한국환경보건학회지, 제46권 제6호(2020)
J Environ Health Sci. 2020; 46(6): 719-725

pISSN: 1738-4087 eISSN: 2233-8616
https://doi.org/10.5668/JEHS.2020.46.6.719

원 저 | Original articles

고형연료제품 사용시설에서 배출되는 미세먼지 입경분율 분석

유한조† · 정연훈 · 김진길 · 신형순 · 임윤정 · 이상수 · 손해준 · 임삼화 · 김종수
경기도보건환경연구원 북부지원

Analysis of the Fine Particulate Matter Particle Size Fraction Emitted from Facilities Using Solid Refuse Fuel

Han-Jo You†, Yeon-Hoon Jung, Jin-guil Kim, Hyung-Soon Shin, Yoon-Jung Lim, Sang-Soo Lee, Hae-Jun Son, Sam-Hwa Lim, and Jong-Su Kim
Gyeonggi Institute of Health and Environment in North Branch

ABSTRACT

Objectives: With the growth of national interest in fine particulate matter, many complaints about pollutants emitted from air pollution emitting facilities have arisen in recent years. In particular, it is thought that a large volume of particulate pollutants are discharged from workplaces that use Solid Refuse Fuel (SRF). Therefore, particulate contaminants generated from SRF were measured and analyzed in this study in terms of respective particle sizes.

Methods: In this study, particulate matter in exhaust gas was measured by applying US EPA method 201a using a cyclone. This method measures Filterable Particulate Matter (FPM), and does not consider the Condensable Particulate Matter (CPM) that forms particles in the atmosphere after being discharged as a gas in the exhaust gas.

Results: The mass concentration of Total Suspended Particles (TSP) in the four SRF-using facilities was 1.16 to 11.21 mg/Sm3, indicating a very large concentration deviation of about 10 times. When the fuel input method was the continuous injection type, particulate matter larger than 10 μm diameter showed the highest particle size fraction, followed by particulate matter smaller than 10 μm and larger than 2.5 μm, and particulate matter of 2.5 μm or less. Contrary to the continuous injection type, the batch injection type had the smallest particle size fraction of particulate matter larger than 10 μm. The overall particulate matter decreased as the operating load factor decreased from 100% to 60% at the batch input type D plant. In addition, as incomplete combustion significantly decreased, the particle size fraction also changed significantly. Both TSP and heavy metals (six items) satisfied the emissions standards. The measured value of the emission factor was 38-99% smaller than the existing emissions factor.

Conclusions: In the batch injection facility, the particulate matter decreased as the operating load factor decreased, as did the particle size fraction of the particulate matter. These results will help the selection of effective methods such as reducing the operating load factor instead of adjusting the operating time during emergency reduction measures.

Key words: Particulate matter (PM), Solid Refuse Fuel (SRF), operating load-factor, heavy metals, emission factor

†Corresponding author: Gyeonggi Institute of Health and Environment in North Branch, 1, Cheongsa-ro, Uijeongbu-si, Gyeonggi-do 11780, Republic of Korea, Tel: +82-31-8030-5944, E-mail: yhjyzz@gg.go.kr
Received: 19 October 2020, Revised: 5 December 2020, Accepted: 7 December 2020

I. 서 론

PM-10 (Particulate-Matter)은 먼지의 공기역학적 직경이 10 μm 보다 작거나 같은 입자상 물질이며, PM-2.5는 먼지의 공기역학적 직경이 2.5 μm 보다 작거나 같은 입자상 물질이다.[1)]

우리나라에서는 1995년에 10 μm 이하의 작은 입자의 미세먼지(PM-10)로 대기환경기준을 변경하였고, 2015년 미세먼지(PM-10)보다 더 작은 입자인 초미세먼지(PM-2.5)를 본격적으로 관리하기 위해 PM-2.5의 대기환경기준을 신설하였다. 현재 PM-10은 연간 평균치와 24시간 평균치가 각각 50, 100 μg/m^{3}이고 PM-2.5는 연간 평균치와 24시간 평균치가 각각 15, 35 μg/m^{3}로 대기환경기준이 설정되어 있다.[1,2)]

