

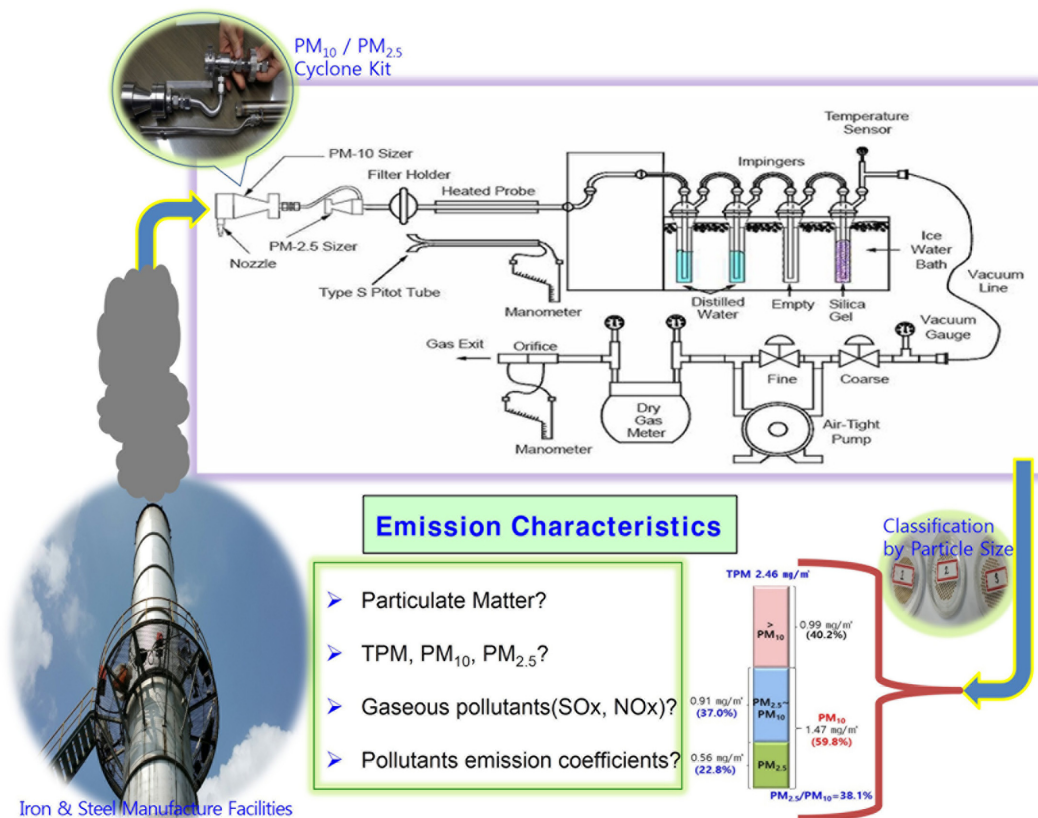
제철제강시설의 대기오염물질 배출특성 및 배출계수 산정

김병욱[†] · 홍영균 · 이영섭 · 양승표 · 현근우 · 이건호
강원도보건환경연구원

Emission Characteristics and Coefficients of Air Pollutants in Iron and Steel Manufacturing Facilities

Byoung-Ug Kim[†], Young-Kyun Hong, Yeong-Seob Lee, Seung-Pyo Yang, Geun-Woo Hyun, and Geon-Ho Yi
Gangwon Institute of Health and Environment

GRAPHICAL ABSTRACT



[†]Corresponding author: Gangwon Institute of Health and Environment, 386-1 Sinbuk-ro, Sinbuk-eup, Chuncheon-si, Gangwon-do, Republic of Korea, Tel: +82-33-248-6441, E-mail: byoungug@korea.kr
Received: 22 April 2021, Revised: 17 May 2021, Accepted: 20 May 2021

ABSTRACT

Objectives: This study was conducted to identify the emissions characteristics of total particulate matter (TPM), fine dust (PM₁₀, PM_{2.5}), and gaseous pollutants (SOx, NOx) in iron and steel manufacturing facilities in order to investigate emissions factors suitable for domestic conditions.

