



고형연료제품 사용시설에 따른 다환방향족탄화수소 (PAHs)의 배출특성 및 유해성 평가

Emission Characteristics and Hazard Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAHs) from Solid Fuel Facilities

허선화 · 임승영 · 강대일 · 김대곤 · 전기준¹⁾ · 장기원*

국립환경과학원 대기공학연구과, ¹⁾인하대학교 환경공학과

(2017년 7월 10일 접수, 2017년 8월 14일 수정, 2017년 8월 18일 채택)

Sun-Hwa Heo, Seung-Young Lim, Dae-Il Kang, Dae-Gon Kim,
Ki-Joon Jeon¹⁾ and Kee-Won Jang*

Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Inha University*

(Received 10 July 2017, revised 14 August 2017, accepted 18 August 2017)

Abstract

Recently, the earth has shown the limit of environmental capacity. It is also experiencing an environmental crisis with rising energy prices and depletion of coal. Therefore, development of renewable energy is very important solution. However, waste fuel solid are renewable fuels, but they cause environmental problems. In this study, the emission characteristics of hazardous air pollutants were analyzed through measurements at the facilities using solid fuels (SRF, BIO-SRF). Analysis method of PAHs are based on the Korea Standard Methods for Examination. The analysis of PAHs showed that the concentration much higher in Naphthalene, and Benzo(a)pyrene showed at a higher concentration incertain sources. As a result of gas phase and particle phase PAHs, most of Benzo(a)pyrene appeared to be particulate. Through the results of this study will provide basic data for atmospheric environmental management.

Key words : Solid fuel, SRF, BIO-SRF, PAHs, Hazard assessment, TEFs, TEQs

1. 서 론

최근 들어 전세계적으로 에너지 가격 상승과 화석 에너지 자원 고갈 및 기후변화 등에 대한 환경위기와 환경용량 한계를 동시에 직면하고 있다(Kang *et al.*,

2015). 이러한 환경위기 극복의 주요 해결방안으로 신·재생에너지 개발에 대한 관심이 집중되고 있다. '15년 기준으로 신·재생에너지는 전년도 대비 15.2% 증가하였으며, 국내 에너지 중 4.66%를 차지하고 있다. 또한 신·재생에너지의 65.2%가 폐기물 고형연료이며, '15년 기준으로 전년도 대비 에너지 보급량이 56.7% 증가하여 신재생에너지 중 가장 높은 증가율을 나타내고 있다(MOTIE, 2016).

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)32-560-7348, E-mail : jangkeewon@korea.kr

그러나 폐기물 고형연료는 청정연료 사용을 권장하는 기존의 연료정책과 상반되며, 오염물질 배출로 인한 사용시설 인근 지역주민들과의 환경문제를 유발하기도 한다. 환경민원이 빈번하게 발생하는 일부 지역에서는 고형연료 사용시설에 대한 집중단속을 실시하였다. 단속 결과, 환경오염기준을 위반한 사업장 등이 다수 적발되어 고형연료 사용에 따른 오염물질 배출관리가 필요하다는 것을 증명하였다(NIER, 2016).

유해대기오염물질 중 발암물질을 포함하고 있는 다환방향족탄화수소(PAHs)는 대기 중에서 가스상과 입자상으로 존재한다. 그중 유해성과 관련이 있는 PAHs는 주로 입자상 형태로 존재하지만 기체상 PAHs는 대기 광화학 반응을 거쳐 기존 PAHs보다 강한 다양한 독성물질들을 생성한다(Lee and Lane, 2010, 2009). 따라서 PAHs 측정 시 가스상과 입자상의 동시측정을 통하여 신뢰도 높은 유해성 평가가 이루어져야 한다.

본 연구는 고형연료 사용시설을 대상으로 PAHs 배출특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 가스상 및 입자상 형태의 PAHs를 측정·분석하였다. 더불어, 배출현황과 유해성 평가 등을 통해 고형연료 사용시설에 대한 관리방안을 제시하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 고형연료제품 사용시설 선정

고형연료는 「자원의 절약과 재활용 촉진에 관한 법

률 시행규칙」에 따라 RDF(Refuse Derived Fuel), RPF(Refuse Plastic Fuel), TDF(Tire Derived Fuel), WCF(Wood Chip Fuel) 등으로 구분되었으나, '13년 상기법률의 개정으로 SRF(Solid Refuse Fuel)와 BIO-SRF(Biomass-SRF)로 재분류되었다. 따라서, 개정 전 성상에 따라 관리해온 각종 폐비닐, 폐합성수지, 폐목재 등을 SRF와 BIO-SRF로 재분류하여 배출 관리가 필요하다.

