

석탄화력발전시설에서의 TSP 및 PM₁₀, PM_{2.5} 배출특성

송금주[†] · 문영훈 · 주종호 · 이아영 · 이재복

포항공과대학교 환경연구소

TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} Emission Characteristics in a Coal-fired Power Plant

Geum-Ju Song[†], Young-Hoon Moon, Jong-Ho Joo, A-Yeoung Lee, and Jae-Bok Lee

*Institute of Environmental and Energy Technology, Pohang University of Science and Technology (POSTECH),
Pohang 37673, Korea*

Received February 9, 2018/Revised March 8, 2018/Accepted March 16, 2018

To quantify TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} emission characteristics, these parameters were sampled during all processes in a coal-fired power plant. Concentrations of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} emitted from boiler were high, and the ratios of PM₁₀/TSP and PM_{2.5}/TSP were very low; this result means that the boiler emitted more coarse particles than fine particles. The ESP removed most of the coarse particles. At the FGD inlet the concentrations of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} were low, but the ratios of PM₁₀/TSP and PM_{2.5}/TSP were higher than at the SCR inlet. The ESP removed ~99.8% of the particulates but only ~99.5% of fine particles (PM₁₀) and ~97.3% of ultrafine particles (PM_{2.5}). Among the TSPs emitted from the stack, the proportion of PM₁₀ was 80-85% and of this, the proportion of PM_{2.5} was 47-56%. Therefore, this study demonstrates that the stack of the plant emitted mostly PM₁₀ and PM_{2.5}, and that the ESP as the dust remover installed in the plant should be improved to remove the fine particles.

Key words: TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, Emission, Coal-fired power plant

1. 서 론

국내 환경에서의 먼지 관리는 1983년 총 먼지(Total Suspended Particulate, TSP) 기준을 도입한 후 1995년 먼지의 입경이 10 μm 이하인 입자(Particulate Matter 10, PM₁₀)로 기준이 강화되었고, 현재 PM₁₀은 24시간 평균 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 적용하고 있다. 2015년부터는 먼지의 입경이 2.5 μm 이하인 입자(Particulate Matter 2.5, PM_{2.5})를 추가로 관리하기 시작하였고, 관리기준은 24시간 평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기준으로 관리하고 있다¹⁾. 2014년 환경대기 중 PM₁₀ 자료에 의하면, 전국 255개 측정소 중 38.8%가 PM₁₀ 연평균기준 이상, 91.8%가 24시간 평균기준 이상인 것으로 조사되었다²⁾. 국내 전국 6대 주요도시의 최근

3년 PM_{2.5} 연평균 농도는 32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (28-39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로, 미국 연평균 기준농도³⁾ 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 유럽 연평균 기준농도⁴⁾ 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 높은 수준이고, 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 연평균 권고기준⁵⁾인 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 3배 높은 수준으로 오염 상태가 심각한 것으로 조사되었다. PM₁₀에 대한 인체영향에 대한 연구들에서 PM₁₀ 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 당 0.5% 정도의 사망률이 증가하는 것으로 보고하고 있다^{6,7)}. WHO는 이러한 자료를 근거로 PM₁₀의 연평균 농도를 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 권고하고 있고, 단기노출에 대한 24시간 평균농도 기준은 연평균 농도와의 상관관계에 의해 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 권고하고 있다. PM_{2.5}는 1/400 mm 이하의 먼지입자로, 대기오염물질 중 유해한 물질 중 하나로 분류되고 있다. 코나 기관지에서 걸러지지 않아 폐 기능을 약화시키거나 모세혈관을 통

[†]To whom correspondence should be addressed.

해 심혈관계 질병을 유발하는 것으로 알려져 있다⁸⁾. PM_{2.5}의 장기노출에 대한 인체 영향에 대한 연구들을 통해 PM_{2.5}의 농도 11-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위에서 위해성이 발생하는 것으로 알려져, WHO는 이를 바탕으로 연평균 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 권고하고 있다⁹⁻¹¹⁾. 국내에서도 90년대들어 호흡기 관련 질환환자 및 심혈관 관련 질환환자들이 PM_{2.5}에 의해 조기사망한다는 사실이 밝혀지면서, PM_{2.5} 관리의 필요성이 대두되었다¹²⁾. 이러한 원인에 의한 사망률의 증가는 고령화가 되고 있는 국내 실정에는 사회적 부담이 가중되는 현상이므로 PM_{2.5}의 발생원을 찾아 발생원으로부터 저감방안을 모색하여야 한다. 2014년 국내 대기오염물질배출량 자료¹³⁾에 의하면, TSP 총 배출량은 약 147톤, PM₁₀은 약 98톤, PM_{2.5}는 약 63톤인 것으로 조사되었다. TSP의 오염원별 배출량 비중은 점오염원 82.8%, 이동오염원 16.9%, 기타면오염원 0.3%, PM₁₀ 비중은 점오염원 74.4%, 이동오염원 25.4%, 기타면오염원 0.2%, PM_{2.5} 비중은 점오염원 63.1%, 이동오염원 36.2%, 기타면오염원 0.7%를 차지하는 것으로 조사되었다. 입경이 작아질수록 점오염원에서의 배출량은 감소하고 이동오염원에서의 배출량이 증가하는 것으로 나타났다. 점오염원의 TSP 대비 PM₁₀은 약 60%, PM_{2.5}는 약 33%, PM₁₀ 대비 PM_{2.5}는 약 55%를 나타내고 있었다. 이동오염원의 TSP 대비 PM₁₀은 약 100%, PM_{2.5}는 약 92%, PM₁₀ 대비 PM_{2.5}도 약 92%를 나타내고 있었다. 이는 오염원별 발생하는 먼지의 입경이 매우 상이하고, 이동오염원의 경우 대부분이 미세먼지임을 나타내고 있다. 그러나 전체 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 가장 높은 배출량을 나타내고 있는 것은 점오염원이었고, 점오염원 중 제조연소공정으로 조사되었다. 그러나 입경이 작아질수록 제조연소공정에서의 배출량은 감소하고 에너지산업연소에서의 배출량이 증가하는 경향을 나타내고 있었다. 이는, 총 먼지의 배출에 있어서 제조연소공정은 TSP 대비 PM₁₀ 혹은 PM_{2.5}의 비중이 에너지산업연소시설보다 상대적으로 낮음을 의미한다. 그러므로 점오염원 중 에너지산업연소시설에서의 미세먼지에 대한 지속적인 관리가 필요하다.

