



논문

연소 배출가스 중 SO₂ 농도에 따른 응축성먼지 변화에 관한 연구

A Study on the Change of Condensable Particulate Matter by the SO₂ Concentration among Combustion Gases

유정훈, 임슬기¹⁾, 송지한¹⁾, 이도영, 유명상, 김종호^{2)*}

한서대학교 대학원 환경공학과, ¹⁾한서대학교 환경연구소, ²⁾한서대학교 인프라시스템학과

JeongHun Yu, SeulGi Lim¹⁾, Jihan Song¹⁾, DoYoung Lee, MyeongSang Yu, JongHo Kim^{2)*}

Department of Environmental Engineering, Graduate School of Hanseo University

¹⁾Environmental Research Center, Hanseo University

²⁾Department of Infrastructure System, Hanseo University

접수일 2018년 9월 4일
 수정일 2018년 9월 20일
 채택일 2018년 9월 20일

Received 4 September 2018
 Revised 20 September 2018
 Accepted 20 September 2018

*Corresponding author

Tel : +82-(0)41-660-1431

E-mail : kimjh@hanseo.ac.kr

Abstract Particulate matter (PM) emitted from fossil fuel-combustion facilities can be classified as either filterable or condensable PM. The U.S. Environmental Protection Agency (EPA) defined condensable PM as material that is in the phase of vapor at the stack temperature of the sampling location which condenses, reacts upon cooling and dilution in the ambient air to form solid or liquid in a few second after the discharge from the stack. Condensable PM passed through the filter media and it is typically ignored. But condensable PM was defined as a component of primary PM. This study investigates the change of condensable PM according to the variation in the sulfur dioxide of combustion gas. Domestic oil boilers were used as the source of emission (SO₂) and the level of SO₂ concentration (0, 50, 80, and 120 ppm) was adjusted by diluting general light oil and marine gas oil (MGO) that contains sulfur less than 0.5%. Condensable PM was measured as 2.72, 6.10, 8.38, and 13.34 mg/m³ when SO₂ concentration in combustion gas were 0, 50, 80, and 120 ppm respectively. The condensable PM tended to increase as the concentration of SO₂ increased. Some of the gaseous air pollutants emitted from the stack should be considered precursors of condensable PM. The gas phase pollutants which converted into condensable PM should reduced for condensable PM control.

Key words: Condensable particulate matter, Filterable particulate matter, Cold impinger method, Precursor, SO₂, VOCs

1. 서 론

대기 중의 먼지(PM, Particulate Matter)는 연소 및 생산 공정 과정에서 직접 배출되거나 다른 가스상 물질(SO₂, NO_x, NH₃, VOCs 등)에 의해서 대기 중에서 2차로 생성되기도 한다(Seinfeld and Pandis, 2006). 특히 공기역학적 직경이 2.5 μm 이하의 작은 입자상 물질인 PM_{2.5}는 악성천식, 호흡기 질환, 만성 기관지염, 폐 기능 손상, 심장과 폐 관련 질환환자의 조기 사망 등의 인체위해성이 매우 높으며, 시정을 악화시키

는 원인물질로 대기환경에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Kim and Hwang, 2016).

우리나라에서는 2015년부터 먼지의 대기환경기준 항목에 PM_{2.5}(일평균 50 μm/m³, 연평균 25 μm/m³)를 설정하였고, 2018년부터는 PM_{2.5} 기준(일평균 35 μm/m³, 연평균 15 μm/m³)을 강화하여 시행하고 있다. 그러나 최근 몇 년간 미세먼지의 고농도 사례가 자주 발생되어 이를 해결하기 위한 노력("미세먼지 관리 특별대책, 2016. 6. 3", "미세먼지 관리 종합대책, 2017. 9. 26")들이 시행되고 있으나, 이러한 정책들의 기초

적인 정보를 제공하는 먼지 배출원에서의 미세먼지 생성과 특성 등에 대한 기초 연구는 아직 부족한 실정이라 판단된다.

발생원에서부터 직접 배출되는 1차(Primary) 먼지는 여과성먼지(FPM; Filterable Particulate Matter)와 응축성먼지(CPM; Condensable Particulate Matter)로 분류한다(Gong *et al.*, 2016). 여과성먼지(FPM)는 필터(Filter Media)에 걸러지는 물질이며, 대기오염물질 발생원에 대한 배출허용기준 항목인 입자형태의 물질도 그 측정방법을 고려하면 여과성먼지에 해당한다(MOE, 2018; NIER, 2016a, b). 따라서 그동안 개발되어 사용하는 여러 종류의 먼지를 처리하는 대기오염방지장치(여과집진기, 전기집진기)들은 여과성먼지의 제거에만 초점이 맞추어져 있다.