국내 고형연료제품 사용시설은 '15년 12월 말 기준 총 150개이며, 연료 형태에 따라 SRF 76개, BIO-SRF 74개 시설이다(www.srf-info.com, 2015). 본 연구는 SRF 사용시설 3개, BIO-SRF 사용시설 2개 등 5개 시설을 선정하였다. 선정된 사용시설의 사업장 일반 현황은 표 1과 같다.

2.2 시료 채취 및 분석

시료 채취와 분석 방법은 대기오염공정시험기준을 적용하였다. 대상시설에서 시료채취는 각 3회이며, 채취된 가스상 및 입자상 PAHs에 대해 분석을 진행하였다.

2.2.1 시료 채취

배출가스 중 PAHs는 수은과 마찬가지로 가스상 및 입자상 물질로 존재한다. 따라서, 시료채취는 대기오염공정시험기준 ES 01505.1 배출가스 중 다환방향족탄화수소-기체크로마토그래피를 적용하여 그림 1과 같이 동시 채취가 가능한 포집장치를 사용하였다(KSME, 2016). 가스상 물질은 가스흡수부와 가스흡착부로 구

Table 1. General information of SRF & BIO-SRF combustors.

Unit No.	Fuel	Fuel usage (ton/day)	Combustors	LHV (Kcal/kg)	Cl (wt %)	Moisture (wt %)	Ash (wt %)	S (wt %)
			APCD					
A	SRF	11	Dryer CL, B/F	6,825	0.68	7.4	7.4	—
B		14	Boiler SNCR, SDR, B/F	7,930	0.72	5.6	5.4	0.29
C		7	Power Plant B/F	7,610	0.04	10.5	6.63	1.34
D	BIO-SRF	135	Boiler SNCR, A/S, B/F, SCR	3,640	0.13	9.4	3.1	0.23
E		840	Boiler SNCR, B/F	4,230	0.02	10.8	1.5	0.04

※APCD: Air Pollution Control Devices, CL: Cyclone, B/F: Bag-filter, SNCR: Selective Non-Catalytic Reactor, SDR: Semi-Dry Reactor, A/S: Absorption, SCR: Selective Non-Catalytic Reactor.

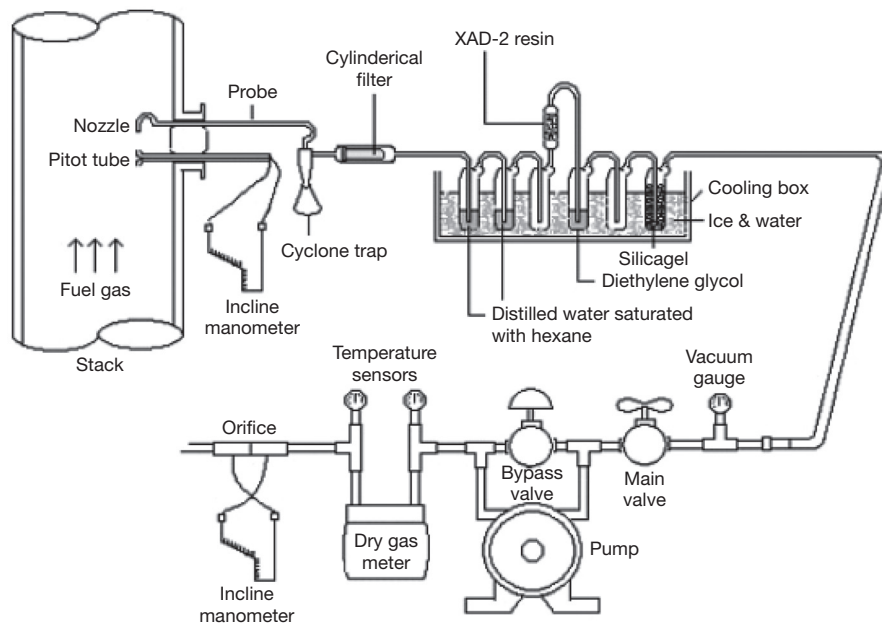


Fig. 1. Flow-Chart of PAHs Sampling on Stack.

분하여 별도의 흡수액과 XAD-2 (1-0357, Supelco) 및 PUF (Poly Urethane-Foam) 흡착제를 사용하여 시료를 채취하였다. 입자상 물질은 석영재질의 원통형 여지를 시료 채취 전에 850°C에서 3~4시간 강열과정을 거친 후, 아세톤, 헥산, 디클로로메탄 세정 및 건조과정을 거쳐 등속흡인으로 시료를 채취하였다.