기존 많은 연구에서 이미 석탄 연소 시 발생하는 오염물질들이 인간의 건강에 악영향을 미치는 것에 대해 언급하였고, 이중 PM₁₀ 이하의 입자상 물질에 대해서는 많은 문제를 제기해오고 있었다¹⁴⁻¹⁶⁾. 특히, 연간 총 먼지의 발생량 중 석탄 연소 시 발생하는 총 먼지의 양이 1/3을 차지하고 있는 개발도상국들에 대해 문제를 제기하고 있다¹⁷⁾. 정부는 2017년 9월 관계부처 합동으로 ‘미

세먼지 관리 종합대책’을 발표하여 노후 발전기 폐지, 기존 발전기 성능개선, 신규 발전기 배출허용기준 강화 등 노후 석탄화력발전소 미세먼지 저감방안에 대한 세부이행계획을 수립하고, 산업통상자원부와 발전 5사는 ‘30년까지 총 11.6조원을 투자하여 ‘석탄발전 미세먼지 등 오염물질 저감을 위한 이행협약’을 체결하고 환경설비 보강 및 전면교체 등을 추진 예정이다. 석탄화력발전시설에서 미세먼지 저감을 위한 환경설비를 보강하거나 교체하기 위해서는 보강 및 교체의 필요성을 먼저 제시하여야 한다. 합당한 필요성을 제시하기 위해서는 현재 가동중인 시설에서 발생하는 미세먼지와 미세먼지 전구물질의 정확한 측정과 배출특성에 대한 진단이 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 국내 가동중인 석탄화력발전시설 1기를 대상으로 전 공정에서 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출특성을 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상시설 및 시료

일반적으로 석탄화력발전소는 보일러로 연료가 공기와 함께 투입되면서 연소과정이 이루어진다. 이때 발생하는 연소가스 중 질소산화물을 처리하기 위해서 선택적 환원 촉매장치(Selective Catalytic Reduction System, SCR)를, 먼지를 제거하기 위해서 전기 집진장치(Electrostatic Precipitator, ESP) 혹은 여과집진장치(Fabric Filter, FF)를, 황산화물을 제거하기 위해서 탈황설비(Flue Gas Desulfurization System, FGD)를 거치고 굴뚝으로 배출된다. Fig. 1은 일반적인 화력발전시설의 공정도를 나타내고 있다.

국내 용량이 큰 석탄화력발전시설은 방지시설의 처리용량의 문제로 하나의 보일러에서 2개의 배출가스 흐름 공정으로 나누어지는 경우가 대부분이다. 본 연구 대상 시설도 이러한 공정을 가지고 있고 Fig. 2에 배출가스 흐름도 및 측정지점을 나타내었다. 본 연구에서는 드럼타입의 보일러를 가지고 유연탄을 사용하여 500MW 전기를 생산하는 국내 석탄화력발전시설 1기를 대상으로 전 공정에서 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}를 측정하여 공정별 배출특성을 파악하였다. 또한 ①과 ②지점, ③과 ④지점, ⑥과 ⑦지점은 동시에 측정하여 A라인과 B라인을 비교 분석하였다.

2.2. 시료채취 및 분석

대기오염공정시험기준 “ES 01112.1-배출가스 입자상

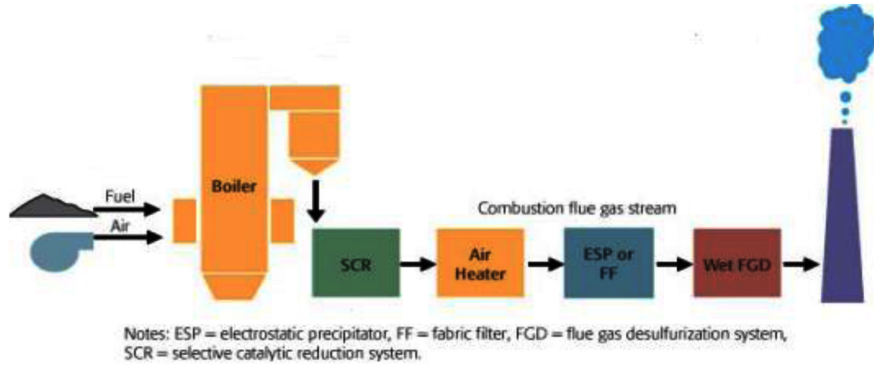


Fig. 1. Process of a coal-fired power plant.

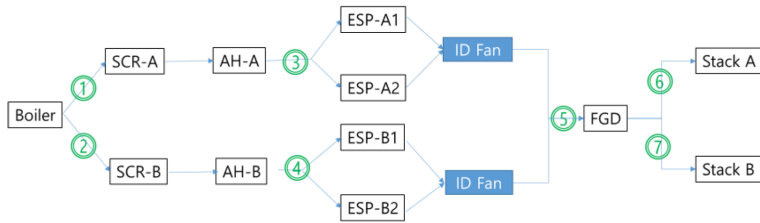


Fig. 2. Diagram of exhaust gas flow and sampling points.

