

화력발전소에서의 국내 배출계수 산정 방안 연구 - 먼지를 중심으로 -

Estimating PM Emission Factor from Coal-Fired Power Plants in Korea

장기원 · 김형천 · 이용미 · 송덕종 · 정노을 · 김상균 · 홍지형 · 이석조 · 한종수*

국립환경과학원 대기공학연구과

(2011년 3월 23일 접수, 2011년 8월 15일 수정, 2011년 9월 19일 채택)

Kee-Won Jang, Hyung-Chun Kim, Yong-Mi Lee, Deok-Jong Song, Noel Jung,
Sang-Kyun Kim, Ji-Hyung Hong, Suk-Jo Lee and Jong-Su Han*
Air Quality Control Research Division, National Institute of Environmental Research

(Received 23 March 2011, revised 15 August 2011, accepted 19 September 2011)

Abstract

In Korea, PM (Particulate Matter) emissions caused by coal-fired power plants are measured by a system, so called Clean Air Policy Support System (CAPSS), which uses foreign emission factors. However, the system fails to reflect the characteristics of domestic power plants. In this regard, this study aims to develop local, accurate domestic emission factors. The study measured the amount of TSP (Total Suspended Particulates), PM10 and PM2.5 by collecting samples from the latter parts of pollution control devices which were installed at 3 bituminous-fired power plants and 3 anthracite-fired power plants.

The results showed that the average concentrations of TSP, PM10 and PM2.5 measured at bituminous-fired power plants were 4.63 mg/Sm³, 2.96 mg/Sm³ and 3.07 mg/Sm³ respectively, much higher than those from anthracite-fired power plants (2.96 mg/Sm³, 2.47 mg/Sm³ and 1.37 mg/Sm³, respectively). In addition, bituminous-fired power plants showed higher ratios of PM10/TSP and PM2.5/TSP with 0.66 and 0.92, respectively, compared to 0.82 and 0.46, the ratios of PM10/TSP and PM2.5/TSP measured in anthracite-fired power plants. Emission factors based-on concentration measurements were also higher for bituminous-fired power plants, and PM with smaller particles tended to have bigger difference in emission factors between the two fuels.

This study calculated the amount of PM emissions by using the estimated emission factors. When it comes to the PM emissions, it was less than that of CAPSS while similar to that of CleanSYS in its amount. It is expected that the emission factors developed by this study will be used in Korea replacing foreign emission factors currently used in Korea by ensuring the objectivity and reliability as domestic emission factors.

Key words : Coal-fired plant, Emission, Emission factor, CAPSS, CleanSYS

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7296, E-mail : hjs9733@me.go.kr

1. 서 론

우리나라는 최근 들어 깨끗한 환경, 맑은 하늘에 대한 국민의 기대치가 높아지고 산업시설에서 배출되는 인체에 유해한 성분을 함유한 각종 오염물질이 인체에 미치는 위해성에 관심이 증가하면서 유해물질에 대한 관리를 강화하는 추세에 있다. 특히 먼지는 인체의 위해성뿐만 아니라 스모그 현상을 유발하거나 시정에 영향을 주어 체감 오염도를 증가시킨다(Oh *et al.*, 2009). 또한 미세먼지가 대기 중에 존재할 경우 태양 복사에너지의 균형을 깨트리면서 지구 냉각화와 같은 기후변화 문제를 초래하기도 한다(Poisar *et al.*, 2001). 이처럼 인체의 위해성뿐만 아니라 대기환경이나 기후변화에도 영향을 미치는 입자상 오염물질은 대기오염 문제를 해결하고 대기질을 개선하는 데 있어 중요한 관리대상물질 중의 하나이다.

현재 국가대기오염물질 배출량을 산정하는 CAPSS(Clean Air Policy Support System)에서는 아직 PM2.5를 산정하고 있지 않지만 TSP와 PM10 배출량 산정 시 미국 EPA 배출계수 및 EPA에서 제시하고 있는 성분비(SPECIATE) 자료를 활용(NIER, 2010)하고 있다. 그러나 이러한 국외 자료를 활용하여 산정된 배출량은 국내 배출원의 특성을 반영하는 데 한계가 있으며, 특히 개별 사업장의 오염물질별 배출량은 국외 배출계수를 적용했을 경우 실측 배출량과의 격차는 조금 더 커질 수도 있다고 알려져 있다(Jang *et al.*, 2009). 이런 면에서 Pham *et al.* (2008)은 다양한 자국의 산업 배출계수를 개발하여 국외의 배출계수를 대체하거나 CEMS(Continuous Emission Monitoring System) 자료를 이용하여 배출량의 신뢰도를 높이는 것이 중요하다고 밝힌 바 있다. 따라서 본 연구는 먼지 배출량 기여도가 높은 석탄 화력발전소에서 측정용을 통해 연료별 TSP 배출계수를 산정하고 입자상 물질의 분율(Ratio)을 통해 PM10과 향후 적용 가능성이 높은 PM2.5의 배출계수를 도출하였다. 도출된 배출계수는 현재 국가대기오염물질 배출량 산정프로그램인 CAPSS에 적용하고 있는 국외 배출계수 및 실측 배출량 자료인 CleanSYS 등과 비교를 통하여 국가 고유 배출계수로서의 객관성 및 신뢰성 향상을 도모하였다. 이를 위해 도출된 배출계수의 CAPSS 적용 및 배출량 산정 등의 추가 연구를 실시하였다.

