 구성하는 물질의 특성에 대해서는 Choi et al.[9]의 논문에서 찾을 수 있다.

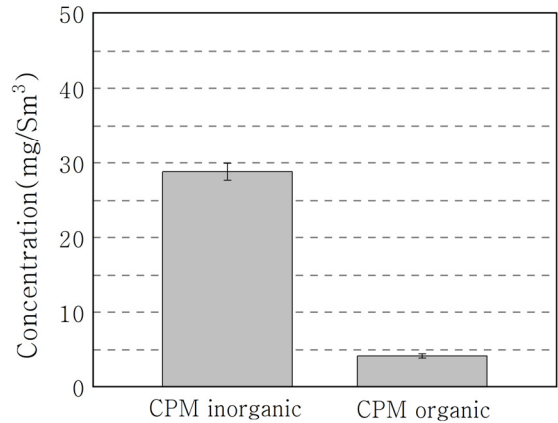


Figure 5. Organic and inorganic concentrations of CPM.

Figure 6은 CPM의 유기성분에서 방향족 탄화수소인 toluene, ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene의 함량을 백분율로 각각 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 분석한 방향족 탄화수소 중에서 toluene이 가장 높은 함량을 보여주었다. Toluene이 CPM의 유기성분에서 차지하는 함량은 평균 1.03%이었다. Ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene이 차지하는 비율은 각각 평균 0.11%, 0.18%, 0.51%로 낮은 함량을 나타내었다. 그 결과, toluene, ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene의 함량을 모두 합한 양도 CPM 유기성분의 1.83%에 불과하였다. 비록 본 연구에서는 benzene을 분석하지 못하였으나, toluene, ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene의 분석결과로 유추해볼 때, CPM의 유기성분 중 방향족 탄화수소의 함량은 낮은 것으로 판단된다. 그리고 이 낮은 함량은 문헌에서 CPM 유기성분에 대한 정성분

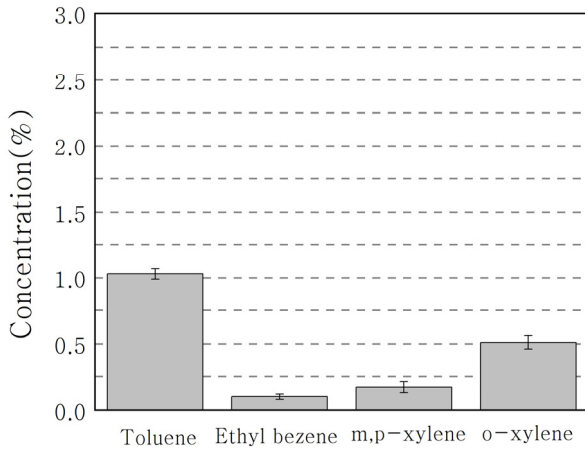


Figure 6. Percentage of aromatic hydrocarbons in the organic portion of CPM.

석을 통해 예상된 결과와도 동일하다[13,21].

CPM의 유기성분 중에서 탄소수 10부터 30까지의 n-alkane을 정량분석하였을 때, 12개의 물질만 검출되었다. 따라서 Figure 7은 검출된 각 물질이 CPM의 유기성분에서 차지하는 함량을 백분율을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 검출된 물질 중에서 triacontane(C₃₀)의 함량이 평균 2.64%로 가장 높았고, 다음으로 decane(C₁₀)과 dodecane(C₁₂)이 각각 2.05%, 1.68%로

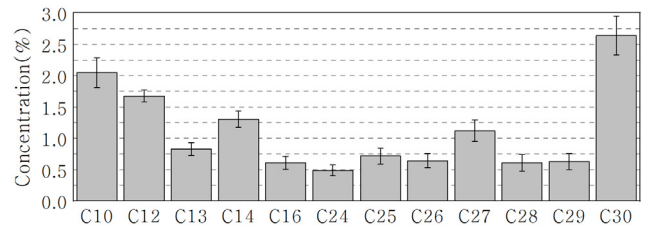


Figure 7. Percentage of n-alkane in the organic portion of CPM.

높은 함량을 보였다. 다음으로 함량이 높은 tetradecane(C₁₄), heptacosane(C₂₇)의 함량도 각각 평균 1.31%, 1.12%로 방향족 탄화수소에서 비율이 가장 높은 toluene보다도 높은 함량을 나타내었다. 그리고 tridecane(C₁₃), hexadecane(C₁₆), pentacosane(C₂₅), hexacosane(C₂₆), octacosane(C₂₈), nonacosane(C₂₉)은 toluene 보다 낮은 함량을 나타내었으나, ethylbenzene, m,p-xylene, o-xylene보다는 높은 함량을 보였다. 그래서 검출된 n-alkane 물질들을 모두 합한 양은 전체 CPM의 유기성분 중에서 평균 13.33%를 차지하였다. 문헌에서 CPM 유기성분에 대한 정성분석 결과[13-15,19,21,22]에서도 alkanes의 함량이 가장 높을 것으로 예상되었던 것처럼 alkanes은 CPM의 유기성분으로 실제 높은 함량을 나타내었다. 그리고 높은 함량을 보인 triacontane(C₃₀), decane(C₁₀), dodecane(C₁₂)도 문헌에서 정성분석을 통해 예상되었던 물질에 해당한다[24]. 그러나 문헌의 정성분석 결

