

논문

# 연료별 화력발전시설의 미세먼지(PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>) 배출특성

## Emission Characteristics of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Thermal Power Plants Using Different Fuel Types

박현수<sup>1),2)</sup>, 이덕안<sup>1)</sup>, 양정고<sup>1)</sup>, 장성국<sup>1)</sup>, 김환범<sup>1)</sup>, 김득수<sup>2),\*</sup>

<sup>1)</sup>전라남도보건환경연구원, <sup>2)</sup>군산대학교 환경공학과

Hyun-Soo Park<sup>1),2)</sup>, Duk-An Lee<sup>1)</sup>, Jeong-Go Yang<sup>1)</sup>, Seong-Guk Jang<sup>1)</sup>,  
Hwan-Beom Kim<sup>1)</sup>, Deug-Soo Kim<sup>2),\*</sup>

<sup>1)</sup>Jeollanam-do Institute of Health and Environment

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering, Kunsan National University

접수일 2018년 6월 11일  
수정일 2018년 7월 19일  
채택일 2018년 7월 24일

Received 11 June 2018

Revised 19 July 2018

Accepted 24 July 2018

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)63-469-4764

E-mail : dskim@kunsan.ac.kr

**Abstract** Concentrations of total particulate matter (TPM), PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> were measured at three different sites based on each different fuel type (solid, liquid and gas) used in thermal power plants operating in Yeosu and Gwangyang National Industrial Complexes during 2017. The highest concentrations of TPM, PM<sub>10</sub>, and PM<sub>2.5</sub> were observed at the solid fuel facility, and these values were 3.356 mg/Sm<sup>3</sup>, 2.342 mg/Sm<sup>3</sup> and 1.834 mg/Sm<sup>3</sup>, respectively. The ratio of PM<sub>2.5</sub> to TPM was the highest value of 54.6% in solid fuel case, and the lowest was 35.7% found in liquid fuel case. As a result of analyzing 9 kinds of metal compound with respect to each particle size, the metal concentration of TPM is higher than those of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in all fuel types. Total concentrations of metal elements in TPM by fuel difference are 1.2702 mg/Sm<sup>3</sup> in solid fuel, 0.0603 mg/Sm<sup>3</sup> in liquid fuel, and 0.0733 mg/Sm<sup>3</sup> in gas fuel, respectively. Relatively higher total metal concentration in gas fuel than in liquid fuel was found; and this could be higher Cr and Al concentrations in use of gas fuel. As a result of estimating the emission factors of each facility, in case of solid fuel, TPM emissions per electricity production were found to be 0.7080 kt/PJ, followed by liquid fuel and gas fuel. PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emissions per hour of electricity production were similar to those of TPM.

**Key words:** TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, Metal compound, Emission factor

## 1. 서 론

먼지란 대기 중에 떠다니거나 흩날려 내려오는 입자상물질을 말하며, 미세먼지는 공기역학적 직경이 10 μm 이하인 PM<sub>10</sub>과 2.5 μm 이하인 PM<sub>2.5</sub>로 나뉜다(MOE, 2016).

미세먼지가 건강에 미치는 영향을 살펴보면, 대기 중에서 호흡기를 거쳐 폐에 침투하거나 혈관을 따라 체내로 이동하여 건강에 심각한 영향을 미칠 수도 있으며 1군 발암물질로 지정되어있다(MOE, 2016).

미세먼지 발생 원인은 크게 자연적 요인과 인위적

요인으로 나눌 수 있다. 자연적 요인은 흙먼지, 식물의 꽃가루 등이며, 인위적 요인은 교통, 산업 활동 등에 의해 발생한다.

특히, 인위적 발생원 중 화력발전소는 사용연료에 따라 먼지, 미세먼지, 유해중금속, 황산화물, 질산화물, 휘발성유기화합물 등 다양한 유해물질을 배출한다. 그 중 미세먼지와 유해중금속은 기존 방지시설로 제어하기 어려워 상당량이 대기 중으로 배출되어 인체에 심각한 피해를 끼치고 있다(Jang *et al.*, 2003).

발전소에 대한 국가의 대책으로 미세먼지가 심한 봄철(3~6월)에 일시가동정지, 노후 석탄화력발전소

에 대한 배출이 논의되고 있다.