2.2.2 분석 방법

시료 채취를 마친 원통형 여과지는 가속 용매추출장치(ASE® 200, Dionex, USA)를 이용하여 용매(Hexane : DCM = 50 : 50)로 추출하고, 입자상 세정액은 액-액분리를 통하여 추출액과 합한다. 가스상 물질이 흡착된 XAD-2 수지는 24시간 동안 용매(Hexane : DCM = 50 : 50)로 추출하여 액-액분리 과정을 거치고, 흡수액 및 세정액과 PUF 추출액을 합한다. 각각 추출된 시료 용액은 회전증발농축기를 사용하여 25 mL로 표시선까지 맞춘 후(mass up) 적당량만 분취해 컬럼을 이용하여 느린 속도로 추출한다. 이런 정제과정을 마친 시료는 다시 소량으로 농축한 후 GC/MSD (6890, Agilent / 5973i, Agilent, USA)를 사용하여 분석하였으며, 기기 분석 조건은 표 2와 같다.

기기 분석은 선택적 이온검출법인 SIM모드로 분석

Table 2. GC-MSD conditions for PAHs analysis.

Parameter	Condition
GC model	Agilent 6890
Injection temp.	280°C
Inj. mode	Split (ratio 10 : 1)
Column	DB-5MS (60 m × 0.32 mm × 0.25 μm)
Oven temp.	50°C to 310°C (4 min) at 3°C/min
MS model	Agilent 5973i
Ionization mode	EI
Ionization energy	70 eV
MS Source temp.	280°C
Ion mode	SIM

하였다. 표준물질은 Supelco사의 EPA 610 (Polynuclear Aromatic Hydrocarbons Mixture)을 사용하였으며, 대상 물질은 표 3과 같다. 시료 분석 전 SCAN 분석을 통해 확인된 이온만 선택하여 SIM모드로 정량 분석하였다.

2.3 유해성 평가

PAHs의 유해성 평가를 위해서는 대표물질의 독성을 기준으로 하는 TEF (Toxic Equivalency Factors)를 이용하여 TEQs (Toxic Equivalency Quotients)를 산정하였다. 본 연구에서 사용된 TEFs는 Benzo(a)pyrene의

Table 3. Selected ion group of SIM for PAHs analysis.

Group	Time	Compounds	Selected ions (m/z)
1	11 min	Naphthalene Acenaphthylene Acenaphthene Fluorene	Nap Acy Ace Flu 76 83 89 128 152 154 166
2	30 min	Phenanthrene Anthracene	Phen Anthr 89 176 178
3	40 min	Fluoranthene Pyrene Benz(a)anthracene Chrysene	Flt Pyr BaA Chry 101 113 114 200 202 226 228
4	60 min	Benzo(b)fluoranthene Benzo(k)fluoranthene Benzo(a)pyrene Indeno(1,2,3-cd)pyrene Dibenz(a,h)anthracene Benzo(g,h,i)perylene	BbF BkF BaP Ind DBahA BghiP 126 138 250 252 276 278

Table 4. Proposed Toxicity Equivalency Factors (TEFs) for individual PAHs.

Pollutants	TEFs
Naphthalene	0.001
Acenaphthylene	0.001
Acenaphthene	0.001
Fluorene	0.001
Phenanthrene	0.001
Anthracene	0.01
Fluoranthene	0.001
Pyrene	0.001
Benz(a)anthracene	0.1
Chrysene	0.01
Benzo(b)fluoranthene	0.1
Benzo(k)fluoranthene	0.1
Benzo(a)pyrene	1
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	0.1
Dibenz(a,h)anthracene	5
Benzo(g,h,i)perylene	0.01

*Nisbet *et al.*, 1992

발암성을 기준으로 부여된 상대독성 계수이며 표 4와 같다(AETDC, 2008).