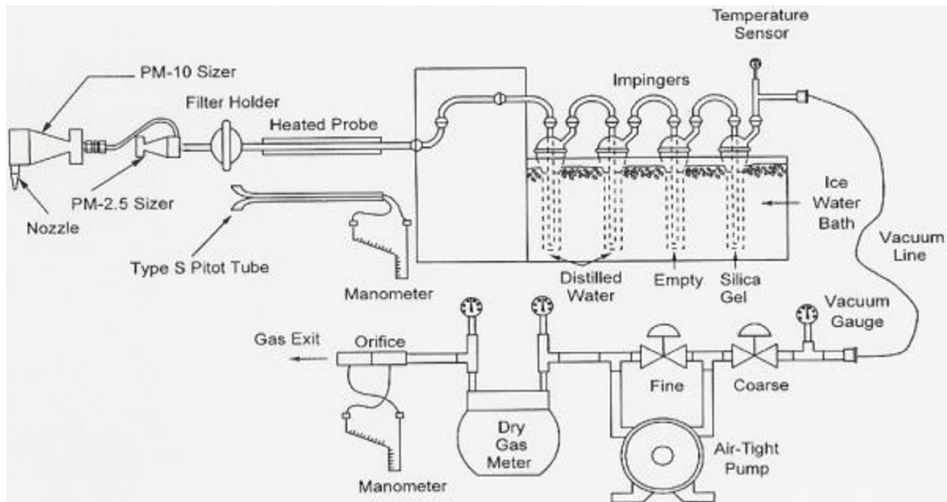


Fig. 3. Sampling train for TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in the stack.

물질 채취방법¹⁸⁾과 "ES 01317.1a-배출가스 중 미세먼지(PM₁₀ 및 PM_{2.5}) 채취방법¹⁹⁾에 준하여 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}를 총 3차에 걸쳐 채취하였다. 1차는 3월 27일~4월 7일, 2차는 8월 7~17일, 3차는 9월 11~15일에 Fig. 2에서 나타내는 지점에서 시료를 채취하였다. TSP, PM₁₀,

PM_{2.5} 시료는 105°C 이상에서 2시간 이상 강열된 석영재질의 원형여지로 Fig. 3과 같은 트레인을 이용하여 TSP 및 PM₁₀, PM_{2.5}를 채취하였다. PM_{2.5}는 Fig. 3과 동일한 시스템으로 채취하고, PM₁₀은 PM_{2.5} Sizer cyclone을 부착하지 않고 채취한다. TSP는 PM₁₀ Sizer

cyclone과 PM_{2.5} Sizer cyclone 없이 Filter Holder에 직접 노즐을 연결하여 채취한다.

Fig. 3의 Filter Holder에 강열 처리된 원형여지를 넣고 시료를 채취한 후 여지를 개별 여지케이스에 보관하여 실험실로 운반하였다. 실험실로 운반된 여지는 수분을 제거하고 g단위 소수점 이하 4째자리까지 측량이 가능한 저울(Model: METTER MT/UMT Balances)을 사용하여 중량 농도값을 측정하였다. 중량 농도값에 가스 채취량으로 환산하여 배출가스 중 먼지농도를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공정별 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 농도특성

Table 1은 측정지점에서 채취된 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도를 나타내고 있다. A line TSP는 SCR 전단 2,610-5,061 (3,943) mg/Sm³, ESP 전단 2,725-2,781 (2,753) mg/Sm³, FGD 전단 13.5-18.1 (15.8) mg/Sm³, 굴뚝5.5-8.5 (7.4) mg/Sm³으로 배출된다. A line PM₁₀은 SCR 전단 987-2,019 (1,336) mg/Sm³, ESP 전단 675-832 (776) mg/Sm³, FGD 전단 10.6-14.3 (11.8) mg/Sm³, 굴뚝4.8-7.6 (6.3) mg/Sm³으로 배출된다. A line PM_{2.5}는 SCR 전단 103.4-122.0 (110.6) mg/Sm³, ESP 전단 76.6-326.2 (175.1) mg/Sm³, FGD 전단 3.4-8.8 (5.5) mg/Sm³, 굴뚝2.0-3.5 (3.0) mg/Sm³으로 배출된다. ESP 전단까지는 TSP, PM₁₀은 크게 감소하지 않았고, PM_{2.5}는 다소 증가하는 경향을 나타냈다. TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 ESP에서 대부분이 제거되고 FGD를 거치면서 다소 제거되는 것으로 나타났다. B line TSP

는 SCR 전단 2,396-4,279 (3,205) mg/Sm³, ESP 전단 1,728-5,794 (4,131) mg/Sm³, FGD 전단 13.5-18.1 (15.8) mg/Sm³, 굴뚝 7.9-8.7 (8.3) mg/Sm³으로 배출된다. B line PM₁₀은 SCR 전단 607-1,453 (965) mg/Sm³, ESP 전단 435-885 (664) mg/Sm³, FGD 전단 10.6-14.3 (11.8) mg/Sm³, 굴뚝 6.3-6.9 (6.6) mg/Sm³으로 굴뚝으로 배출된다. B line PM_{2.5}는 SCR 전단 63.0-114.8 (87.7) mg/Sm³, ESP 전단 96.4-230.7 (146.3) mg/Sm³, FGD 전단 3.4-8.8 (5.5) mg/Sm³, 굴뚝 3.0-3.5 (3.3) mg/Sm³으로 배출된다. ESP 전단까지는 TSP와 PM_{2.5}는 SCR을 거치면서 다소 증가하였고, PM₁₀은 감소하는 경향을 나타냈다. TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 ESP에서 대부분이 제거되고, FGD를 거치면서 다소 제거되는 것으로 나타났다. 하나의 보일러에서 발생된 연소가스가 2개의 line으로 나누어져 배출되는 공정에서는 서로 다른 line의 배출가스 흐름이 동일하다고 볼 수 없다. 이는 A line과 B line이 동일한 공정을 사용한다 하여도, 공정구조 및 덕트구조, 그에 따른 연소가스 흐름 방향, 속도 등의 차이에 의해 다르게 나타난다. 이는 각 line별 동일 공정으로 유입되는 연소가스의 유량, 유속, 가스의 압력 등이 다르게 나타나는 것으로 보아 추정이 가능하였다. 또한 1, 2, 3차 측정농도를 비교해보면, 공정별 일정한 수준의 농도가 배출되고 있지 않음을 알 수 있었고, 특히 3차의 경우는 1, 2차와는 공정별 경향이 다소 다르게 나타나고 있었다. 이는 3차 측정 시 조업조건이 1차 및 2차 측정시의 조업조건과는 많은 차이가 있었다는 것을 의미한다. 먼지에 가장 영향을 미치는 것은 연료로 사용된 탄의 종류, 혼소된 폐기물의 유무 및 종류, 연소조건 등이 영향을 미치는데, 본 연구를