2. 연구방법

2.1 연구 추진 과정

화력발전소의 배출량을 산정하기 위한 방법론은 크게 4가지로 구분하여 순서대로 진행하였다. 우선, 먼지의 배출계수를 도출하기 위해 화력발전소를 선정하고 유연탄 및 무연탄을 연료로 사용하는 대상시설을 구분하여 방지시설 후단에서 입자상 물질의 측정을 실시하였다. 다음으로 TSP 배출계수는 직접 측정을 통해 도출하고자 하였으며, PM10과 PM2.5의 경우는 측정된 TSP 배출계수와의 분율을 적용하여 도출하였다. 또한, 도출된 배출계수 가운데 TSP와 PM10 배출계수는 CAPSS 분류체계에 맞게 적용하여 화력발전소 배출량을 산정하였다. 마지막으로 기존에 산정되고 있는 CAPSS 배출량과 CleanSYS 배출량의 비교를 통해 신뢰성 높은 배출계수를 산정하기 위한 연구를 실시하였다.

2.2 대상시설 선정

화력발전은 화석연료인 석탄, 석유, 가스 등을 연소시켜 발생하는 열 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 발전 방식이다. 따라서 주요 배출원은 연료를 연소시키는 보일러이며, 화력발전은 일반적으로 기력발전 및 복합 화력발전으로 구분한다. 본 연구에서는 석탄-화력발전소 가운데 유연탄과 무연탄을 연료로 사용하는 발전소로 구분하여 각각 3개씩, 총 6개 석탄-화력발전소를 연구 대상 시설로 선정하였다. 선정된 유연탄 및 무연탄-화력발전소의 일반적인 공정도는 그림 1과 같다.

본 연구에서 선정된 석탄-화력발전소는 모두 스팀을 이용한 기력발전시설이다. 주요방지시설로는 질소산화물을 제거하기 위한 선택적 촉매 환원시설(Selective Catalytic Reduction, SCR), 먼지를 저감하기 위한 전기집진기(Electrostatics Precipitator, ESP)와 가스상 물질을 제거하기 위한 배연탈황시설(Flue-Gas Desulfurization, FGD)을 운영하고 있다. 표 1과 같이 보일러 설비용량은 100 MW 이상의 대형 발전시설용 보일러이며(KECP, 2009), 무연탄은 유연탄보다 열량이 낮기 때문에 무연탄-화력발전소의 경우 유연탄을 혼소할 수 있는 발전시설이고, 연소방식은 유동층 연소 방식이다. 유동층 연소 방식의 보일러는 석탄재를 유동매체로 하고 고압의 공기를 연소로 하부에 불어넣

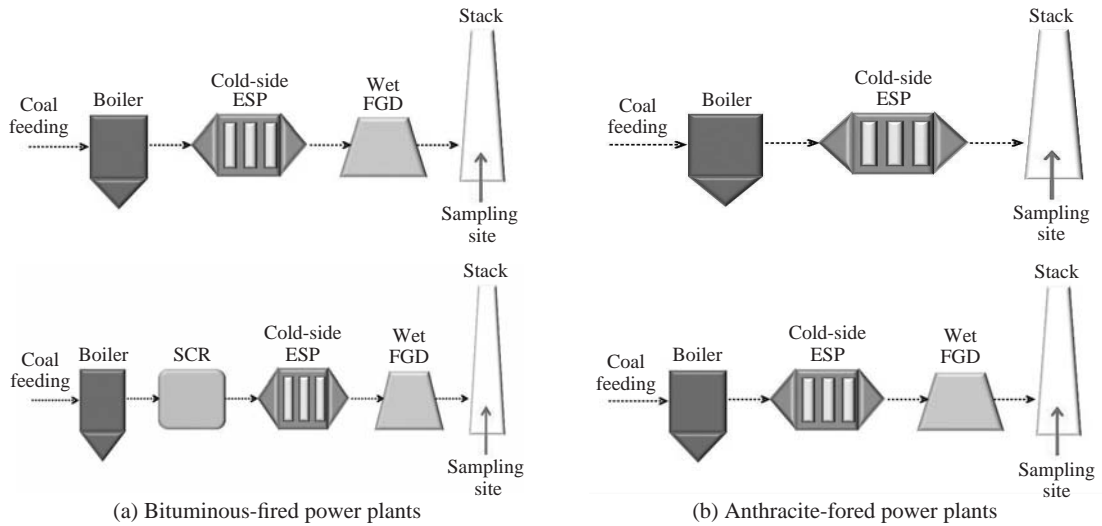


Fig. 1. Schematic 2 types of general coal-fired power plants.

Table 1. General information of the target coal-fired power plant.

