



고형연료의 배출특성 연구

A Study on the Characteristics of Solid-Fuel Combustion

장기원 · 허선화 · 임승영 · 김대곤 · 정용원¹⁾ · 강대일*

국립환경과학원 대기공학연구과, ¹⁾인하대학교 환경공학과

(2017년 7월 11일 접수, 2017년 8월 14일 수정, 2017년 8월 22일 채택)

Kee-Won Jang, Sun-Hwa Heo, Seung-Young Lim, Dae-Gon Kim,
Yong-Won Jung¹⁾ and Dae-Il Kang*

Air Pollution Engineering Research Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾Department of Environmental Engineering, Inha University

(Received 11 July 2017, revised 14 August 2017, accepted 22 August 2017)

Abstract

In this study, we developed emission factors from solid-fuel fired combustors. In order to increase the reliability of emission factors, we conducted a joint research with the Institute of Health and Environment. As a result, PM average concentration was 8.19 mg/m³. SO₂ and NO_x were respectively 8.46 ppm, 50.64 ppm. Hazardous air pollutants such as Cr, Pb and Hg were detected in trace amounts continuously for 2 years in some solid-fuel fired combustors. The emission factors for the three kinds of PM, SO_x, NO_x were developed based on the measurement data. For the PM emission factors, that of SRF was 15.93 g/kg and that of Bio-SRF was 14.18 g/kg. Compared with those of US. EPA, emission factors of this study showed the results of low values. SO_x emission factors were 4.42 g/kg for SRF and 1.39 g/kg for Bio-SRF. NO_x emission factors were 13.21 g/kg and 4.43 g/kg, respectively. Through the results of this study, we would support atmospheric administration policies such as the emission factor notification revision.

Key words : Solid-fuel, SRF, Bio-SRF, Emission factor

1. 서 론

에너지 자원이 매우 부족한 우리나라는 안정적인 에너지 확보를 위해 신재생에너지의 개발 및 생산을 시급히 해결해야 한다(NIER, 2010). 더욱이 최근 들어 부각되고 있는 탈원전 시대를 극복할 수 있는 주요 대안으로 ‘신재생에너지’에 대한 관심이 집중되고 있다.

2015년 기준으로 신재생에너지는 총 13,293천toe로 전년대비 15.2% 증가하였으며, 국내에너지의 4.66%를 공급하고 있다. 이 가운데 신재생에너지의 65.2%가 폐기물이며, 에너지 보급량 또한 '15년 기준으로 전년대비 56.7% 급등하여 신재생에너지 가운데 가장 높은 증가율을 나타내고 있다(MOTIE, 2016). 태양광, 풍력 등과 같은 신에너지보다 재생에너지인 폐기물 에너지가 급격히 증가하는 것(Kim *et al.*, 2012)은 궁극적으로 청정연료 사용으로 대기오염물질 발생을 저감하려고 하는 기존 연료정책과 상반된다. 더불어, 화석연료에

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7347, E-mail : nierkang@korea.kr



Fig. 1. Various types of solid fuels.

준하여 배출계수를 적용받던 고형연료가 국내 특성이 반영된 현실적인 대기오염물질 발생량으로, 그 필요성이 상향 조정됨을 의미한다.

최근 들어 증가하고 있는 고형연료 사용 시설은 인근 지역주민들과 빈번한 환경문제를 유발하고 있다 (NIER, 2016). 경기도에서 최근 3년간 고형연료시설에 대한 점검 결과, 배출허용기준을 초과한 16개소를 포함하여 39개소를 적발하는 등의 고형연료 사용에 따른 적정 관리가 미흡할 경우, 오염물질 배출이 주변에 악영향을 끼칠 수 있음을 증명하고 있다. 고형연료를 사용하는 시설은 어느덧 주요 대기배출원으로 위치하고 있음을 의미하기도 한다. 이에 따라 고형연료 사용 시설에 대한 대기관리방안 마련이 시급히 요구된다. 본 연구는 SRF (Solid Refuse Fuel)와 Bio-SRF로 구분되는 고형연료에 대한 현장조사 및 측정을 통해 배출특성을 파악하고자 하였다. 궁극적으로 신뢰도 높은 대기오염물질 배출계수 개발 등을 통해 대기관리를 위한 기초자료 구축을 목표로 하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 시설 일반 현황

고형연료는 그림 1과 같이 다양한 형태와 종류가 있으나, 일반적으로 SRF와 Bio-SRF로 구분된다. 더불어 연료 투입 형태에 따라 일정한 규격의 성형제품과 규격이 일정하지 않은 비성형제품으로 구분된다.