Table 1. Concentration of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in A and B lines (Unit: mg/ Sm³, O₂ 6%)

Item	Sample No.	A line				B line			
		SCR Inlet	ESP Inlet	FGD Inlet*	Stack	SCR Inlet	ESP Inlet	FGD Inlet*	Stack
TSP	1	2,610.2	-	13.5	5.5	2,395.5	1,728.4	13.5	-
	2	5,060.9	2,780.8	18.1	8.5	2,941.4	5,793.6	18.1	7.9
	3	4,157.7	2,724.5	15.9	8.2	4,279.0	4,872.3	15.9	8.7
	Avg.	3,942.9	2,752.7	15.8	7.4	3,205.3	4,131.4	15.8	8.3
PM ₁₀	1	1,001.5	820.0	10.6	4.8	606.7	434.8	10.6	-
	2	2,018.6	832.2	14.3	7.6	1,452.9	672.0	14.3	6.3
	3	987.2	674.7	10.6	6.4	834.1	885.0	10.6	6.9
	Avg.	1,335.8	775.6	11.8	6.3	964.6	663.9	11.8	6.6
PM _{2.5}	1	106.3	326.2	4.3	2.0	85.4	96.4	4.3	-
	2	122.0	122.5	8.8	3.5	114.8	111.9	8.8	3.0
	3	103.4	76.6	3.4	3.4	63.0	230.7	3.4	3.5
	Avg.	110.6	175.1	5.5	3.0	87.7	146.3	5.5	3.3

위한 측정에서는 유연탄만 사용하였으나, 탄의 종류들에 대해서는 현장에서 동일하게 유지하기 곤란하였다. 탄의 발열량으로 연소효율을 산정하여 탄을 사용하는데, 여러 종류의 탄을 혼합하여 사용할 경우, 탄의 종류에 따라 발열량의 차이로 혼합비율이 달라지고, 사용되는 탄의 종류에 따라 오염물질의 종류 및 양이 달라지게 된다. 또한 상용화 시설에서는 항상 동일한 조업조건의 유지가 어렵기 때문에 매번 일정한 수준의 농도가 검출되지 못하였다. 본 연구에서는 탄의 종류 및 조업의 차이를 1, 2, 3차 측정여지들로 비교해 보았다. 1차 측정여지들의 색상은 검회색을, 2차 측정여지들은 갈색을, 3차 측정여지들은 회갈색 혹은 검회색을 주로 띠고 있었다. 이는 기본적으로 사용된 탄의 종류 차이에 의해 발생하는 입자상 물질의 색상이 다르게 나타난 것으로 추정할 수 있다. 또한, 여지들의 색상은 비교적 균일하였으나, 3차에 측정된 여지들은 2~3가지의 색상들로 분포되어 있었다. 이는 3차 측정시에 1, 2차 측정시보다 더 다양한 탄들이 사용되었고, 조업조건 또한 매우 다르게 이루어진 것으로 추정된다. Liu et al. 연구²⁰⁾에서도 로의 온도, 연소되는 석탄의 입경, 연소조건에서의 산소의 양 등이 미세먼지의 농도 및 분포에 영향을 끼친다고 보고하고 있다.

Table 2는 기존 조사자료에 의한 석탄화력발전시설 굴뚝 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 농도범위와 본 연구에서의 농도범위를 나타내고 있다. 4개 조사 모두 먼지중량농도에 의한 측정방법으로 US EPA method²¹⁾ 및 이를 기준으로 작성된 국내 공정시험기준^{18,19)}에 의해 조사가 이루어진 자료들이다. 조사대상시설의 공정은 Fig. 1과 모두 유사한 공정을 가지고 있으며, 500 MW 용량으로 유연탄을 주로 사용한 시설들이다. Table 2에서와 같이 각 조사자료에서의 농도범위가 매우 상이하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급했던 것과 같이, 사용된 연료의 종류(탄의 종류, 탄의 혼합비율), 조업조건, 공정구조 등이 방지시설의 종류보다 입자상 물질의 거동에 더 영향을 미치고 있는 것으로 보여진다.