화력발전소 미세먼지에 대한 기 연구를 살펴보면 Jang *et al.* (2003)이 “석탄화력발전소에서 배출되는 입자상 물질 및 중금속 배출특성”, Yoon *et al.* (2010)은 “유연탄 발전소에서의 PM 및 PM<sub>2.5</sub> 배출특성”, Jang *et al.* (2011)이 “화력발전소에서의 국내 배출계수 산정 방안 연구” 등 고체연료인 유연탄과 무연탄을 사용하는 화력발전소를 중심으로 이루어졌다. 반면, 비교적 미세먼지 배출이 상대적으로 적을 것으로 예상되어서 인진 액체나 기체연료를 사용하는 화력발전소에 대한 미세먼지 배출에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 여수·광양국가산단지역에 가동 중인 화력발전소를 기체, 액체, 고체연료로 구분하고 먼지와 미세먼지의 배출량 조사, 성분 비율, 입경별 중금속 변화를 살펴봄으로써 연료에 따른 미세먼지 배출특성 및 배출계수 산정에 관한 자료를 제공코자 한다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 대상시설 선정 및 일반 현황

대상시설은 화력발전시설 중 사용연료 종류에 따라 기체, 액체, 고체 각각 1개, 총 3개 사업장을 선정하였으며, 현황을 표 1에 나타냈다.

기체연료 발전시설은 제철 공정 중 발생하는 고로가스(Blast Furnaces Gas, BFG)와 코크스로가스(Coke Oven Gas, COG)를 연료로 활용한 142.2 MWh 용량의 복합발전시설로 측정시 연료사용량에 따른 부하량은 100%로 일정하게 가동하고 있었다. 방지지설 설치 의무 면제로 특별한 방지지설이 없다.

액체연료 발전시설은 공정 중 발생하는 부생액체연료(Mixed Fuel Oil, MFO)를 이용 42.17 MWh 용량의 복합발전시설을 가동하여 공장의 스팀과 전기를 생산하는 시설로 공정부하율은 77%로 운전을 하고 있었다. 방지지설은 질소산화물의 생성을 억제하는 선택적촉매환원시설(Selective Catalytic Reduction, SCR)이 설치되어있다.

고체연료 발전시설의 경우는 유연탄을 사용하여 23 MWh 용량의 발전시설을 가동하여 스팀을 생산하며, 측정기간 동안 공정부하율은 평균 78%를 보였다. 방지지설은 배연탈황시설(Flue Gas Desulfurization, FGD), 비선택적촉매환원시설(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR), 전기집진시설(Electrostatics Precipitator, ESP)로 구성 운영되고 있었다.

### 2.2 사용연료 성분조사

발전시설에서 사용된 기체, 액체, 고체연료의 조성은 각 사업장에 납품된 연료조성표를 정리하여 표 2에 나타냈다. 기체연료 중 고로가스는 질소(49.6%), 일산화탄소(25.2%), 코크스로가스는 수소(55.5%), 메탄(25.2%)이 높은 조성을 보였으며, 액체연료는 C9(66.4%), C6~C7(31.3%)으로 탄소화합물 함량이 가장 높았으며, 고체연료는 고정탄소(39.6%), 휘발분(39.2%)이 높은 비율을 보였으며 입자상 오염물질 발생과 밀접한 관계가 있는 회분이 4.2% 함유되어 있다.

### 2.3 시료채취 및 분석방법

굴뚝에서의 먼지(Particulate Matter, PM) 시료는 대기오염공정시험기준인 ES 01301.1을 준하여 반자동식 시료채취기(Clean Air Experiment, USA, Meth-

**Table 1.** General information of power plant.

Fuel type	Volume (MWh)	Control device	Average load factor (%)
Gas (BFG <sup>1)</sup> , COG <sup>2)</sup> )	142.2	-	100
Liquid (MFO <sup>3)</sup> )	42.17	SCR	77
Solid (Bituminous coal)	23	FGD → SNCR → ESP	78

<sup>1)</sup>BFG: Blast Furnaces Gas, <sup>2)</sup>COG: Coke Oven Gas, <sup>3)</sup>MFO: Mixed Fuel Oil