Coal type	Plant	Stack No.	Generating facilities (MW)	Gross generation (MWh)	Fuel usage (ton/yr)	Control device (APCD)
Bituminous	CPP#1	2	500	4,132,000	1,712,000	SCR, ESP, FGD
	CPP#2	2	200	1,423,929	684,299	ESP, FGD
	CPP#3	8	500	4,628,132	1,701,650	SCR, ESP, FGD
Anthracite	CPP#4	1	125	777,936	341,435	ESP, FGD
	CPP#5	2	200	1,534,500	816,777	ESP
	CPP#6	2	200	1,438,408	655,738	ESP, FGD

어 유동층을 형성 한 후 사이클론을 5~10회 순환하면서 연소시키는 방식이다(Park *et al.*, 2010). 보통 구조가 간단하여 고장이 적고, 보일러 온도를 제어하기 쉬워서 균일하게 유지할 수 있고, 보일러 단위 면적당 처리 능력이 좋은 특성이 있다. 불활성층이 미리 가열된 상태에서 태우기 때문에 순간적으로 연소하고 열효율이 좋다.

2.3 시료 채취

TSP의 채취를 위해서는 국내 대기오염공정시험방법 제2절 제1항 먼지측정분석방법을 기준으로 하였으며, PM10과 PM2.5의 채취를 위해서는 사이클론 채취기를 사용하여 미국 EPA 201A 방법을 기준으로 “Determining PM10 and PM2.5 Emissions from Stationary Sources”의 방법에 의해 시료를 채취하였다. 그림 2와 그림 3은 굴뚝에서의 TSP 및 PM10과 PM2.5를 측정

하기 위한 측정트레인을 나타내고 있다.

굴뚝에서의 시료채취는 Stack Sampler를 사용하여 먼지채취에는 500°C에서 2~3시간 강열한 원형 석영 필터를 사용하여 시료를 채취하였다. 원형 석영필터는 0.1 μg까지 측정이 가능한 미량 측정용 저울을 사용하여 측정하였으며, 시료는 각 시설별 배출가스의 온도 및 동압, 정압에 의해 다소 차이는 있으나 3시간 이상, 2 Sm³ 이상을 포집하였다. 포집 횟수는 한 개 사업장에 한하여 입점별로 최소 2회, 최대 4회 연속 포집하였으며 1일 1회를 기준으로 일반적으로 3일이 소요되었다. 단, 가동 중인 상업화 시설을 대상으로 하였기 때문에 현장시설의 조업상태에 따라 다소 변동이 발생하는 경우도 있었다. 원형 석영필터에 포집된 먼지는 동일한 미량 측정용 저울을 사용하여 측정하였으며, 포집전과 포집후의 무게차로 중량 농도를 나타냈다.

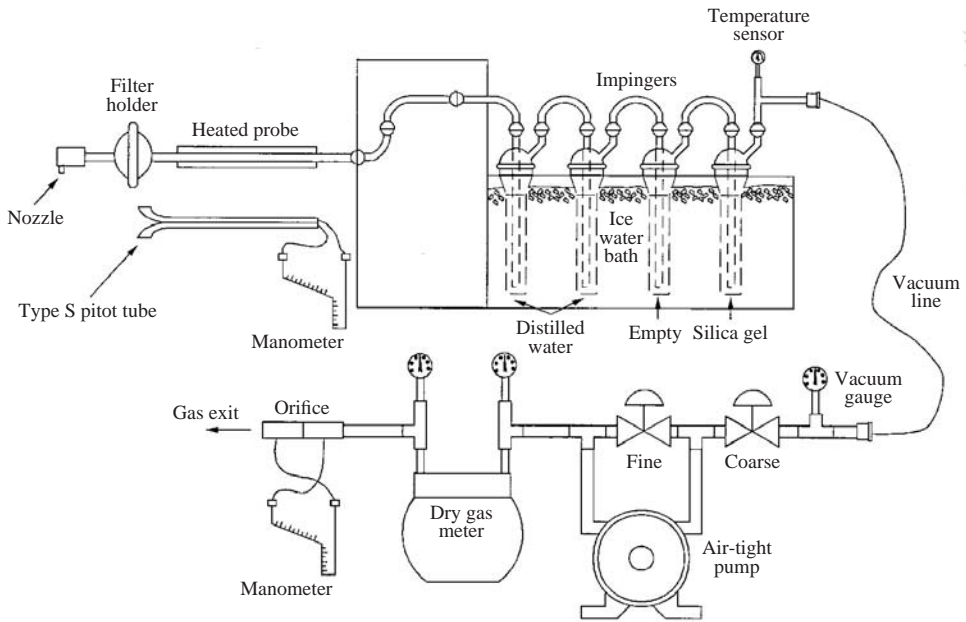


Fig. 2. Flow-chart of TSP sampling on stack.

