

고체연료 사용에 따른 오염물질 배출특성 조사연구

A Study on Emission Characteristics of Air Pollutants from the use of Solid Fuel

김중현 · 허선화 · 김형천 · 조명란¹⁾ · 임승영 · 이상보 · 강대일*

국립환경과학원 대기공학연구과, ¹⁾화학재난합동방제센터 환경팀

(2015년 11월 24일 접수, 2016년 10월 14일 수정, 2017년 2월 7일 채택)

Jong-Hyeon Kim, Sun-hwa Heo, Hyung-Chun Kim, Myeong-ran Jo¹⁾,
Seung-oung Lim, Sang-Bo Lee and Dae-il Kang*

Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research

¹⁾*Environment team, Joint Inter-agency Chemical Emergency Preparedness Center*

(Received 24 November 2015, revised 14 October 2016, accepted 7 February 2017)

Abstract

Globally, use of affordable fuels such as briquettes, woods and wood pellets has increased. Organic pollutants emitted from non-point sources using solid fuels may have contributed to air pollution in urban environment. In this study, we utilized simulated incinerator proposed by U.S. EPA and investigated concentrations of PM, PM₁₀, PM_{2.5}, OC/EC, CO, SO_x, NO_x, VOCs and PAHs emitted while cooking meat and fish using briquettes, woods and wood pellets, and developed emission factors. As a result, wood combustion produced more air pollutants than the others. Particulate matter emission factors for woods and wood pellets were 13.54 g/kg and 9.15 g/kg, respectively. Total VOCs emission factors for briquettes, woods and wood pellets were 36.12 mg/kg, 46.13 mg/kg and 18.26 mg/kg, respectively. Additionally, total PAHs emission factors for briquette, woods and wood pellets were 0.44 mg/kg, 18.84 mg/kg and 101.62 mg/kg, respectively.

Key words : Solid Fuel, Briquette, Wood, Wood pellet, Emission factor

1. 서 론

전 세계적인 에너지 자원의 부족현상으로 기존의 화석연료를 대체할 수 있고 비용이 상대적으로 저렴한 연료를 이용하는 난방 방식이 증가 추세를 보이고 있다(Kaung *et al.*, 2009). 특히, 가정 및 난방 부분에서

사용량이 감소하다 다시 늘어나고 있는 연탄, 아궁이나 화목난로에 쓰이는 화목, 나무를 가공하고 남은 부산물이나 숲을 가꾸기 위해 뽑은 잡목들을 톱밥화하여 만들어진 목재펠릿 등에 대한 관심과 사용이 점차 증가하고 있다(NIER, 2013). 하지만 이러한 난방방식은 대기오염 저감 장치가 없는 소규모 시설이나 체계적인 관리가 이루어지지 않는 장소에서 많이 이루어진다. 더욱이 이러한 연료의 연소는 대기질과 인체 건강에 심각한 악영향을 미치는 일산화탄소, 휘발성유기화합

*Corresponding author.

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

물 등 주요 오염원이기도 하다(Shuxiao *et al.*, 2009; Yan *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2006, 2004; Bates, 2005; Jin *et al.*, 2005; Tonooka *et al.*, 2001).

이와 같은 비 관리형 소규모 연소시설은 불완전 연소가 일어나고 인체에 유해한 유기성 화합물이 발생할 가능성이 높고 아무런 여과장치 없이 배출됨으로서 주로 지표면에서 대기 중 확산이 발생하여 시간이 경과하면서 주변지역의 대기오염을 가중시킨다.

우리나라에서 오래전부터 사용된 연탄은 일산화탄소(Carbon monoxide, CO), 황산화물(Sulfur oxides, SO_x), 질소산화물(Nitrogen Oxide, NO_x) 등의 오염물질을 배출하고 있지만, 사용함에 있어서 여러 가지 문제가 해결되지 않으며, 특히 일산화탄소 발생에 관한 많은 연구를 필요로 하고 있다(Kim *et al.*, 1975). 목재펠릿의 경우, 아궁이, 야외 캠핑장, 화목난로에서 많이 사용되어지고 있으며, 주로 조리 및 난방의 목적으로 사용되고 있다. 이와 더불어 이용편의성과 생산 증가 및 전용보일러의 확대보급으로 고밀화한 목재펠릿의 2011년 생산(공급)량은 64,000톤이고, 소비량은 63,000톤으로 점차 증가하는 추세에 있다(KFS, 2012).

