

Emission Characteristics of Fine Particles from Thermal Power Plants

화력발전소의 미세먼지 배출특성

Sooman Park, Gayoung Lee

Abstract

In order to identify the characteristics of fine particle emissions from thermal power plants, this study conducted measurement of the primary emission concentration of TPM, PM₁₀ and PM_{2.5} according to Korea standard test method (ES 01301.1) and ISO 23210 method (KS I ISO 23210). Particulate matters were sampled in total 74 units of power plants such as 59 units of coal-fired power plants, 7 units of heavy oil power plants, 2 units of biomass power plant, and 6 units of liquid natural gas power plants. The average concentration of TPM, PM₁₀, PM_{2.5} by fuel are 3.33 mg/m³, 3.01 mg/m³, 2.70 mg/m³ in coal-fired plant, 3.02 mg/m³, 2.99 mg/m³, 2.93 mg/m³ in heavy oil plant, 0.114 mg/m³, 0.046 mg/m³, 0.036 mg/m³ in LNG plant, respectively. These results of TPM, PM₁₀ and PM_{2.5} were satisfied with the standards of fine dust emission allowance in all units of power plants, respectively. Also, this study evaluated the characteristics of fine particle emissions by conditions of power plants including generation sources, boiler types and operation years and calculated emission factors and then evaluated fine particle emissions by sources of electricity generation.

Keywords: Particulate Matter, PM₁₀, PM_{2.5}, Emission, Emission Factor, Coal-Fired Power Plant

1. Introduction

먼지란 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질 (PM, Particulate Matter)을 말하며, 이 중에서 미세먼지는 공기역학적 먼지 직경이 10 μm 이하인 PM₁₀과 2.5 μm 이하인 PM_{2.5}로 나뉜다. 미세먼지는 최근 다양한 환경문제 중 국민의 큰 걱정거리로 떠오르며 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있다. 특히 미세먼지가 인체에 심각한 영향을 미칠 수 있어 세계보건기구(WHO)에서 1급 발암물질로 지정되면서 사회적 관심이 한층 높아지고 있다 [1].

국내의 미세먼지는 중국 등 인접국에서 유입되는 영향이나 국내의 자동차, 산업시설, 발전소 등에서 배출되는 오염물질이 큰 영향을 끼치며, 미세먼지 농도는 겨울과 봄에 높은 반면 여름과 가을에는 상대적으로 낮은 양상을 보이는 것으로 알려져 있다. 이러한 요인은 북서 계절풍으로 인한 국외 유입이나 대기의 순환, 풍속, 풍향, 강수량 등과 같은 기후 조건에 의해 달라지는 것으로 알려져 있다 [2]-[5].

최근 국내의 미세먼지 증가에 따라 2022년까지 국내 미세먼지 배출량의 30%를 감축하겠다는 목표가 담긴 미세먼지 관리 종합대책 등 각종 미세먼지 대책을 정부에서 발표하였다 [3]. 특히 석탄화력발전소에 대한 미세먼지 감축 요구가 가중되면서 노후 석탄화력발전소 가동 중단 및 조기 폐지, 기존 화력발전소 성능 개선, 배출허용기준 강화 등 미세먼지 저감을 위한 다양한 세부계획

에 따라 관리하고 있다. 정부와 발전 5사는 미세먼지 저감 정책을 실천하기 위해 '석탄발전 미세먼지 등 오염물질 저감을 위한 이행협약' [7]을 체결하고 환경설비 개선 및 교체, 신기술 개발과 적용 등을 단계적으로 추진키로 하였다. 또한 2019년 출범한 국가기후환경회의에서는 고농도 계절 중 미세먼지 배출이 높은 순으로 석탄화력발전소(14-22기) 가동을 중단하고, 나머지 발전소는 출력을 100%에서 80%로 낮추어 운전하는 상한 제약발전 등 미세먼지 계절관리제를 제안하였으며, 정부는 2019년 겨울철부터 이를 시행하고 있다 [6].

환경부에서 발표한 2018년도 기준의 굴뚝자동측정기기(TMS)가 설치된 주요 사업장의 대기오염물질 배출량 자료에 의하면, 질소산화물 22만 2,183톤(67%), 황산화물 9만 8,110톤(30%), 먼지 6,438톤(2%) 등 총 배출량은 33만 46톤이었으며, 이중 발전소에서 배출되는 1차 총 먼지는 약 3,153톤으로 나타났다 [7]. 한편 중국 등 외부에서 유입되는 미세먼지 이슈가 부상하면서 2016년 한국 국립환경과학원(NIER)과 미국 항공우주국(NASA)이 공동으로 수행한 한미 대기질 합동연구(KORUS-AQ)에 따르면 초미세먼지의 국내 기여율은 52%, 국외가 48% 정도였으며, 항공관측을 통한 미세먼지 성분분석 결과 2차 생성 성분이 전체의 75% 이상인 것으로 조사되었다 [8][9]. 그리고 한중일이 2019년 11월에 발표한 '동북아 장거리이동 대기오염물질 국제공동연구결과'에서는 연평균 기준 자체 기여율은 각각 한국 51%, 중국 91%, 일본 55%였으며, 중국의 초미세먼지가 한국에 미치는 영향은 연평균 32%인 것으로