Methods: Total particulate matter (TPM), fine dust (PM₁₀, PM_{2.5}), and gas phase materials were investigated at the outlet of electric arc furnace facilities using a cyclone sampling machine and a gas analyzer.

Results: The concentrations of TPM ranged from 1.64 to 3.14 mg/Sm³ and the average was 2.47 mg/Sm³. Particulate matter 10 (PM₁₀) averaged 1.49 mg/Sm³ with a range of 0.92 to 1.99 mg/Sm³, and the resulting ratio of PM₁₀ to TPM was around 60 percent. PM_{2.5}/PM₁₀ ranged from 33.7 to 47.9% and averaged 41.6%. Sulfur oxides (SOx) were not detected, and nitrogen oxides (NOx) averaged 6.8 ppm in the range of 5.50 to 8.67 ppm. TPM emission coefficients per product output were in the range of 0.60 to 1.26 g/kg, 0.13 to 0.79 g/kg for PM₁₀ and 0.12 to 0.36 g/kg for PM_{2.5}, and showed many differences from the emissions coefficients previously announced. An emissions coefficient for NOx is not currently included in the domestic notices, but the results were calculated to be 0.42 g/kg per product output.

Conclusions: Investigation and research on emissions coefficients that can reflect the characteristics of various facilities in Korea should be conducted continuously, and the determination and application of unique emissions coefficients that are more suitable for domestic conditions are needed.

Key words: Total particulate matter (TPM), particulate matter 10, 2.5 (PM₁₀, PM_{2.5}), sulfur oxides (SOx), nitrogen oxides (NOx), emission coefficients

I. 서 론

세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 기후변화로 인한 대표적인 건강위험요인으로 오존층 감소와 폭염뿐만 아니라 미세먼지 등으로 인한 대기오염 역시 주요 원인으로 보고 있다.¹⁾ 일반적으로 대기 중에 부유하는 먼지는 입자의 크기에 따라 50 µm 이하인 총 먼지(Total Suspended Particles, TSP)와 입자크기가 매우 작은 미세먼지(Particulate Matter, PM)로 구분된다. 미세먼지는 다시 지름이 10 µm보다 작은 미세먼지(Particulate Matter less than 10 µm in diameter, PM₁₀)와 지름이 2.5 µm보다 작은 초미세먼지(Particulate Matter less than 2.5 µm in diameter, PM_{2.5})로 구분된다.^{2,3)} 입자 크기가 10 µm 이하인 미세먼지(PM₁₀)는 1급 발암물질로 지정된 오염물질이며, 입자크기가 매우 작고 비표면적이 크므로 인해 체내에 흡입되기 쉽고 각종 유해성분을 함유하여 천식, 기도자극, 폐 기능 감소, 만성기관지염 발생 등 호흡기계 질환 및 부정맥, 심혈관계 질환, 암과 전체 사망률 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁴⁻⁹⁾

광의적으로 입자상물질(Particulate Matter, PM)은 0.01~100 µm 사이의 입자를 의미하기도 한다. 대기

배출원의 경우 배출구를 통하여 배출되는 입자상물질은 일반대기상의 단순히 공기역학적으로 부유되는 입자와 더불어 인위적으로 송풍 등을 이용하여 굴뚝으로 강제적으로 배출시킬 때 발생하는 모든 입자상물질을 포함한다. 따라서, 굴뚝 배출구에서의 입자상물질들은 부유상태의 총 먼지(Total Suspended Particles, TSP)의 개념 대신 총 입자상물질(Total Particulate Matter, TPM)의 개념을 이용하는 것이 바람직하다.