**Table 2.** Fuel composition. (unit (%))

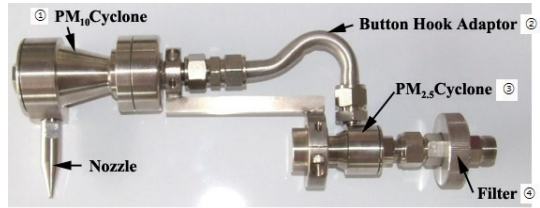
Fuel type	Fuel composition
BFG, COG	<b>1) Blast Furnaces Gas (BFG)</b> • Nitrogen: 49.6 • Carbon dioxide: 21.1 • Oxygen: 0.38 • Carbon monoxide: 25.2 • Hydrogen: 3.7 • Moisture: 0.0
	<b>2) Coke Oven Gas (COG)</b> • Hydrogen: 55.5 • Nitrogen: 7.7 • Ethylene: 2.8 • Oxygen: 0.37 • Methane: 25.2 • Carbon monoxide: 6.4 • Carbon dioxide: 2.1 • Moisture: 0.0
MFO	• C9: 66.4 • Ortho-Xylene: 1.08 • Toluene: 0.05 • C6~C8: 31.3 • Benzene: 0.21
Bituminous coal	• Fixed Carbon: 39.6 • Ash: 4.2 • Volatile: 39.2 • Moisture: 17.0

od-5)로 3회 반복 채취하였다. 먼지시료채취가 완료된 원통여지(Advantec, Japan, 88R)는 항온조를 사용하여 110°C에서 (2~3)시간 건조하고 데시케이터 내에서 실온까지 냉각하여 전자저울(AND, Japan, GH-200)을 사용하여 무게를 0.1 mg까지 측정하였다.

원통여지는 먼지 분석을 위한 무게 측정 후 금속화합물 분석을 위해 마이크로파(CEM, USA, MARS)를 이용하여 산분해한 후 ICP (PerkinElmer, USA, Optima 8300)를 사용하여 금속화합물 9개 성분(Cu, Pb, Cr, Zn, Cd, Ni, Fe, Mn, Al)을 분석하였다.

미세먼지(PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>) 시료채취는 대기공정시험법(ES 01317.1)인 여과성 먼지(필터 또는 사이클론/필터 조합을 통과하지 못하는 물질)의 Cyclone법에 준하여 반자동식 시료채취기를 사용하였다. 여과지는 중량 농도 및 중금속 분석을 위해 테플론 여과지(Polytetrafluoroethylene, 47 mm)를 사용하였다. 사이클론 장치의 구성은 그림 1과 같이 PM<sub>10</sub> 사이클론(①), 연결부(②), PM<sub>2.5</sub> 사이클론(③), 여과지홀더(④)으로 이루어져 있으며 측정항목에 따라 표 3의 장비 구성과 같이 사이클론을 연결한 후 측정하였다(NIER, 2017).

시료채취가 완료된 여과지는 데시케이터 내에서 건조시킨 후 전자저울(Sartorius, Germany, DE/CP2P)을 사용하여 무게를 0.01 mg까지 측정하였다.

**Fig. 1.** Cyclone coupling device and filter holder.**Table 3.** Cyclone cutting diameter (D50) and measuring equipment configuration.

Cyclone	Minimum cutting diameter (μm)	Maximum cutting diameter (μm)	Configuration of equipment
PM <sub>10</sub>	9	11	①+④
PM <sub>2.5</sub>	2.25	2.75	①+②+③+④

### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 총먼지, 미세먼지 농도

화력발전시설의 총 먼지(Total Particulate Matter, TPM), 미세먼지(PM<sub>10</sub> 및 PM<sub>2.5</sub>) 농도에 대해 연료별·입경별로 측정된 결과를 표 4에 제시하였다. 기체, 액체, 고체연료 사용시설 모두 최종 방지시설을 거친 배출가스 농도를 굴뚝 후단에서 측정하였으며, 표준산소농도를 보정하였다.

기체연료 발전시설의 측정 평균 농도는 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 각각 0.248 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.185 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.121 mg/Sm<sup>3</sup>로 다른 2개의 시설과 비교하여 가장 낮은 농도를 나타내었다. 한편, Jeong *et al.* (2016)이 보고한 LNG 사용시설의 측정결과와 비교하면, 이번 연구결과와 TPM의 경우는 평균값이 0.248 mg/Sm<sup>3</sup>으로 LNG 사용시설 결과인 0.4586 mg/Sm<sup>3</sup>의 절반수준 정도로 낮게 나타났다. 반면, PM<sub>10</sub>과 PM<sub>2.5</sub>의 경우에는 LNG 사용시설 결과(PM<sub>10</sub>: 0.2026 mg/Sm<sup>3</sup>, PM<sub>2.5</sub>: 0.1521 mg/Sm<sup>3</sup>)와 유사한 값을 보였다.