응축성먼지(CPM)는 생성되는 과정을 살펴보면 이해할 수 있는데, 굴뚝에서 연기가 굴뚝 밖으로 배출되면 굴뚝 근처에서 빠른 시간(수초)안에 희석되며 냉각된다. 이 과정에서 굴뚝에서 배출된 가스(Vapor) 상태의 물질들은 균일(Homogeneous) 혹은 불균일(Heterogeneous) 반응을 통하여 고체 혹은 액체 상태의 물질(Aerosol)로 변환되며, 그 크기는 매우 작은 $PM_{1.0}$ 의 형태로 존재할 것이라고 판단한다. 이러한 물질을 응축성먼지라 하며, 발생원 근처에서 빠른 시간 내에 발생되기 때문에 1차 먼지로 포함시킨다(Feng *et al.*, 2018; Cano *et al.*, 2017; U.S. EPA, 2016; Corio and Sherwell, 2000).

응축성먼지에 대한 연구는 1987년에 대기환경기준(NAAQS, National Ambient Air Quality Standards)에 PM_{10} 항목을 신설하여 관리한 미국을 중심으로 1983년부터 이루어졌다. 대기 중의 PM_{10} 관리를 위해서는 배출원 규제가 필요하였으며, 이를 위해 배출원 굴뚝의 PM_{10} 측정방법(U.S.EPA method 201, 201A-여과성먼지 측정법)을 1990년에 도입하였다. 또한, 굴뚝에서 배출되는 가스상(Vapor)물질이 응축되어 먼지가 되는 것도 관리하기 위하여 응축성먼지를 측정하는 방법(U.S.EPA method 202-응축성먼지 측정법)도 1991년에 개발하였다(Corio and Sherwell, 2000).

최근에는 미국, 일본뿐 아니라 대기 중 미세먼지가 높은 중국에서 응축성먼지와 관련하여 많은 연구들이 진행되고 있으나 아직은 초기단계라 판단된다(Wang *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018, 2014; Li *et al.*, 2017; Gong *et al.*, 2016; Kogure *et al.*, 1997).

표 1은 응축성먼지에 대한 선행연구 결과를 요약하였는데, 응축성먼지 배출농도 수준을 파악할 수 있으며, 측정대상 시설의 종류를 고려하면 그 배출량이 상당히 많을 것으로 사료된다. 또한, 대부분의 응축성먼지 관련 연구는 측정방법에 관한 것과 배출농도를 파악하는 것이며, 응축성먼지 처리방법이나 관리에 대한 연구는 부족한 것으로 판단된다.

본 연구는 연소시설에서 발생하는 SO_2 농도변화에 따른 응축성먼지 농도의 변화를 파악하기 위하여 보일러를 실험실에 설치하였다. 보일러의 연소 조건은

Table 1. Previous studies of CPM.

Source	FPM (mg/m ³)	CPM (mg/m ³)	APCD	Measurement method	Reference
Coal-fired power plant	19.3 ± 2.94	27.2 ± 3.49	EP	U.S. EPA 201A, 202	Yang <i>et al.</i> , 2018
	0.65	2.61	SCR, EP, FGD	U.S. EPA 201A, 202	Gong <i>et al.</i> , 2016
	0.75	2.15	EP, FGD	U.S. EPA 201A, 202	Yang <i>et al.</i> , 2014
	1.6	7.9	SCR, EP, FGD, w-EP	ISO23210, U.S.EPA202	Li <i>et al.</i> , 2017
Boiler	16.9	29.3	EP	U.S. EPA 201A, 202	Yang <i>et al.</i> , 2014
Cement plant	0.02	11.68	Baghouse	U.S. EPA 201A, 202	Gong <i>et al.</i> , 2016
Incinerator	0.15	0.17	BF, AB	U.S. EPA 201A, 202	Yang <i>et al.</i> , 2014
	0.87 ± 0.10	19.04 ± 3.67	SNCR, FGD, AC, BF	U.S. EPA 201A, 202	Wang <i>et al.</i> , 2018
Arc furnace	2.12	2.53	BF	U.S. EPA 201A, 202	Yang <i>et al.</i> , 2014