3. 연구 결과

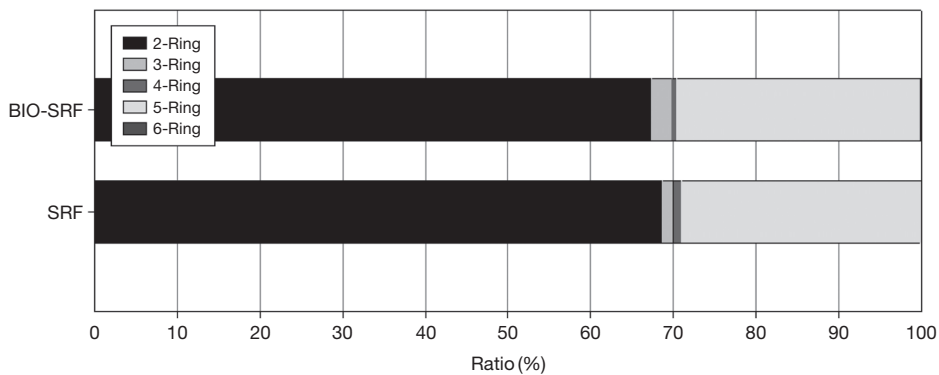
3.1 PAHs 농도 배출특성

본 연구는 건강위해성 및 유해성 등을 고려하여 고

형연료 사용시설에서 발생하는 PAHs 물질 16종에 대한 연구를 수행하였다. 측정은 배출시설 후단(Controlled)에서 실시하였으며, 표 5는 SRF 사용시설 3개, BIO-SRF 사용시설 2개에서 측정한 PAHs 성분의 가스상과 입자상 농도이다. SRF 사용시설 3개에 대한 Σ PAHs 평균 농도는 $93.46 (27.73 \sim 220.84) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. BIO-SRF 사용시설 2개에 대한 평균 Σ PAHs 농도는 $106.23 (56.72 \sim 155.75) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 SRF 사용시설에 비해 높게 검출되었다. BIO-SRF 대상시설에서 사용되는 연료는 폐목재류 가연성 폐기물과 수입산 열대식물부산물(캐슈넛)이다. BIO-SRF에서 배출되는 PAHs 농도를 Kim *et al.* (2017)에서 조사한 화목보일러의 농도와 비교하였다. 그 결과, 화목보일러의 Σ PAHs 농도는 $261.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구 결과에 비해 약 2.5배 높게 나타났다. 단, 선행연구의 경우 비관리형 연소배출원으로 방지시설을 거치지 않은 결과이다. 그러나 PAHs 성분의 각각 농도를 살펴보면, 두 연구 모두 Nap이 전체 농도의 과반수 이상을 차지하는 배출 특성을 보였다. 또한 정확한 배출수준 파악을 위해 단위고형연료당 유해물질 배출계수를 산출하였다. 현재 PAHs에 대한 국내 배출계수 산출 방법이 마련되어있지 않으므로, Hall *et al.* (2012)에서 사용한 배출계수 산출식을 참고하였다(식 1). 연료사용량은 측정 시 사용된 연료를 일단위로 환산하여 적용하였다. 그 결과, SRF와 BIO-SRF의

Table 5. Concentration of gas and particle phase PAHs on solid fuel fired combustors.

Compounds ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SRF						BIO-SRF			
	A		B		C		D		E	
	G	P	G	P	G	P	G	P	G	P
Nap	0.43	29.27	90.53	46.35	0.41	25.66	52.42	0.09	90.42	0.06
Acy	0.03	0.05	0.02	0.01	0.02	0.00	0.04	0.01	0.00	0.49
Ace	0.02	0.04	0.03	0.02	0.01	0.02	0.06	0.05	0.01	0.13
Flu	0.05	0.10	0.10	0.06	0.03	0.03	0.18	0.22	0.05	0.10
Phen	0.23	0.41	1.22	0.60	0.21	0.18	0.84	1.30	1.26	0.41
Anthr	0.01	0.02	0.04	0.13	0.01	0.01	0.05	0.03	0.07	0.17
Flt	0.04	0.06	0.12	0.12	0.03	0.02	0.07	0.11	0.31	0.13
Pyr	0.02	0.03	0.09	0.06	0.01	0.01	0.13	0.10	0.14	0.06
BaA	0.34	0.00	N.D.	N.D.	0.38	0.00	0.00	N.D.	0.01	N.D.
Chry	0.33	0.33	0.00	0.00	0.37	0.34	0.00	N.D.	0.01	N.D.
BbF	N.D.	0.00	0.40	0.18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.14	0.15
BkF	N.D.	0.00	N.D.	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.00	0.34
BaP	N.D.	0.01	0.79	79.83	N.D.	N.D.	N.D.	1.02	2.51	58.47
Ind	N.D.	0.00	0.00	0.00	N.D.	N.D.	0.00	0.00	0.02	0.03
DBahA	N.D.	N.D.	0.00	N.D.	N.D.	N.D.	0.01	N.D.	N.D.	0.15
BghiP	N.D.	0.00	N.D.	0.07	N.D.	0.01	0.00	N.D.	0.03	0.06
Σ PAHs	1.49	30.34	93.35	127.49	1.47	26.26	53.80	2.92	95.00	60.75