Table 4. Summary of the concentrations in CPM

CPM	Concentration (mg/Nm ³)	Component	Portion(%)			
CPM organic	4.2±0.3	Aromatic hydrocarbon	Toluene	1.03±0.04		
			Ethyl benzene	0.11±0.02		
			m,p-Xylene	0.18±0.03		
			o-Xylene	0.51±0.05		
		N-alkane			Decane(C ₁₀)	2.05±0.24
					Undecane(C ₁₁)	N.D.
					Dodecane(C ₁₂)	1.68±0.10
					Tridecane(C ₁₃)	0.83±0.11
					Tetradecane(C ₁₄)	1.31±0.13
					Pentadecane(C ₁₅)	N.D.
					Hexadecane(C ₁₆)	0.61±0.10
					Heptadecane(C ₁₇)	N.D.
Octadecane(C ₁₈)	N.D.					
Nonadecane(C ₁₉)	N.D.					
Eicosane(C ₂₀)	N.D.					
Henicosane(C ₂₁)	N.D.					
Docosane(C ₂₂)	N.D.					
Tricosane(C ₂₃)	N.D.					
Tetracosane(C ₂₄)	0.49±0.09					
Pentacosane(C ₂₅)	0.72±0.12					
Hexacosane(C ₂₆)	0.65±0.11					
Heptacosane(C ₂₇)	1.12±0.17					
Octacosane(C ₂₈)	0.61±0.13					
Nonacosane(C ₂₉)	0.63±0.13					
Triacontane(C ₃₀)	2.64±0.31					
CPM inorganic	28.8±1.1					

과에서는 다양한 유기성분 후보물질들을 제시하여 각 물질의 함량을 예측하기 어려웠으나, 본 연구를 통하여 유기성분 각 물질의 함량을 확인하였으며, 물질 간의 함량 차이도 크다는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 본 연구에서 분석한 CPM 유기성분들에 대하여 각 물질의 농도와 평균농도는 Table 4에 요약하여 나타내었다.

4. 결 론

실험실 규모 석탄 연소로에서 발생하는 연소가스 중 CPM을 유기성분과 무기성분으로 나누어 회수하고, 그 중 CPM의 유기성분에서 방향족 탄화수소(toluene, ethyl benzene, m,p-xylene, o-xylene)와 탄소수 10부터 30까지의 n-alkane에 대한 정량 분석을 진행하였다. 이를 통하여 CPM의 유기성분을 구성하는 각 물질의 함량을 다음과 같이 확인할 수 있었다. CPM의 유기성분을 정량 분석한 결과, 방향족 탄화수소 중 toluene이 CPM의 유기성분에서 1.03%로 가장 높은 함량을 나타내었고, o-xylene이 0.51%, m,p-xylene이 0.18%, ethylbenzene이 0.11% 순으로 나타났다. 따라서 분석한 방향족 탄화수소의 함량을 모두 합하여도 1.83%로 낮은 값을 나타내었다. 다만, 방향족 탄화수소의 대표물질 중 하나인 벤젠을 정량분석하지 못하였으므로, CPM의 유기성분 중 방향족 탄화수소의 비율이 낮다고 단정하기는 어려운 점이 있다. 반면에 n-alkane의 경우 triacontane(C₃₀)이 2.64%, decane(C₁₀)이 2.05%로 높은 함량을 나타내었다. 다음으로 높은 함량을 보이는 dodecane(C₁₂), tetradecane(C₁₄), heptacosane(C₂₇)은 각각 평균 1.68%, 1.31%, 1.12%로 방향족 탄화수소에서 가장 높은 함량을 보이는 toluene보다도 높은 함량을 나타내었다. 그래서 분석한 n-alkane의 함량을 모두 합하면 CPM의 유기성분에서 13.33%를 차지하는 것으로 나타났다. 따라서 CPM 유기성분의 거동해석을 위해서는 alkanes에 대한 해석이 중요할 것으로 예상되며, 특히 탄소수가 높은 triacontane(C₃₀)과 탄소수가 낮은 decane(C₁₀) 물질을 대비하여 생성과정을 이해하고, 대기방지시설에서 이 물질들을 저감하는 방안을 찾아내는 것이 중요할 것으로 보인다.