세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서는 미세먼지를 1급 발암물질로 분류하고 있고, 최근 위험성이 부각되면서 사회적으로 큰 관심을 받고 있다.[3,4)] 많은 국민들은 미세먼지 문제를 심각하게 생각하고 있으며 이에 따라 야외 활동을 위해 예보, 경보를 찾아보는 등 미세먼지로 인한 불편함을 많이 느끼고 있다. 비상저감조치시 미세먼지 감소에 가장 효과가 있을 것으로 예상되는 대책을 설문조사한 결과 '대기배출시설, 대형공사장 지도·점검 강화'로 응답을 하였는데,[5)] 이는 사업장들이 미세먼지의 주된 발생원으로 인식을 받고 있음을 알 수 있다. 그러나 사업장에서 배출되는 PM-10이나 PM-2.5에 대한 배출허용기준은 아직 설정되지 않은 상태이고 실측 조사도 미미한 상태이다.

고형연료제품(Solid Refuse Fuel, SRF)은 지정폐기물을 제외한 가연성 고형폐기물을 사용하여 제조한 것을 말한다. SRF를 사용하는 시설은 폐기물의 재활용과 에너지 회수율을 높이기 위해 설치했지만, 대기오염물질의 배출에 따른 환경문제와 SRF에 대한 안전성에 대한 우려 때문에 SRF 사용시설 주변 사람들은 많은 민원을 제기하고 있다.[6)] 특히 경기도는 전국에서 가장 많은 SRF 사용시설을 보유하고 있으며, 경기도에서도 80% 이상이 경기도 북부지역에 위치하고 있다.[7)]

본 연구에서는 경기도 북부지역 SRF 사용시설에 대해 연료투입방식 및 시설용량대비 가동부하율에 따른 입자상 물질의 입경분율을 분석하여 SRF 사용시설의 적정한 운전방식 및 현행 배출계수 산정방식을 검토하고자 하였다.

II. 연구대상 및 방법

1. 시료채취 및 분석방법

본 연구에서는 사이클론(Cyclone)을 사용한 미국 환경청(EPA) method201a를 이용하여 배출가스 중 입자상 물질을 측정하였다.[8)] 이 방법은 여과성 미세먼지(Filterable Particulate-Matter, FPM)를 측정하며, 대기 중에 가스로 배출된 후 입자를 형성하는 응축성 미세먼지(Condensable Particulate-Matter, CPM)가 고려되지 않는 방법이다.

총 부유분진(Total Suspended Particles, TSP), PM-10, PM-2.5는 PM-2.5 여과지 홀더(Holder)와 먼지를 입경별로 분리할 수 있는 사이클론을 Fig. 1과 같이 먼지채취 프로브(Probe)의 앞에 설치하여 반자동식 시료채취기(Method 5, CAE, USA)를 사용하여 등속흡인 하였다. 시료채취 후 여과지(PT48P-KR, MTL, USA)를 회수하고, 사이클론과 여과지홀더 내부의 시료를 아세톤으로 세척하여 입경별로 비커에 분리하였다. 비커에서 아세톤을 휘발시킨 후 비커의 시료와 여과지를 데시케이터 내에서 24시간 이상 건조시키고 전자저울(MSA224S-100-DA, Sartorius, GER)로 무게를 0.1 mg 까지 측정하였다. 미량의 입자상 물질 시료의 대표성을 확보하기 위하여 시료채취는 4 m^3 이상, 4~5시간 동안 실시하였다.