Table 2. Concentration of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in the stack of coal-fired power plants in other studies (Unit: mg/ Sm³, O₂ 6%)

Investigation Year	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
2009 ²²⁾	1.5-6.1	1.4-5.4	1.0-2.0
2010 ²³⁾	0.6-5.3	0.6-5.0	0.4-3.4
2013 ²⁴⁾	0.8-2.0	0.9-2.0	0.8-1.9
this study	5.5-8.7	4.8-7.6	2.0-3.5

3.2. 공정별 PM₁₀/TSP, PM_{2.5}/TSP 비율

Table 3은 A line과 B line의 PM₁₀/TSP, PM_{2.5}/TSP, PM_{2.5}/PM₁₀ 비율을 각 공정에서 나타내고 있다. A line의 PM₁₀/TSP는 SCR 전단 23.7-39.9 (34.0)%, ESP 전단 24.8-29.9 (27.4)%, FGD 전단 66.7-78.5 (74.7)%, 굴뚝 78.0-89.4 (84.9)%를 나타내는 것으로 조사되었다. ESP 전까지는 TSP 중 PM₁₀이 25-40%로 낮게 나타난 것은 보일러에서 발생하는 입자상 물질 중에는 조대입자가 많음을 의미한다. ESP를 지나면서 TSP 중 PM₁₀의 비중이 증가하고, FGD를 지나면서 다시 TSP 중 PM₁₀의 비중이 다소 증가하는 것으로 조사되었다. 이는 ESP에서

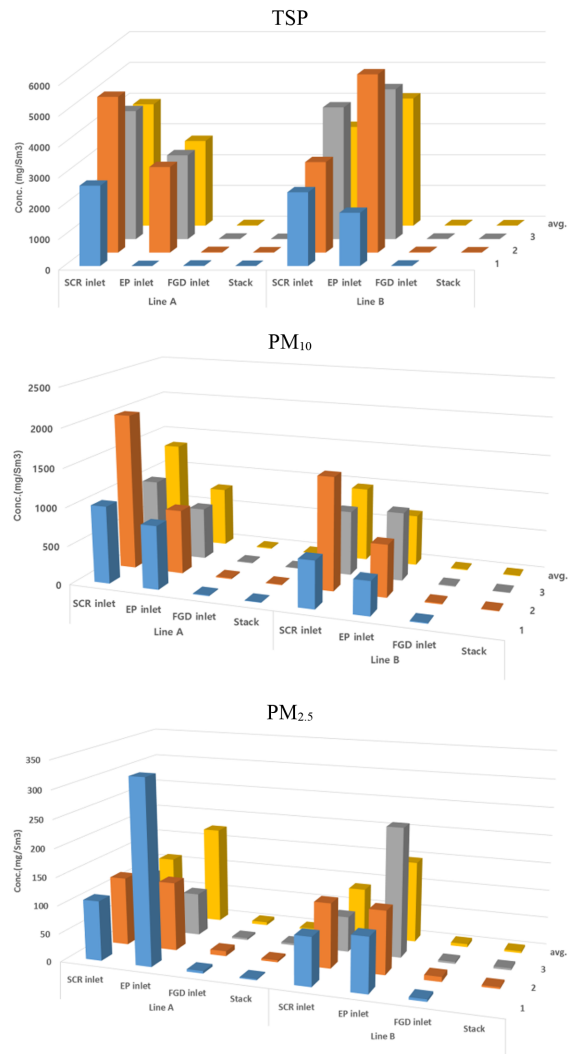


Fig. 4. Distribution of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in A and B lines.

Table 3. Ratio of TSP vs PM₁₀, PM_{2.5} in A and B lines (Unit: %)

Item	Sample No.	A line				B line			
		SCR Inlet	ESP Inlet	FGD Inlet	Stack	SCR Inlet	ESP Inlet	FGD Inlet	Stack
PM ₁₀ / TSP	1	38.4	-	78.5	87.3	25.3	25.2	78.5	-
	2	39.9	29.9	79.0	89.4	49.4	11.6	79.0	79.7
	3	23.7	24.8	66.7	78.0	19.5	18.2	66.7	79.3
	Avg.	34.0	27.4	74.7	84.9	31.4	18.3	74.7	79.5
PM _{2.5} / TSP	1	4.1	-	31.9	36.4	3.6	5.6	31.9	-
	2	2.4	4.4	48.6	41.2	3.9	1.9	48.6	38.0
	3	2.5	2.8	21.4	41.5	1.5	4.7	21.4	40.2
	Avg.	3.0	3.6	34.0	39.7	3.0	4.1	34.0	39.1
PM _{2.5} / PM ₁₀	1	10.6	39.8	40.6	41.7	14.1	22.2	40.6	-
	2	6.0	14.7	61.5	46.1	7.9	16.7	61.5	47.6
	3	10.5	11.4	32.1	53.1	7.6	26.1	32.1	50.7
	Avg.	9.0	22.0	44.7	46.7	9.8	21.6	44.7	49.2

PM₁₀ 이상의 입자는 대부분이 제거되고, FGD를 지나면서 다시 PM₁₀ 이상의 입자가 다소 제거되는 것을 알 수 있었다. A line의 PM_{2.5}/TSP는 SCR 전단 2.4-4.1 (3.0)%, ESP 전단 2.8-4.4 (3.6)%, FGD 전단 21.4-48.6 (34.0)% 굴뚝 36.4-41.5 (39.7)%로 대기로 배출되는 TSP 중 약 40%정도가 PM_{2.5}인 것으로 조사되었다. ESP 전까지는 TSP 중 PM_{2.5}가 2.8-4.4%로 매우 낮게 나타난 것은 보일러에서 발생하는 입자상 물질 중에는 조대입자가 많음을 의미한다. ESP를 지나면서 TSP 중 PM_{2.5}의 비중이 증가하였다. A line의 PM_{2.5}/PM₁₀는 SCR 전단 6.0-10.5 (9.0)%, ESP 전단 11.4-39.8 (22.0)%, FGD 전단 32.1-61.5 (44.7)%, 굴뚝 41.7-53.1 (46.7)%로 대기로 배출되는 TSP 중 약 85% 정도가 PM₁₀이고, 이 중 PM_{2.5}가 거의 50%를 차지하고 있는 것으로 나타났다. 그러므로 A line에서의 입자상 물질의 거동은 보일러에서 발생하는 입자상 물질은 PM₁₀ 이상의 입자가 대부분이고, ESP를 지나면서 PM₁₀ 이상의 입자가 대부분 제거되어 굴뚝으로는 배출되는 입자상 물질에는 PM₁₀ 이하의 입자상 물질이 약 85%를 차지하고 이중 약 47%가 PM_{2.5} 이하의 입자상 물질인 것으로 조사되었다.