사 사

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

Nomenclature

FPM: filterable particulate matter

CPM: condensable particulate matter

TPM: total particulate matter

LLT-ESP: low-low temperature electrostatic precipitation

WFGD: wet flue gas desulfurization

WESP: wet electrostatic precipitation

BH: bag house

SCR: selective catalytic reduction

FID: flame ionization detector

N.D.: not detected

References

- Kim, H. J. and Park, I. G., "Evaluation of Dust Removal Efficiency on Roadway Structures Using Ultrafine Bubble Water Jet," *Clean Technol.*, **27**(1), 39-46 (2021).
- Yeom, G. I., Han, D. B., Nam, S. H., and Baek, Y. S., "A CFD Analysis on DPF for the Removal of PM from the Emission of Diesel Vehicle," *Clean Technol.*, **24**(4), 301-306 (2018).
- Kim, Y. J., Han, D. B., Seo, T. W., Oh, K. C., and Baek, Y. S., "Effect of Particulate Matter and Ash Amount on Pressure Drop and Flow Uniformity of Diesel Particulate Filter Reduction System," *Clean Technol.*, **26**(1), 22-29 (2020).
- Gong, B., Kim, J., Kim, H., Lee, S., Kim, H., Jo, J., Kim, J., Gang, D., Park, J. M., and Hong, J., "A Study on the Characteristics of Condensable Fine Particles in Flue Gas," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **32**(5), 501-512 (2016).
- Feng, Y., Li, Y., and Cui, L., "Critical Review of Condensable Particulate Matter," *Fuel (Guildford)*, **224**, 801-813 (2018).
- Cano, M., Vega, F., Navarrete, B., Plumed, A., and Camino, J. A., "Characterization of Emissions of Condensable Particulate Matter in Clinker Kilns Using a Dilution Sampling System," *Energy Fuels*, **31**(8), 7831-7838 (2017).
- Corio, L. A. and Sherwell, J., "In-stack Condensable Particulate Matter Measurements and Issues," *J. Air Waste Manage. Assoc.*, **50**(2), 207-218 (2000).
- Russell, A. G. and Brunekreef, B., "A focus on particulate matter and health," *Environ. Sci. Technol.*, **43**(13), 4620-4625 (2009).
- Choi, S., Park, J., and Lee, S., "Characteristics of Condensable Particulate Matter Components with the Coal Property," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **39**(3), 372-380 (2023).
- Liang, B., Bai, H., Tan, B., and Bai, D., "Sources Apportionment of Water-Soluble Inorganic Salts in CPM from Coal-Fired Power Plants With Different Emission Control Technologies," *Fuel*, **334**, 126786 (2023).
- Liu, S., Wu, Y., Xu, Z., Lu, S., and Li, X., "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 (2022).
- Yuan, C., Wang, Z., Cheng, H., Liang, S., Hu, Y., Dong, X., and Wu, J., "Characteristics of Water-Soluble Ions in Condensable Particulate Matter Emitted from Stationary Sources in Wuhan," *Fuel*, **295**, 120626 (2021).
- Wu, Y., Xu, Z., Liu, S., Tang, M., and Lu, S., "Emission Characteristics of PM_{2.5} and Components Of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Industrial Plants," *Sci. Total*

- Environ.*, **796**, 148782 (2021).
14. Zhang, X., Li, Y., Zhang, Z., Nie, M., Wang, L., and Zhang, H., "Adsorption of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Flue Gas by Activated Carbon," *Sci. Total Environ.*, **778**, 146245 (2021).
 15. Park J. and Lee S., "Characteristics of PM2.5 Emitted from Pulverized Coal Combustion," *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **37**(5), 803-811 (2021).
 16. Song, J., Lu, S., Wu, Y., Zhou, C., Li, X., and Li, J., "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 (2020).
 17. Wang, K., Yang, L., Li, J., Sheng, Z., He, Q., and Wu, K., "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 (2020).
 18. Yang, F., Li, Z., Liu, H., Feng, P., Tan, H., Zhang, S., and Lu, X., "Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter and Sulfur Trioxide from Coal-Fired Power Plants," *Journal of the Energy Institute*, **94**, 146-156 (2021).
 19. Li, X., Zhou, C., Li, J., Lu, S., and Yan, J., "Distribution and Emission Characteristics of Filterable and Condensable Particulate Matter before and after a Low-low Temperature Electrostatic Precipitator," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **26**(13), 12798-12806 (2019).
 20. Zhang, Z., Li, Y., Zhang, X., Zhang, H., and Wang, L., "Review of Hazardous Materials in Condensable Particulate Matter," *Fuel Process. Technol.*, **220**, 106892 (2021).
 21. Zheng, C., Hong, Y., Liu, S., Yang, Z., Chang, Q., Zhang, Y., and Gao, X., "Removal and Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter in an Ultralow Emission Power Plant," *Energy Fuels*, **32**(10), 10586-10594 (2018).
 22. Li, J., Qi, Z., Li, M., Wu, D., Zhou, C., Lu, S., Yan, J., and Li, X., "Physical and Chemical Characteristics of Condensable Particulate Matter from an Ultralow-Emission Coal-Fired Power Plant," *Energy Fuels*, **31**(2), 1778-1785 (2017).
 23. Peng, Y., Shi, N., Wang, T., Wang, J., Zhang, Y., Chen, W., Sajjadi, B., and Pan, W., "Investigating the Effect of Flue Gas Temperature and Excess Air Coefficient on the Size Distribution of Condensable Particulate Matters," *Fuel*, **298**, 120866 (2021).
 24. Feng, Y., Li, Y., Zhang, X., Zhang, Z., Dong, Y., and Ma, C., "Characteristics of Condensable Particulate Matter Discharging from a One-Dimensional Flame Furnace Firing Lignite," *Fuel*, **277**, 118198 (2020).