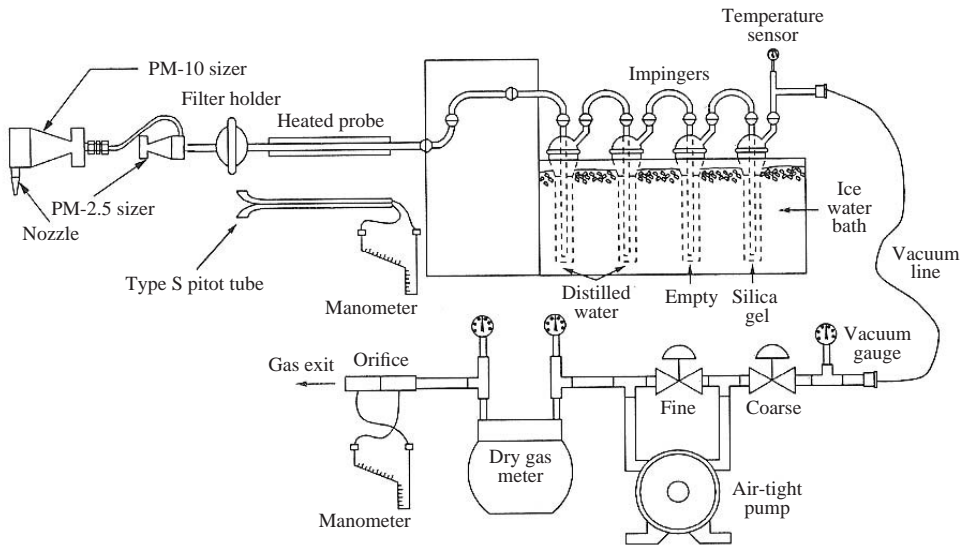


Fig. 3. Flow-chart of PM10 & PM2.5 sampling on stack.

2.4 배출계수 및 배출량 산정 방법

실측자료를 이용한 TSP의 배출계수는 아래의 식 (1)에 의하여 구하였다.

TSP 배출계수 (kg/ton)

$$= \frac{\text{TSP 농도}(\text{mg}/\text{m}^3) \times \text{건조배출가스유량}(\text{m}^3/\text{day}) \times 10^{-6}}{\text{연료 사용량}(\text{ton}/\text{day})}$$

(1)

위 식에서 일일 유량의 경우 사업장에서 제출한 시간당 유량과 일일 조업 시간 및 연간 조업 일수를 분석하여 환산하였으며, 연료사용량의 경우 대기배출원 관리시스템인 SEMS (Stack Emission Management System)에 입력된 2009년 사업장 자료를 적용하였다. 단 무연탄-화력발전소의 경우 유연탄을 혼소하는 시설인 경우 혼소되는 유연탄의 연료사용량도 함께 적용한 연료사용량이다. PM10 및 PM2.5 배출계수는 도출된 TSP 배출계수에 PM10/TSP과 PM2.5/TSP 분율을 적용하여 아래의 식(2)와 같이 도출한다.

$$\text{PM10 (PM2.5) 배출계수 (kg/ton)} \\ = \text{TSP 배출계수 (kg/ton)} \times \frac{\text{PM10 (PM2.5) 농도 (mg/m}^3\text{)}}{\text{TSP 농도 (mg/m}^3\text{)}} \quad (2)$$

도출된 배출계수를 이용한 먼지 배출량은 아래 식(3)과 같이 시설별 연간 연료사용량을 적용하였으며,

CAPSS 배출량 산정방법과 다른 점은 방지시설 후단에서 측정된 값이므로 방지시설의 방지효율을 적용하지 않았다는 점이다.

$$\text{먼지 배출량 (kg/year)} \\ = \text{먼지 배출계수 (kg/ton)} \times \text{연간연료사용량 (ton/year)} \quad (3)$$

3. 연구결과

3.1 발전소의 먼지 농도 및 분율

각 대상 발전소에서 포집한 먼지의 농도는 표 2와 같이 나타났다. 측정횟수는 유연탄-화력발전소 3개 시설에서 8회, 무연탄-화력발전소 3개 시설에서 9회를 포함한 총 17회 측정하였다. TSP의 경우 유연탄을 연료로 사용하는 CPP#2에서 평균 7.39 mg/Sm³로 가장 높게 측정되었으며, 무연탄을 사용하는 CPP#4

Table 2. Measured concentration and PM10/TSP (PM2.5/TSP) ratio.

Coal type	Site	Test No.	Concentration (mg/Sm ³)			Ratio	
			TSP	PM10	PM2.5	PM10/TSP	PM2.5/TSP
Bituminous	CPP#1	1	4.93	3.96	3.42	0.80	0.69
		2	5.32	5.02	3.57	0.94	0.67
		avg.	5.12	4.49	3.50	0.87	0.68
	CPP#2	1	4.62	5.02	3.16	1.09	0.68
		2	7.76	5.11	6.71	0.66	0.86
		3	9.78	8.35	4.61	0.85	0.47
		avg.	7.39	6.16	4.83	0.87	0.67
	CPP#3	1	1.58	1.51	1.13	0.96	0.72
		2	1.60	1.67	0.96	1.04	0.60
		3	1.46	1.43	0.97	0.98	0.66
		avg.	1.54	1.54	1.02	1.00	0.66
	Sub-avg.			4.63	4.01	3.07	0.92
Anthracite	CPP#4	1	1.66	1.07	0.40	0.64	0.24
		2	0.99	0.70	0.59	0.71	0.60
		avg.	1.33	0.88	0.50	0.67	0.42
	CPP#5	1	1.39	1.12	0.94	0.81	0.68
		2	0.62	0.65	0.59	1.05	0.95
		3	1.06	0.74	0.67	0.70	0.63
		4	3.45	3.30	2.09	0.96	0.61
	avg.	1.63	1.45	1.04	0.87	0.71	
	CPP#6	1	5.93	5.40	2.03	0.91	0.34
		2	5.43	4.45	2.80	0.82	0.52
		3	6.11	4.76	2.22	0.78	0.36
		avg.	5.82	4.87	2.35	0.84	0.41
Sub-avg.			2.96	2.47	1.37	0.82	0.46