액체연료 발전시설은 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 각각 0.890 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.400 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.318 mg/Sm<sup>3</sup>으로 기체연료 사용시설과 비교하여 TPM은 3.5배, PM<sub>10</sub>은 2.2배,

**Table 4.** Measured concentration and exhaust gas flow rate of TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>.

Fuel type	TPM		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
	Conc. <sup>1)</sup> (mg/Sm <sup>3</sup> )	Flow rate (Sm <sup>3</sup> /h)	Conc. (mg/Sm <sup>3</sup> )	Flow rate (Sm <sup>3</sup> /h)	Conc. (mg/Sm <sup>3</sup> )	Flow rate (Sm <sup>3</sup> /h)
Gas	0.323	1,075,434	0.290	1,075,434	0.128	1,041,294
	0.222	1,036,926	0.143	1,036,926	0.137	1,036,926
	0.199	1,039,041	0.121	1,073,107	0.098	1,073,107
Mean value	0.248	1,050,467	0.185	1,061,823	0.121	1,050,443
Liquid	0.933	397,182	0.314	397,182	0.257	397,182
	0.765	386,671	0.361	386,671	0.354	386,671
	0.972	386,671	0.525	386,671	0.343	386,671
Mean value	0.890	390,175	0.400	390,175	0.318	390,175
Solid	2.145	345,170	1.682	345,170	1.355	345,170
	3.496	424,866	2.349	424,866	1.705	424,866
	4.428	333,334	2.994	333,334	2.442	333,334
Mean value	3.356	367,790	2.342	367,790	1.834	367,790

<sup>1)</sup>Conc.: Concentration

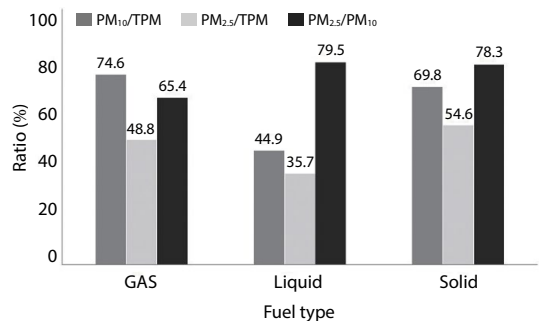
PM<sub>2.5</sub>는 2.6배 정도 높게 나타났다.

고체연료 발전시설의 측정 평균 농도는 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 각각 3.356 mg/Sm<sup>3</sup>, 2.342 mg/Sm<sup>3</sup>, 1.834 mg/Sm<sup>3</sup>으로 액체연료 발전시설보다도 각 입경별 먼지 농도가 3~5배 이상 높게 나타나서 조사대상 시설에서 가장 높은 농도를 보였다. 이는 Yoon *et al.* (2010)의 조사결과인 PM 4.45 mg/Sm<sup>3</sup>~12.06 mg/Sm<sup>3</sup> 보다 낮은 값을 보였으며, PM<sub>2.5</sub>는 0.76 mg/Sm<sup>3</sup>~3.02 mg/Sm<sup>3</sup>로 유사한 값을 보였다.

화력발전시설에서 연료별 농도의 실측치를 분석한 결과, TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 모두 고체>액체>기체연료 발전시설 순으로 나타났다.

### 3.2 총먼지, 미세먼지 입경분율

사용연료 종류에 따라 3개 시설의 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 입경분율을 그림 2에 나타내었다. 기체연료 발전시설의 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율은 각각 74.6%, 48.8%, 65.4%로 나타났다. 액체연료 발전시설의 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율은 각각 44.9%, 35.7%, 79.5%를 나타냈다. 고체연료 발전시설의 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율은 69.8%, 54.6%, 78.3%로 조사되었다.

**Fig. 2.** Particle size fraction of TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>.

TPM 중 PM<sub>10</sub>이 차지하는 비율은 기체연료가 74.6%로 가장 높았으며, 다음으로 고체연료, 액체연료 순으로 나타났다. 기체연료 발전시설이 다른 시설에 비해 PM<sub>10</sub>이 차지하는 비율이 높은 이유는 기체연료 PM<sub>10</sub>이 다른 연료에 비해 낮은 값을 보이고 있으나 TPM의 농도가 0.248 mg/Sm<sup>3</sup>으로 다른 연료의 TPM 농도보다 현저히 적기 때문이다.