B line의 PM₁₀/TSP는 SCR 전단 19.5-49.4 (31.4)%, ESP 전단 11.6-25.2 (18.3)%, FGD 전단 66.7-79.0 (74.7)%, 굴뚝 79.3-79.7 (79.5)%를 나타내는 것으로 조사되었다. ESP 전까지는 TSP 중 PM₁₀이 11.6-25.2%로 낮게 나타난 것은 보일러에서 발생하는 입자상 물질 중에는 조대입자가 많음을 의미한다. ESP를 지나면서 TSP 중 PM₁₀의 비중이 증가하고, FGD를 지나면서 다시 TSP 중 PM₁₀의 비중이 다소 증가하는 것으로 조사

되었다. 이는 ESP에서 PM₁₀ 이상의 입자는 대부분이 제거되고, FGD를 지나면서 다시 PM₁₀ 이상의 입자가 다소 제거되는 것을 알 수 있었다. B line의 PM_{2.5}/TSP는 SCR 전단 1.5-3.9 (3.0)%, ESP 전단 1.9-5.6 (4.1)%, FGD 전단 21.4-48.6 (34.0)%, 굴뚝 38.0-40.2 (39.1)%로 대기로 배출되는 TSP 중 약 39% 정도가 PM_{2.5}인 것으로 조사되었다. ESP 전까지는 TSP 중 PM_{2.5}가 1.9-5.6%로 매우 낮게 나타난 것은 보일러에서 발생하는 입자상 물질 중 조대입자가 많음을 의미한다. ESP를 지나면서 TSP 중 PM_{2.5}의 비중이 증가하였다. B line의 PM_{2.5}/PM₁₀은 SCR 전단 7.6-14.1 (9.8)%, ESP 전단 16.7-26.1 (21.6)%, FGD 전단 32.1-61.5 (44.7)%, 굴뚝 47.6-50.77 (49.2)%로 대기로 배출되는 PM₁₀ 및 PM_{2.5}가 약 50%를 넘게 차지하고 있음을 나타내고 있다. 그러므로 B line도 A line과 같이, 보일러에서 발생하는 입자상 물질은 PM₁₀ 이상의 입자가 대부분이고, ESP를 지나면서 PM₁₀ 이상의 입자가 대부분 제거되어 굴뚝으로는 배출되는 입자상 물질에는 PM₁₀ 이하의 입자상 물질이 80%를 차지하고 이중 56%가 PM_{2.5} 이하의 입자상 물질인 것으로 조사되었다. Liu et al. 연구²⁰⁾에 의하면, 사이클론은 PM₁₀분리에 전혀 효과가 없고, ESP에서는 PM_{2.5}의 제거효율이 매우 낮다고 제시하고 있다.

Table 4는 기존 조사자료에 의한 석탄화력발전시설 굴뚝에서의 TSP vs. PM₁₀, PM_{2.5} 비율을 나타내고 있다. 자료를 보면, 굴뚝으로 배출되는 입자상 물질 중 PM₁₀ 이하의 입자상 물질이 평균 약 78%, PM_{2.5} 이하의 입자상 물질이 평균 약 61%인 것으로 보고되었다. 이는 본 조사자료보다 다소 높기는 하지만, 굴뚝에서 배출되

Table 4. Ratio of TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} in the stack of coal-fired power plants in other studies (Unit: %)

Investigation Year	PM ₁₀ /TSP	PM _{2.5} /TSP	PM _{2.5} /PM ₁₀
2009 ²¹⁾	82-109	34-86	38-131
2010 ²²⁾	64-104	24-94	38-91
2013 ²³⁾	93-106	83-105	83-104
This study	78-89	38-41	42-68

는 입자상 물질 중 많은 부분이 PM₁₀ 이하 및 PM_{2.5} 이하 입자상 물질인 것을 보여주고 있다.

이러한 비율에 의해 대상시설 집진설비에서 입자상 오염물질의 제거율을 살펴보면, 보일러에서 발생된 TSP는 99.7~99.8%, PM₁₀은 99.3~99.5%, PM_{2.5}는 96.3~97.3% 제거된 후 굴뚝으로 배출된다. 이는 입경이 작을수록 제거효율이 낮음을 나타냈는데, 이는 입경이 작은 미세먼지의 대기배출이 높음을 의미한다. 입자상은 ESP에서 대부분이 제거되지만 FGD에서도 다소 제거되고 있음을 알 수 있었고, FGD에서도 입경이 작을수록 제거효율이 낮음을 알 수 있었다. 그러므로, 배출가스 중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 제거효율을 높이기 위해서는 현재 사용하고 있는 집진시설의 개선이 필요하다.

3.3. 대상시설 보일러에서 발생되어 굴뚝으로 배출되는 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}량

Table 5는 하나의 보일러에서 발생되어 A line과 B line으로 분리되는 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 발생량과 최종 굴뚝에서 대기로 배출되는 배출량을 나타내고 있다. 각 공정에서는 보일러에서 발생하는 배출가스 외에 유량에 영향을 미칠 수 있는 요소들이 있기 때문에 보일러 전 단과 굴뚝에서의 유량만으로 보일러에서의 발생량과 굴뚝에서의 배출량을 산정하였다. 보일러에서 발생된 TSP는 약 29 ton/day, PM₁₀은 9.6 ton/day, PM_{2.5}는 약 0.8 ton/day이 발생하여, A line으로 TSP는 약 55%, PM₁₀은 약 58%, PM_{2.5}는 약 63%, B line으로 TSP는 45%, PM₁₀은 42%, PM_{2.5}는 37%로 배출되고 있었다. 굴뚝에서의 TSP 배출량은 163 kg/day, PM₁₀은 131 kg/day, PM_{2.5}는 63 kg/day로 산정되었다. 3.2에서 나타냈듯이 TSP 배출량의 80% 이상이 PM₁₀, 약 40%가 PM_{2.5}임을 알 수 있었다. 보일러에서 발생된 먼지는 집진시설을 거친 후 굴뚝으로 먼지를 배출하게 되는데, 본 대상시설 집진설비의 제거효율은 TSP에 있어서는 99.4~99.7%, PM₁₀에 있어서는 97.3-99.3%, PM_{2.5}는 89.0-95.9%를 나타내고 있다. 이는 보일러에서 발생되는 배출가스 중