Article Information

Manuscript Received July 9, 2020, Revised September 8, 2020, Accepted September 21, 2020, Published online December 30, 2020

The authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Sooman Park (sooman.park@kepc.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>
This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepc.co.kr>.

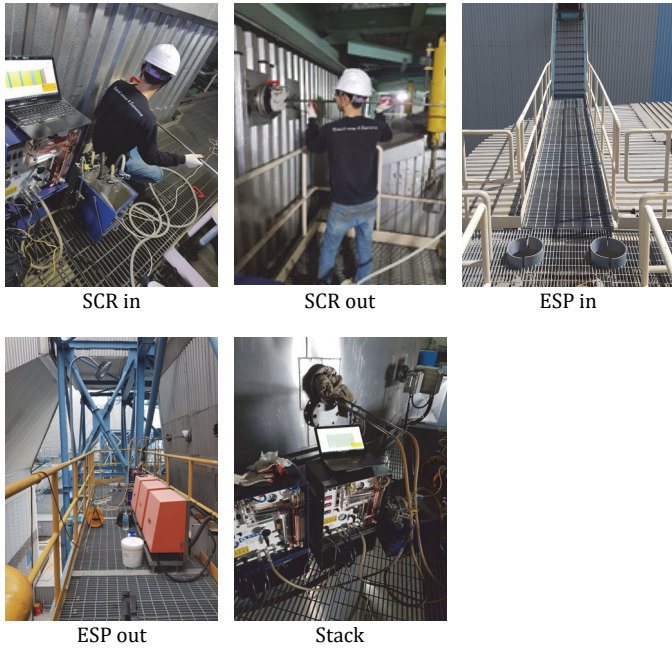
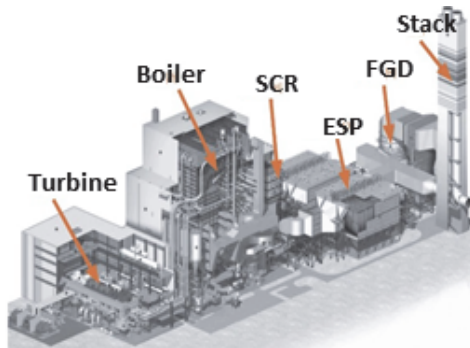


Fig. 1. Sampling points of TPM, PM₁₀, and PM_{2.5} in power plant.

평가되었다 [10]. 또한 2019년 12월에서 2020년 3월까지 시행한 계절관리제 기간 중 국내의 초미세먼지 평균 농도는 전년도 동 기간 33 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 에서 24 $\mu\text{m}/\text{m}^3$ 으로 약 27% 정도 감소하였고, 특히 발전부문에서는 가동 중단과 상한 제약운전의 효과로 미세먼지 배출량이 전년도 동 기간 대비 약 2,503톤(39%) 감축되는 것으로 나타났다 [11].

석탄화력발전설비에서 발생하는 미세먼지 저감을 위한 환경설비의 개선 또는 교체를 시행하기 위해서는 이에 대한 기술적 타당성과 그 대책을 먼저 제시할 필요가 있다. 이러한 관리방안을 제시하려면 현재 가동 중인 발전설비에서 발생하는 미세먼지와 미세먼지를 야기하는 전구물질의 정확한 측정과 배출특성에 대한 진단이 필요하다. 또한 국내 화력발전소는 굴뚝자동측정기기(TMS)를 통해 총 먼지에 대한 배출정보는 실시간으로 모니터링되고 있다. 그러나 사회적으로 관심이 큰 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})에 대한 측정, 조사는 거의 이뤄지지 않고, 제한적으로 일부 연구가 진행되었다 [12][13].

