

기술자료

# 화력발전시설의 연료종류별 여과성 및 응축성먼지 배출농도 Concentration of Filterable and Condensable PM from Coal, Oil and LNG-fired Power Plants

송지한<sup>1)</sup>, 김종현<sup>2)</sup>, 이도영<sup>1),2)</sup>, 유정훈<sup>2)</sup>, 유명상<sup>1)</sup>, 정종한<sup>2),3)</sup>, 천성남<sup>4)</sup>, 김중호<sup>2),\*</sup>

<sup>1)</sup>온앤아이(주), <sup>2)</sup>한서대학교 대학원 환경공학과,

<sup>3)</sup>한국동서발전(주) 당진발전본부, <sup>4)</sup>한국전력공사 전력연구원

Ji Han Song<sup>1)</sup>, JongHyeon Kim<sup>2)</sup>, Do Young Lee<sup>1),2)</sup>, Jeong Hun Yu<sup>2)</sup>,  
Myeong Sang Yu<sup>1)</sup>, JongHan Jung<sup>2),3)</sup>, Sung-Nam Chun<sup>4)</sup>, Jong Ho Kim<sup>2),\*</sup>

<sup>1)</sup>R&D center, ON&I Inc, Incheon, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Environmental Engineering, Graduate School of Hanseo University,  
Seosan, Republic of Korea

<sup>3)</sup>Dangjin Power Complex, Korea East-West Power CO., LTD, Dangjin, Republic of Korea

<sup>4)</sup>Korea Electric Power Research Institute, Korea Electric Power Corporation, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2023년 6월 12일

수정일 2023년 7월 17일

채택일 2023년 7월 18일

Received 12 June 2023

Revised 17 July 2023

Accepted 18 July 2023

\*Corresponding author

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

E-mail : kimjh@hanseo.ac.kr

**Abstract** This study investigated the emission characteristics of filterable particulate matter (FPM) and condensable particulate matter (CPM) emitted from coal, oil, and LNG-fired power plants. FPM and CPM were measured in two power plants for each fuel type. FPM was measured using a cascade impactor (KSI 23210) in particle size categories of  $PM_{total}$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5-10}$ , and  $PM_{2.5}$ . CPM was measured using a dry impinger (U.S EPA method 202) that separates inorganic and organic components. The average FPM concentration of coal, oil, and LNG-fired power plants were  $1.86 \text{ mg/m}^3$  (@O<sub>2</sub> 6%),  $3.05 \text{ mg/m}^3$  (@O<sub>2</sub> 4%), and  $0.05 \text{ mg/m}^3$  (@O<sub>2</sub> 15%), respectively. The lowest FPM concentration was measured in LNG-fired gas turbines. This indicates that the emission limits at heavy oil-fired power plants are higher than those at coal-fired power plants and each power plant must adhere to the set emission limits. The particle size of FPM emitted from power plants varied depending on the fuel type. While the ratio of fine particles (FPM<sub>2.5</sub>/FPM) was approximately 0.95 for plants fueled by coal or heavy oil, it was approximately 0.36 for LNG-fired gas turbines. This difference can be attributed to the presence of electrostatic precipitator and wet-scrubber in coal and heavy oil-fired power plants, which remove a majority of large particles. In contrast, most of the particles generated in LNG-fired gas turbines are emitted as is due to the absence of particle collectors, since LNG-fired gas turbines have lower FPM concentrations. The average CPM concentration of coal, heavy oil-fired power plants and LNG-fired gas turbines were  $2.55 \text{ mg/m}^3$  (@O<sub>2</sub> 6%),  $14.20 \text{ mg/m}^3$  (@O<sub>2</sub> 4%), and  $0.50 \text{ mg/m}^3$  (@O<sub>2</sub> 15%), respectively. The CPM concentrations were higher than the FPM concentrations. By fuel type, coal, heavy oil, and LNG-fired power plant showed CPM concentration that were 1.4, 4.6, and 10.6 times higher FPM concentrations. CPM in emissions from coal and heavy oil-fired power plants exhibited significantly higher inorganic fractions, approximately 7 and 88 times higher, respectively, while LNG-fired gas turbines had a similar ratio of inorganic and organic components. The FPM and CPM emission factors (controlled) for coal-fired power plants were 0.0172 kg/ton and 0.0228 kg/ton, respectively, consistent with other research. The FPM and CPM emission factors (controlled) for heavy oil-fired power plants were 0.0362 kg/kL and 0.1682 kg/kL, respectively with the FPM emission factor being inconsistent with that of other research findings. Lastly, the FPM and CPM emission factor (uncontrolled) for LNG-fired gas turbines were 0.00256 kg/km<sup>3</sup> and 0.01773 kg/km<sup>3</sup>, respectively, which is lower than that of the AP-42 data but consistent with more recent research data. The emission characteristics of FPM from power plants vary according to emission facility regulations such as emission limits and maximum permissible levels. The emission characteristics of CPM are influenced by factors such as exhaust gas temperature and precursors, including water-soluble SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> gas and volatile organic compounds. However, a correlation equation between various exhaust gas conditions and CPM has not been proposed yet. Therefore, further research is necessary to investigate the concentration, chemical components, and exhaust gas conditions of CPM.