TPM 중 PM<sub>2.5</sub>가 차지하는 비율은 고체연료가 54.6%로 가장 높고, 기체연료, 액체연료 순으로 나타났다.

기체연료 발전시설에서 PM<sub>10</sub>/TPM이 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>보다 높게 나왔으나 액체·고체연료 발전시설은 반

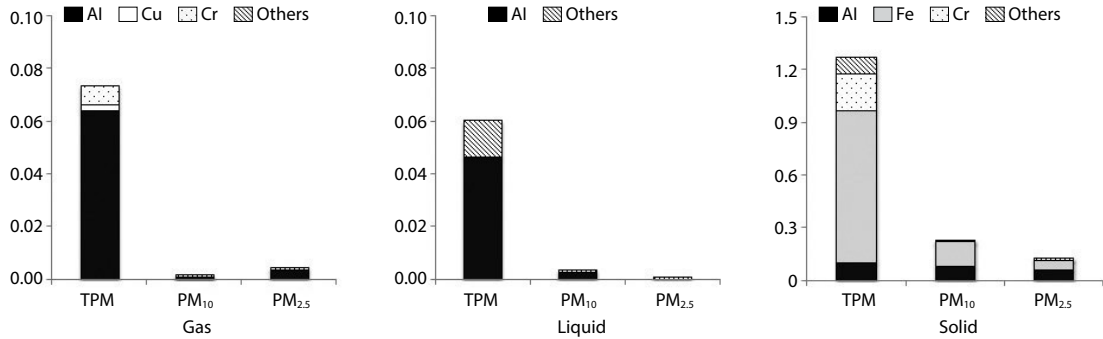


Fig. 3. Major metal compounds concentration by fuel.

Table 5. Metal compounds concentration by fuel.

(unit: mg/Sm<sup>3</sup>)

	Gas			Liquid			Solid		
	TPM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TPM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TPM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Al	0.0638	0.0005	0.0036	0.0460	0.0023	0.0003	0.0996	0.0772	0.0590
Fe	ND	0.0004	0.0004	0.0026	ND	0.0001	0.8651	0.1408	0.0550
Cr	0.0073	0.0001	ND	0.0010	0.0013	ND	0.2082	0.0002	0.0007
Zn	ND	0.0130	ND	ND	ND	ND	0.0467	ND	0.0067
Cd	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.0340	ND	ND
Mn	ND	0.0004	0.0004	0.0026	ND	0.0001	0.0083	0.0017	0.0017
Pb	ND	ND	ND	0.0081	ND	ND	ND	0.0033	ND
Cu	0.0022	ND	ND	ND	ND	ND	0.0083	0.0044	0.0040
SUM	0.0733	0.0144	0.0044	0.0603	0.0036	0.0005	1.2702	0.2276	0.1271

대 경향이 나타났다. 액체나 고체연료의 경우 방지시설을 통해 큰 입자가 제거되어 작은 입자의 비율이 높은 반면, 본 조사지점의 기체연료 발전시설은 방지시설이 없어 고체·액체 사용시설보다 PM<sub>2.5</sub> 이상의 입자가 제거되지 않아 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 비율이 낮게 나타난 것으로 판단되어진다.

### 3.3 금속화합물 농도

금속화합물을 분석한 결과는 표 5, 그림 3과 같다.

기체연료의 경우 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 금속화합물 농도는 각각 0.0733 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.0144 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.0044 mg/Sm<sup>3</sup>로 조사되었다.

액체연료의 경우 0.0603 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.0036 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.0005 mg/Sm<sup>3</sup>로 다른 2개의 시설과 비교하여 가장 낮은 농도를 나타내었다.

고체연료는 각각 1.2702 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.2276 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.1271 mg/Sm<sup>3</sup>로 가장 높은 농도를 보였으며 모든 연료에서 TPM의 금속화합물 농도가 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>보다 높은 값을 보였다.

고체연료 중 Fe은 TPM (0.8651 mg/Sm<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (0.1408 mg/Sm<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub> (0.0550 mg/Sm<sup>3</sup>)으로 83.7% 이상이 PM<sub>10</sub>보다 큰 입자의 형태로 존재하였다. Cr은 TPM에서 0.2082 mg/Sm<sup>3</sup>으로 검출된 반면, 미세먼지에서는 극미량 검출되었다. Al은 TPM (0.0996 mg/Sm<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (0.0772 mg/Sm<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub> (0.0590 mg/Sm<sup>3</sup>)으로 77.5% 이상이 PM<sub>10</sub>보다 작은 입자의 형태로 존재하였다. 이외 다른 금속들은 극미량 검출되거나 검출되지 않았다.