따라서, 본 연구에서는 가정 및 난방 부분에서 사용량이 늘어나고 있는 고체연료인 연탄과 화목, 목재펠릿을 선정하여 이들의 연료연소에 따른 대기오염물질 배출 특성을 연구하였다. 또한 각각의 연료연소에 따른 먼지(Particulate Matter, PM), 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}) 등의 입자상 물질과 CO, 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 다환방향족탄화수소류(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs) 등의 오염물질에 대한 배출특성을 파악하고 국내 활동도를 조사하여 배출량을 산정해 보았다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 시료의 선정

주거 및 난방용 고체연료의 연소는 대기오염 저감장치가 없는 소규모 시설에서 연소함으로 불완전 연소가 발생되며, 인체에 유해한 유기성 화합물이 발생할 가능성이 높다(Chaney, 2010). 이러한 이유로 본 연구는 고체연료 중 최근 에너지 가격의 급상승으로 가정 및 온실난방 등에서 사용량이 증가하고 있는 연탄 및 화

Table 1. Quality standard of fuel type.

Unit Type	Diameter (mm)	Height (mm)	Weight (kg)	Caloric value (kcal/kg)
Briquette	150	142	3.6	4,000 over
Wood	80	300	5	4,500 over
Wood pellet	6	30	20	4,500 over

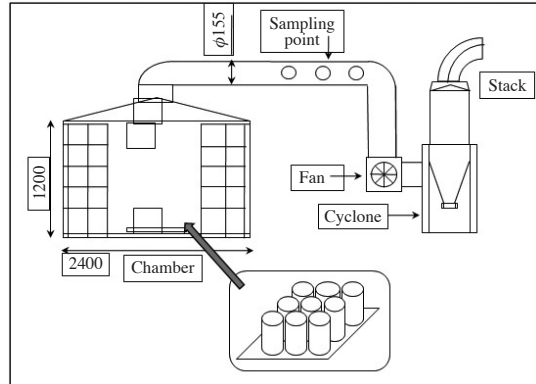


Fig. 1. Diagram of combustion simulation chamber.

목, 목재펠릿을 선정하였다. 본 연구에서 사용된 연료의 품질기준은 표 1과 같다(KEEI, 2012; MIRECO, 2012). 연료는 시판되고 있는 제품을 선정하였다.

2.2 모의소각장치 구성

연탄, 화목 및 펠릿난로와 같은 비관리형 연소시설의 고체연료 연소는 연소제어가 어려워 불완전 연소 가능성이 높아져 미세먼지와 더불어 PAHs 등 인체에 매우 유해한 각종 오염물질이 함유되어 가스상 또는 입자상 형태로 아무런 여과장치 없이 대기 중으로 배출된다. 이렇게 배출되는 각종 오염물질을 실측하기 위하여 본 연구에서는 그림 1과 같이 시험기준 EPA-600/R-96-128 (Christopher and Kariher, 1996)의 모의소각장치를 이용하였다. 주요 부분은 연소부, 시료채취부, 방지시설로 구성되어 있다. 연소부는 연탄, 화목 및 펠릿난로의 유동적인 고체연료의 투입과 원활한 연소를 위해 챔버로 구성되어 있으며 챔버 안에서 모든 시료를 연소하였으며, 연소부에서 연소된 배출가스는 시료채취구에서 시료채취가 이루어진 후 방지시설을 통과하여 굴뚝으로 배출되게 구성되어 있다. 연탄은 1구 2탄의 화덕을 이용하여 연탄연소를, 드림(용량: 0.123

m³, D: 0.56 m, H: 0.5 m)을 이용하여 화목연소를 하였고, 목재펠릿은 가정용 펠릿난로 (300×600×300 mm)를 이용하였다.

2.3 시료채취 및 분석

본 연구에서 사용한 고체연료에 대한 시료채취 방법 및 분석방법 등을 표 2에 나타내었다. 입자상 오염물질은 PM, PM₁₀, PM_{2.5}를 각각 측정하였다. 입자상 오염물질의 측정 시 동시에 가스상 오염물질, VOCs 그리고

OC/EC를 측정하였고, 이후 PAHs를 측정하였다. 시료의 채취 및 분석은 각각 3회씩 이루어졌으며 그 결과 값은 평균 값을 사용하였다. 모든 결과 값에는 blank를 3개씩 준비하여 측정용 여과지와 같은 전처리 과정을 거쳐 3개 평균 데이터를 사용하여 농도 값에 blank 교정을 하였다.

2.3.1 입자상 오염물질

입자상물질 중 PM은 대기오염공정시험기준 ES 01301.01의 배출가스 중 먼지측정방법을 바탕으로 시료를 채취하였으며 PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 대기오염공정시험기준 ES 01317.1의 배출가스 중 PM₁₀ 및 PM_{2.5}를 바탕으로 시료채취 하였다.

모든 측정은 Stack Sampler (Clean Air Experiment, Method-5)를 이용하여 그림 2와 같이 장치를 구성하여 배출가스의 유속, 온도, 압력(동압, 정압), 수분량 등을 측정하여 등속흡인으로 채취하였다. PAHs의 측정을 위한 여과지(Whatman, glass microfibre filters/47 mm) 전처리에는 회화로를 이용하여 850°C에서 4시간 이상 강열하여 탄소 성분 및 유기물질을 완전히 제거한 후,

Table 2. Measurement and analysis method.