본 연구에서는 국내 발전회사가 운영 중인 석탄화력 59기를 포함 중유 및 가스발전소 등 총 74기를 대상으로 굴뚝에서 배출되는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 배출특성과 배가스 계통 환경설비(탈질 및 탈황설비, 전기집진기)의 전, 후단에서의 미세먼지 농도 및

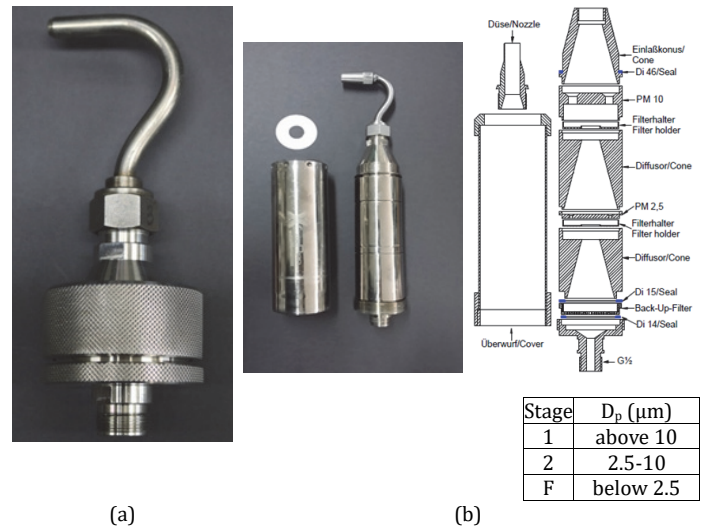


Fig. 2. Measuring devices for particulate matter. (a) PM Holder. (b) Cascade Impactor (Stage-X MS, Xear Pro, Italy).

집진효율을 평가하였고, 이들 측정자료로부터 사용 연료, 보일러 형식, 가동년수 등 조건에 따른 배출특성을 분석하고 평가하였다.

II. 연구내용 및 방법

A. 대상 발전소 및 환경설비

국내 발전공기업을 운영중인 발전설비는 석탄화력 59기, 중유화력 11기, 복합화력 및 내연발전이 117기이다. 2019년 기준 발전설비의 총 발전량은 563,040 GWh이며, 발전원별 발전량 비중은 석탄 39.2%, 원자력 25.9%, LNG 27.8%, 신재생 5.4%, 수력 1.1% 등으로 구성되어 있다 [14]. 화력발전소 보일러 내 연료(석탄, 중유, LNG)의 연소과정에서 질소산화물(NO_x), 황산화물(SO_x), 먼지(Dust) 등의 오염물질이 발생하는데, 굴뚝으로 배출되는 오염물질을 배출허용기준 이하로 유지하기 위해 발전소에서는 탈질설비(SCR), 집진설비(ESP), 탈황설비(FGD) 등의 환경설비를 구성하여 운영하고 있다.

본 연구에서는 석탄화력 59기, 중유화력 7기, LNG발전 6기 및 바이오화력 2기 등 총 74기를 대상으로 배출되는 배가스 중 미세먼지 농도를 굴뚝에서 측정하였다. 또한 연소 후 배가스가 보일러에서 굴뚝에 이르는 동안 탈질설비, 전기집진기 및 탈황설비 등 오염물질 제어설비를 통과하게 되므로 각각의 제어설비에서 미세먼지 거동특성을 파악하기 위해 석탄화력 16기를 대상으로 Fig. 1과 같이 SCR inlet, SCR outlet (A/H inlet), ESP inlet (A/H outlet), ESP outlet (FGD inlet), Stack (FGD outlet)에서 미세먼지 농도를 측정하였다.

B. 측정장치 및 분석방법

발전소에서 배출되는 여과성 총먼지(TPM, Total particulate matter)를 측정하는 방법으로 대기오염공정시험기준 ES 01301.1 방법이 있으며, 여과성 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})를 측정하는 방법으로는 Cyclone을 이용하는 ES 01317.1 방법(U.S. EPA 201A Method)과

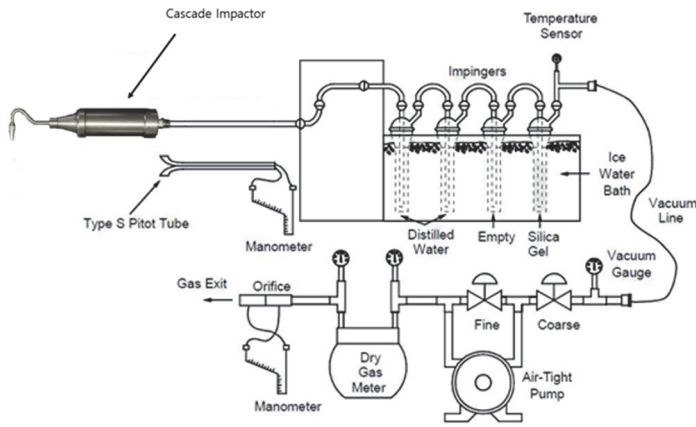


Fig. 3. Schematic diagram for particulate matter sampling in stack.