**Key words:** Filterable Particulate Matter (FPM), Condensable Particulate Matter (CPM), Coal, Heavy oil-fired power plant, LNG gas turbine, Emission factor

## 1. 서 론

대기 중의 먼지는 발생원에서 직접 배출되는 1차 (Primary) 발생 먼지와 대기 중에서 여러 물리·화학적 반응에 의해 생성되는 2차 (Secondary) 생성 먼지로 구분한다 (Hinds and Zhu, 2022; Zheng *et al.*, 2017). 또한 1차 발생 먼지는 여과성 (Filterable) 먼지와 배기가스의 온도가 높은 연소시설에서 배출되는 증기가 대기 중에서 응축되면서 생성되는 응축성 (Condensable) 먼지로 구분하며, 여과성과 응축성먼지를 합하여 총먼지 (Total Particulate Matter; TPM)라 칭하기도 한다 (Park and Lee, 2021; Feng *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018; Gong *et al.*, 2016).

1987년 미국 대기질 환경기준 (National Ambient Air Quality Standard) 항목에  $PM_{10}$ 이 신설되고, 이를 관리하기 위한 대책 중의 하나로 발생원에 대한  $PM_{10}$  배출허용기준이 설정되었다. 배출원에서  $PM_{10}$  측정하면서 굴뚝에서 배출되는 증기가 대기 중에서 응축되면서 빠르게 전환되는 응축물질 (액체, 고체)이  $PM_{10}$ 의 중요한 구성 성분이라는 것을 인지하면서 응축성먼지의 중요성을 파악하였고, 이후 측정방법에 대해서도 연구되었다. 1991년 냉각방식 (impinger cooling method)의 응축성먼지 측정방법 “U.S. EPA Method 202”가 처음 제안되었고 (Corio and Sherwell, 2000), 이후 희석식냉각 (dilution cooling method)을 이용한 응축성먼지 측정방법 (U.S. EPA CTM-039, ISO 25597: 2013)들도 제안되었다 (Feng *et al.*, 2018; England *et al.*, 2007).

우리나라는 1991년, 대기환경기준에  $PM_{10}$ 이 신설되어 1995년부터 적용하였으며,  $PM_{2.5}$ 는 2011년에 신설되고 2015년부터 적용하고 있다. 대기 중의 미세먼지 농도를 감소시키기 위한 배출원관리 방안이 강구되면서 굴뚝에서 배출되는  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ 뿐 아니라 응축성먼지에 대한 관심도 높아지게 되었다 (Park and Lee, 2021; Lee *et al.*, 2017).

또한, 응축성먼지와 관련된 연구는 미국 EPA의 method 202, CTM-039, 유럽의 ISO 25597 등 측정방법을 정립하기 위한 연구와 미국과 일본을 중심으로 대형연소시설을 중심으로 배출원목록 (inventory)별 응축성먼지 배출계수를 DB화하는 연구들이 진행되었으며 (Morino *et al.*, 2018; England *et al.*, 2007, 2000; Corio and Sherwell, 2000; Kogure *et al.*, 1997), 최근 들어 먼지예측 모델의 정확도를 높이기 위한 배출원 입력자료를 고도화하는 연구가 진행되었다 (Morino *et al.*, 2022; Kagawa and Ishizaka, 2014). 중국에서는 석탄화력 발전시설을 중심으로 응축성먼지 측정과 처리 방안을 연구하고 있다 (Song *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020, 2018; Yang *et al.*, 2015, 2014; Li *et al.*, 2017a, b).

국내 연구는 Park and Lee (2021)의 실험실의 석탄 연소로에서의 측정, Yu *et al.* (2018)의 실험실의 가정용 보일러에서 측정, Gong *et al.* (2016)의 Pilot scale 보일러와 석탄발전시설과 시멘트 제조시설에서의 측정 등이 있다. 연구 결과는 여과성먼지보다 응축성먼지가 더 높은 농도로 배출되는 것과 응축성먼지의 전구물질에 대한 중요성이 파악되었으나, 실제 운전하는 배출시설에서의 현장조사 연구는 아직 적은 편이다.

따라서 본 연구는 석탄, 중유, LNG를 연료로 사용하는 화력발전시설을 대상으로 여과성과 응축성먼지의 배출특성을 파악하고 배출계수를 산정하였으며, 향후 응축성먼지 연구와 관리대책의 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 대상 시설

측정 대상 시설은 단위배출시설로는 배기가스량이 커서 응축성먼지 배출량이 많을 것이라고 예상되는 화력발전시설을 선정하였다. 안정적인 운전을 하고

있는 석탄, 중유, LNG를 연료로 사용하고 있는 화력 발전시설에서 대기오염 방지장치를 거친 최종 배출구에서 측정하였다.

석탄과 중유를 연료로 사용하는 화력발전시설은 선택적촉매환원장치(SCR), 전기집진기(ESP), 배연탈황장치(FGD)가 대기오염 방지장치로 설치되어 있으며, LNG 가스터빈은 SCR만 설치되어 있다. 또한, 배연탈황장치는 석회석-석고 방식의 흡수탑(Wet Limestone Scrubber)인데, 석탄발전시설은 상부의 노즐에서 석회석 슬러리를 배기가스에 분사하는 방식이고, 중유 발전시설은 배기가스를 석회석 슬러리 안으로 주입하는 난류기포층 흡수방식이다(NIER, 2022).