본 연구는 SRF와 Bio-SRF로 구분하여 대상 시설을 선정하였으며, 자료의 신뢰도 향상을 위하여 시·도 보건환경연구원과 공동으로 추진하였다. 또한 SRF와 Bio-SRF 사용에 따른 대기오염물질 배출계수 산정을 위해서 고형연료만 사용하는 전소시설 (Total solid-fuel

fired combustor)을 선정하였다. 그 결과, 대상 시설은 총 45개의 시설이다. SRF 사용 시설은 32개 시설이며, Bio-SRF 사용 시설은 13개 시설을 선정하였다. 표 1의 'O' 시설의 경우, SRF와 Bio-SRF의 혼용시설 (Mixing combustion facility)이나 SRF 사용량 비중이 높아 SRF 사용 시설로 구분하였다. 본 연구는 측정횟수를 최대한 확보하기 위하여 2년간 추진하였으며, 동일 시설에 대해 매년 1회 이상 측정된 경우도 포함되었다. 동일 시설이라 해도 현장 측정 시 배출특성이 다르기 때문에 중복시설은 개별시설로 각각 구분하여 연구를 추진하였다. 대상 시설을 포함하는 사업장은 중별 다양성을 확보하기 위해 대기 1~4종을 포함시켰으며, 연소시설 형태는 주로 보일러이다. 방지시설은 3개 사업장을 제외한 42개 사업장에서 먼지를 제거할 수 있는 여과 집진시설을 사용하고 있었다. 질소산화물을 제거할 선택적비촉매환원시설과 황산화물을 제거하기 위해 반건식세정시설을 주로 운용하고 있었다. 연료 사용량은 대기배출원관리시스템 (SEMS)에 등록된 배출시설의 연료 사용량을 명시하였다. SRF와 Bio-SRF 배출시설에 대한 일반 현황은 표 1 및 표 2와 같다. 측정은 그림 2와 같이 배출시설 후단에서 수행하였다.

2.2 측정 항목 및 측정 방법

측정물질은 먼지 (PM)를 중심으로 측정하였다. 먼지 측정은 먼지시료채취기 (M-5, CAE, U.S.)를 사용하여 등속흡인 (Isokinetic Sampling)을 위해 배출가스 압력, 수분량, 유속, 온도 등을 측정하고 오리피스 차압을 설정하였다. 여지는 원형여지 (88R, Advantec, Japan)를 사용하였다. 먼지 측정용 여지를 이용하여 인체위해도가 높은 크롬, 납 등 6종의 중금속을 ICP-OES (720-ES, Varian, U.S.)로 분석하였다. 추가로 입자상 및 가스상이 포함된 총 수은은 CVAA (Cold Vapor Atomic Absorption)

Table 1. General information of SRF combustors.

Facility	Fuel type	Form	Fuel usage (ton/day)	APCD	Measuring year
A	SRF	Forming	11	CL, B/F	'15
B	SRF	Forming	12	B/F	'16
C	SRF	Forming	13	SNCR, SDR, B/F	'15
D	SRF	Forming	14	SNCR, SDR, B/F	'15, '16(2)
E	SRF	Forming	42	SNCR, SDR, B/F, A/S	'15, '16
F	SRF	Forming	43.2	CL, B/F, SDR	'15, '16
G	SRF	Forming	46.8	SNCR, SDR, CL, B/F, Scrubber	'15, '16(2)
H	SRF	Forming	72	CL, SDR, B/F, SNCR/SCR	'15, '16
I	SRF	Forming	162	SNCR, SDR, B/F, A/S	'15, '16
J	SRF	Non-forming	14.4	CL, SDR, B/F, SCR	'15, '16
K	SRF	Non-forming	93.6	SNCR, SDR, B/F, A/S	'15
L	SRF	Non-forming	100	SNCR, SDR, B/F, A/S	'15, '16
M	SRF	Non-forming	540	SNCR, A/S, B/F, SCR	'15, '16
N	SRF	Mixing	66	SNCR, SCR, SDR, B/F, A/S	'16
O	SRF/Bio-SRF	Mixing	119	CL, B/F, SCR, SNCR, Scrubber	'15, '16
P	SRF	Non-forming	7	B/F	'15(2), '16
Q	SRF	Non-forming	72	SNCR, SDR, B/F	'15, '16

※APCD: Air Pollution Control Device, CL: Cyclone, B/F: Bag-filter, EP: Electrostatic Precipitator, SNCR: Selective Non-Catalytic Reactor, SCR: Selective Non-Catalytic Reactor, DR: Dry-Reactor, SDR: Semi-Dry Reactor, Scrubber: Wet Scrubber, A/S: Absorption.

Table 2. General information of Bio-SRF combustors.

Facility	Fuel type	Form	Fuel usage (ton/day)	APCD	Measuring year
R	Bio-SRF	Non-forming	16.8	B/F	'15
S	Bio-SRF	Non-forming	17.1	DR, B/F	'15, '16
T	Bio-SRF	Non-forming	22.8	B/F	'15, '16
U	Bio-SRF	Non-forming	46.8	SNCR, CL, SDR, A/S, B/F	'15
V	Bio-SRF	Non-forming	135	SNCR, A/S, B/F, SCR	'16
W	Bio-SRF	Non-forming	338.5	DR, SNCR, SDR, A/S, B/F	'16
X	Bio-SRF	Non-forming	840	SNCR, B/F	'16
Y	Bio-SRF	Non-forming	960	SNCR, CL, B/F SDR, SCR, A/S	'16
Z	Bio-SRF	Non-forming	45.6	SNCR, CL, EP	'15, '16
AA	Bio-SRF	Non-forming	52.8	SNCR, CL, EP	'16