APCD; Air Pollution Control Device, EP; Electrostatic Precipitator, FGD; Flue Gas Desulfurization, BF; Bag Filter, AB; Absorption system, SNCR; Selected non-catalytic reduction, AC; Activated Carbon w-EP; wet Electrostatic Precipitator

동일하게 하고, SO₂ 만을 변화시키면서 응축성먼지 농도를 측정하였고, 이를 통하여 응축성먼지 처리방법에 대해 논의하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 실험장치의 구성

실험장치의 구성은 실험실 여건을 고려하여 그림 1과 같이 가정용 보일러를 실험실에 설치하였다. 가정용 보일러는 일반적으로 난방과 온수공급용으로만 사용하기 때문에 간헐적인 운전을 하게 된다. 따라서 보일러를 연속적으로 운전하기 위하여 실험실 옥상에 냉각탑(Cooling Tower)을 설치하여 발생하는 열

을 처리하였다.

보일러 배기가스 중의 SO₂ 농도를 변화시키기 위해서는 선박용 경유(MGO, Marine Gas Oil, 황함유량 0.5%)와 일반(자동차용) 경유를 여러 비율로 혼합하여 사용하였다. 보일러 배기가스의 SO₂는 응축성먼지의 전구물질 중의 하나로 알려져 있다(Feng *et al.*, 2018; England *et al.*, 2007; Corio and Sherwell, 2000).

표 2에는 보일러의 성능과 실험조건을 정리하여 나타내었다. 소형 경유보일러의 연소방식은 압력분무식이며, 용량은 2.18L/hr 이다.

2.2 응축성먼지 측정방법

응축성먼지의 측정방법은 발생원에서 배출되는 가스상 물질이 희석·냉각하는 과정을 모사한 것으로 크게 희석장치를 이용한 희석법과 냉각기와 임핀저

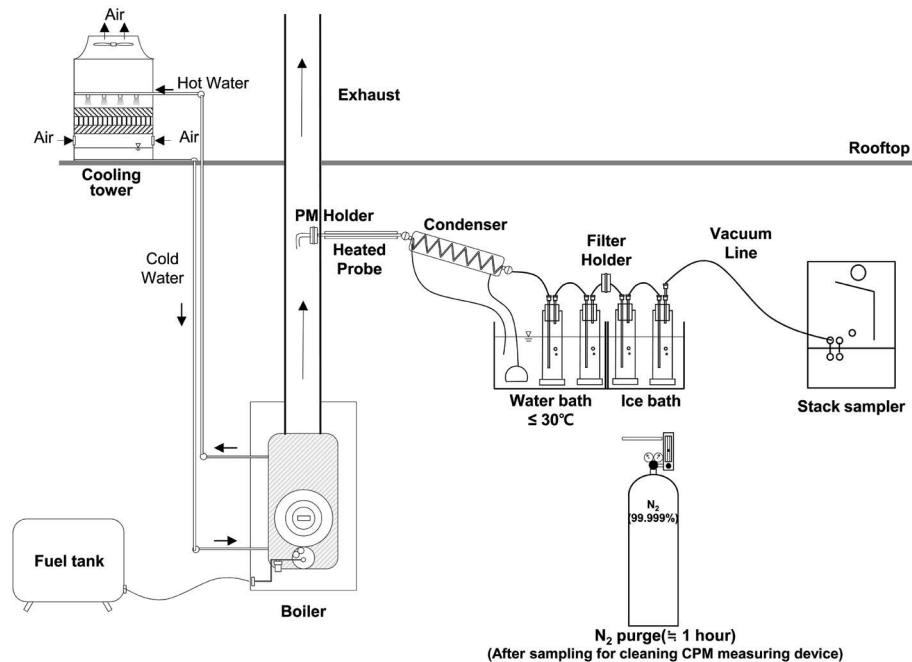


Fig. 1. Experimental setup to measure condensable PM of the small size boiler system.

Table 2. Basic parameter and measuring item in the boiler system.

Boiler type	Fuel	Capacity	Measurement items
Pressure atomizing	Light oil, Marine gas oil, Combination of both	2.18 L/hr	CPM, FPM, SO ₂ , NO _x , CO, VOC, O ₂ , H ₂ O, Temperature

를 이용한 냉각법이 있다(Corio and Sherwell, 2000; England *et al.*, 2000).