에서 평균 1.33 mg/Sm³으로 가장 낮게 측정되었다. PM10 (PM2.5) 역시 유연탄을 사용하는 CPP#2에서 평균 6.16 (4.83) mg/Sm³으로 가장 높게 측정되었으며, 무연탄을 사용하는 CPP#4에서 평균 0.89 (0.50) mg/Sm³으로 가장 낮게 측정되어 그림 4와 같이 TSP 측정 결과와 비슷한 경향을 나타냈다. 유연탄-화력발전소에서 측정된 TSP 평균 농도는 4.63 mg/Sm³으로 무연탄-화력발전소의 평균 농도 2.96 mg/Sm³에 비해 56% 이상 높은 것으로 나타났으며, 무연탄-화력발전소 대비 유연탄-화력발전소의 PM10 (PM2.5) 평균농도 역시 유연탄-화력발전소가 62 (124)% 높게 나타났다. 본 연구에서 측정된 먼지 농도의 특징은 표 3과 같이 상대적으로 품질이 낮고 회분(Ash) 성분이 높은 무연탄을 연료로 사용하는 화력발전소에서 먼지농도

가 낮다는 점이다. 일부 연구 결과에 따르면 화력발전소에서 생성되는 먼지는 일반적으로 연료 중 함유된 회분의 함량에 직접적인 관계가 있고 또는 석탄의 회분 함량과 비산재의 비율로 먼지 배출계수를 산출하기도 한다(Yu *et al.*, 2010; Kim *et al.*, 2004). 그러나 본 연구 결과, 굴뚝을 통하여 배출되는 먼지의 농도에 영향을 미치는 인자는 단지 연료의 성분 조성뿐만 아니라 보일러 종류, 연료사용량, 방지시설의 방지 효율, 조업시간 및 보일러 유지관리 등의 다양한 조건에 의해 복합적으로 작용하는 것으로 나타났다. 먼지 분율은 유연탄에서 PM10/TSP 값이 0.92, PM2.5/TSP 값이 0.66으로 측정되어 무연탄에서 측정된 0.82 및 0.46에 비해 높은 값을 나타냈다. 화력발전소 굴뚝을 통해 배출되는 먼지는 유연탄을 연료로 사용할 경우 PM10 이하의 미세먼지가 많이 발생하며, 무연탄은 상대적으로 품질의 균질성, 즉 입자성상의 균질화는 유연탄에 비해 낮다라는 것을 확인할 수 있었다.

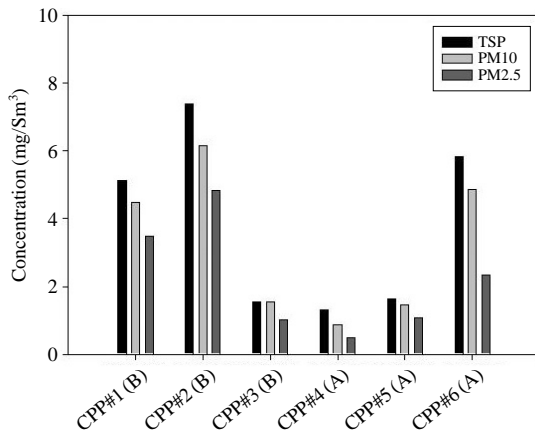


Fig. 4. Comparison of PM concentrations by sampling sites.

3.2 배출계수 도출 및 배출량 산정

본 연구를 통해 도출된 배출계수는 방지시설 후단에서 측정된 즉, 방지시설을 통과한(Controlled) 배출계수이며, 현재 국가 대기오염물질 배출량으로 산정되고 있는 CAPSS 배출계수는 기본적으로 방지시설 전단에서 측정된, 방지시설을 통과하지 않은(Uncontrolled) 배출계수이므로 방지시설의 효율에 의해 각각 배출계수간의 차이가 발생한다. CAPSS 배출계수 가운데 TSP는 미국 EPA AP-42에서 1996년에 제시한 배출계수를 적용하고 있으며, PM10의 경우 TSP 배출계수에 EPA Speciate 4.0에서 제시한 PM10 분율을 적

Table 3. Proximate analysis of coal-fuel.