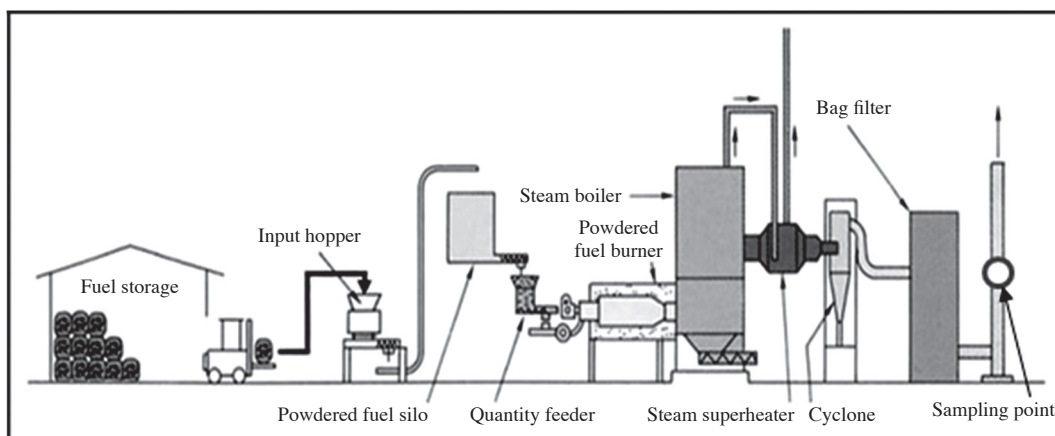
**Fig. 2. Schematic of typical solid-fuel combustion & Sampling point.**

Table 3. Methods of sampling & analysis.

Pollutants	Sampling method	Analysis method	Sampling times
PM	Korea Standard Methods for Examination (ES 01301. 1)	Korea Standard Methods for Examination (ES 01301. 1, Weight)	3
Heavy metals	Korea Standard Methods for Examination (ES 01301. 1)	Korea Standard Methods for Examination (ES 01400. 2, ICP)	"
Hg	Korea Standard Methods for Examination (ES 01408.1)	Korea Standard Methods for Examination (ES 01408.1)	"
NO _x , SO ₂	Auto measurement		Continuously measurement

방식의 수은분석기(AULA-254, Mercury instruments, U.S)를 이용하여 분석하였다. 가스상 물질은 질소산화물, 이산화황을 대상으로 측정하였다. 입자상물질의 시료채취·분석은 대기오염공정시험기준을 적용하였으며, 기본적으로 3회 측정하였다. 질소산화물과 황산화물은 휴대용 가스측정기(350K, Testo, Germany 등)를 사용하였으며, 먼지시료채취 시간에 맞춰 1초 단위로 자료저장을 통해 평균값으로 환산하였다. 오염물질의 측정 및 분석 방법은 표 3과 같다.

2.3 대기오염물질 배출계수 도출

오염물질 배출농도를 배출량으로 환산하기 위해 먼지, 질소산화물, 이산화황(황산화물)에 대한 대기오염물질 배출계수를 식 1을 적용하여 도출하였다.

$$EF = \frac{C \times Q_{dry} \times 10^{-6}}{U} \quad (1)$$

여기서,

EF=Emission factor of air pollutant (g/kg)

C=Concentration of air pollutant (mg/m³)

Q_{dry}=Quantity of dried flue gas (m³/hr)

U=Usage of Fuel (kg/hr)

대기오염물질 농도는 방지시설 후단에서 측정된(Controlled) 값이다. 국립환경과학원에서 고시하고 있는 대기오염물질 배출계수와 동일한 조건을 적용하기 위해 방지시설을 통과하지 않은(Uncontrolled) 값으로 환산이 필요하다. 따라서, 시료채취 시 대상 시설과 연계된 방지시설의 실제 방지효율을 사업장에서 입수하여 각각의 방지시설을 통과하지 않은 농도로 환산하였다. 실제 방지효율을 모두 포함한 오염물질별 평균 방

Table 4. Key factors for uncontrolled emission factor.

Pollutants	Fuel-type	Content (%)		Removal efficiency (%)
		Ash	Sulfur	
PM	SRF	7.3	—	96.8
	Bio-SRF	2.0	—	96.3
NO _x	SRF	—	—	76.2
	Bio-SRF	—	—	43.4
SO _x	SRF	—	0.2	67.1
	Bio-SRF	—	0.1	60.3

지효율은 표 4와 같다. 연료 사용량은 실측 시 사용된 연료 사용량을 적용하였다. 더불어, 폐플라스틱, 폐비닐, 합판 등의 다양한 형태로 구성된 SRF와 Bio-SRF의 배출계수 결과 값의 편차가 클 것으로 판단된다. 이에 대한 보완사항으로 먼지와 황산화물의 경우, 회분 함량과 황 함량을 적용하여 변화 가능한 배출계수 도출을 위해 고형연료 성분분석표도 함께 입수하였다. SRF와 Bio-SRF 사용 시설에서 입수한 품질검사서는 각각 32개, 18개이다. SRF의 회분 함량은 최대 17.6%에서 최소 0.6%이며, 황 함량은 최대 1.3%에서 최소 0.0%이다. Bio-SRF의 회분 함량은 11.7~0.3%이며, 황 함량은 0.2~0.0%이다. 고형연료의 회분 함량 및 황 함량은 평균값으로 환산하여 표 4와 같이 나타났다.