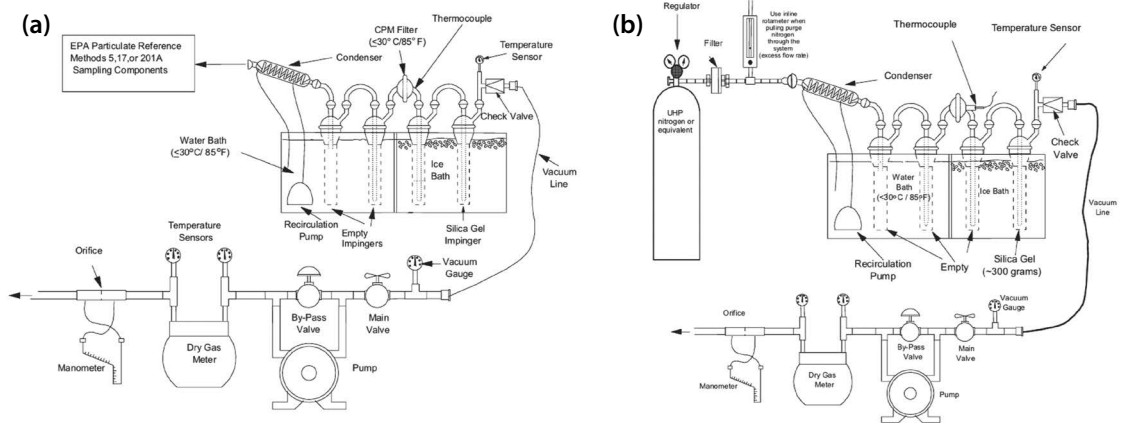
측정 대상 시설의 용량, 방지시설 종류와 측정기간 중 운전부하율 등을 표 1에 나타냈다.

**Table 1.** Description of measurement facilities.

Fuel	Combustion type	Capacity	APCDs	Load*	Operation year
Bituminous coal	Pulverized coal	500 MWh	SCR-ESP-FGD**	69.4%	2000
		1,000 MWh	SCR-ESP-FGD**	92.6%	2017
Heavy oil	-	100 MWh	SCR-ESP-FGD**	83.9%	2007
		100 MWh	SCR-ESP-FGD**	84.2%	2007
LNG	Gas turbine (Combined cycle)	318 MWh	LNB, SCR	69.1%	2014
		318 MWh	LNB, SCR	93.2%	2014

\*at the time of measurement

\*\*Wet-scrubber



**Fig. 1.** (a) Schematic of condensable particulate matter sampling train. (b) Nitrogen purge train configuration (Pressure purge) for sampling train cleaning.

측정하였다(Yu *et al.*, 2018; Gong *et al.*, 2016).

무·유기 성분분석은 먼저, 현장에서 질소 purge가 완료된 impinger의 응축된 시료를 아세톤, hexan을 이용하여 유기 성분을 회수하고, 증류수를 이용하여 무기 성분을 회수하였다. 또한 테플론 필터의 시료는 채취한 후 필터를 데시케이터 내에서 하루 정도 항온·항습하여 무게를 측정하고, 이 필터를 추출관에 넣어 1~2분간 초음파세척기에서 무·유기 성분을 추출한다. 이 과정을 총 3회 반복하며 추출된 무기 성분은 시료의 회수과정에서 나온 수분 및 증류수로 세척한 회수병에 합친다. 유기 성분분석은 무기 성분분석과 같으나 증류수 대신 hexan을 이용하여 무기 성분분석과 같은 추출과정을 거친다(Yu *et al.*, 2018; Gong *et al.*, 2016).

여과성먼지 측정은 표 2와 같이 두 가지 장비로 총먼지(PM<sub>total</sub>)와 먼지를 크기별(>PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5-10</sub>, PM<sub>2.5</sub>)로 측정하였다. 여과성먼지의 농도는 측정된 총먼지(PM<sub>total</sub>) 농도를 기준으로 크기분포는 cascade impactor로 측정된 농도의 비율 값을 적용하였다(Kim *et al.*, 2021; Yu *et al.*, 2021).

시료 채취 시 사용된 여지는 Teflon 재질(Zeflour, Pall Corp., USA)의 지름 47 mm 원형필터이며, 시료가 채취된 여지는 24시간 동안 항온·항습 데시케이터에서 항량시킨 후에 무게를 측정했으며, 데시케이터의 상대습도는 45±5%, 온도는 20±2°C를 유지하였다.

시료의 채취는 굴뚝에 설치된 여러 개의 측정구에서 동시에 실시하였으며, 시료 채취가 오래 걸리는 응축성먼지 채취시간을 고려하여 여과성먼지와 가스상 오염물질은 그 사이 시간에 측정하였으며, 각 발전시설별로 3회 이상 측정하였다. 시료 채취시기는 2017

년 5월부터 2018년 11월까지이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 측정 결과

본 연구의 측정 대상 발전시설에서 배출되는 여과성먼지, 응축성먼지, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도와 배기가스 온도를 연료별로 표 3에 나타냈으며, FPM(PM<sub>total</sub>)은 여과성먼지 농도이며, 연료 종류는 석탄(A), 중유(B), LNG(C)이다. 그림 2와 3에는 화력발전시설의 배출구별로 여과성먼지, 응축성먼지, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도와 배기가스 온도를 나타냈다.

여과성먼지 평균농도는 연료별로 석탄, 중유, LNG에 대해 각각 1.86 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 6%), 3.05 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 4%), 0.05 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 15%)이며, 석탄연소 발전시설의 배출농도가 중유연소 발전시설보다 더 낮게 배출되고 있는 것으로 파악되었다.

이는 일반적으로 고체연료인 석탄연소 시에 발생하는 먼지 농도가 액체연료인 중유연소에서 발생하는 먼지 농도보다 높은 것으로 알려져 있으나, 굴뚝에서 배출되는 농도는 배출허용기준, 배출허용총량, 허가배출기준 등 다소 복잡한 배출원 규제에 의해 배출기준이 설정되어 있어 이들 배출기준을 준수하기 위해 집진장치, 탈황·탈질장치 등과 같은 대기오염 방지시설을 설치하였기 때문으로 사료된다. 본 연구 대상 발전시설의 먼지 배출허용기준은 측정기간 기준으로 석탄연소 발전시설인 A-1, A-2는 각각 12 mg/m<sup>3</sup>, 10 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 6%)이며, 중유연소 발전시설인 B-1, B-2는 20 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 4%)이다.