무게 측정 후 중금속 측정을 위해 마이크로웨이브로 전처리 후 ICP-OES (Inductively Coupled Plasma -Optical Emission Spectrometry, Optima 5300DV, Perkin-Elmer, USA)를 이용하여 대기오염물질의 배출허용기준에 포함된 Cu, Ni, Zn, Cd, Cr, Pb을 측

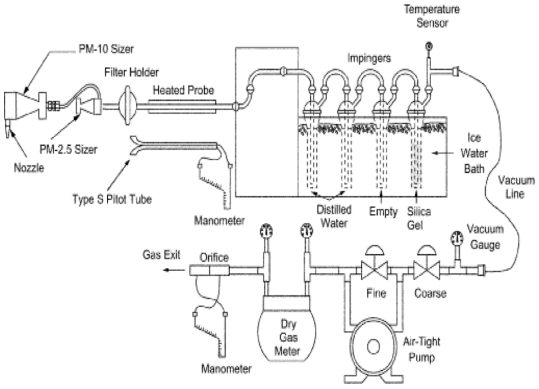

Fig. 1. Sampling device of the particulate mater[8)]

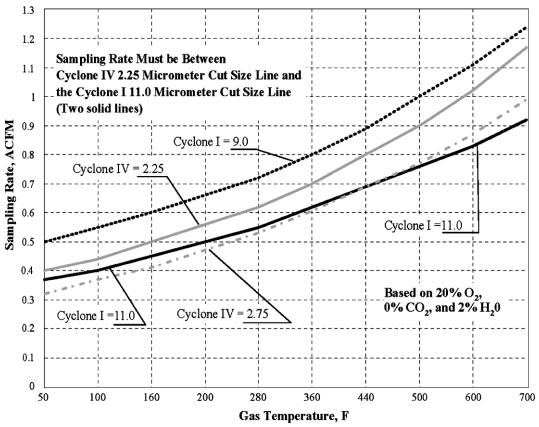

Fig. 2. Acceptable sampling rate for combined cyclone heads[8)]

정하였다. CO, SOx, NOx는 가스분석기(GA-21plus, Madur, AUT)를 이용하여 분석하였다.

2. 사업장 선정

PM-10과 PM-2.5 채취를 위한 사이클론은 기존의 TSP를 채취하기 위한 프로브의 직경보다 더 크기 때문에 굴뚝의 측정공 내경은 약 160 mm 이상이어야 한다. 기존에 설치되어 있는 대부분 측정구의 크기는 사이클론을 이용하기에 부적합하였으며, 이를 만족하는 SRF 사용 사업장은 많지 않았다. 이번 연구를 위해 사이클론으로 측정 가능한 크기의 측정공을 가진 사업장을 먼저 조사하여 6곳을 선정하였다. 1차 선정된 사업장 중 PM-10과 PM-2.5를 동시에 측정하기 위해 EPA method 201a에서 제시된 기준인 Fig. 2 유량곡선을 적용하여 등속흡인이 부적합한 2곳을 제외하고, 최종적으로 적합한 4개의 사업장을 선정하였다. 사업장의 방지시설 종류는 Selective Non-Catalytic Reactor (SNCR), Wet Scrubber (WS), Semi-Dry Reactor (SDR), Selective Catalytic Reactor (SCR), Dry Reactor (DR), cyclone, absorption 등이 설치되어 있었다. 사업장별 방지시설과 연료의 종류, 연료투입방식을 Table 1에 나타내었다.

3. 배출계수 및 배출량 산정

현재 우리나라 대부분의 대기배출시설 측정은 방지시설 후단에서만 할 수 있게 되어있다. 그러나 대기배출시설 설치허가증에는 방지시설 유입 전의 값을 나타내고 있기 때문에 이번 연구에서는 배출계수와 발생량을 구하기 위해 후단에서 측정한 후 방지시설의 제거효율을 적용하여 방지시설의 전단의 값으로 환산하였다. PM-10과 PM-2.5는 방지시설의 제거효율이 제시되지 않았기 때문에 TSP의 제거효율과 동일하다는 가정하에 식(1)을 통하여 배출계수를 산정하였다.[9,10)]

Table 1. Kind of control device, fuel type and injection type

Facility	Control device	Fuel type	Injection type
A	Cyclone, SDR, BF	SRF (Forming)	Continuous
B	SCR, SNCR, WS, BF, Absorption	Bio-SRF (Non-forming)	Continuous
C	Cyclone, SNCR, SCR, SDR, BF	SRF (Non-forming)	Batch
D	Cyclone, SNCR, SCR, DR, BF	SRF+Bio-SRF (Non-forming)	Batch

$$\text{배출계수(g/kg)}=\frac{C \times Q \times 10^3}{F} \quad (1)$$

여기서,
C: 오염물질 농도(mg/m^3)
Q: 건조배출가스유량(m^3/hr)
F: 연료사용량(kg/hr)