대기로 배출되는 오염물질은 배출사업장의 업종, 규모, 시설의 형태, 연료 종류 및 사용량, 생산제품 등에 따라 발생특성이 다양하며, 이러한 각 시설별 배출특성을 대기오염물질 배출계수로 규정(국립환경과학원고시)하고 이를 활용하고 있다. 배출계수는 배출부과금의 부과·징수, 방지시설의 설계, 대기오염저감 및 대기환경 보전계획 수립 등을 위하여 국가기관, 연구기관, 학계, 배출사업장, 방지시설 업체 등에서 기본적인 자료로 이용되고 있다.^{10,11)}

그동안 국내 대기배출원에 대한 배출계수 조사는 산발적으로 수행되어 대표성과 신뢰성 있는 자료를 확보하지 못하였고, 이로 인해 대부분의 자료를 미국 EPA¹²⁾ 등 선진국의 계수를 적용해 왔다. 그러나, 외국과 우리나라는 배출시설과 형태 등에 대한 차이

가 있고, 사용연료, 운전방식 등도 상이함에 따라 국내 특성을 고려한 배출계수의 체계적 개발은 지속적인 추진이 필요한 실정이다. 이러한 필요성에 의해 국립환경과학원과 전국 시·도 보건환경연구원은 최근 다양한 배출시설에 대한 공동연구를 지속적으로 수행해 오고 있으며, 조사결과는 유효성 검증 등 충분한 검토를 거친 후 국내실정에 적합한 대기배출계수를 개정 고시하고 있다.

본 연구는 대기배출계수를 조사하기 위하여 다량의 오염물질을 배출하고 있으나 배출계수에 대한 조사가 미흡한 제철제강시설을 대상으로 총 입자상물질(TPM), PM₁₀, PM_{2.5}, 가스상물질(SO_x, NO_x)의 배출특성 검토 및 배출계수를 분석하여, 향후 대기환경 보전계획 및 오염물질 저감계획 수립을 위한 기초 토대를 마련하고자 하였다.

II. 조사내용 및 방법

1. 대상시설 선정 및 일반현황

본 연구의 대상시설은 금속제품 제조업으로 망간 합금철(FeMn, SiMn)을 제조하는 시설이다. 조사 대상은 용융·제련공정의 전기아크로 시설을 대상으로 하였다. 전기아크로는 원료를 투입하고 고철을 용융

시켜 액체 철로 전환하기 위해 고전류 전기아크를 사용한다. 전기아크 용융은 열조절을 용이하게 할 수 있어 많은 양의 합금원소를 첨가할 수 있는 장점이 있다. 전기아크로에서 발생된 오염물질은 침강 및 분배(Dust chamber)와 여과집진기를 거친 후 최종적으로 배출된다. 대상시설의 사용연료, 원료, 생산제품에 대한 일반현황은 Table 1에 제시하였다.

2. 시료채취 및 분석방법

시료채취 및 분석방법을 Table 2에 나타내었다. 총 입자상물질을 포함한 모든 분석항목은 대기오염공정 시험기준을¹³⁾ 바탕으로 측정 및 분석이 수행되었다. 현장조사 및 시료채취는 2019년 6월부터 9월까지 총 5회 측정하였다. 미세먼지 측정은 동일한 채취방식의 시료채취기 2세트를 이용하였다. 미세먼지 측정을 위한 사이클론 결합장치는 현장조사 전에 아세톤으로 전부 세척하고 건조 후 조립하였으며, 결합장치는 파라필름, 알루미늄 호일 등으로 밀봉하여 보관함에 담아서 운반하였다. 또한, 수분의 영향을 배제하기 위하여 노즐 사이클론을 히팅밴드를 이용하여 히팅시키고, 필터(Filter)는 수분의 영향을 받지 않는 테프론(Teflon, 2 μm PTFE 46.2 mm Filter, PP Ring Supported) 재질을 사용하였다. 시료채취시

Table 1. General status of the facilities studied

Item	Monthly (ton)		Yearly (ton)		
	Max.	Avg.	Max.	Avg.	
Fuel and raw material usage	MnO ₂	12,100	11,970	145,200	143,640
	Cokes(C)	1,500	1,460	18,000	17,520
	Fe ₂ O ₃	2,450	2,427	29,400	29,120
	CaMg(CO ₃) ₂	390	378	4,680	4,530
	PASTE	75	70	900	840
	SiO ₂	180	165	2,160	1,980
	FeMn slag	840	810	10,080	9,720
Product output	FeMn	4,667	4,567	56,004	54,804
	SiMn	834	792	10,008	9,504