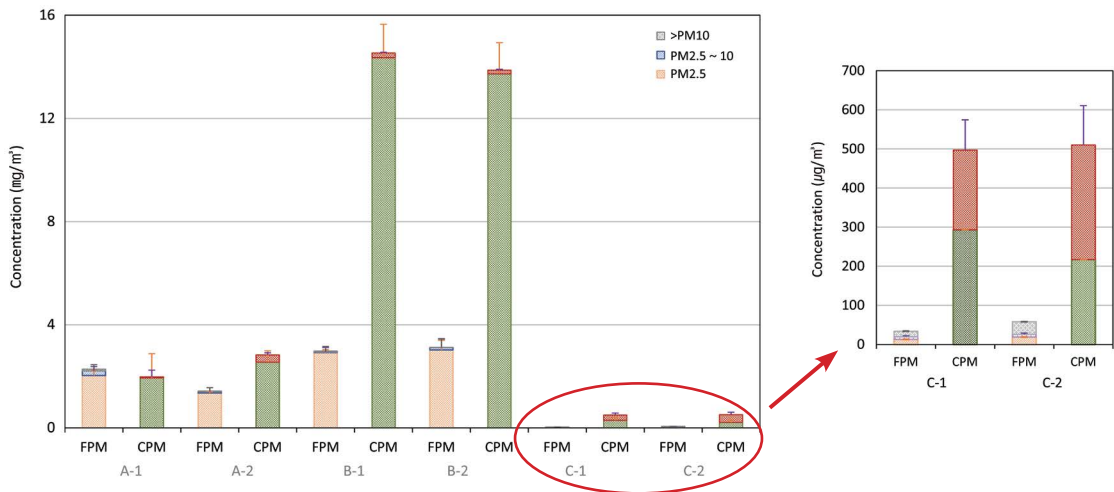
**Table 2.** Measuring equipments.

Item	Method	Instruments
CPM	U.S. EPA 202*	Dry impinger set (M-202, KNJ, Korea)
FPM (PM <sub>total</sub> )	ES 01301.1	PM sampler (KNJ-5, KNJ, Korea)
FPM (>PM <sub>10</sub> , PM <sub>2.5-10</sub> , PM <sub>2.5</sub> )	KS I ISO 23210	2-stage cascade impactor (Stage-X MS, X Ear Pro, Italy)
SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , O <sub>2</sub> , Temp.	ES 01204	CleanSYS (Stack Tele-monitoring system)

\*FPM modified

**Table 3.** Concentration of FPM, CPM, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and exhaust gas temperature for Coal, Heavy oil, and LNG-fired power plants.

		n	Coal (@O <sub>2</sub> 6%)		Heavy oil (@O <sub>2</sub> 4%)		LNG (@O <sub>2</sub> 15%)	
			Mean	STD	Mean	STD	Mean	STD
FPM (mg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>total</sub>	6	1.86	0.48	3.05	0.26	0.047	0.01
	PM <sub>10</sub>	6	1.81	0.45	3.03	0.26	0.023	0.009
	PM <sub>2.5</sub>	6	1.69	0.41	2.97	0.25	0.016	0.006
CPM (mg/m <sup>3</sup> )	Inorganic	6	2.24	1.16	14.04	1.17	0.26	0.10
	Organic	6	0.31	0.15	0.16	0.03	0.24	0.09
SO <sub>2</sub> (ppm)		96	21.8	8.4	14.3	8.3	-	-
NO <sub>x</sub> (ppm)		96	24.2	12.1	51.3	3.3	7.3	2.6
Temp. (°C)		96	88.7	1.9	130.6	21.2	85.4	3.9
Moisture (%)		6	10.4	0.9	9.5	0.6	9.4	0.1

**Fig. 2.** Concentration of FPM (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5-10</sub> > PM<sub>10</sub>), CPM (Inorganic, Organic) from Coal (A), Heavy oil (B) and LNG-fired power plants (C).

따라서 굴뚝에서 배출되는 오염물질의 농도는 배출 허용기준에 따라 변화되는 것으로 판단되며, 배출허용기준보다 배출되는 농도가 크게 낮은 이유는 배출허용기준의 30% 수준으로 낮게 배출하면 기본부과금이 면제되는 인센티브제도가 있기 때문이라 사료된다 (Kim and Lee, 2013).

무기와 유기 성분을 합친 응축성먼지의 평균농도는 석탄, 중유, LNG에 대해 각각 2.55 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 6%),

14.20 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 4%), 0.50 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 15%)으로 측정되었다. 또한 응축성먼지의 전구물질인 SO<sub>2</sub> 평균농도는 석탄, 중유연소 발전시설은 각각 21.8 ppm (@O<sub>2</sub> 6%), 14.3 ppm (@O<sub>2</sub> 4%)으로 측정되었으며, NO<sub>x</sub> 평균농도는 석탄, 중유, LNG 연소 발전시설에서 각각 24.2 ppm (@O<sub>2</sub> 6%), 51.3 ppm (@O<sub>2</sub> 4%), 7.3 ppm (@O<sub>2</sub> 15%)으로 측정되었다. SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도는 석탄, 중유연소 발전시설이 LNG 가스터빈보다 높았다. 배기가스



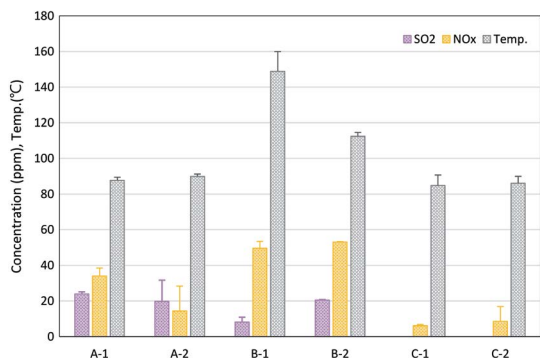


Fig. 3. Concentration of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> from Coal, Heavy oil and LNG-fired power plants.