III. 결 과

1. 입자상 물질 농도

이번 연구대상인 SRF 사용 사업장은 표준산소농도 12%를 적용하여 입자상 물질의 질량농도를 보정하였다. 사업장을 각각 3회 측정하여 평균하였다. Fig. 3은 사업장 A, B, C, D의 배출가스 중 입자상 물질의 평균농도를 나타내었다. 4개의 사업장 중 가장 낮은 농도를 나타내는 A 사업장의 TSP, PM-10, PM-2.5의 농도는 각각 1.16, 0.62, 0.18 mg/Sm^3, B 사업장은 2.91, 1.28, 0.36 mg/Sm^3, C 사업장은 2.17, 1.69, 0.95 mg/Sm^3, 가장 높은 농도를 나타내는 D 사업장의 농도는 각각 11.21, 8.17, 3.84 mg/Sm^3 으로 나타났다. A와 D 사업장의 TSP농도는 약 10배, PM-10은 13배, PM-2.5는 약 21배 정도의 차이를 나타내었다.

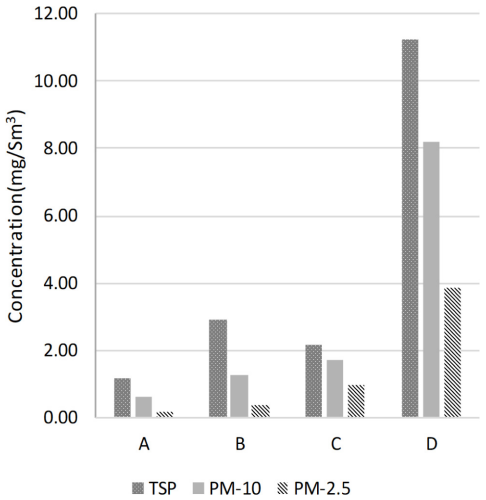

Fig. 3. TSP, PM-10, PM-2.5 concentration of facility A, B, C, D

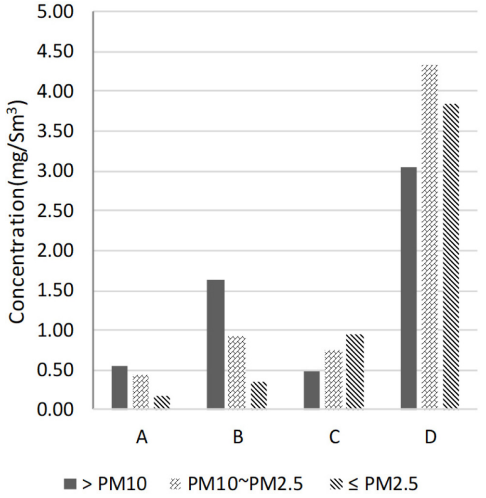

Fig. 4. Particle size concentration of facility A, B, C, D

2. 입자상 물질의 입경분율

입자상 물질의 입경을 3개의 범위로 구분하였다. 10 μm 보다 큰 입자상 물질(>PM10), 10 μm 이하이면서 2.5 μm 보다는 큰 입자상 물질(PM10~PM2.5), 2.5 μm 이하의 입자상 물질(≤PM2.5)로 나타냈다. 이와 같이 구분하여 나타낸 Fig. 4는 4개 사업장의 입자크기에 따른 차이를 확연하게 알아볼 수 있다. A, B 사업장은 공통적으로 >PM10, PM10~PM2.5, ≤PM2.5의 순서대로 농도가 높게 나타난다. 반면 C와 D 사업장은 >PM10이 가장 작은 농도를 나타내