액체연료는 TPM에서 Pb은 0.0081 mg/Sm<sup>3</sup>로 미량 검출되고 있으나, 미세먼지에서는 검출되지 않았다.

Al은 TPM (0.0460 mg/Sm<sup>3</sup>), PM<sub>10</sub> (0.0023 mg/Sm<sup>3</sup>), PM<sub>2.5</sub> (0.0003 mg/Sm<sup>3</sup>)으로 95.0% 이상이 PM<sub>10</sub>보다 큰 입자의 형태로 존재하여 고체연료와 다른 결과가 나타났다.

기체연료의 경우 TPM에서 Al (0.00638 mg/Sm<sup>3</sup>), Cr (0.0073 mg/Sm<sup>3</sup>)로 검출되고 있으나, 미세먼지에서는 대부분 극미량 검출되거나 검출되지 않았다.

### 3.4 미세먼지 배출량

#### 3.4.1 배출계수 산정

배출계수는 연료별로 방지시설 후단에서 총먼지, 미세먼지 측정결과를 식 1을 이용하여 방지시설을 통과한(controlled) 배출계수를 산출한 후, 방지시설의 먼지 제거효율을 적용하여 방지시설을 통과하지 않은(Uncontrolled) 배출계수를 구하였으며 표 6에 제시하였다.

고체연료의 경우 TPM Uncontrolled 배출계수는 전기집진기의 총먼지 제거효율 99.885%을 적용하면 2.042 g/kg으로 고시에 의한 산출값 21.0 g/kg (5.0A)에 비해 약 10% 수준으로 낮게 조사되었다. 미세먼지의 경우 방지시설의 집진효율이 없어 총먼지와 같은 집진효율을 적용하였으며, 그 결과 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 Uncontrolled 배출계수는 각각 1.393 g/kg, 1.085 g/kg로 조사되었다. 본 조사결과가 Jang *et al.* (2011)이 보고한 유연탄에서 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 배출계수보다 높은 값을 보였으며, 이는 배출계수 산정 시 적용한 방지시설 제거효율(99.43%, 99.885%)의 차이와 측정시설의 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

기체연료와 액체연료 사용시설의 Uncontrolled 배출계수는 먼지 제거 방지시설이 없어 Controlled 배출계수와 동일한 값을 적용하였다. 기체연료의 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 Uncontrolled 배출계수는 0.00090 g/m<sup>3</sup>, 0.00068 g/m<sup>3</sup>, 0.00044 g/m<sup>3</sup>이고, 액체연료의 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 Uncontrolled 배출계수는 0.028 g/L, 0.020 g/L, 0.016 g/L로 나타났다.

배출계수(g/m<sup>3</sup>, g/L, g/kg) =

$$\frac{\text{농도}(\text{mg}/\text{Sm}^3) \times \text{건조배출가스유량}(\text{Sm}^3/\text{hr}) \times 10^{-3}}{\text{연료사용량}(\text{m}^3/\text{hr}, \text{L}/\text{hr}, \text{kg}/\text{hr})} \quad (1)$$

#### 3.4.2 단위 전기 생산량 대비 미세먼지 배출량

표 7은 시간당 먼지배출량과 단위전기생산량 대비 먼지배출량(kg/PJ)을 산출하였으며, 기 보고된 배출계수와 비교하였다. 시간당 먼지배출량은 식 2를 이용하여 구하였다.