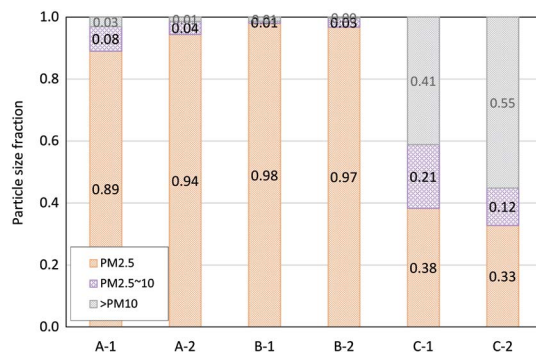


Fig. 4. FPM concentration ratio by particle size for Coal, Heavy oil and LNG-fired power plants.

온도는 석탄, 중유, LNG 연소 발전시설에서 각각 88.7°C, 130.6°C, 85.4°C로 중유연소 발전시설이 약 40°C 정도 높게 측정되었다.

응축성먼지의 생성은 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, 수용성 휘발성유기화합물과 같은 전구물질들이 응축수가 생성되는 조건에서 발생하는 것으로 알려져 있으며 (Feng *et al.*, 2018; Yu *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2014; Corio and Sherwell, 2000), 본 연구 결과도 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도가 높은 석탄, 중유연소 발전시설이 LNG 가스터빈보다 높게 나타났다.

석탄과 중유연소 발전시설의 경우 SO<sub>2</sub> 농도는 석탄연소 발전시설이 더 높았으며, NO<sub>x</sub> 농도 및 배기가스와 주변 온도의 차이가 중유연소 발전시설에서 높게 나타났으며, 응축성먼지 농도도 중유연소 발전시설의 농도가 석탄발전시설보다 약 5배 정도 높았다. 그러나 전구물질 중 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하지 못해서 응축성먼지 생성의 원인을 정확하게 파악할 수 없었다. 또한, 전구물질 농도나 배기가스와 주변 대기 중의 온도 차이에 따른 응축성먼지 발생량과의 관계가 정량적으로 제안된 연구는 아직 없다. 본 연구의 결과도 전구물질의 농도, 배기가스와 대기 중의 온도 차이가 큰 조건에서 응축성먼지 농도가 높은 것을 알 수는 있었으나, 정량적인 관계는 파악할 수 없었다. 이에 대한 추가연구가 필요하다.

응축성먼지의 농도가 여과성먼지 농도보다 석탄,

중유와 LNG 연소 발전시설에서 각각 1.4, 4.6, 10.6배 정도 높게 배출되는 것으로 산출되었다. 기존 연구 결과와 비교하면 석탄연소 발전시설과 LNG 가스터빈의 연구 결과와는 유사하지만, 중유연소 발전시설에서의 응축성먼지 농도는 본 연구의 결과가 높은 것으로 나타났다 (Corio and Sherwell, 2000; Song *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Gong *et al.*, 2016). 그러나 중유연소 발전시설에서 응축성먼지가 높게 측정된 것에 대해서는 명확하게 생성의 원인을 파악할 수 없었다.

또한, 본 측정 결과에서 응축성먼지 성분은 석탄과 중유연소 발전시설에서는 무기 성분이 유기 성분보다 각각 약 7배, 약 88배로 많게 나타났으며, LNG 가스터빈에서는 두 성분의 비율이 비슷하게 측정되었다. 특히 중유연소 발전시설에서 무기 성분의 농도가 매우 높게 측정되었는데, 전구물질인 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 농도는 측정하였으나 NH<sub>3</sub> 농도는 측정하지 못해서 좀 더 명확한 응축성먼지 생성의 원인을 파악하기 위한 연구가 필요하다.

일반적으로 응축성먼지 생성과정에서 NH<sub>3</sub>는 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 등과 반응하여 황산염((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>), 질산염(NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>) 등을 형성하는 데 크게 기여하는 것으로 알려져 있으며 (Corio and Sherwell, 2000), 질소산화물 방지장치인 SCR의 환원제로 NH<sub>3</sub>, 요소수 등이 사용된다 (Heck and Farrauto, 2002).

여과성먼지의 크기별 농도분포를 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>2.5-10</sub>,

>PM<sub>10</sub>으로 구분하여 그림 4에 나타났다. 석탄과 중유연소 발전시설과 LNG 가스터빈과는 상이하게 나타났다. 석탄과 중유연소 발전시설에서는 PM<sub>2.5</sub>의 비율이 약 0.95로 측정되었는데, 이는 대기오염 방지시설로 전기집진기와 습식스크러버가 설치되어 크기가 큰 먼지는 대부분 제거되고 있는 것으로 사료되며 (Yu *et al.*, 2021), LNG 가스터빈의 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> 비율은 각각 약 0.36, 0.52로 미세먼지 비율이 적은 것으로 파악되었는데, LNG 가스터빈에서 발생하는 먼지 농도는 낮은 수준이며, 집진장치가 설치되어 있지 않아 발생된 먼지가 그대로 배출되는 기존 연구와 유사하게 측정되었다 (Kim *et al.*, 2021).