본 연구에서는 U.S. EPA Method 202의 측정법인 냉각방법(Cold-Impinger Sampling Method)을 사용하였다. 굴뚝에서 배출된 가스를 냉각기(Condenser)에 통과시키면 가스(Vapor)가 냉각되는데 이 과정에서 응축수(Water drop)가 생성되고 아울러 이 응축수에 용해되지 않고 비산하는 고체(Solid) 혹은 액적(Droplet)도 생성될 수 있다. 여기서 응축성먼지는 임핀저 내의 응축수를 증발시키고 남은 잔유물과 고체 혹은 액적을 포집한 필터의 먼지를 합쳐서 구하는 것이다(U.S. EPA, 2016). 이러한 냉각법은 배출가스 중의 가스상 물질이 가능한 응축성 먼지로 변화될 수 있게 설계한 측정방법으로 판단된다.

또한, 이 방법은 응축성 먼지를 무기(Inorganic)성분과 유기(Organic)성분으로 구별하여 분석할 수 있는데, 선행연구에서 응축성먼지의 무기성분으로는 황산암모늄($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), 질산암모늄(NH_4NO_3) 등의 성분과 유기성분으로는 알칸(Alkanes), 에스테르(Esters) 등이 검출되었다. 따라서 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 암모니아(NH_3)와 같은 무기 반응성 가스와 탄소수가 7개 이상인 휘발성유기화합물(VOCs), 다환방향족탄화수소류(PAHs)와 같은 반휘발성유기화합물(semi-VOCs) 등을 전구물질로 추정하고 있다(Feng *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2015; England *et al.*, 2007; Corio and Sherwell, 2000). 측정방법의 자세한 공정은 Gong *et al.* (2016)의 논문에서 제시하였으며, 본 연구의 측정과 분석도 이에 준하여 실시하였다.

응축성먼지를 측정하는 다른 방법인 희석방법(Dilution Sampling Method)은 희석되는 연기(Plume) 속에서 입자의 응결과 성장이 빠르게 이루어지며, 이러한 과정은 온도, 상대습도, 체류시간, 혼합율 등에 영향을 받으며(Lee, 2010), 이런 요소를 고려한 희석장치로 측정한다. 이와 관련한 연구는 주로 미국(California Institute of Technology, Desert Research Institute), 캐나다, 유럽, ISO 기술위원회 등에서 진행

하고 있으나(Lee, 2010; Chang *et al.*, 2005; England *et al.*, 2000) 아직까지도 그 기준이 명확하게 결정되지 않았다.

2.3 실험방법

응축성 먼지는 배출가스의 온도, 수분량, 가스상물질 농도 등에 크게 영향을 받는다(Li *et al.*, 2017; Yang *et al.*, 2014). 따라서 연료연소의 일반적인 조건은 일정하게 유지하고, 배출가스 중의 SO_2 농도를 변화시키기 위해 선박용 경유와 일반 경유를 혼합비율(100:0, 60:40, 40:60, 0:100)로 조절하여 연소하였다. 이때 SO_2 발생농도는 각각 120, 80, 50, 0 ppm이었다.

여과성먼지의 측정은 대기오염물질 공정시험기준(ES 01301.1, NIER, 2016)을 따라 총먼지(Total FPM)를 측정하였으며, 응축성먼지의 측정은 앞에서 설명한 U.S. EPA Method 202에 따라 측정하였으며, 측정회수는 각각 3회씩 실시하였다.

또한, 응축성먼지를 측정하면서 응축기(Condenser)에서 응축되는 가스상 물질을 파악하기 위하여 응축기 후단에서 SO_2 , NO_x , CO, VOC를 측정하였다.