Coal type	Proximate analysis (wt%)				Heating value (Kcal/kg)
	Volatile (wt%)	Moisture (wt%)	Fixed carbon (wt%)	Ash (wt%)	
Bituminous (CPP#1)	35.78	9.25	44.74	10.23	5,538
Anthracite (CPP#5)	5.92	4.17	56.85	33.06	4,578

Table 4. Comparison between projected emission factors of this study and CAPSS.

(unit: kg/ton)

SCC1	SCC2	SCC3	Fuel type	CAPSS			This study		
				TSP	PM10	PM2.5	TSP	PM10	PM2.5
Combustion in energy industries	Public power	Boiler	Bituminous	50	29.1	-	0.045	0.041	0.030
			Anthracite	200	116.4	-	0.046	0.038	0.021

용하였다(표 4). 방지시설 전·후단에서 측정된 농도를 이용하여 산출된 배출계수의 차이에서도 알 수 있듯이 유연탄과 무연탄을 연소하면서 발생한 입자상 물질은 방지시설을 통과하면서 대부분 제거된다. 또한 배출되는 먼지는 입경이 클수록 연료에 상관없이 비슷한 비율로 배출됨을 본 연구에서 도출된 먼지의 분율을 통해 알 수 있다. 그러나 입자가 미세해질수록 연료에 따른 차이가 발생함을 알 수 있는데, 이는 분율을 적용한 배출계수에서도 뚜렷하게 나타난다. 유연탄과 무연탄의 TSP 배출계수는 각각 0.045 g/ton과 0.046 kg/ton으로 거의 비슷하게 도출되었으나 배출 분율차에 의해 PM10과 PM2.5의 배출계수는 연료별로 차이가 발생하였다.

도출된 배출계수와 국내·외 배출계수 연구 결과를 그림 5과 같이 비교하였다. 비교대상은 유연탄 또는 무연탄과 유연탄을 혼용하는 화력발전시설의 배출계수이다. 미국 EPA와 중국(Yu *et al.*, 2010)의 배출계수는 회분 함량을 적용한 배출계수이며, 국내 회

분 함량율인 10.23%를 적용하였다. 방지효율 역시 중국을 제외하고 국내 전기집진기 방지효율인 99.43%를 일괄 적용하였다. 중국은 자체 측정된 전기집진기 효율을 적용하였으며, 방지효율은 최대 99.53%에서 최소 90.88%를 적용하였다. 그 결과 중국의 배출계수는 각각 TSP는 0.962, PM10은 0.665, PM2.5는 0.327로써 본 연구에서 도출된 배출계수에 비해 최대 21배 이상 차이가 발생하였으며, 전반적으로 타 배출계수에 비해 높음을 알 수 있다. 한편 본 연구에서 도출된 배출계수는 타 배출계수에 비해 낮은 수준이나 Yoon *et al.* (2010)이 국내 화력발전소에서 도출한 TSP의 0.059, PM2.5 값인 0.015와 비슷한 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 향후 추가 실측을 통한 보다 많은 data가 구축되어야 한다는 전제를 필요로 하지만 국내 현실을 일부 반영한 유의미한 결과로 사료된다.

3.3 PM 배출량 분석 결과

국내 대기오염물질 배출량 산정 프로그램인 CAPSS는 1999년부터 2007년까지 대기오염물질 배출량 자료를 구축하고 있다. 현재 CAPSS는 그동안 지속적인 개선작업을 통하여 국내 산업을 12개 대분류로 구분하고 각각의 배출원에 대해 배출량을 산정하고 있으며, 화력발전소는 에너지산업연소의 공공발전 부문으로 배출원을 분류하고 있다(NIER, 2009). 본 연구에서 도출된 배출계수를 이용하여 산정된 배출량과 CAPSS 배출량을 비교하기 위하여 SEMS에 입력된 동일한 2007년 사업장 배출시설별 연료사용량을 이용하였다. 추가적으로 TSP 배출량의 경우 사업장 CleanSYS 배출량을 함께 비교대상으로 기재하고 실측 배출량을 기준으로 산정된 두 간접배출량의 신뢰성을 비교하였다. 비교 배출량은 표 5와 같이 6개의 석탄화력발전소 가운데 2007년 CAPSS 배출량이 없는 CPP#3을

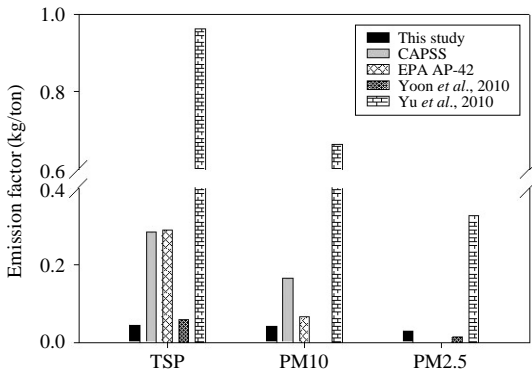


Fig. 5. Comparison of PM emission factors between this study result and others.

Table 5. Comparison of PM emission by power plants.