### 3. 2 먼지 배출계수의 비교

대기오염물질 배출계수는 식 1로 구하며, 상향식 (Bottom-up) 방법으로 대기오염물질 배출량을 산정할 때 연료 혹은 원료 사용량과 함께 필수적인 요소이다 (NAIR, 2022). 또한, 배출시설을 특성을 파악할 때 측정농도 값만 아니라 배출계수를 산정하고, 이를 다른 배출계수 자료 (U.S. EPA AP-42)와 비교하는 것이

객관적이라고 판단한다.

표 4에는 측정기간에 사용한 연료량을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} & \text{Emission factor (kg/ton, kg/kL, kg/km}^3\text{)} \\ & = \text{Concentration (mg/Sm}^3\text{)} \\ & \times \text{amount of flue gas (Sm}^3\text{/hr)} \times 10^{-9} \\ & / \text{amount of fuel feeding (ton/hr, kL/hr, 10}^3 \text{ m}^3\text{/hr)} \end{aligned} \quad (1)$$

본 측정연구의 배출계수 산정 결과를 표 5에 나타났다. 석탄연소 발전시설의 방지장치 후단 (controlled, SCR, ESP, Wet-scrubber)의 배출계수는 총먼지 (TPM) 0.0400 kg/ton, 여과성먼지 0.0172 kg/ton, 응축성먼지 0.0228 kg/ton으로 산출되었다. 국내의 다른 연구 결과 (Gong *et al.*, 2016)와는 유사하게 나타났으나, AP-42의 배출계수보다 낮게 산출되었다.

이는 국내의 석탄연소 발전시설의 배출원 규제 (배출허용기준 강화, 총량관리제, NO<sub>x</sub> 배출부과금 신설 등)가 저유황 석탄 사용, 대기오염 방지장치의 효율 향상 등으로 미국에서 대기오염물질 배출계수를 작성

**Table 4.** Average fuel usage during sampling periods at facilities.

Fuel	Coal (ton/hr)		Heavy oil (kL/hr)		LNG (km <sup>3</sup> /hr)	
	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2
Usage	77	189	15	17	211	265

**Table 5.** Particulate matter emission factors for Coal, Heavy oil and LNG-fired power plants.

Fuel	TPM	FPM	CPM	Unit	Reference
Coal	4.00 × 10 <sup>-2</sup>	1.72 × 10 <sup>-2</sup>	2.28 × 10 <sup>-2</sup>	kg/ton	This study (controlled SCR, ESP, FGD) Gong <i>et al.</i> (controlled SCR, ESP, FGD) AP-42 (controlled FGD, ESP)
	7.17 × 10 <sup>-2</sup>	6.55 × 10 <sup>-3</sup>	6.51 × 10 <sup>-2</sup>		
	6.00 × 10 <sup>-1</sup>	4.00 × 10 <sup>-1</sup>	2.00 × 10 <sup>-1</sup>		
Heavy oil	2.04 × 10 <sup>-1</sup>	3.62 × 10 <sup>-2</sup>	1.68 × 10 <sup>-1</sup>	kg/kL	This study (controlled SCR, ESP, FGD) Gong <i>et al.</i> (controlled Cyclone) AP-42 (controlled FGD, ESP)
	3.71 × 10 <sup>-1</sup>	1.44 × 10 <sup>-1</sup>	2.28 × 10 <sup>-1</sup>		
	1.85 × 10 <sup>-1</sup>	5.67 × 10 <sup>-3</sup>	1.80 × 10 <sup>-1</sup>		
LNG gas turbine	2.03 × 10 <sup>-2</sup>	2.56 × 10 <sup>-3</sup>	1.77 × 10 <sup>-2</sup>	kg/km <sup>3</sup>	This study (controlled LNB, SCR) Gong <i>et al.</i> (uncontrolled) AP-42 (controlled SCR)
	2.07 × 10 <sup>-1*</sup>	3.79 × 10 <sup>-3*</sup>	2.03 × 10 <sup>-1*</sup>		
	1.22 × 10 <sup>-1</sup>	3.04 × 10 <sup>-2</sup>	9.12 × 10 <sup>-2</sup>		

\*LNG combustion boiler

한 시기인 1990년대보다 배출농도가 엄격하게 관리되기 때문에 사료된다.

또한 500 MW 석탄연소 발전시설은 측정 시간대의 부하율이 약 70%로 전기집진기의 비집진면적(Specific collection area)이 커져서 제거효율이 높아졌을 것으로 판단되며(Cooper and Alley, 2002), 1,000 MW 석탄연소 발전시설은 표 1에 나타난 것처럼 최신시설로 각종 대기오염 방지장치들의 설계 및 운전효율이 높았을 것으로 판단된다. 국내 석탄연소 발전시설의 먼지 제거효율은 99.9% 이상으로 보고되고 있으며(Yu *et al.*, 2021), 미국에서 여과성과 응축성먼지의 배출계수를 작성하여 AP-42에 공포할 때의 전기집진기 제거효율은 99.2%를 적용하고 있다(U.S. EPA, 2009).

중유연소 발전시설의 경우 방지장치 후단(controlled, SCR, ESP, Wet-scrubber)의 먼지 배출계수는 총먼지 0.2044 kg/kL, 여과성먼지 0.0362 kg/kL, 응축성먼지 0.168 kg/kL로 산출되었다. 발전시설의 대기오염 방지장치가 유사한 AP-42의 배출계수와 비교해보면, 여과성먼지는 차이가 나타났으며, 응축성먼지는 유사한 것으로 나타났다.

이는 연소장치, 대기오염 방지장치 제거효율 등의 차이뿐 아니라 적용받는 배출원 규제(먼지 배출허용기준, 석탄 5 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 6%), 중유 20 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 4%))와도 관련이 있을 것으로 사료되는데, 미국의 배출규제는 중유연소 발전시설의 배출허용기준이 석탄연소 발전시설과 비슷한 수준이지만 국내는 석탄연소 발전시설이 더 엄격하여 배출계수는 이러한 영향을 받았을 것으로 사료된다(<https://www.epa.gov/catc/ractbactlaerclearinghouse-rblc-basic-information>).