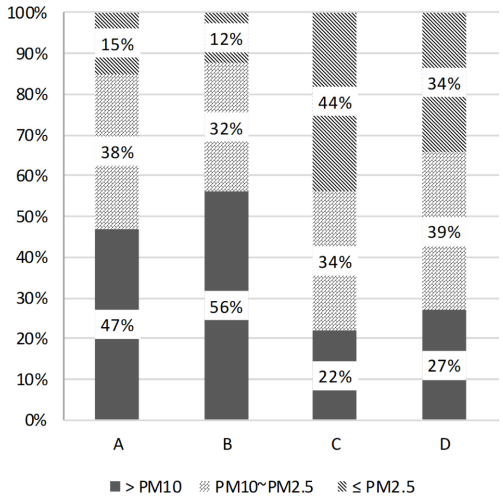

Fig. 5. Particle size fraction of facility A, B, C, D

며 PM10~PM2.5와 ≤PM2.5가 더 높은 농도를 나타내었다.

3. 가동부하율에 따른 입자상 물질 농도변화

입자상 물질의 입경분포 차이를 한 사업장의 가동부하율의 차이에서 찾아볼 수 있었다. A 사업장은 약 80%, B 사업장은 95%, C 사업장은 80% 정도의 꾸준한 가동부하율을 보였다. 반면 D 사업장은 100%와 60%의 가동부하율로 나뉘었는데 결과에서도 큰 차이를 보였다. Fig. 6에 나타난 100%의 가동부하율에서 >PM10, PM10~PM2.5, ≤PM2.5의 농도는 각각 4.24, 6.38, 5.74 mg/Sm^3 이었고, 60%의 가동부하율에서 >PM10, PM10~PM2.5, ≤PM2.5의 농도는 각각 0.64, 0.21, 0.06 mg/Sm^3 이었다. 100%와 60%의 가동부하율의 차이는 약 40% 정도의 감소를 보였지만 입자상 물질의 농도 차이는 >PM10에서 약 85%, PM10~PM2.5에서는 약 97%, ≤PM2.5에서는 약 99% 정도의 감소를 보였다. Fig. 7을 보면 입경분율 또한 크게 변화하였는데 100%의 가동부하율에서는 >PM10이 26%를 차지하여 가장 적은 분율을 나타내었다. 반면 60%의 가동부하율에서는 >PM10이 70%의 가장 큰 분율을 나타내었고, PM10~PM2.5가 그 다음으로 많은 23%를 나타냈다. 마지막으로 ≤PM2.5가 6%로 가장 작은 분율을 나타냈는데 이는 Fig. 5에서 보이는 연속투입식의 A, B 사업장과 비슷한 분율을 보였다. 또한 D 사업장은

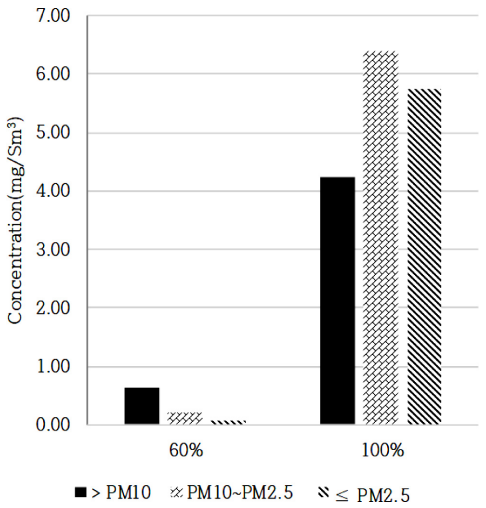

Fig. 6. Concentration of particle size according to operating load-factor of facility D

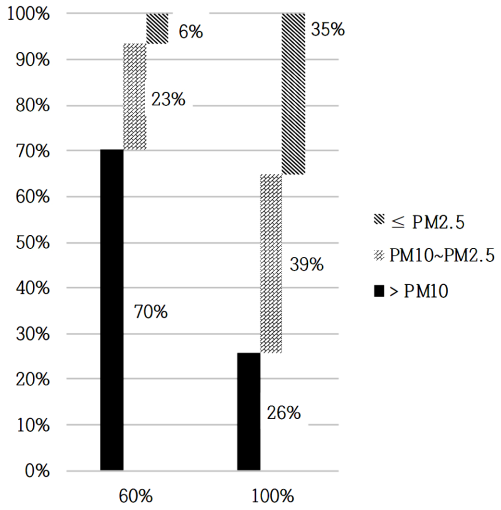

Fig. 7. Particle size fraction according to operating load-factor of facility D

정상적인 가동에서 유지되는 CO의 값이 10 ppm으로 안정적으로 측정되었다. 이에 비해서 연료투입시에 CO의 값은 60%의 가동부하율에서는 30 ppm 이하의 증가만을 보였지만, 100%의 가동부하율에서는 100 ppm 이상의 증가를 보였다.