**Fig. 2. Relative percentages of PAHs based on the number of benzene ring.**

Σ PAH 배출계수는 각각 1.631 mg/kg, 1.852 mg/kg으로 도출되어 농도 결과와 동일하게 BIO-SRF에서 높게 나타났다. 본 연구에서 산출된 배출계수를 선행연구 결과(NIER, 2010)와 비교한 결과, 선행연구보다 약 3배~9배 낮게 나타났다. 그러나 현재 연료 분류체계는 기존의 연료형태에서 단순화된 형태로 배출계수에 차이가 있을 것으로 판단된다.

$$EF = \frac{C \times Q_{\text{stack}} \times t}{m} \times 10^{-3} \quad (1)$$

여기서,

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

C = Concentration of air pollutant ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

t = Sampling time (hr)

Q_{stack} = Quantity of dried flue gas (m^3/hr)

m = Usage of fuel (kg)

각 성분별 분포 특성을 알아보기 위해 벤젠고리 수로 구분하여 SRF와 BIO-SRF 사용시설에 대한 비교분석을 수행하였다(그림 2). 그 결과 SRF와 BIO-SRF 2

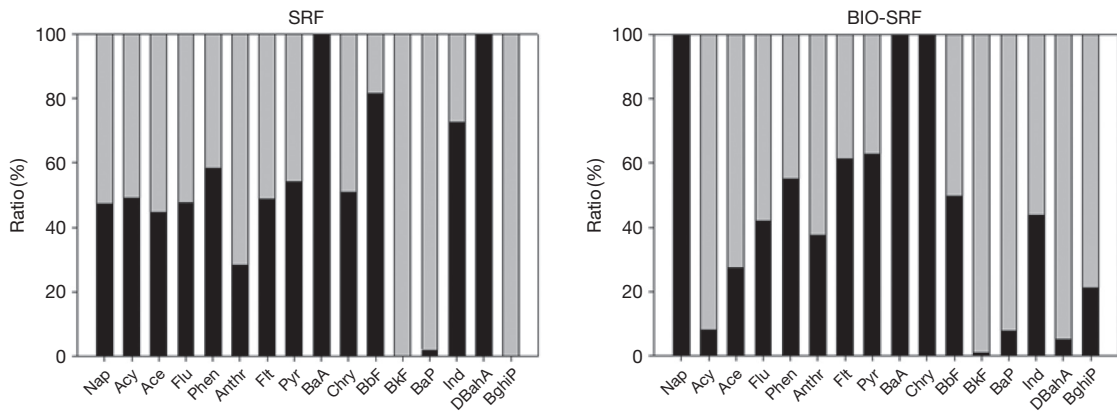


Fig. 3. Composition of PAHs in gas and particle phase at SRF/BIO-SRF fired combustors.

개 시설에서 동일하게 2개의 벤젠고리를 갖고 있는 물질이 과반수 이상을 차지하고 있었으며, 다음으로는 5개의 벤젠고리를 갖고 있는 물질이 많이 분포하고 있었다. PAHs의 화학적 특성상 벤젠고리가 밀집한 형태에서 안전성을 보이며, 직선형태로 배열된 경우에는 분자량이 클수록 불안정하다(Hong, 2012). 또한, 벤젠고리가 3개 이상인 것은 분해속도가 느려 오랫동안 잔류하기 때문에 특정 PAHs 물질에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

고형연료 사용시설의 가스상 및 입자상 물질은 SRF와 BIO-SRF에서 특정 물질 2~3개가 상이한 분포특성을 나타냈다(그림 3). SRF 사용시설의 경우 B(k)F와 B(ghi)P 물질이 입자상으로만 존재하였으며, BIO-SRF 사용시설은 B(a)A와 Chry 물질이 가스상으로만 존재하였다. 성상별 농도 분포 특성의 경우 SRF 사용시설과 BIO-SRF 사용시설의 결과가 서로 다른 양상으로 나타났다. 이는 연료 성분에 따른 차이로 발생하는 결과라고 예측할 수 있다. 따라서, 향후 고형연료 사용시설에 대한 관리방안 마련 시 연료 성분 특성에 대한 반영이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 선행연구 비교

PAHs 성분은 배출원별, 연료에 따라 배출 농도는 비슷할 수 있으나 분포특성은 달라진다. 따라서, 기존에 수행된 선행연구와 비교를 통하여 다양한 고형연료 사용시설에 대한 배출특성을 파악하고자 하였다.