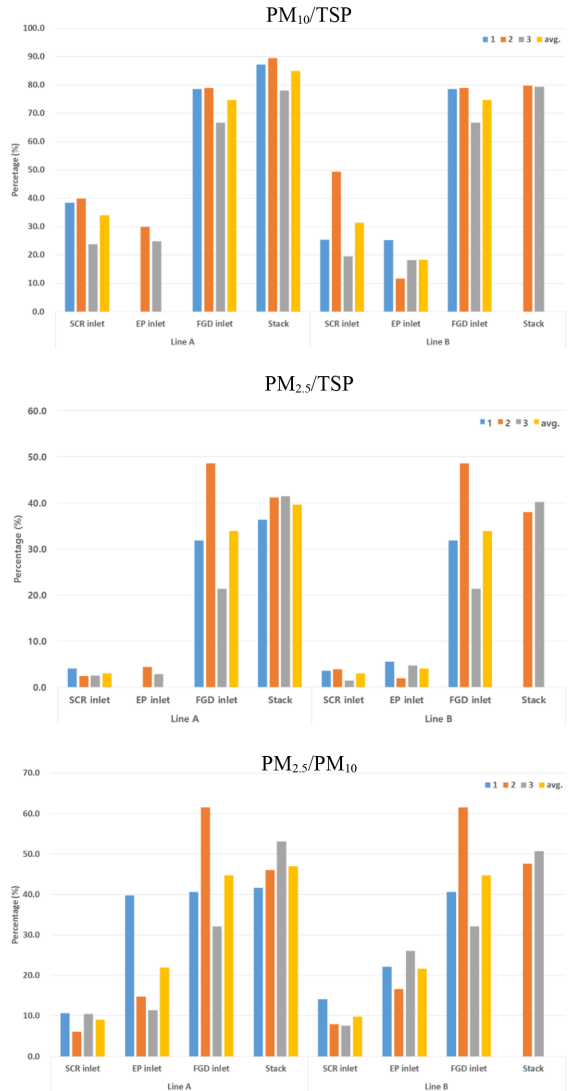


Fig. 5. Distribution of PM₁₀/TSP, PM_{2.5}/TSP and PM_{2.5}/PM₁₀ in A and B lines.

입자상 오염물질이 방지시설을 통과하여 굴뚝으로 배출되기까지 PM₁₀이상의 입자는 99% 이상 제거되고 있었으나, PM₁₀과 PM_{2.5}는 TSP보다 제거효율이 낮게 나타났다. PM₁₀은 97%, PM_{2.5}는 90% 이하를 나타내는 경우도 있었다. 그러므로 본 대상시설의 경우, 현재 설치되어 있는 집진시설로는 PM₁₀ 이하의 입경을 가지는 입자상 오염물질, 특히 PM_{2.5} 이하의 입경을 가지는 입자상 오염물질에 대한 제거를 위해서는 개선이 필요한 것으로 나타났다.

Table 5. TSP, PM₁₀ and PM_{2.5} Emission from SCR Inlet and Stack of A and B lines (Unit: kg/day)

Item	Sample No.	A line			B line		
		SCR Inlet	Stack	Removal Efficiency (%)	SCR Inlet	Stack	Removal Efficiency (%)
TSP	1	10,867	137	98.7	10,109	-	
	2	19,122	60	99.7	11,470	68	99.6
	3	16,945	44	99.7	17,463	73	99.4
	Avg.	15,794	92	99.4	13,035	71	99.5
PM ₁₀	1	4,198	114	97.3	2,519	-	-
	2	8232	54	99.3	5,903	55	99.1
	3	4,294	34	99.2	3,545	58	98.4
	Avg.	5,619	75	98.7	4,008	56	98.6
PM _{2.5}	1	449	47	89.6	364	-	-
	2	507	25	95.1	473	26	94.4
	3	444	18	95.9	268	29	89.0
	Avg.	467	35	92.4	369	28	92.5

4. 결 론

본 연구에서는 국내 500MW 용량의 유연탄 사용 화력발전시설에서 배출되는 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

석탄화력발전시설 보일러에서는 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 모두 매우 높은 농도로 발생되고, TSP 대 PM₁₀ 혹은 PM_{2.5}의 비율이 낮은 것을 알 수 있다. 이는 보일러에서 발생하는 TSP에는 입경이 10 μm 이상의 입자상 오염물질이 많음을 나타내는 것이다. 따라서, 보일러에서 발생하는 TSP, PM₁₀, PM_{2.5} 농도 및 분포값은 방지시설에서 집진설비의 제거효율을 산출하기 위한 기본적인 자료로의 활용이 가능하다. 집진시설의 제거효능은 방지시설 후단에서의 농도값으로 제시하기 때문에 초기 발생량에 따라 제거효율이 달라질 수 있다. 그러므로 초기 발생농도 및 분포비는 방지시설 성능을 좌우하는 중요한 인자 중 하나임이 분명하므로 초기 발생농도 및 분포값 조사는 매우 중요하다.