4. 중금속

대기오염물질의 배출허용기준에 명시되어 있는 중금속인 Cu, Ni, Zn, Cd, Cr, Pb을 분석한 결과를 Table 2에 나타냈다. 방법검출한계는 각각 Cu 0.003 이하, Ni 0.003 이하, Zn 0.030 이하, Cd 0.001 이하, Cr 0.001 이하, Pb 0.008 이하이며 단위는 mg/Sm³이었다. Cd와 Pb는 모든 사업장에서 불검출이었으며 모든 항목이 배출허용기준 이내로 확인되었다. 입자상 물질의 입경별 농도가 높을수록 중금속 또한 높은 값을 나타낼 것이라는 예상을 하였지만 중금속 농도가 너무 낮거나 검출되지 않아 입자상 물질의 농도와 중금속의 농도의 상관관계를 알 수 없었다. 공정시험기준의 방법검출한계를 적용하지 않았을 때는 A, B, C, D 사업장 모두 미량이지만 Zn이 가장 높게 검출되었다. 이전 연구[5]에서도 SRF를 분석한 결과 Zn 항목이 중금속들 중 가장 높게 나타났으며, SRF의 연소 후 배출가스에서도 배출허용기준에 명시되어 있는 중금속들 중 Zn이 가장 높은 값을 나타냈다.

Table 2. Heavy metals concentration of facility D (mg/Sm³)

Element	>PM10	PM10~PM2.5	≤PM2.5
Cr	N.D.	0.0007	N.D.
Cd	N.D.	N.D.	N.D.
Pb	N.D.	N.D.	N.D.
Ni	N.D.	N.D.	N.D.
Cu	N.D.	0.0030	0.0097
Zn	N.D.	0.0537	0.1408

※N.D.: non-detection

5. 배출계수 및 배출량

대기배출시설설치 허가증 상의 TSP 배출계수와 배출량 실측상의 TSP 배출계수와 배출량을 Table 3에 나타냈다.

4개의 사업장 모두 배출계수가 크게 감소하였다. 가장 크게는 감소한 사업장은 C 사업장으로 99% 감소하였고, 가장 적게 감소한 사업장은 D 사업장으로 38% 감소하였다. Table 4에는 각 사업장에서의 PM-10과 PM-2.5의 배출계수와 배출량을 산정하여 나타내었다.

Table 3. Emission factor and emission of TSP

Facility	Permit		Actual measurement	
	TSP emission factor (kg/ton)	Emission (ton/year)	TSP emission factor (kg/ton)	Emission (ton/year)
A	31.80	207.04	0.64	4.12
B	31.78	1,286.93	4.32	174.84
C	21.45	92.66	0.19	0.83
D	8.63	37.28	5.35	21.24

Table 4. Emission factor and emission of PM-10, PM-2.5

Facility	Actual measurement			
	PM-10 emission factor (kg/ton)	Emission (ton/year)	PM-2.5 emission factor (kg/ton)	Emission (ton/year)
A	0.34	2.21	0.10	0.64
B	1.84	74.33	0.52	21.11
C	0.15	0.66	0.10	0.44
D	3.87	16.72	1.82	7.85