3. 연구 결과

3.1 오염물질 농도

3.1.1 먼지

고형연료 사용 시설 가운데 SRF는 총 28개 시설에

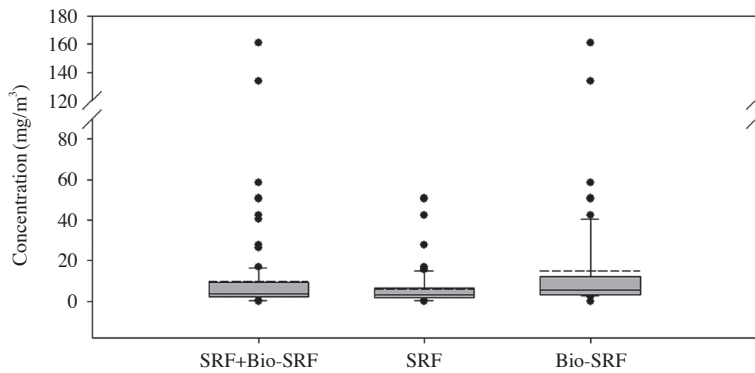


Fig. 3. PM concentration range on solid-fuel fired combustors.

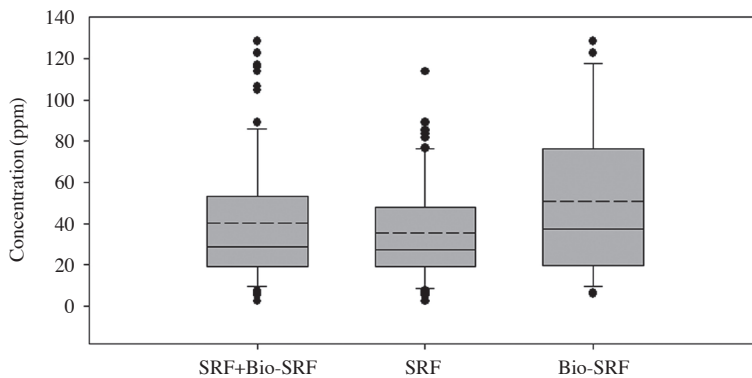


Fig. 4. NO_x concentration range on solid-fuel fired combustors.

서 먼지농도를 측정하였으며, 측정 개수는 81개이다. 81개의 측정된 먼지농도는 최소 0.14 mg/m³에서 최대 50.61 mg/m³이었으며, 평균 먼지농도는 6.16 mg/m³이었다. Bio-SRF는 총 10개 시설에서 측정하였으며, 측정 개수는 34개이다. 먼지농도는 최소 0.00 mg/m³에서 최대 161.04 mg/m³로 측정되었다. 평균 먼지농도는 18.60 mg/m³로 SRF 사용 시설에 비해 약 3배 높게 나타났다. SRF와 Bio-SRF 사용 시설을 모두 포함한 고형연료 사용 시설에서의 평균 먼지농도는 9.84 mg/m³이었다.

그림 3과 같이 SRF 사용 시설에 비해 Bio-SRF 사용 시설에서 먼지농도가 광범위하게 측정되었다. 주요 원인으로서는 폐플라스틱, 폐합성수지 중심의 가연성 고형 폐기물이 주성분인 SRF에 비해 농업 폐기물, 땅콩껍질 등의 식물성 잔재물, 합판, 목재부산물 등의 가공목재

류, 팜껍질, 캐슈넛 등의 수입산 열대식물 부산물 등으로 다양하게 구성된 Bio-SRF 사용 시설에서 측정농도가 광범위한 것으로 판단된다.

3.1.2 질소산화물

SRF 사용 시설에서 측정된 질소산화물 농도는 최소 농도 2.31 ppm에서 최대 농도 113.80 ppm이었으며, 평균농도는 35.43 ppm이었다. Bio-SRF 사용 시설은 최소 5.86 ppm에서 최대 128.25 ppm으로 측정되었다. 평균농도는 50.80 ppm으로 SRF 사용 시설의 평균농도에 비해 1.4배 높게 나타났다. SRF와 Bio-SRF 사용 시설을 포함한 고형연료 사용 시설의 평균 질소산화물 농도는 40.50 ppm이었다.