TABLE 1
Average Concentration of TPM, PM₁₀, and PM_{2.5} by Fuel

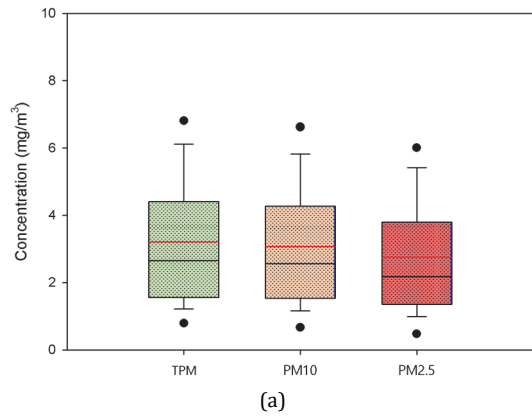
Fuel	Number of facilities	Avg. concentration (mg/m ³)			Size fraction (%)	
		TPM	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀ /TPM	PM _{2.5} /TPM
Coal	59	3.33	3.01	2.70	91.3	81.2
Heavy oil	7	3.02	2.99	2.93	93.8	88.4
Biomass	2	1.57	1.18	0.75	77.0	57.4
LNG	6	0.114	0.046	0.036	47.2	37.2

Cascade Impactor를 이용하는 국제규격 ISO 23210(국가표준 KS I ISO 23210) 방법이 있다 [15][17]. 대기오염공정시험기준에서 제시하는 ES 01317.1 방법은 굴뚝 측정구 직경이 165 mm 이상인 조건을 필요로 하나, 측정대상 발전소 중 약 6%의 발전소에서만 그 조건을 만족한다. 본 연구에서는 측정구 직경이 90 mm인 경우에도 사용이 가능한 국가표준 KS I ISO 23210 방법을 적용하여 여과성 미세먼지를 측정하였다. 단, 굴뚝 측정을 위한 ISO 23210 방법에 Cascade Impactor의 각 stage 별 먼지의 농도를 합한 TPM 질량농도를 사용할 수 없다고 명시하고 있어(ISO, 2009), 본 연구에서 TPM의 측정은 대기오염공정시험기준 ES 01301.1 방법으로 측정하였다. 사용된 측정 장비와 미세먼지 측정 모식도를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타냈다. 시료의 채취는 측정지점에서의 배기가스 온도, 수분량, 유속 등을 고려하여 등속 흡인(95-110%)하였으며, 입경별 먼지농도(TPM, PM₁₀, PM_{2.5})를 각 지점별로 6회 이상 측정하였다. 시료 채취 및 중량농도 분석을 위한 여지는 Teflon 재질의 여지(47 mm)를 사용하였으며, 시료 채취가 완료된 여지는 데시케이터 내에서 건조한 후 전자저울을 사용하여 무게를 0.01 mg까지 측정하였다. 측정된 먼지의 농도는 표준상태(0°C, 760 mmHg), 건조배출가스 1 Sm³ 중에 함유된 먼지의 중량(mg/Sm³)으로 표시하였으며, 발전소별 적용되는 표준산소농도를 사용하여 보정하였다.

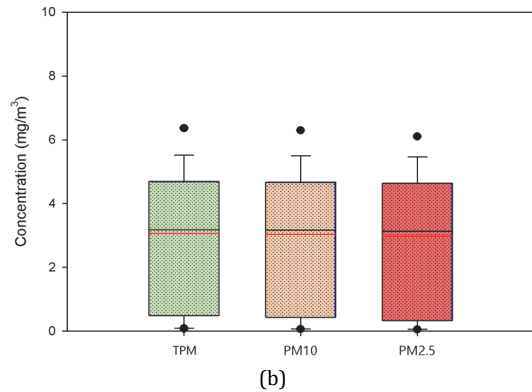
III. 연구결과 및 고찰

A. 사용 연료에 따른 미세먼지 배출농도

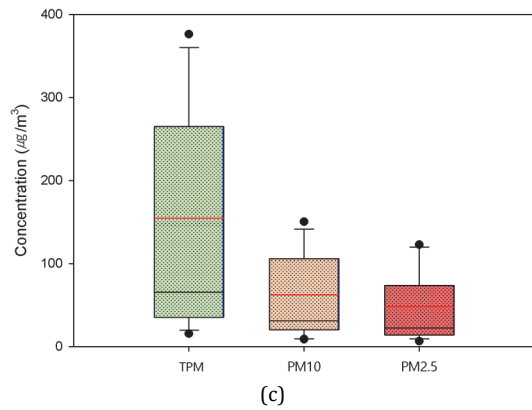
본 연구에서는 국내 발전공기업이 운영중인 화력발전설비를 연료별로 구분하여 석탄화력 59기, 중유화력 7기, 바이오 2기 및 LNG발전 6기를 대상으로 굴뚝으로 배출되는 1차 미세먼지인



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Variance of concentration of TPM, PM₁₀, and PM_{2.5} by Fuel: (a) Coal; (b) Heavy oil; (c) LNG.