Table 2. Methods for sampling and analysis

Item	Sampling method	Equipment
TPM	ES 01301.1a (Semi-Automatic)	Apex Instruments, KXC572-0 (1704069)
PM ₁₀ , PM _{2.5}	ES 01317.1a (Semi-Automatic)	
SO _x , NO _x	ES 01307.3a, ES 01308.3a (Automated measuring Method)	TESTO AG, TESTO 350K

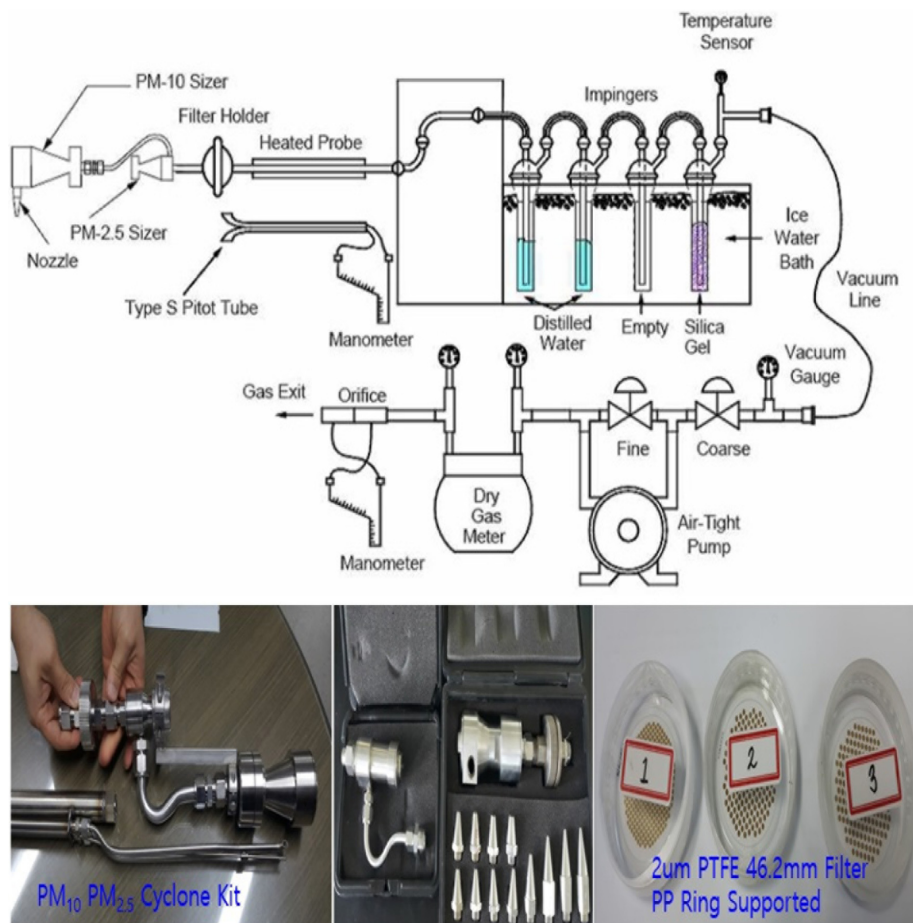


Fig. 1. Sampling device and configuration diagram

가장 중요한 등속흡인을 위하여 PM₁₀과 PM_{2.5} 사이 클론간의 유량비 곡선(Performance curves)을 참조하여 적절한 가스 채취 유량비(Gas sampling rate)에 맞춰서 채취유량을 결정하였다. 시료채취 후 회수시 싸이클론 유입구와 여과지 홀더 유출부 등을 밀봉하여 전체를 결합한 상태로 실험실로 운반하였다. 실험실에서 사이클론 결합장치를 3단계(PM₁₀ 초과, PM₁₀ 이하~PM_{2.5} 초과, PM_{2.5} 이하)로 분해하여 아세톤으로 세척하면서 여과지에 걸렸으며, 건조 후 무게를 측정하여 입자상물질 각각의 값을 계산하였다. 가스상물질인 SO_x, NO_x의 측정은 휴대용 자동 측정 가스분석기(TESTO 350K)를 이용하여 5분 간격으로 3회 이상 측정하여 평균값을 사용하였다.