특히 그림 4와 같이 Bio-SRF 사용 시설의 최소 농도 값이 SRF 사용 시설에 비해 2.5배 높게 측정되어 질소

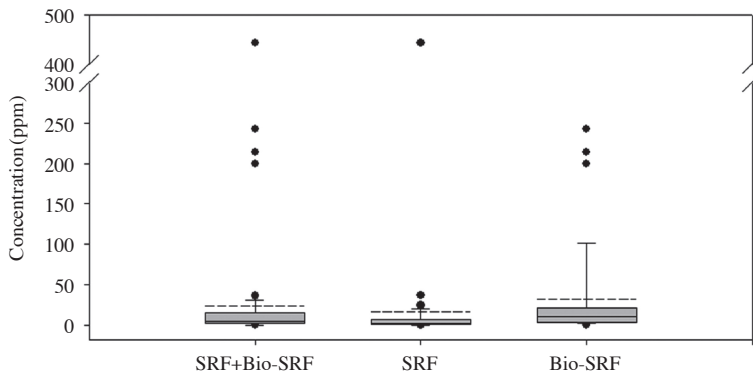
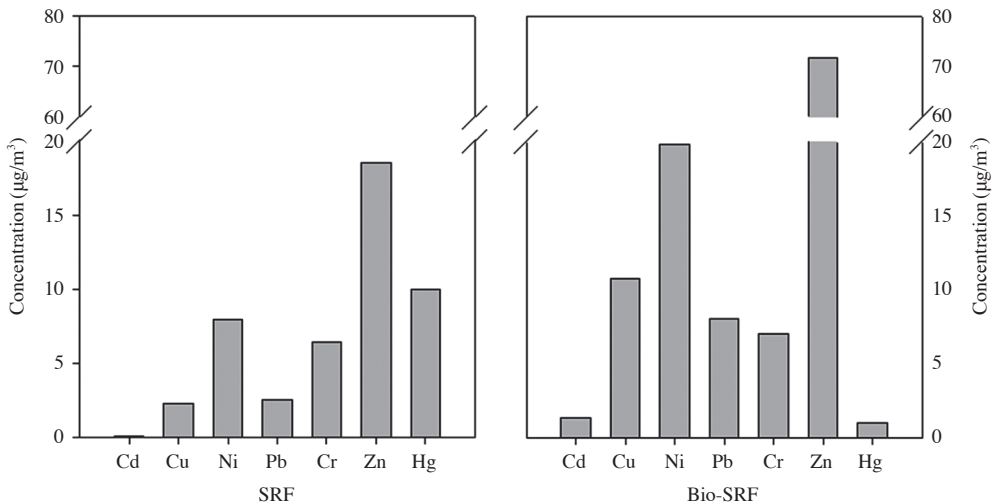
Fig. 5. SO₂ concentration range on solid-fuel fired combustors.

Fig. 6. Heavy metals concentration range on solid-fuel fired combustors.

산화물 배출이 초목 계열의 고형연료제품에서 상대적으로 많음을 알 수 있다. 위와 같은 결과는 배출가스 중 질소산화물 농도는 연료의 원료 물질 조성에 따라 결정된다는 이동규 등(2005)의 논문 내용과 비슷한 경향성을 보인다.

3.1.3 이산화황

SRF 사용 시설의 이산화황 농도는 최소 0.04 ppm에서 최대 443.58 ppm이었으며, 평균농도는 16.68 ppm이었다. Bio-SRF 사용 시설의 경우 최소 0.55 ppm에서 최대 242.54 ppm으로 측정되었으며, 평균농도는 31.84 ppm이었다. Bio-SRF 사용 시설에서의 이산화황 농도

가 약 2배 높게 나타났으며, 고형연료 사용 시설에서의 이산화황 평균농도는 23.20 ppm으로 나타났다.

한편, 이산화황의 측정농도는 그림 5와 같이 질소산화물 측정농도에 비해 측정범위가 광범위하다. 특히 평균농도는 낮으나 상대적으로 황 함유량이 높은 SRF 사용 시설에서 Bio-SRF 사용 시설에 비해 최대 농도 값이 약 1.8배 수준으로 높음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 황 함유량이 고형연료의 황산화물 농도 결정 요소로 일부 작용함을 알 수 있다.