가스상 오염물질 측정장비로는 SO_2 , NO_x , CO, O_2 , 온도는 비분산적외선 방식(NDIR)의 분석기(Vario Plus, MRU, Germany)를 이용하였으며, VOC는 광이온화 검출(PID)방식의 측정기(PTXSLBMP-0007, ION Science, USA)를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배출가스 중 가스상 물질의 농도

배기가스 중의 SO_2 농도에 따른 가스상 물질(NO_x , CO, O_2 , VOC)의 농도변화를 그림 2에 나타냈다. SO_2 의 농도가 변화함에 따라 NO_x , VOC의 농도는 높아지는 것을 관찰할 수 있는데, SO_2 의 농도가 0, 50, 80, 120 ppm으로 변화될 때 NO_x 의 농도는 각각 78.7, 84.0, 88.0, 97.3 ppm으로 높아졌으며, VOC의 농도도 SO_2 의 농도가 0, 50, 80, 120 ppm으로 변화될 때 각각

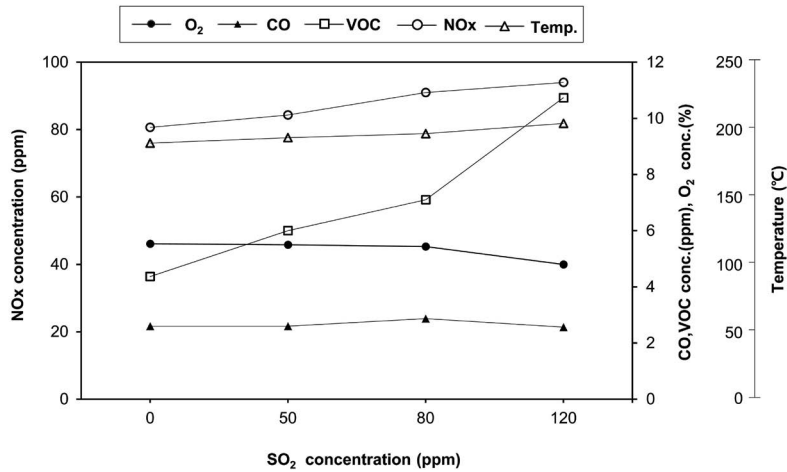


Fig. 2. The concentration of gases in accordance with SO₂.

Table 3. CPM and FPM concentration in accordance with SO₂.

SO ₂ concentration (ppm)		CPM (mg/m ³)			FPM (mg/m ³)
		Sum	On filter	Condensate	
0	Avg.	2.72	0.01	2.70	0.16
	SD.	1.10	0.00	1.10	0.07
50	Avg.	6.10	0.03	6.07	0.19
	SD.	3.36	0.01	3.36	0.09
80	Avg.	8.38	0.04	8.34	0.40
	SD.	5.49	0.03	5.50	0.02
120	Avg.	13.34	0.23	13.10	0.25
	SD.	1.21	0.01	1.22	0.12

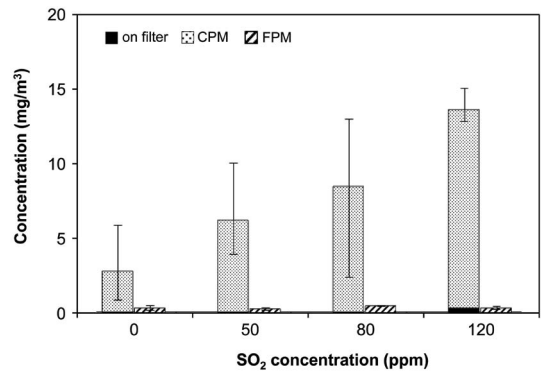


Fig. 3. CPM and FPM concentration in accordance with SO₂.

4.4, 6.2, 7.1, 10.7 ppm으로 증가한 것으로 나타났다.

이것은 SO₂의 농도를 조절하기 위해 선박용 경유와 일반 경유를 혼합하였는데, 선박용 경유의 발열량이 일반 경유에 비해 약간 더 높기 때문에 선박용 경유가 많이 포함된 경우에는 연소실의 온도가 높아지고, 이에 따라 Thermal NO_x가 높게 발생되기 때문이라 사료된다. VOC 농도가 높아지는 것도 이와 같은 이유이다.

또한 그 외에 O₂, CO의 농도와 수분량은 각각 5.5%, 2.5 ppm, 9.5%로 측정되었으며, SO₂ 농도 변화와는 크게 상관성이 없이 일정한 농도로 측정되었다.

3.2 응축성·여과성먼지 농도

표 3과 그림 3에는 SO₂의 농도 변화에 따른 응축성먼지와 여과성먼지 농도를 나타낸 것이다. 또한, 응축성먼지 농도는 임핀저에 응축된 응축수를 증발시켜 남은 잔류물질의 양과 두 번째와 세 번째 임핀저 사이의 필터홀더 여과지에 포집된 먼지를 각각 나타내었다.