3. 배출계수의 산정

본 연구에서 도출하고자 하는 TPM, PM₁₀, PM_{2.5}, SO_x, NO_x의 배출계수는 방지시설 전단(입구)에서의 측정이 곤란하여 후단(최종 배출구)에서 실측한 배출농도에 방지시설 효율을 역산, 유입농도를 추정하여 계산하였다. 현장 측정 당시 해당 사업장의 황로 망간(FeMn), 실리망간(SiMn)의 생산규모는 4.3 ton/h, 전기사용량은 458 kWh, 방지시설 효율은 평균 93%였다. 배출가스의 유량(Sm³/h)은 굴뚝 유속과 내경(m)을 이용하여 계산하였으며, 배출계수 산정식은 다음과 같다.

배출계수(g/kg)

$$= \frac{\text{농도}(\text{mg}/\text{Sm}^3) \times \text{배출가스의 유량}(\text{Sm}^3/\text{h}) \times 1,000}{\text{제품사용량}(\text{kg}/\text{h}) \text{ or } \text{전기사용량}(\text{kWh})}$$

III. 결과 및 고찰

1. 미세먼지 배출 분율

제철제강시설 전기아크로의 배출특성을 5회에 걸쳐 조사하였다. 총 입자상물질(Total Particulate Matter, TPM) 농도는 1.64~3.14 mg/Sm³의 범위를 보였으며, 평균 2.47 mg/Sm³으로 나타났다. 미세먼지(PM₁₀)는 0.92~1.99 mg/Sm³의 범위로서 평균 1.49 mg/Sm³이었으며, 이에 따른 TPM 대비 PM₁₀ 비율은 60% 정도로 나타났다. 미세먼지보다 큰 먼지(>PM₁₀)는 0.72~1.25 mg/Sm³의 범위였다.

미세먼지의 비율을 살펴보면 PM_{2.5}/PM₁₀은 33.7~47.9%의 범위였으며, 평균 41.6%로 나타나 전체 미세먼지 대비 PM_{2.5}의 비율이 상대적으로 낮은 것으로 조사되었다.

Table 3. The emission concentration of particulate matters

Item	Range (mg/Sm ³)	Avg. (mg/Sm ³)
TPM	1.64~3.14(n=5)	2.47(±0.67)
>PM ₁₀	0.72~1.25(n=5)	0.98(±0.23)
PM ₁₀	0.92~1.99(n=5)	1.49(±0.45)
PM ₁₀ > ~ >PM _{2.5}	0.61~1.17(n=5)	0.86(±0.24)
PM _{2.5}	0.31~0.88(n=5)	0.63(±0.23)

2. 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx) 농도

측정기간 동안 주기적으로 가스분석기를 이용하여 SOx와 NOx를 5분 간격으로 3회씩 측정하였다. 일반적으로 SOx는 공정에서 주연료(유연탄) 또는 원료의 황(S) 함유량에 의해 주로 발생된다. 본 조사 기간 동안 SOx는 검출되지 않는 것으로 나타났으며, 이러한 원인은 원료중에 미량의 황성분이 포함되어 있는 있으나, 동시에 원료중에 CaO 성분도 함유되어 있어 공정을 거치는 과정에서 CaSO₄ 등의 형태로 결합됨으로 인해 배출되지 않는 것으로 판단된다. NOx는 연료의 조성, 연소조건 등에 따라 달라지며,¹⁴⁾ 일반적으로 공기 중 질소의 고온산화에 의한 Thermal NOx, 연료 연소에 의한 Fuel NOx, 원료 함유 질소산화물 산화에 의한 Feed NOx로 구분할 수 있다. 본 시설의 NOx 발생은 전기아크로에서 외부 공기를 유입시켜 사용함으로 인한 Thermal NOx에 기인되며, 전체적인 농도는 5.50~8.67 ppm의 범위로서 평균 6.8 ppm이 발생하는 것으로 나타났다.