그림 4와 같이 본 연구에서 수행한 SRF와 BIO-SRF

결과를 RPF, RDF, WCF 사용시설에서 측정한 선행연구 결과와 비교하여 그래프로 나타냈다. 그 결과, 폐목재 고형연료제품인 WCF 사용시설에서 16종 물질 모두 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하이며, 본 연구 결과에 비해 상대적으로 낮게 나타났다(NIER, 2011). 페플라스틱 고형연료제품인 RPF는 사용시설에 따라 Σ PAHs 농도가 $12.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $188.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다양하게 나타났다. 또한, 농도가 가장 높은 사용시설은 Nap 농도가 $179.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 검출되었다. 이러한 결과는 PAHs의 열역학적 안정성이 벤젠고리 형태, 탄소-수소 결합에 따라 달라지기 때문에 나타난 결과라고 볼 수 있다(NIER, 2010). 또한 고형연료 사용시설의 경우 연료 종류와 배출시설 및 방지시설 운영 현황에 따라 농도 결과가 상이할 수 있으므로 보다 많은 관련 연구가 수행되어야 할 것이다.

3.3 유해성 평가

본 연구에서는 고형연료 사용시설로부터 배출되는 PAHs의 유해성 정도를 평가하기 위하여 PAHs 16종 성분의 농도를 B(a)P 기준의 TEFs로 환산하여 표 6에 TEQs로 나타내었다(NIER, 2007). 고형연료 사용시설에서 측정된 PAHs 농도에 Nisbet *et al.*(1992)에서 제시한 독성상대계수를 적용하였다. 그 결과 SRF와 BIO-SRF 사용시설에 대한 B(a)P-eq는 각각 $27.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $31.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 배출 농도와 같이 BIO-SRF 사용시설에서 농도가 더 높게 분석되었다.