응축성먼지는 배기가스의 SO₂의 농도가 0, 50, 80, 120 ppm 일 때 각각 2.72, 6.10, 8.38, 13.34 mg/m³으로 측정되었으며, 이 중에서 응축수에 응축된 먼지의 농도는 SO₂의 농도가 0, 50, 80, 120 ppm 일 때 각각

2.70, 6.07, 8.34, 13.10 mg/m³으로 측정되었다. 따라서 응축성먼지의 대부분(약 99%)은 응축수의 형태로 존재하는 것을 알 수 있었으며, 응축성먼지의 농도는 SO₂ 농도가 높아짐에 따라 증가하는 경향을 나타냈었다.

또한, 여과성먼지 농도의 범위는 0.11~0.41 mg/m³으로 측정되었으며, SO₂ 농도 변화에 따른 여과성먼지 농도의 변화는 없는 것으로 측정되었다. 따라서 본 연구에서 측정된 총먼지(Total PM)의 대부분(약 92% 이상)은 응축성먼지로 파악되었다.

이 결과 중에서 SO₂의 농도가 0 ppm 일 경우는 선행연구(Gong *et al.*, 2016)의 경우 연소와 비슷한 조건이라 판단되며, 그 결과(FPM: 0.14 mg/m³, CPM:

Table 4. CPM(Inorganic, Organic) and condensate (SO₂, VOC).

SO ₂ concentration (ppm)	Condensate	CPM (mg/m ³)			
		SO ₂ (ppm)	VOC (ppm)	Inorganic	Organic
0	Avg.	0.0	1.4	2.48	0.24
	SD.	0.0	0.1	1.13	0.11
50	Avg.	28.8	2.5	4.58	1.53
	SD.	0.2	0.5	0.54	0.27
80	Avg.	51.0	3.2	6.41	1.98
	SD.	1.0	0.6	3.56	0.99
120	Avg.	66.7	4.0	9.99	3.34
	SD.	1.2	0.4	1.97	0.95

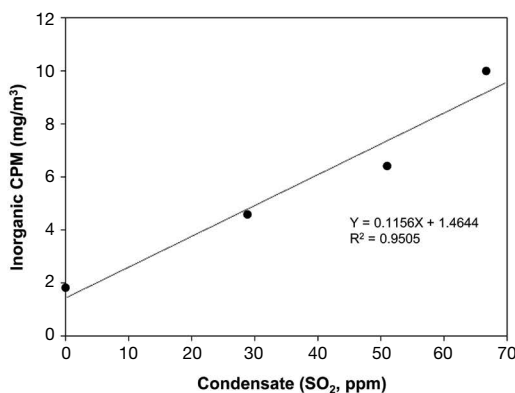
2.61 mg/m³)도 유사한 것으로 측정되었다.

본 연구에서 사용한 측정방법인 냉각법(U.S. EPA Method 202)은 응축성먼지의 무기와 유기성분을 구분하여 파악할 수 있다. SO₂ 농도를 0, 50, 80, 120 ppm로 변화시켰을 때 무기성분은 전체 응축성먼지 중에 각각 73, 81, 85, 86%로 측정되어 무기성분이 유기성분보다 더 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났으며, SO₂ 농도가 높을수록 응축성먼지의 무기성분도 증가하는 것으로 나타났다.

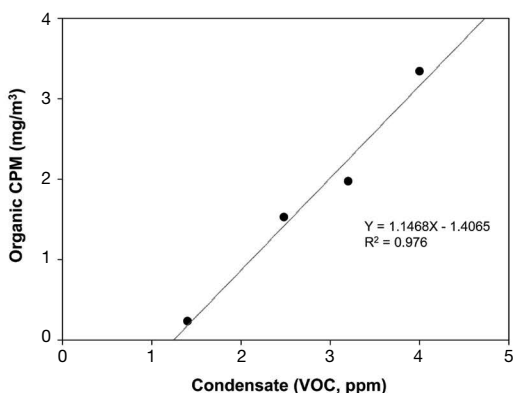
이를 좀 더 구체적으로 파악하기 위하여 응축성먼지 측정시스템의 냉각기 출구에서 가스상 물질을 측정하였다. 냉각기를 통과하면서 농도가 변화되는 물질은 SO₂와 VOC로 측정되었으며, 굴뚝에서 측정된 농도와 냉각기를 통과한 후의 농도를 계산하여 표 4에 나타났다.