TPM, PM₁₀, PM_{2.5} 농도를 측정하고 그 결과를 TABLE 1과 Fig. 4에 제시하였다. 총 먼지(TPM)의 평균 농도는 석탄화력 3.33 mg/m³, 중유화력 3.02 mg/m³, LNG발전 0.114 mg/m³이었고, PM₁₀은 석탄화력 3.01 mg/m³, 중유화력 2.99 mg/m³, LNG발전 0.046 mg/m³이었으며, PM_{2.5}는 석탄 2.70 mg/m³, 중유 2.93 mg/m³, LNG발전 0.036 mg/m³으로 각각 조사되었다. 석탄 등 고체연료 사용시설의 배출허용기준은 설치시기에 따라 2001년 6월 30일 이전 12 mg/m³ 이하, 2001년 7월 1일 이후 설치 10 mg/m³ 이하, 2015년 1월 1일 이후 5 mg/m³ 이하 등으로 달리 적용되고 있다 [18]. 석탄화력발전소 설치시기별로 실측한 자료를 구분하여 분석한 평균 농도는 각각 3.37 mg/m³, 3.04 mg/m³, 3.42 mg/m³로 나타났고, 석탄화력 60기의 배출 평균 농도 또한 배출허용기준의 1/2이하 수준인 3.28 mg/m³로 파악되었다.

TABLE 2
TPM, PM₁₀, and PM_{2.5} Concentration and Size Fractions
by Characteristic of Coal-Fired Power Plant

Classification		Avg. concentration (mg/m ³)			Size Fraction (%)	
		TPM	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀ /TPM	PM _{2.5} /TPM
Boiler Types	Pulv. coal	3.54	3.21	2.89	91.8	82.6
	CFB	1.41	1.32	1.05	86.7	70.7
Operation years	1-10 yrs (12 units)	2.44	2.29	1.97	93.8	80.7
	11-20 yrs (20 units)	3.82	3.25	2.94	85.0	76.9
	21-30 yrs (20 units)	3.33	3.21	2.87	96.4	86.2
	Above 30 yrs (7 units)	3.12	3.02	2.76	96.8	88.5

TABLE 3

Concentration of TPM, PM₁₀, and PM_{2.5} in Sampling Points

	SCRin	SCRout	ESPIn	ESPout	FGDout-Stack	Efficiency (%)
TPM	11,188	9,498	9,216	8,02	2,99	99.97
PM ₁₀	7,314	5,778	5,013	7.55	2,79	99.96
PM _{2.5}	4,991	3,273	2,580	5.51	2.53	99.95

TABLE 4

Yearly Emission in Coal-Fired Power Plant by GENCO (unit: GWh, ton)

Classification	2017		2018		2019	
	power gen.	PM ₁₀ PM _{2.5}	power gen.	PM ₁₀ PM _{2.5}	power gen.	PM ₁₀ PM _{2.5}
Coal-fired plant	227,186	2,272 1,999	222,818	2,228 1,961	211,786	2,118 1,864
Gas plant	37,177	7.4 3.7	46,780	9.4 4.7	39,049	7.8 3.9

B. 석탄화력 특성별 미세먼지 배출농도

1) 보일러형식에 따른 미세먼지 배출농도

국내 석탄화력발전소의 연소방식은 크게 미분탄보일러(53기)와 유동층보일러(6기)로 구분되며, 이들 발전소의 보일러 형식에 따라 미세먼지의 농도를 측정, 평가하였다. 미분탄 연소방식에서 TPM, PM₁₀, PM_{2.5}의 평균 농도는 각각 3.54 mg/m³, 3.21 mg/m³, 2.89 mg/m³으로 나타났으며, TPM에 대한 PM₁₀, PM_{2.5}분율은 각각 91.8%, 82.6% 정도로 나타났다. 유동층 연소방식에서는 TPM, PM₁₀, PM_{2.5}의 평균 농도가 각각 1.41 mg/m³, 1.32 mg/m³, 1.05 mg/m³로 각각 나타났으며 그 결과는 TABLE 2와 같다. 미세먼지 배출농도는 유동층 연소방식이 미분탄 연소방식보다 낮았으며, 이는 유동층연소방식이 노내 탈황 및 연료의 노내 체류시간이 길어 완전연소에 가까운 상태로 운전되기 때문이다 [19][20].