3.1.4 중금속

SRF 사용 시설에서의 수은을 포함한 7종의 중금속

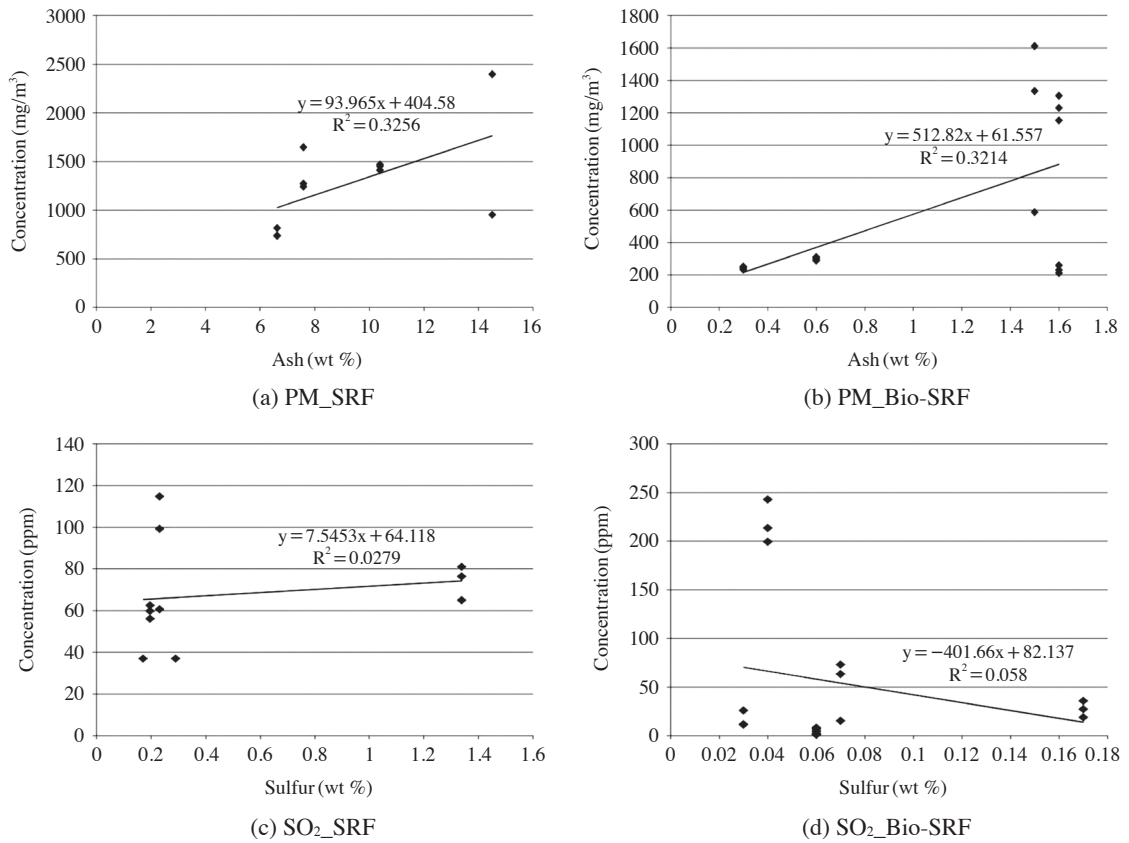


Fig. 7. Correlation between sulfur & ash content and concentrations of air pollutants.

을 분석한 결과, 그림 6과 같이 아연의 농도가 $18.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 수은, 니켈, 크롬의 순으로 농도가 높았다. 특히 특정대기유해물질로 알려진 크롬, 납, 수은은 배출허용기준 이하의 낮은 농도가 일부 검출되고 있음을 알 수 있다. Bio-SRF 사용 시설의 중금속 농도 역시 아연의 농도가 $71.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 니켈, 구리의 순으로 나타났다. 수은의 경우, 배출허용기준 이하로 검출되고 있으나, SRF 사용 시설에서 Bio-SRF 사용 시설보다 약 10배 높게 검출되었다.

3.2 배출계수 개발

3.2.1 연료 성분과 배출가스 농도

대기환경보전법 시행규칙 별표 10(2017)에 따르면, 고체연료의 먼지 및 황산화물 배출계수는 연료 중의 회분 함량과 황 함량에 의해 배출계수 값이 결정된다.

국립환경과학원 고시 제2015-9호(NIER, 2015b) 역시, 기타 고체연료의 회분 함량과 황 함량에 의해 먼지 및 황산화물의 배출계수가 결정됨을 알 수 있다. 이에 본 연구에서 배출계수 도출에 앞서 고형연료 중 황 · 회분 함량과 먼지 · 황산화물 농도와의 상관성을 분석하였다. 그 결과, 그림 7과 같이 먼지는 회분 함량과 배출가스 농도 사이에는 양의 상관관계를 나타내고 있다. 그러나 다양한 범위로 측정된 황산화물의 경우 미세한 양의 상관관계 또는 음의 상관관계를 나타내고 있다. 특히 방지시설 미설치 등에 의해 고농도로 측정된 Bio-SRF 사용 시설 등이 포함되어 있어서, 오염물질 배출계수 도출 시 통계처리 방법 등을 통해 배출계수의 신뢰도 향상이 필요한 것으로 나타났다.

3.2.2 배출계수 개발 및 비교

본 연구는 다양한 종류의 고형연료를 측정하여 오염

물질 배출계수를 개발하고 이에 대한 신뢰도를 높이고자 하였다. 특히, 먼지와 황산화물의 경우, 회분과 황성분에 따른 배출계수 형태를 가변형으로 도출하고, 측정 범위가 광범위한 자료를 바탕으로 국내 특성을 반영한 배출계수가 필요했다. 이를 위해 측정자료의 구간추정으로 많이 활용하는 신뢰구간(Confidence interval; CI)을 적용하였다. 본 연구에서는 99% 신뢰구간을 적용하였으며, 식 2와 같다.

$$\text{모평균의 99\% 신뢰구간} = \bar{X} \pm 2.58 \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

($\bar{X}$: 표본평균, s : 표본표준편차, n : 표본의 크기)

식 2를 적용하여 99% 신뢰구간에 포함되지 않는 측정 최솟값과 최댓값 등의 측정 확률이 낮은 값은 제외하였다. 본 연구에서 개발된 배출계수는 방지시설을 거치지 않은 배출계수이며, 연료 사용량은 측정 시 사용량을 적용하였다. 그림 8과 같이 미국 환경보호청(EPA) 배출계수(AP-42) (1996), 국립환경과학원 고시와 선행 연구 결과(NIER, 2010) 등과 비교하였다. 한편, 고형연료는 연료형태가 RDF(Refuse Derived Fuel), RPF(Refuse Plastic Fuel), TDF(Tire Derived Fuel) 등으로 다양하게 구분되었으나 '13년부터 일반 고형연료인 SRF로 분류체계를 단순화하였으며, WCF(Wood Chip Fuel)와 같은 폐목질계 연료를 Bio-SRF로 재설정하였다(NIER, 2015a). 따라서, 본 연구에서 개발된 배출계수는 선행 연구 결과의 배출계수와 연료 형태가 동일하지 않으나 폐기물을 재활용한 고형연료라는 공통점이 있다.

본 연구에서 개발된 SRF와 Bio-SRF의 먼지 배출계수는 각각 15.93 g/kg, 14.18 g/kg이다. EPA와 국립환경과학원에서 고시하고 있는 RDF 고형연료 배출계수에 비해 전반적으로 낮게 나타났다. 단, RPF 보일러에서 측정한 국립환경과학원의 선행연구와 비교해서 약 1.5 배 높게 나타났다. 폐종이, 폐플라스틱, 폐비닐 등으로 구성되어 불균질성이 상대적으로 높은 RDF는 연소조건에서 폐플라스틱 중심의 일정한 연료형태의 RPF에 비해 불완전연소가 발생하며, 불연소성분 및 회성분과 같은 입자상물질 등이 먼지 배출계수에 반영된 것으로 판단된다. 질소산화물의 배출계수는 SRF가 13.21 g/kg, Bio-SRF는 4.43 g/kg으로 도출되었다. Bio-SRF의 경우, 같은 목질계인 WCF 배출계수와 비슷한 수준이다.