냉각기를 통과하면서 응축되는 SO₂는 SO₂ 농도가 0, 50, 80, 120 ppm으로 변화될 때 각각 0, 28.8, 51.0, 66.7 ppm으로 측정되었으며, VOC의 경우에도 SO₂의 농도가 0, 50, 80, 120 ppm 일 때 각각 1.4, 2.5, 3.2, 4.0 ppm으로 측정되었다. 따라서 SO₂와 VOC 농도가 높아지면 응축되는 양도 많아지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 냉각기를 통과하면서 응축되어 제거된 SO₂, VOC 농도와 응축성먼지 농도의 관계를 나타낸 것으로 응축된 SO₂, VOC 농도(입구농도 - 출구농도)



(a) Inorganic CPM and SO₂



(b) Organic CPM and VOC

Fig. 4. Relationships between CPM and Gases.

와 응축성먼지 농도와의 관계는 SO₂와 무기성 응축성먼지의 경우 $\text{slop: } 0.11$, $R^2: 0.95$ 이며, VOC와 유기성 응축성먼지는 $\text{slop: } 1.15$, $R^2: 0.98$ 로 파악되어 매우 높은 양(+)의 상관관계를 나타내고 있다. 따라서 본 연구의 경우에는 응축성먼지의 전구물질로 황산화물(SO_x)뿐 아니라 휘발성유기화합물(VOCs)도 적은 양이지만 기여하는 것으로 추정할 수 있다.

Feng *et al.* (2018), Li *et al.* (2017), England *et al.* (2007) 등의 연구에서는 좀 더 구체적으로 응축성먼지의 성분을 파악하였는데, 무기성분은 황산암모늄((NH₄)₂SO₄), 질산암모늄(NH₄NO₃) 등으로 파악하였고, 유기성분은 알칸(Alkanes), 에스테르(Esters) 등으로 파악하였다.

그동안 대기오염물질 배출시설의 먼지 처리는 여과성먼지에만 초점이 맞추어져 있었으며, 많은 기술들이 개발되어 그 배출량을 상당히 줄이고 있다. 특히 일부 석탄연소 발전시설의 배출허용기준이 5 mg/m³으로 낮아졌는데, 이를 준수하기 위해 이보다 낮은 2, 3 mg/m³으로 운전하고 있다. 이러한 기술은 상당히 발전된 것이라 사료된다(Feng *et al.*, 2018; Kim and Hwang, 2016).

최근 들어 집진기술에 대한 새로운 방향은 기존의 여과성먼지 처리기술에서 응축성먼지 포함한 처리기술로 전환되고 있으며, 이에 대한 연구들이 진행되고 있다(Feng *et al.*, 2018). 본 연구의 결과를 고려하면 SO₂, VOC와 같은 가스상물질의 제거는 해당 오염물질이 갖고 있는 위해성을 제거하는 것뿐 아니라 응축성먼지를 처리하는 역할도 하는 것으로 판단된다. 따라서 응축성먼지 처리를 위해서 그 전구물질인 가스상물질을 제어하는 것도 하나의 방법이 될 수 있으며, 이를 위하여 응축성먼지의 전구물질(가스상물질)과 그 처리방법에 대한 연구가 필요한 것으로 판단한다.

4. 결 론

본 연구는 굴뚝에서 배출되는 SO₂ 농도의 변화에

따른 총먼지(여과성, 응축성) 농도의 변화를 파악하였고, 이를 통하여 응축성먼지 처리방법에 대해 논의하였다.

실험실에 소형 경유보일러를 설치하고, 연소조건은 동일하게 유지하면서 배출가스 중의 SO₂ 농도만을 0, 50, 80, 120 ppm으로 변화시키면서 여과성먼지와 응축성먼지 농도를 측정·비교하였다.

배기가스 중 SO₂의 농도가 증가함에 따라 여과성먼지의 농도는 변화하지 않았으나, 응축성먼지 농도는 SO₂ 농도가 0, 50, 80, 120 ppm으로 변화될 때 각각 2.72, 6.10, 8.38, 13.34 mg/m³으로 측정되어, 일정하게 증가하는 경향을 나타냈다.

또한, 응축성먼지 측정시스템의 냉각기를 통과하면서 응축되어 제거된 가스상물질(SO₂, VOC) 농도와 응축성먼지 농도는 양(+)의 상관관계를 나타내었다. 따라서 굴뚝에서 배출되는 가스상물질 중의 일부는 응축성먼지의 전구물질이라 판단된다.