선행연구를 조사하여 본 연구의 유해성 평가 방법과 동일한 방법으로 비교 분석해본 결과, 생활폐기물 소

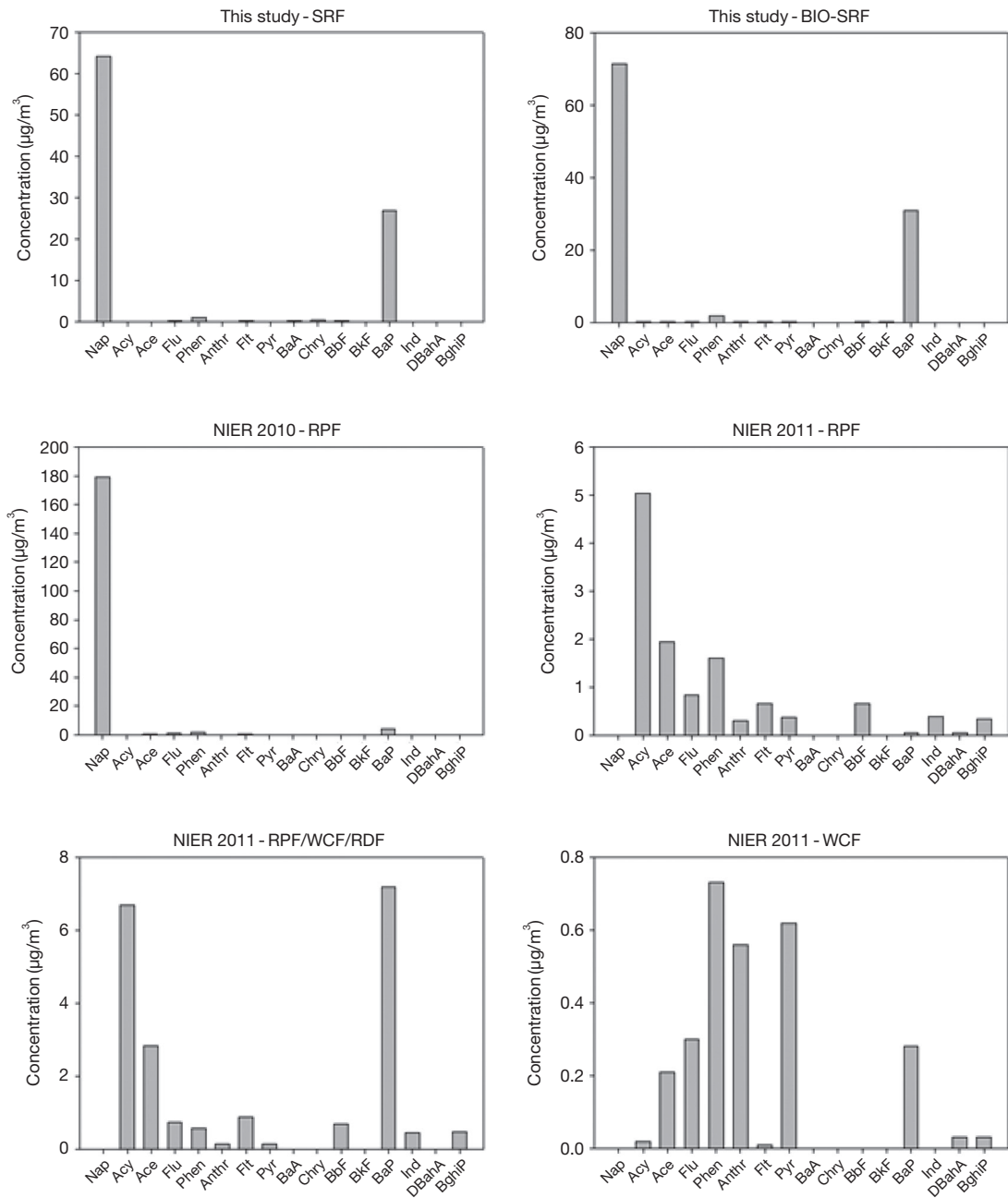


Fig. 4. Comparison of PAHs concentration with previous researches.

각시설 PAHs 농도에 대한 B(a)P-eq는 $122.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되었다(NIER, 2011). 따라서, 고형연료 사용시설의 PAHs 유해성은 생활폐기물 소각시설보다 4~5배

정도 낮은 수치로 분석되었다. 그러나 본 연구의 유해성 평가 방법은 B(a)P을 기준으로 산출된 독성상대계수로 분석하기 때문에 B(a)P의 농도 수준에 따라 차이

Table 6. Analysis result of TEQs.

Compounds ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SRF	BIO-SRF
Nap	0.064	0.071
Acy	0.000	0.000
Ace	0.000	0.000
Flu	0.000	0.000
Phen	0.001	0.002
Anthr	0.001	0.002
Flt	0.000	0.000
Pyr	0.000	0.000
BaA	0.024	0.001
Chry	0.005	0.000
BbF	0.020	0.014
BkF	0.001	0.017
BaP	26.879	30.999
Ind	0.000	0.003
DBahA	0.005	0.405
BghiP	0.000	0.000
Σ PAHs	27.000	31.516

가 클 것으로 판단된다. 정확한 PAHs의 유해성 평가를 위해서는 다양한 방법의 유해성 연구가 이루어져야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 최근 들어 사용량이 증가하고 있는 고형 연료 사용시설에서 가스상 및 입자상 PAHs를 측정하였다. 측정 결과를 이용하여 배출특성과 유해성을 검토하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 배출특성 분석 결과, SRF 사용시설 Σ PAHs 평균 농도는 $93.462 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, BIO-SRF 사용시설 Σ PAHs 평균 농도는 $106.235 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 SRF 사용시설보다 높게 검출되었다. 또한 Σ PAHs 배출계수는 각각 $1.631 \text{ mg}/\text{kg}$, $1.852 \text{ mg}/\text{kg}$ 으로 산출되어 농도 결과와 마찬가지로 BIO-SRF에서 높게 나타났다. SRF 사용시설의 경우 B(k)F와 B(ghi)P 물질이 입자상으로만 존재하였으며, BIO-SRF 사용시설은 B(a)A와 Chry 물질이 가스상으로만 존재하였다. 따라서, 향후 고형연료 사용시설에 대한 관리방안 마련 시 연료 성분 특성에 대한 반영이 필요할 것으로 판단된다.
2. 본 연구에서 수행한 SRF와 BIO-SRF와 선행연구에서 수행한 RPF, RDF, WCF 사용시설의 배출 농도를

비교 분석하였다. 그 결과, 고형연료 종류와 시설 운영에 따라 RPF 사용시설 Σ PAHs 농도는 $12.26 \sim 188.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, WCF 사용시설은 $2.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다양한 농도범위를 나타냈다. 이와 같이 고형연료 사용시설의 경우 연료 종류와 배출시설 및 방지시설 운영 현황에 따라 농도 결과가 상이할 수 있으므로 다양한 연구가 수행되어야 할 것이다.