3. 배출계수 산정

본 연구에서는 제철제강시설을 대상으로 배출특성을

Table 4. The composition ratio of particulate matters

Item	Range (%)	Avg. (%)
(PM _{2.5} +PM ₁₀)/TPM	56.1~63.4	59.9
PM _{2.5} /PM ₁₀	33.7~47.9	41.6
>PM ₁₀	36.6~43.9	40.1

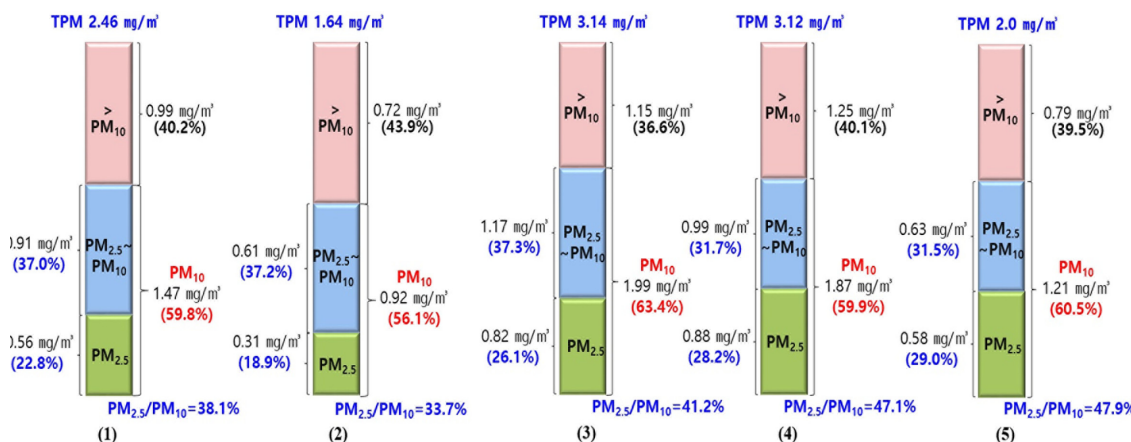


Fig. 2. The emission characteristics of particulate matters

Table 5. The emission characteristics of SOx and NOx

Item	Range	Avg.
SOx (ppm)	-	-
NOx (ppm)	5.50~8.67(n=8)	6.80(±0.91)

과약하였다. 방지시설 전단부에 측정공이 없는 관계로 최종 굴뚝 배출구 농도를 근거로 방지시설 효율을 적용하여 방지시설 유입전 농도를 역추산하였으며, 제품생산량 및 전기사용량에 대한 배출계수를 산정하였다. 제품생산량당 총 입자상물질(TPM)은 0.60~1.26 g/kg의 범위로서 평균 0.90 g/kg으로 나타났다. PM₁₀은 0.13~0.79 g/kg의 범위로서 평균 0.48 g/kg, PM_{2.5}는 0.12~0.36 g/kg의 범위로서 평균 0.25 g/kg으로 조사되었다. NOx는 제품생산량당 0.23~0.59 g/kg의 범위를 보였으며 평균 0.42 g/kg으로 나타났다. 전기사용량에 따른 배출계수는 TPM 5.61~11.81 g/h/kW의 범위로서 평균 8.47 g/h/kW였으며, PM₁₀은 평균 4.49 g/h/kW, PM_{2.5}는 평균 2.33 g/h/kW로 조사되었다. NOx는 전기사용량당 2.11~5.50 g/h/kW의 범위로서 평균 3.98 g/h/kW으로 나타났다.