2) 발전설비 가동년수에 따른 배출농도

석탄을 연료로 사용하는 발전설비를 가동 연수에 따라 10년 단위로 구분하여 측정한 미세먼지 농도는 TABLE 2와 같다. 가동 연수가 10년 이내인 최신 발전설비 12기의 TPM, PM₁₀, PM_{2.5} 평균 농도는 2.44 mg/m³, 2.29 mg/m³, 1.97 mg/m³이고, 11년에서 20년 이내인 20기 평균 농도는 각각 3.82 mg/m³, 3.25 mg/m³, 2.94 mg/m³, 20년부터 30년 이내의 20기의 평균 농도는 3.33 mg/m³, 3.21 mg/m³, 2.87 mg/m³, 그리고 30년 이상 가동한 발전설비 7기의 평균 농도는 3.12 mg/m³, 3.02 mg/m³, 2.76 mg/m³로 각각 분석

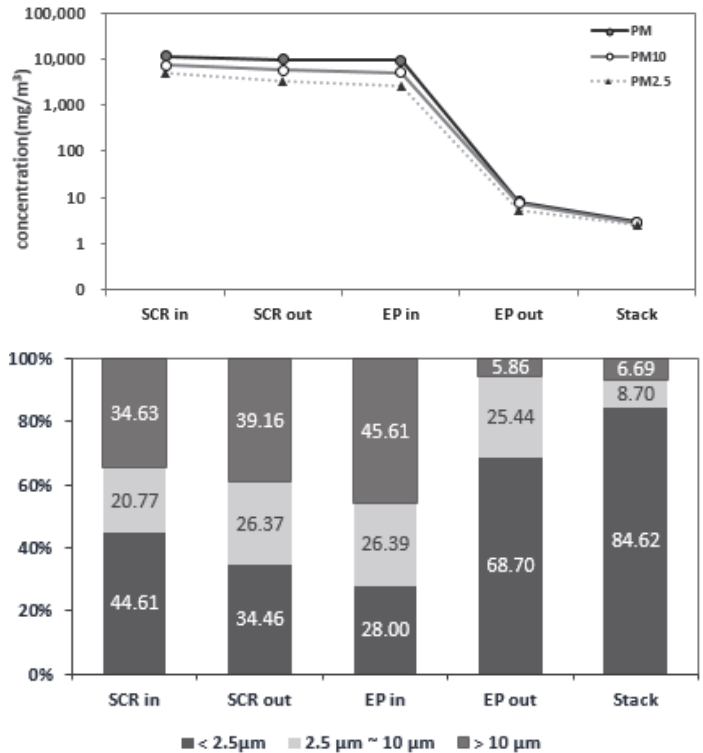


Fig. 5. Concentration of TPM, PM₁₀, and PM_{2.5} and Size fractions in sampling points.

되었다. 가동 연수와 미세먼지 농도와의 상관관계를 분석한 결과 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이는 발전시설의 설치시기 등을 고려하여 대기오염물질 배출허용기준은 점차적으로 강화되었지만 해당설비를 운영하는 발전회사가 배출허용기준에 대응하여 환경설비와 연소설비 등에 최신 개발기술을 접목하거나 설비개선을 위한 지속적 투자가 이뤄졌기 때문이다.

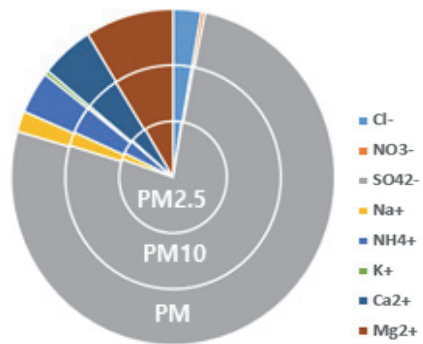
C. 석탄화력 배가스 계통별 미세먼지 농도 및 집진효율

석탄화력발전소에서 연소 후 배출되는 배가스는 오염물질을 처리하는 배가스 계통인 탈질, 집진, 탈황설비를 거쳐 굴뚝으로 배출된다. 석탄화력 16기를 대상으로 배가스 계통의 미세먼지 배출 특성을 평가한 결과 계통 지점별 미세먼지 평균 농도는 TABLE 3과 같다. 보일러 후단부터 굴뚝까지의 총괄 집진 효율은 TPM, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 99.95% 이상 제거되는 것으로 조사되었고, 집진 설비에서 99.8% 이상, 나머지 먼지는 탈황설비에서 62% 정도 제거된다. 먼지 입경에 따른 제거효율은 집진설비를 지나면서 10 µm 이상의 큰 먼지는 대부분 제거되고, Fig. 5와 같이 굴뚝으로 배출되는 먼지의 약 85%가 2.5 µm 이하의 미세 입자로 구성되어 이들 미세 입자의 제거효율을 높이는 방안이 필요하다.