IV. 고 찰

A와 B 사업장은 연료투입방식이 연속투입식으로 일정량의 연료가 꾸준히 투입되어 연소가 일정하게 이루어지는 반면 C와 D 사업장은 일괄투입식으로 한 번에 많은 양의 연료를 투입하기 때문에 불완전연소가 상대적으로 연속투입식보다 많이 일어난다. 실제로 A와 B 사업장은 입자상 물질의 채취시간 동안 CO의 농도는 일정한 수준을 유지하였지만 C와 D 사업장은 연료투입이 일어날 때 CO의 농도가 현저히 높아지는 현상을 보였다. 앞서 다른 연구에서도 연료투입시점에서 CO의 농도가 크게 증가함을 나타냈다.[11] 이와 같은 현상으로 C와 D 사업장은 연기, 검댕과 같은 미세한 입자상 물질이 많이 나오게 된다. 이때 10 μm 이하의 미세한 입자상 물질이 더 많이 발생되고 방지시설이 처리하지 못한 미세입자들이 배출되어 A, B 사업장과 C, D 사업장의 입경분율이 차이가 난 것으로 생각한다.

또한 입경분율과 입자상 물질의 농도변화가 가동부하율에 따라 변화한다는 것을 확인했다. 가동부하율이 낮은 것은 연료투입이 적어진다는 것을 의미한다. 특히 연속투입식이 아닌 일괄투입식에서 연료의 투입이 적어지면 불완전연소가 적어진다. D 사업장의 결과로 100%일 때보다 60%의 가동부하율일 때 큰 입자상 물질들뿐만 아니라 연기, 검댕 같은 미세한 입자상 물질도 적게 발생된다. 이로 인해 연료투입시에 방지시설에서의 과부하가 줄어들어 전체적인 입자상 물질의 농도가 줄어든 것으로 판단된다. 사업장 운영방식이 완전연소 될 수 있도록 연속투입방식과 적정 가동부하율의 운전이 요구된다.

가동부하율은 배출계수에도 영향을 미친 것으로 생각한다. 대기배출시설설치 허가증의 가동부하율이 100%로 산정되어 있는데 실제 가동시에는 이보다 줄어들면서 배출계수도 크게 감소하였다. 또 다른 배출계수 감소원인 중 하나는 SRF의 회분 함량(%)의 변화다. 대기배출시설설치 허가를 처음 받았을 때와 실제 납품받아 사용되고 있는 SRF의 회분 함량에 차이가 있었다. SRF의 배출계수는 5A로 설정되어 있으며, 여기서 A가 회분 함량을 나타냈다. 회분 함량이 바뀔 때 배출계수가 변화하는데, 시료채취당시 SRF의 회분 함량이 D 사업장을 제외하고 전부 감소한 것을 확인하였다.

중금속은 결과 4.와 같이 매우 미량이 배출되지만 그 중 Zn이 가장 높은 농도를 나타냈다. 이는 SRF의 관리에서 문제를 찾을 수 있었는데 SRF는 「고형연료제품의 품질기준」뿐만 아니라, 「고형연료제품 품질 시험·분석 방법」에도 Zn을 제외한 다른 항목들만 명시되어, Zn의 관리는 이루어지지 않고 있다는 것을 보여준다. 현재는 모두 배출허용기준 이내로 관리되고 있지만 더 엄격한 관리를 위해서는 적어도 「고형연료제품 품질시험·분석 방법」에 Zn 항목을 추가할 필요가 있다고 생각한다. Zn은 산화아연이나 염화아연으로 흡입하면 금속열이 발생하며 오한, 발열, 두통 등도 나타난다고 알려져 있다.[11] 그러나 Zn은 인체 발암성을 분류할 수 있을 정도의 충분한 근거자료가 없을 뿐만 아니라, 호흡노출참고치(Inhalation Reference Concenration) 및 호흡단위위해도(Inhalation Unit Risk) 등이 제시되어 있지 않다.[11-13] 따라서 다른 중금속에 비해 연구가 이루어지지 않은 상태이다. 그러나 인체에 흡입되어 건강에 위해를 미치는 2.5 μm 이하와 10 μm 이하의 입자상 물질에 중금속이 검출된 만큼 향후 장기간의 모니터링 및 연구가 필요할 것으로 생각한다.