국내 대기배출시설의 배출계수는 「배출시설의 대기오염물질 배출계수 고시(국립환경과학원고시 제 2020-29호)」에 제시되어 있다. 이중 제1차 금속제조 시설 및 금속가공제품 제조시설 등의 전기아크로에 대한 대기오염물질 배출계수를 Table 7에 나타내었

다. 국내의 Mn 합금철 전기아크로의 합금철 생산량당 배출계수는 먼지의 경우 3.9735 kg/ton, SOx는 2.4480 kg/ton을 제시하고 있다. 이를 본 연구결과와 비교해 보면 먼지의 경우 평균 3.9735/0.9=4.4배 높은 수치이다. 가스상 물질인 SOx는 본 연구에서 검출되지 않았으나 국내 배출계수는 제시되어 있으며, 이와는 반대로 NOx에 대한 배출계수는 고시되어 있지 않으나, 본 조사결과 제품생산량당 0.42 g/kg으로 산정되었다. 일반적으로 대기배출 사업장의 오염물질별 배출량은 EPA 등 외국 배출계수(기본값)를 적용했을 경우 실측을 기반으로 산정한 배출량과 많은 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.^{15,16} 대기오염물질 배출계수는 동일한 시설이라도 사용연료 및 원료, 적용 공정 등에 따라 다양하게 나타날 수 있다. 이러한 이유로 인해 각 국가별 조사·연구를 통한 고유 배출계수가 있는 경우에는 그 값을 적용하고 있으며, 선진국에서도 배출계수를 산출하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다.^{17,18} 본 연구결과는 기존에 국내 고시된 배출계수와 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 조사대상 시설의 사용연료, 적용 공정 등의 차이와 방지시설 전·후 오염물질 측정에 따른 차이 등의 원인을 들 수 있다. 이와 관련하여 향후 방지시설 전단에서의 추가적인 배출계수에 대한 연구와 더불어 다양한 시설에 대한 조사·연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Table 6. The emission factor of electric arc furnace in this study

Item	Product output (g/kg)		Electricity usage (g/h/kW)	
	Range	Avg.	Range	Avg.
TPM	0.60~1.26	0.90	5.61~11.81	8.47
PM ₁₀	0.13~0.79	0.48	1.25~7.44	4.49
PM _{2.5}	0.12~0.36	0.25	1.10~3.40	2.33
SOx	-	-	-	-
NOx	0.23~0.59	0.42	2.11~5.50	3.98

Table 7. Domestic air pollutant emission factor of electric arc furnace

Emission facility	Raw material, Product or Fuel	TPM	SOx	NOx	Unit
Electric arc furnace	Mn alloy iron	3.9735	2.4480	-	kg/Mn alloy iron production (ton)
	Scrap metal	1.3000	-	-	kg/scrap iron usage (ton)
	Aluminum	1.5500	-	-	kg/aluminium Usage (ton)

IV. 결 론

대기오염물질 배출원에 대한 오염물질 배출특성과 배출계수 산정은 저감대책을 수립하고, 배출원을 관리하기 위해 매우 중요하다. 본 연구는 제철제강업의 전기아크로 시설을 대상으로 오염물질 배출특성과 배출계수를 조사하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. TPM 농도는 1.64~3.14 mg/Sm³의 범위를 보였으며, 평균 2.47 mg/Sm³로 나타났다. PM₁₀은 0.92~1.99 mg/Sm³의 범위로서 평균 1.49 mg/Sm³였으며, 이에 따른 TPM 대비 PM₁₀ 비율은 60% 정도였다. PM_{2.5}/PM₁₀은 평균 41.6%였다.

2. 입자상 물질을 세부적으로 구분하여 배출계수를 산정한 결과, 제철생산량당 TPM 배출계수는 0.60~1.26 g/kg, PM₁₀은 0.13~0.79 g/kg, PM_{2.5}는 0.12~0.36 g/kg의 범위로서 현재 고시된 배출계수와 많은 차이를 보였다.

3. 가스상 물질인 SO_x는 검출되지 않았으며, NO_x는 5.50~8.67 ppm의 범위로서 평균 6.8 ppm이 발생되는 것으로 조사되었다. NO_x 배출계수는 현재 국내 고시에는 제시되어 있지 않으나, 본 조사결과 제철생산량당 0.42 g/kg으로 산정되었다. 가스상 물질은 현재 국내 배출계수와 다른 결과를 보였으며, 이에 대한 추가적인 조사가 필요한 것으로 판단된다.