LNG 가스터빈 먼지 배출계수의 경우 총먼지 0.02029 kg/km<sup>3</sup>, 여과성먼지 0.00256 kg/km<sup>3</sup>, 응축성먼지 0.01773 kg/km<sup>3</sup>으로 산출되었다. 국내 연구자료는 LNG 연소 보일러로 본 연구의 LNG 가스터빈과는 연소방식과 장치가 서로 상이하여, 같은 연소방식의 AP-42 배출계수와 비교하였는데, 본 연구 결과가 여과성먼지는 약 10배, 응축성먼지는 약 5배 낮게 산출되었다. 한편 England *et al.* (2002)의 연구에서 LNG

가스터빈의 여과성과 응축성먼지 배출계수를 각각 0.00996 kg/km<sup>3</sup>, 0.00490 kg/km<sup>3</sup>으로 산정하였으며, AP-42의 배출계수라 높은 수준이라고 보고하였다.

#### 4. 결 론

본 연구는 석탄, 중유, LNG연소 발전시설에서 배출되는 여과성먼지와 응축성먼지의 농도를 측정하였다.

발전시설에서 배출되는 여과성먼지의 평균농도는 석탄, 중유, LNG에 대하여 각각 1.86 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 6%), 3.05 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 4%), 0.05 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 15%)이며, LNG 가스터빈에서 배출되는 여과성먼지 농도가 가장 낮게 측정되었고, 석탄연소 발전시설보다 중유연소 발전시설의 여과성먼지 농도가 낮게 나타났다.

발전시설에서 배출되는 여과성먼지의 크기는 석탄과 중유연소 발전시설에서는 미세먼지 비율(FPM<sub>2.5</sub>/FPM)이 약 0.95, LNG 가스터빈은 미세먼지 비율이 약 0.36으로 나타났다. 이는 석탄과 중유연소 발전시설에는 전기집진기와 습식스크러버가 설치되어 큰 먼지는 대부분 제거되지만, LNG 가스터빈에서는 발생하는 먼지의 농도가 낮아서 집진장치가 설치되어 있지 않으므로 발생한 먼지가 처리되지 않고 굴뚝으로 그대로 배출되기 때문에 사료된다.

응축성먼지의 배출농도는 석탄, 중유연소 발전시설과 LNG 가스터빈에서 각각 2.55 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 6%), 14.20 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 4%), 0.50 mg/m<sup>3</sup> (@O<sub>2</sub> 15%)으로 측정되었다. 응축성먼지 농도가 여과성먼지 농도보다 높으며, 석탄, 중유 LNG 연소 발전시설에서 각각 1.4, 4.6, 10.6배 정도 높게 산출되었다. 응축성먼지의 성분은 석탄과 중유연소 발전시설에서는 무기 성분이 각각 약 7배, 약 88배로 많게 측정되었으나, LNG 가스터빈은 무기 성분과 유기 성분의 비율이 비슷하게 측정되었다. 또한, 전구물질 중 NH<sub>3</sub> 농도를 측정하지 못해서 중유연소 발전시설에서의 응축성먼지 농도가 높은 것에 대해 정확하게 파악할 수 없었다.

석탄연소 발전시설의 여과성과 응축성먼지 배출계



수(controlled)는 각각 0.0172 kg/ton, 0.0228 kg/ton으로 산출되었고, 다른 연구 결과와 유사하게 나타났으며, 중유연소 발전시설의 여과성과 응축성먼지 배출계수(controlled)는 각각 0.0362 kg/kL, 0.1681 kg/kL로 산출되었으며, 여과성먼지 배출계수는 다른 연구와 상이하게 나타났다. LNG 가스터빈의 여과성과 응축성먼지 배출계수(uncontrolled)는 각각 0.00256 kg/km<sup>3</sup>, 0.01773 kg/km<sup>3</sup>으로 AP-42 자료보다 낮게 나타났으나, 비교적 최근의 다른 연구자료와는 유사하게 나타났다.

발전시설에서의 여과성먼지 배출특성은 배출시설 규제에 따라 다르며, 응축성먼지 배출특성은 배기가스 온도, 전구물질인 수용성 가스상물질인 SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, VOCs의 영향을 받는 것으로 판단된다. 그러나 아직까지 여러 배기가스 조건과 응축성먼지 관계식이 제안되지 않았으며, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 정부(산업통상자원부, 한국에너지기술평가원)의 재원 “청정화력핵심기술개발사업(20161110100140)”과 정부(환경부, 한국환경산업기술원)의 재원으로 “미세먼지관리 특성화대학원” 전문인력 양성사업의 지원을 받아 수행하였습니다.