먼지배출량(kg/hr)

$$= \text{Uncontrolled 배출계수}(\text{g}/\text{m}^3, \text{g}/\text{L}, \text{g}/\text{kg}) \times \text{시간당연료사용량}(\text{g}/\text{m}^3, \text{g}/\text{L}, \text{g}/\text{kg}) \times 10^{-3} \quad (2)$$

시간당 TPM 배출량은 고체연료가 45.74 kg/hr으로 가장 높은 값을 보였고, 가스, 액체연료는 0.26 kg/hr, 0.22 kg/hr으로 거의 비슷한 값을 보였다. 전기생산량당 TPM 배출량은 고체연료에서 0.7080 kt/PJ으로 가장 높은 값을 보였지만, 액체연료(0.00188 kt/PJ)는 가스연료(0.00051 kt/PJ)에 비해 3.7배 높은 배출량을 보였다. 가스와 액체연료의 시간당 PM<sub>10</sub> · PM<sub>2.5</sub> 배출량은 비슷하거나 기체연료가 높은 값을 보인 반면 전기

**Table 6.** Emission factors of TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> by fuel.

Fuel type (Uite)	Calculated value			Controlled			Uncontrolled		
	TPM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TPM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	TPM	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
Gas (g/m <sup>3</sup> )	0.03	-	-	0.0009	0.0007	0.0004	0.0009	0.0007	0.0004
Liquid (g/L)	0.24	-	-	0.028	0.020	0.016	0.028	0.020	0.016
Solid (g/kg)	5.0A <sup>1)</sup>	-	-	0.0024	0.0016	0.0013	2.042 (0.045 <sup>2)</sup> )	1.393 (0.041 <sup>2)</sup> )	1.085 (0.030 <sup>2)</sup> )

<sup>1)</sup>A: Ash content (%)

<sup>2)</sup>Jang *et al.* (2011), Bituminous coal

**Table 7.** Fine dust emission compared to electricity production.

Fuel type	Fuel usage per hour	Electricity output (PJ)	Dust emission					
			TPM		PM <sub>10</sub>		PM <sub>2.5</sub>	
			kg/hr	kt/PJ	kg/hr	kt/PJ	kg/hr	kt/PJ
Gas	$2.90 \times 10^5 \text{ m}^3$	$5.12 \times 10^{-4}$	0.26	0.00051	0.20	0.00039	0.13	0.00025
Liquid	$7.92 \times 10^3 \text{ L}$	$1.17 \times 10^{-4}$	0.22	0.00188 (0.0033 <sup>1)</sup> )	0.16	0.00137 (0.005 <sup>2)</sup> )	0.13	0.00111 (0.005 <sup>2)</sup> )
Solid	$2.24 \times 10^4 \text{ kg}$	$6.46 \times 10^{-5}$	45.74	0.7080 (0.050 <sup>3)</sup> )	31.20	0.4830 (0.045 <sup>3)</sup> )	24.30	0.3762

\* Unit (PJ = 10<sup>15</sup>J)<sup>1)</sup>UBA (1989), Light oil, Power plants<sup>2)</sup>Berdowski *et al.* (1997), Light oil, Power plants<sup>3)</sup>BUWAL (2001), Coal, Industrial boilers

생산량당 배출량을 기준으로 살펴보면 액체연료가 기체연료보다 많이 배출되는 것으로 나타나 발전시설에서 배출량 기준에 대한 검토가 필요하다고 사료된다. 전기생산량당 입경별 배출량을 UBA (1989), Berdowski *et al.* (1997), BUWAL (2001) 연구논문과 비교하면 액체연료 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 경우는 1.8배, 3.6배, 4.5배 낮은 값을 보였지만, 고체연료 TPM, PM<sub>10</sub>의 경우는 14.2배, 10.7배 높은 값을 보였다. 고체연료에서 본 조사결과 값과 많은 차이점을 보이는 원인은 발전시설과 다른 산업용 보일러 측정값을 비교하였기 때문이라 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 연료에 따른 미세먼지 배출특성을 살펴보기 위해 2017년 여수·광양국가산단지역에 가동 중인 화력발전소를 사용연료 종류에 따라 기체, 액체, 고체 각각 1개, 총 3개 사업장을 선정하여 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>를 조사하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 각 시설의 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 농도는 기체연료 0.248 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.185 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.121 mg/Sm<sup>3</sup>, 액체연료 0.890 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.400 mg/Sm<sup>3</sup>, 0.318 mg/Sm<sup>3</sup> 고체연료 3.356 mg/Sm<sup>3</sup>, 2.342 mg/Sm<sup>3</sup>, 1.834 mg/Sm<sup>3</sup>로 고체연료 > 액체연료 > 기체연료 발전시설 순으로 나타났다.

(2) 기체연료의 PM<sub>10</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/TPM, PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>

의 비율은 74.6%, 48.8%, 65.4%, 액체연료는 44.9%, 35.7%, 79.5%, 고체연료는 69.8%, 54.6%, 78.3%로 나타났다.