D. 발전소 미세먼지 배출특성 평가

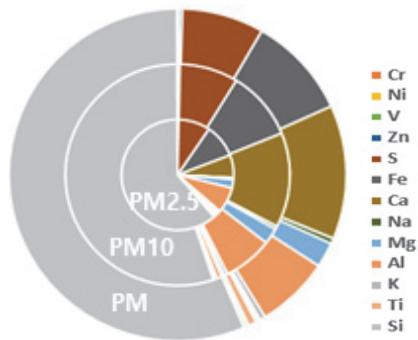
1) 발전원별 미세먼지 배출계수 및 배출량 산정

발전원별 미세먼지 배출계수의 산정은 본 연구에서 실측한 석탄화력 및 LNG 발전 배출 미세먼지 농도와 발전소 TMS에서 제



SO₄²⁻ (77%) > Mg²⁺ (9%) > Ca²⁺

(a)



Si (70%) > Al (9%) > Fe > Ca

(b)

Fig. 6. Composition of fine particle matter in coal-fired power plant. (a) Ratio of ionic composition. (b) Ratio of elemental composition.

공하는 유량 정보를 활용하였으며, 그 결과 PM₁₀의 배출계수는 석탄화력 0.010 kg/MWh, LNG발전 0.0002 kg/MWh이고, PM_{2.5}의 경우 석탄화력 0.0088 kg/MWh, LNG발전 0.0001 kg/MWh이다. 각 배출계수로부터 연간 1차 미세먼지 배출량을 산정한 결과는 TABLE 4와 같으며, 이는 정부에서 발표한 PM_{2.5}의 배출계수인 석탄화력 0.010 kg/MWh, LNG발전 0.005 kg/MWh와 비교하여 작거나 유사하다. 2019년 기준으로 PM₁₀의 배출량은 국내 전체 석탄화력 2,294톤, LNG발전 29톤이며, 이 중 발전공기업이 보유한 석탄화력의 PM₁₀ 배출량은 2,118톤으로 약 92.3%를 차지하였으며, LNG발전은 7.8톤으로 약 27%를 차지하는 것으로 평가되었다.

2) 배출 미세먼지 성분분석

석탄화력 59기를 대상으로 굴뚝 배가스에 포함된 미세먼지 이온 및 원소성분의 구성비는 Fig. 6과 같다. 석탄화력의 이온성분은 TPM, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 SO₄²⁻ 성분이 77% 이상으로 가장 높았고, Mg²⁺, Ca²⁺, NH₄⁺ 순이었으며, LNG발전의 경우 SO₄²⁻, NH₄⁺, Ca²⁺ 순으로 나타났다. 원소성분은 석탄화력이 입경별로 모두 Si가 70% 이상으로 가장 높고 Al, Fe, Ca 순이었으며, LNG발전소의 주성분은 Fe, S, Ca 순이었다.

IV. Conclusion

본 연구는 국내 발전공기업이 운영중인 석탄 59기, 중유 7기, 바이오 2기 및 LNG 6기 등 총 74기의 화력발전설비를 대상으로 1차 배출 먼지 TPM, PM₁₀, PM_{2.5}를 측정, 분석하였고 또한 석탄화력 16기의 배가스 처리 계통의 먼지 특성을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 각 발전설비별 TPM, PM₁₀, PM_{2.5} 평균농도는 석탄화력 3.33 mg/m³, 3.01 mg/m³, 2.70 mg/m³, 중유화력 3.02 mg/m³, 2.99 mg/m³, 2.93 mg/m³, LNG발전 0.114 mg/m³, 0.046 mg/m³, 0.036 mg/m³로 각각 나타났다.
- (2) 석탄, 중유, LNG 등 사용연료별 PM₁₀/TPM 입경 비율은 각각 91.3%, 93.8%, 47.2%이며, PM_{2.5}/TPM 입경 비율은 각각 81.2%, 88.4%, 37.2%로 다른 연구 결과와 유사하다.
- (3) 석탄화력을 보일러 형식, 가동년수 등으로 분류하여 각각의 조건에 따른 배출 농도특성은 보일러 형식별로는 유동층 연소방식이 미분탄 연소방식보다 낮았고, 발전설비 가동년수별 배출 농도는 큰 상관관계가 없이 유사했으며, 이는 배출허용 기준 강화에 선제적으로 대응하여 환경설비 성능개선 또는 교체, 개발기술을 적용한 영향으로 판단되었다.
- (4) 배가스 처리 계통인 보일러 후단부터 굴뚝까지의 총괄 집진 효율은 PM, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 99.95% 이상이다. 집진설비에서 99.8% 이상, 나머지 먼지는 탈황설비에서 62% 정도 제거된다. 굴뚝으로 배출되는 먼지의 약 85%가 2.5 μm 이하의 미세 입자로 구성되어 이들 미세 입자의 제거효율을 높이는 방안이 필요하다.
- (5) 석탄, LNG 발전의 배출계수는 각각 PM₁₀의 경우 0.010 kg/MWh, 0.0002 kg/MWh. PM_{2.5}는 0.0088 kg/MWh, 0.0001 kg/MWh로 산정되었고, 발전5사의 석탄 및 LNG발전의 PM_{2.5} 배출량은 2019년 기준으로 각각 1,864톤과 3.9톤으로 조사되었다.
- (6) 석탄화력의 배가스에 포함된 미세먼지 이온 및 원소성분은 분석결과 이온 성분은 SO₄²⁻가 77% 이상으로 가장 높고 이어서 Mg²⁺, Ca²⁺, NH₄⁺ 순이며, 원소성분은 Si가 70% 이상으로 가장 높고 Al, Fe, Ca 순으로 조사되었다.