배출가스가 집진시설인 ESP를 지나서야 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도들이 대폭 감소하는 것을 볼 수 있었는데, TSP는 평균 99.4-99.5%, PM₁₀은 평균 98.6~98.7%, PM_{2.5}는 평균 92.4-92.5%의 제거율을 나타냈다. 이는 현재 부착되어 있는 ESP에서는 입경이 10 μm 이하, 특히 입경이 2.5 μm 이하의 미세먼지에 대한 제거효율이 낮으므로 미세먼지의 배출저감을 위해서는 집진설비의 보강이 필요하다.

굴뚝에서 배출되는 TSP 중 PM₁₀은 약 80~85% 정도로 높게 나타났고, 이중 PM_{2.5}가 50% 이상인 것으로

나타났다. 이는 굴뚝으로 배출되는 입자상 물질의 대부분이 PM₁₀이고, 그 중 절반이 PM_{2.5}임을 나타내고 있다. 따라서 석탄화력발전시설 굴뚝에서 대기로 배출되는 입자상 오염물질은 약 80% 이상이 미세먼지로의 배출임을 확인할 수 있었다.

본 대상시설 보일러에서 발생하는 TSP 발생량을 100%로 기준하여 보일러에서의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 발생량을 산정하면, PM₁₀은 31-36%, PM_{2.5}는 약 3% 발생되는 것으로 나타났다. 그러나 굴뚝에서 배출되는 TSP 배출량을 100%로 기준하여 굴뚝에서의 PM₁₀과 PM_{2.5}의 발생량을 산정하면, PM₁₀은 79-82%, PM_{2.5}는 38-39% 배출되는 것으로 나타났다. 이는 입경 10 μm 이하의 미세먼지가 본 대상시설 집진설비에서는 제거효율이 낮음을 나타내고 있다. 따라서 입자상 오염물질의 관리를 위해서는 향후 TSP 뿐만 아니라 PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 측정 및 배출량 산정이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 환경부, “환경정책기본법”, 2017.
2. 환경부, “대기환경연보”, 2015.
3. US EPA, “National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)”, 2012.
4. European Environment Agency, “Directive 2008/50/EC”, 2008.
5. WHO, “Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen dioxide and Sulfur dioxide”, Global Update, 2005.
6. K. Katsouyanni, G. Touloumi, E. Samoli, A. Gryparis, A. Le Tertre, Y. Monopoli, G. Rossi, F. Ballester, A.

- Boumghar, R. Anderson, B. Wojtyniak, A. Paldy, R. Braunstein, J. Pekkanen, C. Schindler and J. Schwartz J, "Confounding and effect modification in short-term effects of ambient particles on total mortality-results from 29 European cities within the APHEA2 project", *Epidemiology*, **2011**, 12, 521-531.
7. A. Cohen and M. Ezzat, "Mortality impacts of urban pollution-Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors", Geneva, *World Health Organization*, **2004**, 1352-1434.
 8. K. R. Smith, J. M. Veranth, A. A. Hu, J. S. Lighty and A. E. Aust, "Interleukin-8 levels in human lung epithelial cells are increased in response to coal fly ash and vary with the bioavailability of iron, as a function of particle Size and source of coal", *Chem. Res. Toxicol.*, **2000**, 13, 118-125.
 9. O. W. Dockery, C. A. Pope and X. Xu, "An association between air pollution and mortality in six U.S. cities", *New England Journal of Medicine*, **1993**, 329, 1753-1759.
 10. Health Effects Institute, "Reanalysis of harvard six-cities study and american cancer society study of particulate air pollution and mortality" A special report of the institute's epidemiology reanalysis project, Cambridge, MA, **2000**.
 11. C. A. Pope, M. L. Dockery and R. W. Long, "Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution", *Journal of the American Medical Association*, **2002**, 287, 1132-1141
 12. 국립환경과학원, "PM_{2.5} 저감효과 분석 및 향후 관리정책 로드맵 수립", **2012**.
 13. 국립환경과학원, "국가대기오염물질배출량", **2014**.
 14. I. M. Smith and L. L. Sloss, "PM_{10/2.5}-emission and effects", IEA coal research report, London, **1998**.
 15. G. C. England, B. Zielinska and K. Loss, "Characterizing PM_{2.5} emission profiles foe stationary source-Comparison of traditional and dilution sampling techniques", *Fuel Proce. Technol*, **2000**, 65-66, 177-188.
 16. L. L. Sloss, "The importance of PM_{10/2.5} emission", IEA Clean Coal Centre report, London, **2004**.
 17. H. N. Soud and Z. Wu, "East Asia-air pollution control and coal fired power generation", IEA coal research report, London, **2000**.
 18. 환경부, "ES 01112.1-배출가스 입자상 물질 채취방법", 대기오염시험기준, **2015**.
 19. 환경부, "ES 01317.1a-배출가스 중 미세먼지(PM₁₀ 및 PM_{2.5}) 채취방법", 대기오염공정시험기준, **2015**.
 20. X. Liu, M. Minghou, H. Yao, D. Yu, X. Gao, Q. Cao and Y. Cai, "Effect of combustion parameters on the emission and chemical composition of particulate matter during coal combustion", *Energy & Fuels*, **2007**, 21, 157-162.
 21. U.S.EPA, "Determining PM₁₀ and PM_{2.5} Emission from Stationary Source", EPA Method, USA, **2008**.
 22. 국립환경과학원, "국내 배출원을 고려한 대기오염물질 성분비(speciate) 자료 구축 연구(II)", **2009**.
 23. 국립환경과학원, "국내 배출원을 고려한 대기오염물질 성분비(speciate) 자료 구축 연구(III)", **2010**.
 24. 국립환경과학원, "PM_{2.5} 다량배출사업장 성분비 구축 및 관리방안 마련 연구(I)", **2013**.