4. 미세먼지에 대한 위해성이 증가됨에 따라 대기 배출원에 대한 PM₁₀, PM_{2.5} 배출허용기준의 도입이 필요하며, 향후 방지시설 전·후 배출계수 비교, 사용연료, 적용공정 등의 다양한 시설의 특성을 반영할 수 있는 국내 고유 배출계수에 대한 조사·연구가 지속적으로 추진되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구의 일부는 “환경분야 시험검사의 국제적 적합성 기반구축사업” 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. WHO. Using climate to predict infectious disease outbreak: a review. Geneva: World Health Organization Press; 2004. p. 37-42.

2. Kenneth W, Warner CF, Wayne TD. Air pollution-its origin and control, 3rd ed. Addison Wesley; 1988. p. 24-26.

3. Kim SC. Investigation of the Concentration of PM_{2.5} & PM₁₀ and Alveolar Deposition Ratio. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2019; 45(2): 126-133.

4. Goodman PG, Dockery DW, Clancy L. Cause-specific mortality and the extended effects of particulate pollution and temperature exposure. *Environ Health Perspect*. 2004; 112(2): 179-185.

5. Ostro B, Roth L, Malig B, Marty M. The effects of fine particle components on respiratory hospital admissions in children. *Environ Health Perspect*. 2009; 117(3): 475-480.

6. Canova C, Dunster C, Kelly FJ, Minelli C, Shah PL, Caneja, et al. PM₁₀-induced hospital admissions for asthma and chronic obstructive pulmonary disease: the modifying effect of individual characteristics. *Epidemiology*. 2012; 23(4): 607-615.

7. Faustini A, Stafoggia M, Cappai G, Forastiere F. Short-term effects of air pollution in a cohort of patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Epidemiology*. 2012; 23(6): 861-879.

8. Colais P, Faustini A, Stafoggia M, Berti G, Bisanti L, Cadum E, et al. EPIAIR Collaborative Group. Particulate air pollution and hospital admissions for cardiac diseases in potentially sensitive subgroups. *Epidemiology*. 2012; 23(3): 473-481.

9. Yoo HJ, Kim JK, Shin JW, Kim YJ, Min SE, Jegal DS, et al. Health vulnerability assessment for PM₁₀ due to climate change in Incheon. *Journal of Environmental Health Sciences*. 2017; 43(3): 240-246.

10. Kim DG, Kang KH, Jang KW, Lee JH, Jung SW, Hong JH, et al. Trend analysis of air pollutants emission in Korea (2001-2006). *Proceeding of the 47th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2008; 137-138.

11. National Institute of Environmental Research (NIER), National Air Pollutants Emission 2009; No GP2011-1310 (2011).

12. US Environmental Protection Agency. Procedures for preparing emission factor documents, EPA 454/R95-015 REVISED; 1997.

13. Ministry of Environment. Standard methods of Air pollution analysis; 2020.

14. Van der lans RP, Glarborg P, Dam-johansen K. Influence of process parameters on nitrogen oxide formation in pulverized coal burners. *Energy and Combustion Science*. 1997; 23(4): 349-377.

15. Jang KW, Lee JH, Jung SW, Kang KH, Hong JH. A Study on the comparison of emission factor method and CEMS (Continuous Emission Monitoring System). *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2009; 25(5): 410-419.
16. Lee DA, Yang JG, Park BY, Kim HB, Ha H, Yang SI. Emission characteristics of solid fuel using facilities. *Journal of Korean Society of Environmental Technology*. 2017; 18(2): 123-133.
17. Jeon EC, Myeong SH, Jeong JH, Lee SH, Sa JW, Roh GW, et al. Development of emission factors for Greenhouse Gas (CO₂) from Anthracite Fired Power Plants in Korea. *Journal of Korea Society for Atmospheric Environment*. 2007; 23(4): 440-448.
18. Australian Greenhouse office. Technical guidelines (generator efficiency standards version 1.2; 2001. p.14-33.

<저자정보>

김병욱(연구사), 홍영균(연구사), 이영섭(연구사), 양승표(연구사), 현근우(연구관), 이건호(연구관)