Acknowledgment

This research was supported by the ‘Evaluation of fine dust emission characteristic and development of automatic measurement technology for establishing measures to reduce fine dust emission in thermal power plant (No 20161110100140)’ of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea.

이 논문은 산업통상부의 재원으로 2016년에 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구과제(화력발전소 미세먼지 배출저감 대책수립을 위한 미세먼지 배출특성평가 및 자동측정기술개발, No 20161110100140)입니다.

References

- [1] 환경부, “바로 알면 보인다. 미세먼지, 도대체 뭘까?”, No. 11-1480000-001435-01(2016).
- [2] 환경부, “대기환경연보”, 2018.
- [3] 정부, “미세먼지 관리 종합대책”, 관계부처합동, 2017.9.26.
- [4] 환경부, “미세먼지 계절관리제 종료, 미세먼지 줄었다.” 보도자료, 2020.4.1.
- [5] 천성남, “화력발전소 미세먼지 배출현황과 저감”, 대한전기학회 전기의 세계 67(10), p.9-16, 2018.
- [6] 환경부, “미세먼지 배출저감을 위한 화력발전 감축운영 시행 매뉴얼”, 대기환경정책과-21, 2020.1.2.
- [7] 환경부, “전국 626 개 사업장, 대기오염물질 9% 감축, 보도자료, 2019.3.31.
- [8] 한국대기환경학회, “KORUS-AQ 캠페인을 통한 입자상 물질분포 특성 연구 보고서”, 국립환경과학원, NIER-SP2016-181, 2016.
- [9] 국립환경과학원, “KORUS-AQ 예비종합보고서”, NIER-NASA, 2016
- [10] NIER, “Summary Report of the 4th stage (2013–2017) LTP Project, Joint Research Project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia”, 2019.
- [11] 국무조정실, “미세먼지 계절관리제 종료, 미세먼지 줄었다”, 보도자료, 2020.4.1.
- [12] 송금주 외, “석탄화력발전시설에서의 TSP 및 PM10, PM2.5 배출특성”, 한국환경분석학회지, Vol 21. No 1, pp.52-60, 2018.
- [13] 박현수 외, “연료별 화력발전시설의 미세먼지(PM10 및 PM2.5) 배출특성”, 한국대기환경학회지, Vol 34. No4, pp.534-541, 2018.
- [14] 한국전력공사, “제 89 호(2019 년) 한국전력통계”, 등록번호 2020-9721-정 0019, 2020.
- [15] 환경부, “S 01112.1-배출가스 입자상 물질 채취방법”, 대기오염시험기준, 2015.
- [16] 환경부, “S 01317.1a-배출가스 중 미세먼지(PM10 및 PM2.5) 채취방법”, 대기오염공정시험기준, 2015.
- [17] US EPA, “National Ambient Air Quality Standard,” 2012.
- [18] 대기환경보전법 시행규칙, (별표 8) 대기오염물질 배출허용기준.
- [19] 박재혁 외, “순환 유동층 보일러에서 석탄 연소 시 Borax Solution 이 연소 배가스중 미세먼지 저감에 미치는 영향”, 한국화학학회지, Vol.57, Issue 4, pp.492-500, 2019.
- [20] 이시훈 외, “순환유동층 보일러 로내 탈황을 위한 석회석 평가”, 한국화학학회지, Vol.57, No.6, pp.853-860, 2019.