Site	Stack No.	Removal efficiency (%)	TSP emission (kg/yr)			PM10 emission (kg/yr)	
			CleanSYS	CAPSS	This study	CAPSS	This study
CPP#1	2	99.43	50,160	398,097	63,562	231,692	58,196
CPP#2	2	99.92	48,298	51,149	20,998	29,769	19,225
CPP#4	1	99.92	38,350	36,203	11,839	21,070	9,694
CPP#5	2	99.93	20,119	81,852	27,177	47,638	22,254
CPP#6	2	99.5	35,888	348,714	17,544	202,952	14,366
Total			192,815	916,015	141,120	533,121	123,735

제외한 5개 화력발전시설의 배출량이다. 측정대상 석탄-화력발전소는 먼지를 제거하기 위한 방지시설은 모두 전기집진기를 사용하고 있으며, 표 5에서의 방지효율은 전기집진기의 방지효율이다. 한편 본 연구를 위하여 사업장 CAPSS 배출량은 CleanSYS 배출량 일부를 적용하는 개선산정법이 아닌 배출계수와 방지시설 방지효율만 적용하는 간접배출량 산정방법으로 산출되었다.

5개 화력발전소 배출시설의 총배출량은 CleanSYS가 193 ton으로 나타났으며, CAPSS는 916 ton, 본 연구 결과 산정된 배출량은 141 ton으로 CleanSYS 배출량을 100%라고 가정했을 때 각각 475%와 73%를 나타내고 있다. CAPSS 배출량은 CleanSYS 배출량에 비해 전반적으로 높게 산정됐으며, 특히 CPP#1과 CPP#6의 그 차이가 크다. CPP#1은 화력발전소 배출시설 가운데 최대 5배가 넘는 가장 많은 유연탄을 사용하고 있었으며, CPP#6은 높은 무연탄 배출계수와 상대적으로 낮은 방지시설 방지효율이 그 주요원인으로 사료된다. 본 연구 결과 산정된 배출량은 CleanSYS 배출량에 비해 상대적으로 낮은 배출량을 나타냈다. 일부 연구 결과에 따르면 먼지의 경우 전기집진기와 더불어 흡수시설 또는 습식탈황시설과 같은 2차 방지시설이 있는 경우 가장 낮게 배출되었다(Yu *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2004). 본 연구에서 선정한 측정 대상 화력발전소의 대부분은 전기집진기 외에 흡수탑 또는 배연탈황시설과 같은 황산화물 처리시설 및 SCR과 같은 질소산화물 처리시설 등의 2차 방지시설을 함께 운용하고 있었다. 이는 방지시설 후단 측정에 의한 먼지의 배출량이 왜 낮은가에 대한 이유를 간접적으로 증명하고 있다. 특히 전기집진기만 설치된 CPP#5는 5개 화력발전시설 가운데 유일하게 CleanSYS 배출량에 비해 높게 나타나 먼지 제거는 전기집진기의 집진 효율 외에 2차 방지시설에 의한 먼지가 제거됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 100MW 이상의 설비용량을 지닌 6개의 석탄 화력발전소를 측정대상 시설로 선정하고 3개의 유연탄-화력발전소와 3개의 무연탄-화력발전소로 구분하여 직접 측정을 하였다. 이후 사용 연료에

따른 먼지의 배출계수를 도출하고 현재 국가대기오염물질 배출량 산정 프로그램인 CAPSS의 분류체계에 따른 해당 배출계수와 비교하였다. 또한 도출된 배출계수를 이용하여 배출량을 산정하고 기존 CAPSS 배출량과 실측정 배출량인 CleanSYS 배출량과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 본 연구에서 측정된 먼지 농도의 특징은 상대적으로 품질이 낮고 회분 성분이 높은 무연탄을 연료로 사용한 화력발전소에서의 먼지 농도가 낮게 나타났다. 3개의 유연탄-화력발전소에서 측정된 TSP 및 PM10(PM2.5)의 평균 농도는 각각 4.63 mg/Sm³, 4.01 (3.07) mg/Sm³으로 무연탄-화력발전소에서 측정된 TSP 및 PM10(PM2.5)의 평균농도 2.96 mg/Sm³, 2.47 (1.37) mg/Sm³에 비해 최대 2배 이상 높게 측정되었다. 먼지분율 역시 유연탄-화력발전소에서 PM10/TSP 값이 0.92, PM2.5/TSP 값이 0.66으로 측정되어 무연탄-화력발전소의 먼지분율 0.82와 0.46에 비해 높게 나타났다.
- (2) 유연탄과 무연탄의 먼지 배출계수는 TSP의 경우 직접 측정을 통해 도출하였으며, PM10 및 PM2.5는 TSP 배출계수에 각각의 분율을 적용하여 배출계수를 도출하였다. TSP 배출계수는 유연탄이 0.045 kg/ton, 무연탄이 0.046 kg/ton으로 거의 비슷하나, 입자가 미세해질수록 유연탄 배출계수가 높게 나타났다. 그 격차는 조금씩 더 높게 나타났다.
- (3) 본 연구를 통해 도출된 배출계수를 이용하여 유연탄 및 무연탄을 사용하는 화력발전소 배출시설의 배출량을 산정한 결과, CAPSS 배출량에 비해 실측 배출량인 CleanSYS 배출량에 보다 근접한 수치를 나타냈다. 5개의 화력발전소 배출시설의 총 배출량은 CleanSYS가 193 ton, CAPSS가 916 ton, 본 연구결과 산정된 배출량은 141 ton이다. CAPSS 배출량은 CleanSYS 배출량에 비해 전반적으로 높게 산정되었으며, 특히 CPP#1과 CPP#6의 차이가 높게 나타났다. CPP#1은 화력발전소 배출시설 가운데 최대 5배가 넘는 가장 많은 유연탄을 사용하고 있었으며, CPP#6은 높은 무연탄 배출계수와 상대적으로 낮은 방지시설 방지효율이 그 주요원인으로 사료된다.
- (4) 석탄화력발전소에서 설치된 먼지집진기의 방지효율은 최소 99.4%에서 최대 99.93% 이상의 고효