또한 이번 연구에서는 4개의 사업장에 대해서만 연구가 이루어졌지만 이후 지속적으로 많은 사업장의 데이터 확보와 연구를 통하여 가동부하율의 최적의 조건과 정확한 배출계수산정이 이루어져야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 SRF 사용시설에서 배출되는 입자상 물질을 측정·분석하여 실측자료를 확보하고자 하였다.

이번 연구를 통해 연료의 연속투입식보다 일괄투입식이 불완전연소가 많이 일어나 10 μm 이하의 입경분율이 높아지는 것을 확인 할 수 있었다. 그러나 일괄투입식에선 가동부하율이 감소함에 따라 전체적인 입자상 물질이 감소하였으며, 특히 불완전연소가 감소함에 따라 10 μm 이하 입자상 물질의 배출이 크게 감소함을 보였다. 이러한 관점에서 사업장 운영방식은 일괄투입방식보다는 연속투입방식의 사용이 권장되며, 일괄투입방식에서는 적정 가동부하율의 운전이 요구된다. 또한 연료를 일괄투입하는 사업장의 가동부하율에 따른 입자상 물질 감소와 입경분율의 변화는 미세먼지 비상저감조치시 사업장에 따라 조업시간의 조정대신 가동부하율을 일정량 이하로 줄이는 등의 효과적인 방법 선택에 도움을 줄 것으로 기대한다.

References

1. Kim SC. Investigation of the concentration of $PM_{2.1}$ & PM_{10} and alveolar deposition ratio. *J Environ Health Sci*. 2019; 45(2): 126-133.
2. Shin HS, Jung YH, Kim JG, Jung JP, Lee SS, You HJ, et al. Characteristics of heavy metals in the industrial complex area of pocheon city. *J Environ Health Sci*. 2019; 45(6): 577-582.
3. World Health Organization (WHO). Guideline for air quality. 2000.
4. Yoon DK, Namgoung SJ, Kong HK, Hong HJ, Lim HB, Park SH, et al. Assessment of exposure to and risk of formaldehyde and particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) by time activity applying real-time indoor and outdoor monitoring. *J Environ Health Sci*. 2019; 45(6): 646-657.
5. Shin DW, Joo HS, Lee GE. A survey on the people's consciousness of particulate matter. Korea Environment Institute. 2019; KEI Focus. 45.
6. Kang DE, Jang KW, Lim SY, Heo SH, Kim DG, Kang JG, et al. A study on the management plan for the reduction of the fine particulate matter from solid refuse fuel manufacturing and using facilities. National Institute of Environmental Research. 2017.
7. Korea Environment Corporation. Manufacturing, use, and import status of solid fuel products (as of the end of June 2019). Https://www.srf-info.or.kr/lbry/lbryPa geR.do[accessed 3 january 2020].
8. United States Environmental Protection Agency (U.S EPA). Method201a, Determination of PM_{10} And $PM_{2.5}$ emissions from stationary sources. https://www.epa.gov/sites/ production/files/2019-08/documents/method_201a_0.pdf [accessed 3 january 2020].
9. Park HS, Lee DA, Yang JG, Jang SG, Kim HB, Kim DS. Emission characteristics of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in thermal power plants using different fuel types. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2018; 34(4): 534-541.
10. Kim JH, Heo SH, Kim HC, Jo MR, Lim SO, Lee SB et al. A study on emission characteristics of air pollutants from the use of solid fuel. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*. 2017; 33(2): 77-86.
11. United States Environmental Protection Agency (U.S EPA). Toxicological review of zinc and compounds. EPA/635/R-05/002. 2005.
12. Myung N-I, Lee Y-S, Shin D-Y. A case study on health impact assessment from incinerator operation in new towns -Human risk assessment due to heavy metals inhalation-. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 2010; 19(3): 271-279.
13. Kim YH, Choi SK, Lee YS. A cade study of health impact assessment on incinerator construction project -Human risk assessment due to inhalation exposure to heavy metals-. *Journal of Environmental Impact Assessment*. 2009; 18(1): 11-19.

<저자정보>

유한조(연구사), 정연훈(연구관), 김진길(연구사), 신형순(연구사), 임윤정(연구사), 이상수(연구사), 손해준(연구사), 임삼화, 김종수(연구관)