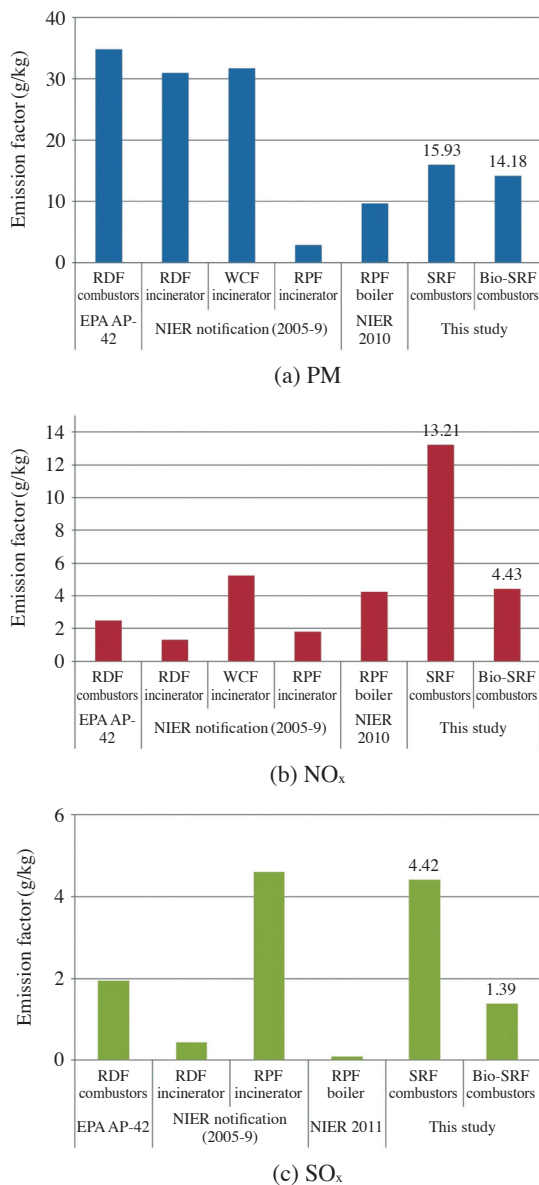


Fig. 8. Comparison of air pollutants emission factors with previous studies.

반면, SRF는 국·내외 배출계수 고시와 선행연구에 비해 가장 높은 값을 나타냈다. 황산화물의 SRF 배출계수는 4.42 g/kg으로 RPF 배출계수와 비슷한 수준이나 Bio-SRF 배출계수 1.39 g/kg에 비해 약 3배 높게 도출되었다. 황산화물 성분분석표 역시 Bio-SRF에 비해 SRF가 약 2배 수준으로 높다. 이는 전반적으로 고형연

Table 5. Comparison with emission factor of environmental regulations.

Classification	Fuel-type (kg/ton)	PM	SO _x	NO _x
Regulations	Anthracite coal	5.0A	19.5S	5.83
	Bituminous coal	5.0A	19.0S	5.55
	Other solid fuels	5.0A	19.5S	5.83
This study	SRF (A·S)	2.2A	22.1S	13.21
	Bio-SRF (A·S)	7.1A	13.9S	4.43

료의 황 함유량에 따라 황산화물 배출이 결정됨을 알 수 있다.

1차 도출된 배출계수는 환경법규에서 명시하고 있는 가변형 배출계수와 비교하기 위하여 표 4의 SRF와 Bio-SRF 회분 함량 7.3%, 2.0% 및 황 함량 0.2%, 0.1%를 적용하여 표 5와 같이 비교하였다.

본 연구에서 개발된 배출계수는 기존 법규에서 명시하지 않고 있는 폐자원을 활용한 고형연료의 배출특성을 조사하고 이를 바탕으로 개발되었다. 따라서 국내 특성이 가장 잘 반영된 형태의 배출계수이다. 개발된 배출계수는 EPA AP-42에서 제시하고 있는 등급을 적용한 결과, 측정데이터는 공정시험기준 등의 명시된 방법에 의해 이루어진 경우로 'A' 등급이며, 배출계수는 측정데이터 품질, 시료측정횟수, 시료 대표성 등을 고려할 경우 'B' 등급 이상의 자료로 판단된다(Kim *et al.*, 2016).