을 집진기였으며, 이를 통해 대부분의 먼지가 제거됨을 알 수 있었다. 특히 본 연구결과 흡수탑 및 습식 배연탈황시설 등의 2차 방지시설이 설치된 석탄화력발전소의 먼지배출량은 전기집진기뿐만 아니라 2차 방지시설에서 일부 제거됨을 CleanSYS 배출량과 비교를 통해 확인할 수 있었다.

지금까지 많은 연구를 통해 석탄화력발전소의 먼지 측정이 이루어졌으나 농도 및 중금속 분석 등의 기초자료 생성에 국한되어 있었다. 그러나 본 연구에서는 석탄화력발전소에서의 먼지 측정을 통해 배출계수를 생성하고 생성된 배출계수를 이용하여 화력발전소에서 발생하는 먼지의 배출량을 산정하였다. 더욱이 2015년 대기환경기준 신설 예정인 PM2.5에 대한 배출계수를 계산하여 제시함으로써 향후 관련 배출량 산정을 위한 기반을 마련했다는 점에서 큰 의의가 있다. 향후 본 연구에서 생성한 배출계수는 전문가 의견수렴과 신뢰도 평가, 배출계수 위원회 개최 등을 통해 객관성 및 신뢰도를 확보하고 국내 석탄화력발전소의 현실을 제대로 반영하지 못하고 있는 CAPSS에 적용된 국외 배출계수를 대체할 예정이다.

참 고 문 헌

Jang, K.-W., J.-H. Lee, S.-W. Jung, K.-H. Kang, and J.-H. Hong (2009) A study on the comparison of emission factor method and CEMS (Continuous Emission Monitoring System), *J. KOSAE*, 25(5), 410-419. (in Korean with English abstract)

Kim, D.-G., Y.-S. Eom, J.-H. Hong, S.-J. Lee, K.-S. Seok, D.-G. Lee, E.-J. Lee, and S.-A. Bang (2004) A study on the estimation of air pollutant emission factors in electric power plants, *J. KOSAE*, 20(3), 281-290. (in Korean with English abstract)

Korea Electric Power Corporation (2009) Statistics of Electric Power in Korea, KEPC Official Press Release No.

2009-08460528-0020.

NIER (2009) National Air Pollutants Emission 2007, NIER Official Press Release No. 11-1480523-000198-10.

NIER (2010) National Air Pollutant Emission Calculation Method Manual II, NIER Official Press Release No. 11-1480523-000189-01.

Oh, M.-S., T.-J. Lee, and D.-S. Kim (2009) Source identification of ambient size-by-size particulate using the positive matrix factorization model on the border of Yongin and Suwon, *J. KOSAE*, 25(2), 108-121. (in Korean with English abstract)

Park, J.-M., S.-B. Lee, H.-C. Kim, M.-J. Kim, M.-S. Kim, D.-J. Song, N.-E. Jung, J.-H. Hong, and S.-J. Lee (2010) A study on the integrated management of mercury using and emission facilities, NIER Official Press Release No. 11-1480523-000685-01.

Pham, T.B.T., K. Manomaiphiboon, and C. Vongmahadlek (2008) Development of an inventory and temporal allocation profiles of emissions from power plants and industrial facilities in Thailand, *Science of the Total Environment*, 397, 103-118.

Polissar, A.V., P.K. Hopke, and R.D. Poirot (2001) Atmospheric aerosol over Vermont: Chemical composition and sources, *Environ. Sci. & Technol.*, 35(23), 4604-4621.

Yoon, Y.-S., J.-H. Kim, D. Pudasainee, S.-U. Son, G.-K. Park, K.-I. Park, and Y.-C. Seo (2010) Emission characteristics of PM and PM2.5 from bituminous coal combustion power plants, *J. KOSAE*, 26(2), 151-160. (in Korean with English abstract)

Yu, Zhao., Shuxiao. Wang, Lei. Duan, Yu. Lei, Pengfei. Cao, and Jiming Hao (2008) Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction, *Atmospheric Environment*, 42, 8442-8452.

Yu, Zhao., Shuxiao. Wang, Chris. P. Nielsen, Xinghua. Li, and Jiming Hao (2010) Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants, *Atmospheric Environment*, 44, 1515-1523.