## References

- Cooper, C.D., Alley, F.C. (2002) Air pollution control; A design approach. Waveland Press, Inc., 159-163.
- Corio, L.A., Sherwell, J. (2000) In-stack condensable particulate matter measurements and issues, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 50(2), 207-218. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464002>
- England, G.C., Chang, O., Wein, S. (2002) Development of fine particulate emission factors and speciation profiles for oil and gas-fired combustion systems, *GE Energy and Environmental Research Corporation*, 4-7.
- England, G.C., Watson, J.G., Chow, J.C., Zielinska, 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 Systems, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 57, 79-93. <https://doi.org/10.1080/10473289.2007.10465304>
- England, G.C., Zielinska, B., Loos, K., Crane, I., Ritter, K. (2000) Characterizing PM<sub>2.5</sub> Emission Profiles for Stationary Sources: Comparison of Traditional and Dilution Sampling Techniques, *Fuel Processing Technology*, 65-66, 177-188. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(99\)00085-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(99)00085-5)
- 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>
- 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). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.5.501>
- Heck, R.M., Farrauto, R.J (2002) *Catalytic Air Pollution Control*, John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 310-324.
- Hinds, W.C., Zhu, Y. (2022) *Aerosol Technology*. John Wiley & Sons, Inc., U.S.A., 4-5.
- Kagawa, M., Ishizaka, Y. (2014) Conversion of SO<sub>2</sub> to Particulate Sulfate during Transport from China to Japan - Assessment by Selenium in Aerosols -, *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1), 269-279. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.12.0343>
- Kim, J.H., Lee, J.J. (2013) Management change of hazardous air pollutants sources and its proposed improvement in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(5), 536-544, (in Korean with English abstract).
- Kim, J.H., Yu, J.H., Song, J.H., Lee, D.Y., Yu, M.S., Hwand, I.J., Kim, J.S., Kim, J.H. (2021) Emission characteristics of PM (PM<sub>total</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), NO<sub>x</sub>, CO and VOCs emitted from LNG-fired gas turbine and small boiler, *Asian Association for Atmospheric Environment*, 15(4). <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.15.4.129>
- Kogure, N., Tamori, L., Ishioka, I., Inoue, T., Tanimoto, T. (1997) Investigation on the measuring method of particulate matter concentration including condensed dust in flue gas, *Journal of Japan Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 162-173, (in Japanese with English abstract). <https://doi.org/10.11298/taiki1995.32.162>

- Lee, J.H., Choi, D.S., Ko, M.J., Park, Y.K. (2017) PM management methods considering condensable PM emissions from stationary source in Seoul and Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 319-325, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.4.319>
- Li, J., Qi, Z., Li, M., Wu, D., Zhou, C., Lu, S., Yan, J., Li, X. (2017a) Physical and chemical characteristics of condensable particulate matter from an ultralow-emission coal-fired power plant, *Energy & Fuels: an American Chemical Society Journal*, 31(2), 1778-1785. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02919>
- Li, Y., Duan, Y., Wang, H., Zhao, S., Chen, M., Liu, M., Wei, H. (2017b) Effects of acidic gases on mercury adsorption by activated carbon in simulated oxy-fuel combustion flue gas, *Energy & Fuels: an American Chemical Society Journal*, 31(9), 9745-9751. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01480>
- Morino, Y., Chatani, S., Fujitani, Y., Tanabe, K., Benjamin, B.N., Jathar, S.H., Takahashi, K., Sato, K., Kumagai, K., Saito, S. (2022) Emissions of condensable organic aerosols from stationary combustion sources over Japan, *Atmospheric Environment*, 289, 119319. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119319>
- Morino, Y., Chatani, S., Tanabe, K., Fujitani, Y., Morikawa, T., Takahashi, K., Sato, K., Sugata, S. (2018) Contributions of condensable particulate matter to atmospheric organic aerosol over Japan, *Environmental Science & Technology*, 52(15), 8456-8466. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01285>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR) (2022) National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual V.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2022) Best Available Techniques Reference Document for Electricity and Steam Production Facility.
- Park, J.M., Lee, S.S. (2021) Characteristics of PM<sub>2.5</sub> 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>
- Song, J., Lu, S., Wu, Y., Zhou, C., Li, X., Li, J. (2020) 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. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125346>
- U.S. EPA (2009) Emission Factors and AP-42 Fifth edition. <https://www.epa.gov/catc/ractbactlaerclearinghouse-rblc-basic-information>
- 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 The Total Environment*, 639, 695-704.
- Wang, K., Yang, I., 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>
- 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 plants, *Aerosol and Air Quality Research*, 15(4), 1672-1680. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.06.0398>
- 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(7), 2010-2016. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.08.0178>
- Yu, J.H., Lim, S.G., Song, J.H., Lee, D.Y., Yu, M.S., Kim, J.H. (2018) A Study on the Change of Condensable Particulate Matter by the SO<sub>2</sub> 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>
- Yu, J.H., Song, J.H., Lee, D.Y., Yu, M.S., Jung, J.H., Chun, S.N., Lee, G.Y., Kim, J.H. (2021) Comparison of PM<sub>total</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> Emission Factors from Coal-fired Power Plants per Load Change, *Asian Association for Atmospheric Environment*, 15(3). <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.104>
- Zheng, C., Shen, J., Zhang, Y., Huang, W., Zhu, X., Wu, X., Chen, L., Gao, X., Cen, K. (2017) Quantitative assessment of industrial VOC emissions in China: Historical trend, spatial distribution, uncertainties, and projection, *Atmospheric Environment*, 150, 116-125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.023>

## Authors Information

송지한(온앤아이(주) 대표) (songjh3004@naver.com)

김종현(한서대학교 대학원 환경공학과 박사과정)  
(st\_moon@naver.com)

이도영 (한서대학교 대학원 환경공학과 박사과정, 온앤아이(주)  
대리) (leedoyoung91@naver.com)

유정훈 (한서대학교 대학원 환경공학과 박사수료)  
(yjh9012@naver.com)

유명상 (온앤아이(주) 대리) (msyu93@naver.com)

정종한 (한서대학교 대학원 환경공학과 박사과정, 동서발전 당진

발전본부 부장) (jjonghan@ewp.co.kr)

천성남 (한국전력공사 전력연구원 부장)  
(sungnam.chun@kepco.co.kr)

김종호 (한서대학교 대학원 환경공학과 교수)  
(kimjh@hanseo.ac.kr)