4. 결론 및 제언

2015년 기준으로 신·재생에너지 생산량의 65%가 폐기물 고형연료이다. 더불어, 정책적으로도 폐기물 고형연료를 통해 환경자원순환정책 실현에 효과적이라는 판단 아래 고형연료의 제조와 사용은 급증하는 반면, 대기배출원에서 고형연료 사용에 따른 대기오염물질 배출특성 및 실태 연구는 아직 많이 부족하다. 본 연구는 대기환경관리를 위한 기초자료라고 할 수 있는 국내 특성을 반영한 대기오염물질 배출계수 개발을 중심으로 진행하였다. 배출계수의 신뢰도를 높이기 위해 2년간 전국 시도보건환경연구원과 공동으로 총 45개의 고형연료 사용 시설에 대해 현장 측정을 실시하였다. 그 결과, 고형연료의 먼지농도는 평균 9.84 mg/m³이며,

질소산화물 40.50 ppm, 이산화황 23.20 ppm으로 측정되었다. 특히 먼지의 경우, SRF 먼지농도에 비해 Bio-SRF 먼지농도가 광범위하게 분포함을 알 수 있었다. 주요원인으로는 폐플라스틱, 폐합성수지 중심의 가연성 고형폐기물이 주성분인 SRF에 비해 농업 폐기물, 땅콩껍질 등의 식물성 잔재물, 합판, 목재부산물 등의 가공목재류, 팜껍질, 캐슈넛 등의 수입산 열대식물 부산물 등으로 다양하게 구성되어 Bio-SRF 사용 시설에서 측정농도가 광범위한 것으로 판단된다. 구리, 납 등의 중금속 7종을 분석한 결과 크롬, 납, 수은 등의 특정 대기유해물질이 일부시설에서 비교적 낮은 농도로 검출되었다. 한편, 고형연료 사용에 따른 대기오염물질 배출량 산정을 위한 배출계수를 개발하였다. 그 결과, 먼지 배출계수는 SRF 15.93 g/kg, Bio-SRF 14.18 g/kg으로 EPA와 국립환경과학원 고시에 비해 다소 낮게 나타났다. 질소산화물 배출계수는 각각 13.21 g/kg, 4.43 g/kg으로, SRF 배출계수의 경우 선행연구에서 제시한 배출계수에 비해 높게 나타났다. 황산화물의 배출계수는 SRF의 경우 4.42 g/kg이나 Bio-SRF는 1.39 g/kg으로 상대적으로 낮게 도출되었다. 본 연구를 통해 개발된 대기오염물질 배출계수는 향후 고형연료 사용 시설에 대한 중 구분, 대기오염물질 배출량 산정, 건강영향평가 등을 위한 기초자료로 활용될 것을 기대한다.

한편, 본 연구를 통해 고형연료 사용과 관련하여 개선점을 크게 2가지로 제안하고자 한다. 우선, 고형연료의 품질관리 강화이다. 고형연료를 사용하면서 오염물질을 저감할 수 있는 방법은 주로 방지시설 활용이다. 그러나 방지시설의 경우, 먼지, 황산화물 등의 일반대기오염물질 중심으로 저감이 이루어진다. 상기 방지시설은 수은, 납 또는 가스상 특정대기유해물질의 방지시설로 분류하기 어려우며, 특정대기유해물질을 위한 방지시설은 별도 설치되어 있지 않다. 따라서, 이를 해결하기 위해서 고형연료의 품질관리 강화 등을 통해 특정대기유해물질의 배출 저감을 유도해야 할 것으로 판단된다. 향후 지속적으로 사용량 증가가 예상되는 만큼 고형연료의 품질관리 강화는 우선 선행되어야 할 요소라 판단된다. 둘째, 고형연료 연소시설에 대한 배출시설 인허가 시 주요 사항으로 전문기술인력의 확보를 명시하고 적정 용량 이상의 연소시설을 유도해야 한다. 일부 사업장의 고형연료 사용에 따른 고농도 오염물질이 배출되며, 주요 사유가 배출시설의 운전미숙과

연소조건 부적절 운영 등이다. 따라서, 배출시설 규모가 적정 용량 이상일 경우 굴뚝 TMS 부착 등의 모니터링이 가능하고 자가측정 횟수 증가 등이 수반되는 만큼 이에 대한 보완이 필요하다.

References

- Kim, H.-C., R.-H. Kim, J.-H. Kim, S.-Y. Lim, D.-I. Kang, J.-H. Hong, and K.-W. Jang (2016) A Study on the Comparison of Measuring Methods and Development of Emission Factor on Mercury from Large-Scale Emission Source, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 184-192. (in Korean with English abstract)
- Kim, S.-K., K.-W. Jang, J.-H. Kim, C. Yoo, J.-H. Hong, and H.-C. Kim (2012) SRF Combustion Pollutants' Impact on Domestic Emissions Assessments, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 656-665. (in Korean with English abstract)
- Lee, D.-K., J.-S. Lee, H. Kwak, and S.-Y. Bae (2005) Combustion Characteristics of RDF, *Journal of Korea Society of Waste Management*, 22(1), 101-112. (in Korean with English abstract)
- MOE (2017) Enforcement rule of Clean Air Conservation Act, Attachment 10.
- MOTIE (2016) New and Renewable Energy Supply Statistics, 11-12.
- NIER (2010) A study of Emission Characteristics of Air Pollutants from Facilities using Reclaiming Fuel, NIER No. 2010-76-1251, 1-2, 23-26.
- NIER (2015a) Development of Air Air Pollutants Emission Factors for the Other Fuels (I), NIER-RP 2015-211, 20-21.
- NIER (2015b) Notification of Emission Factor on Emission Facilities, Notification No. 2015-9, Attachment 3.
- NIER (2016) Development of Air Air Pollutants Emission Factors for the Other Fuels (II), NIER-RP 2016-302, 1.
- U.S. EPA (1996) AP-42, Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources - Chapter2 Solid Waste Disposal.