최근 들어 미세먼지 처리기술의 개발은 기존의 여과성먼지 처리에서 응축성먼지 처리로 전환되고 있으며, 본 연구결과를 통하여 응축성먼지 처리를 위해서 그 전구물질인 가스상물질을 기존보다 더 고효율로 제어해야 할 필요가 있다. 따라서 응축성먼지로 전환하는 가스상물질의 종류와 그 처리방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 청정화력핵심기술개발사업(20161110100140)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Cano, M., Vega, F., Navarrete, B., Plumed, A., Camino, A. (2017) Characterization of Emissions of Condensable Particulate Matter in Clinker Kilns Using a Dilution

- Sampling System, *Energy Fuel*, 31, 7831-7838.
- Chang, M.-C.O., Chow, J.C., Watson, J.G., Glowacki, C., Sheya, S.A., Prabhu, A. (2005) Characterization of Fine Particulate Emissions from Casting Processes, *Aerosol Science and Technology*, 39, 947-959.
- Corio, L.A., Sherwell, J. (2000) In-Stack Condensable Particulate Measurements and Issues, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50, 207-218.
- England, G.C., Watson, J.G., Chow, J.C., Ziolińska, B., Chang, M.-C.O., Loos, K.R., Hidy, G.M. (2007) Dilution-Based Emissions Sampling from Stationary Sources : Part2-Gas-Fired Combustors Compared with Other Fuel-Fired System, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57, 79-93.
- England, G.C., Ziolińska, B., Loos, K., Crane, I., Ritter, K. (2000) Characterizing PM_{2.5} Emission Profiles for Stationary Sources : Comparison of Traditional and Dilution Sampling Techniques, *Fuel Processing Technology*, 65-66, 177-188.
- Feng, Y., Li, Y., Cui, L. (2018) Critical review of condensable particulate matter, *Fuel*, 224, 801-813.
- 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)
- Kim, J.H., Hwang, I.J. (2016) The Characteristics of PM, PM₁₀, and PM_{2.5} from Stationary Sources, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(6), 603-612. (in Korean with English abstract)
- Kogure, N., Tamori, I., Ishioka, O., Inoue, T., Tanimoto (1997) Investigation on the Measuring Method of Particle Matter Concentration Including Condensed Dust in Flue Gas, *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 162-173. (in Japanese with English abstract)
- Lee, S.W. (2010) Fine particulate matter measurement and international standardization for air Quality and Emissions from Stationary Sources, *Fuel*, 89, 874-882.
- 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 Fuel*, 31, 1778-1785.
- Ministry of Environment (MOE) (2018) Clean Air Conservation Act.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016a) Air pollution standard process test, Measurement method of PM-10 and PM-2.5, ES.01317.1.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016b) Particulate Matter in Flue Gas, ES.01301.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York.
- Wang, G., Deng, J., Ma, Z., Hao, J., Jiang, J. (2018) Characteristics of filterable and condensable particulate matter emitted from two waste incineration power plant in China, *Science of Total Environment*, 639, 695-704.
- Yang, H.H., Arafath, S.M., Lee, K.T., Hsieh, Y.S., Han, Y.T. (2018) Chemical Characteristics of Filterable and Condensable PM_{2.5} Emissions from Industrial Boilers with Five Different Fuels, *Fuel*, 232, 415-422.
- 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*, 14, 2010-2016.
- Yang, H.H., Lee, K.T., Hsieh, Y.S., Luo, S.W., Huang, R.J. (2015) Emission characteristics and chemical compositions of both filterable and condensable fine particulate from steel plant, *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 1672-1680.
- International Standard (ISO) 23210 (2009) Stationary source emissions - Determination of PM-10/PM-2.5 mass concentration in flue gas - Measurement at low concentrations by use of impactors.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2010) Method 202 - Dry impinger method for determining condensable particulate emissions from stationary sources.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2016) EPA Method 202 Best Practices Handbook.

Authors Information

유정훈(한서대학교 대학원 환경공학과 박사과정)
 임슬기(한서대학교 환경연구소 연구원)
 송지한(한서대학교 환경연구소 연구교수)
 이도영, 유명상(한서대학교 대학원 환경공학과 석사과정)
 김종호(한서대학교 인프라시스템학과 교수)