(3) 먼지 입경별 9개 항목 금속화합물을 분석한 결과, TPM의 중금속 농도가 모든 연료에서 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>보다 높은 값을 보이고 있으며, 고체연료(1.2702 mg/Sm<sup>3</sup>)가 액체연료(0.0603 mg/Sm<sup>3</sup>)나 기체연료(0.0733 mg/Sm<sup>3</sup>)에 비해 높은 농도를 보였다.

(4) 고체연료의 경우 TPM Uncontrolled 배출계수는 2.042 g/kg, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 Uncontrolled 배출계수는 각각 1.393 g/kg, 1.085 g/kg로 조사되었다. 기체연료의 TPM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>의 Uncontrolled 배출계수는 0.00090 g/kg, 0.00068 g/kg, 0.00044 g/kg이고, 액체연료는 0.028 g/kg, 0.020 g/kg, 0.016 g/kg로 조사되었다.

(5) 각 시설의 연료사용시간당 TPM 배출량은 고체연료가 45.74 kg/hr으로 가장 높은 값을 보였고, 가스, 액체연료는 0.26 kg/hr, 0.22 kg/hr으로 거의 비슷한 값을 보였다. 전기생산량 당 TPM 배출량도 고체연료가 0.7080 kt/PJ으로 가장 높은 값을 보였지만 가스, 액체연료의 경우는 시간당 TPM 배출량 결과 값과 다르게 액체연료가 가스연료에 비해 3.7배 높은 값을 보였다.

#### 감사의 글

이 연구는 국립환경과학원(NIER) “대기배출시설

의 연료별 대기오염물질 배출계수 개선 연구”와 “환경분야 시험·검사의 국제적 적합성 기반 구축”사업에 따른 국고보조금이 일부 지원되어 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

## References

- Berdowski, J.J.M., Mulder, W., Veldt, C., Visschedijk, A.J.H., Zandveld, P.Y.J. (1997) Particulate matter emissions (PM<sub>10</sub>-PM<sub>2.5</sub>-PM<sub>0.1</sub>) in Europe in 1990 and 1993, TNO-report, TNO\_MEP - R 96/472.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) (2001) Massnahmen zur Reduktion von PM<sub>10</sub>-Emissionen, Schlussbericht. BUWAL Abteilung Luftreinhaltung und NIS, January.
- Jang, H.N., Yu, J.I., Lee, S.J., Kim, G.H., Seok, J.H., Seo, Y.C., Seok, G.C., Hong, J.C. (2003) Emission Characteristics of Particulate Matter and Heavy metals from Coal Fire Power Plants, Proceeding of the 36th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment (KOSAE), pp. 213.
- Jang, K.W., Kim, H.C., Lee, Y.M., Song, D.J. Jung, N., Kim, S.K., Hong, J.H., Lee, S.J., Han, J.S. (2011) Estimating PM Emission Factor from Coal-Fired Power Plants in Korea, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(5), 485-493.
- Jeong, Y.H., Jeong, J.B., Jeong, S.D., Kang, I.S., Lee, K.S., Baek, W.S., Kim, H.H., Jang, W. (2016) Characteristics Investigation of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> generated Air Pollutants Emission Facilities, Jeollabukdo Institute of Health and Environment Report, pp. 159-175.
- Ministry of Environment (MOE) (2016) It looks if you know right away. Fine dust, what the hell ?, Administrative publication registration number 11-1480000-001435-01, pp. 5-6.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2012) Investigation Study to Establish Test Standard of Fine Dust of Chimney, NIER Official Press Release 11-1480523-001328-01.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2014) Study on Improvement of Fine Dust Measurement Method in Emission Gas I, NIER Official Press Release No. 11-1480523-002082-01.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2015) National Air Pollutant Emissions 2013, NIER Official Press Release No. 11-1480523-000883-10.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) Air Environment Conservation Act, Air Pollution Process Test Method.
- Universidad de Buenos Aires (UBA) (1989) Luftreinhaltung/Æ88, Tendenzen ù Probleme ù Lösungen, Federal Environmental Agency (Umweltbundesamt).
- Yoon, Y.S., Kim, J.H., Deepak, P., Son, S.U., Park, G.K., Park, K.I., Seo, Y.C. (2010) Emission Characteristics of PM and PM<sub>2.5</sub> from Bituminous Coal Combustion Power Plants, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 26(2), 151-160.