3. PAHs의 유해성 정도를 평가하기 위하여 PAHs 16종 성분의 농도를 BaP 기준의 TEFs로 환산하여 TEQs로 나타내었다. SRF와 BIO-SRF 사용시설에 대한 Σ PAHs 농도는 각각 $27.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $31.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 배출 농도와 동일하게 BIO-SRF 사용시설에서 높게 도출되었다.

본 연구에서는 고형연료의 PAHs 배출특성이 다양하게 나타났으며, 연료 분류체계 변경에 따라 선행연구 비교에서 큰 차이를 보였다. 또한, PAHs의 경우 SRF 사용시설보다 BIO-SRF에서 높은 농도로 검출되어 바이오매스 폐기물 연료에 대한 보다 효과적인 관리와 품질기준 강화가 필요하다고 판단된다. 이를 위해 고형연료의 제조사별, 원료성분, 발열량, 수분함량 등에 대한 관리가 엄격히 이루어져야 한다. 또한, 사업장 배출시설의 연소조건에 따라 오염물질 배출특성 및 유해성이 달라질 수 있으므로, 배출시설 및 운영시설에 대한 전문적인 관리가 필요하다. 따라서, 고형연료 사용시설에 대한 연료품질 관리 강화와 시설운영에 대한 전문인력을 확보하여 PAHs를 포함한 다양한 유해대기 오염물질 관리가 필요하다. 향후 추가적인 연구 등을 통해 고형연료 유해성에 대한 기초자료를 지속적으로 구축할 예정이다.

References

- Ansan Environmental Technology Development Center (2008) Analysis of Hazardous Air Pollutants in Ansan City, Risk Assessment, Establishment of Source Management System, 77.
- Hall, D., C.Y. Wu, Y.M. Hsu, J. Stomer, G. Engling, K. Capeto, J. Wang, S. Brown, H.W. Li and K.M. Yu (2012) PAHs, Carbonyls, VOCs and $\text{PM}_{2.5}$ Emission Factors for Pre-harvest Burning of Florida Sugarcane,

- 55, 164-172.
- Hong, S.P. (2012) A Study on the Characterization of PM_{2.5}-bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Seoul Area, University of Seoul, 5-6.
- Kang, D.I., H.C. Kim, K.W. Jang, J.H. Kim, S.Y. Lim, S.H. Heo, S.B. Lee and J.H. Hong (2015) A Study on the Development of the Air Pollutants Emission Factor from Waste Solid Fuel Fired Facilities, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 58, 181.
- Kim, J.H., S.H. Heo, H.C. Kim, M.R. Jo, S.Y. Lim, S.B. Lee and D.I. Kang (2017) A Study on Emission Characteristics of Air Pollutants from the use of Solid Fuel, 33(2), 77-89.
- Korea Environmental Corporation (2015) Waste Resource Energy Comprehensive management system, <http://www.srf-info.com>.
- Korea Standard Methods for Examination (2016) PAHs in Flue Gas - Gas Chromatography, 1-22.
- Lee, J.Y. and D.A. Lane (2009) Unique Products From the Reaction of Naphthalene with the Hydroxyl Radical, *Atmospheric Environment*, 43, 4886-4893.
- Lee, J.Y. and D.A. Lane (2010) Formation of Oxidized Products from the Reaction of Gaseous Phenanthrene with the OH Radical in a Reaction Chamber, *Atmospheric Environment*, 44, 2469-2477.
- Ministry of Trade, Industry and Energy (2016) Energy Statistical Year Book, 11-12.
- National Institute of Environmental Research (2007) Emission Source Inventory of Hazardous Air Pollutants from Stationary Source (IV), 87-88.
- National Institute of Environmental Research (2010) A Study of Emission Characteristics of Air Pollutants from Facilities Using Reclaiming Fuel, 22-25.
- National Institute of Environmental Research (2011) A Study Air Pollutants Reduction Plan for Waste Solid Fuel Fired Facilities, 23-24.
- National Institute of Environmental Research (2011) Emission Source Inventory of Hazardous Air Pollutants from Stationary Sources (VIII) - Open Burning, 15-16.
- National Institute of Environmental Research (2016) Development of Air Pollutants Emission Factors for the Other Fuels (II), 1.
- Nisbet, I.C.T. and P.K. Lagoy (1992) Toxic Equivalency Factors (TEFs) for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs), *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 16(3), 290-300.