Polutants	Sampling method	Analysis method
PM	KSMEA* Method ES 01301.1	Weighting
PM ₁₀	" ES 01317.1	Weighting
PM _{2.5}	" ES 01317.1	Weighting
VOCs	" ES 01113.1	KSMEA Method ES 01606.1
PAHs	" ES 01505.1	GC/MS
CO, SO _x , NO _x	portable Analyzer (electrochemical sensor)	
OC/EC	Organic Carbon/Elemental Carbon Analyzer (Used in PM ₁₀ and PM _{2.5} Filter)	

*Korea Standard Methods for Examination

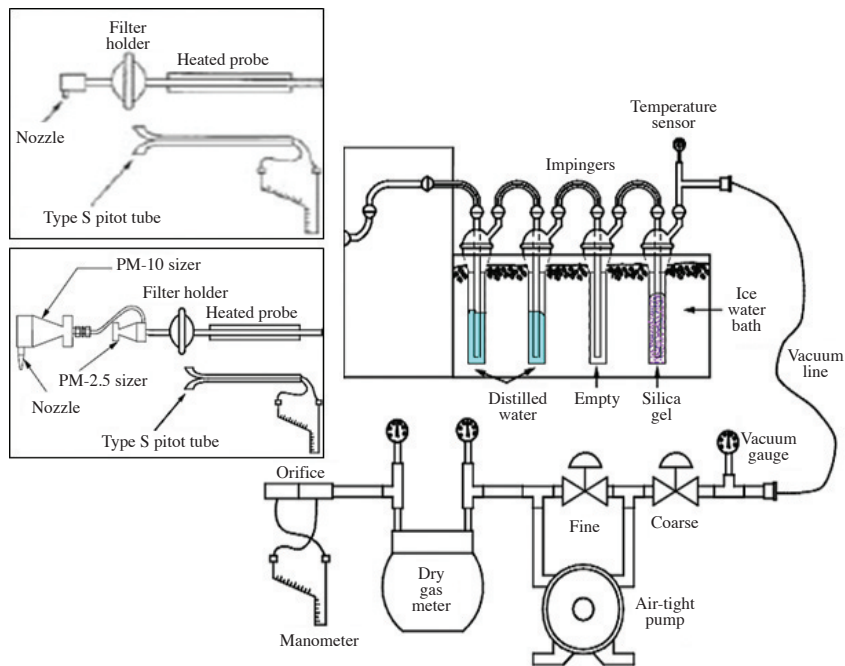


Fig. 2. Sampling device of the Particulate Mater.

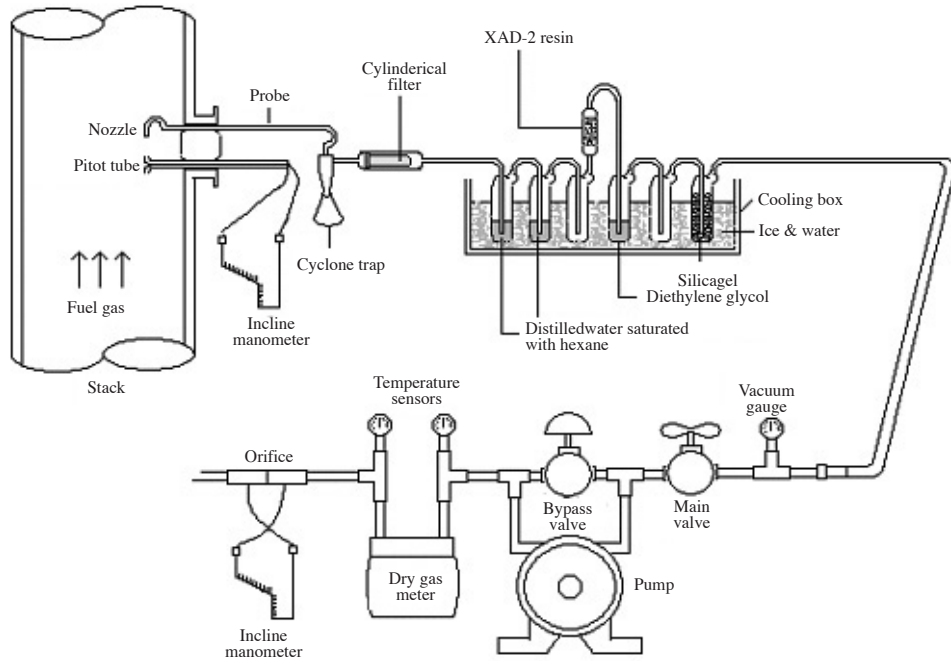


Fig. 3. Sampling device of the PAHs.

데시케이터에서 실온까지 방냉한 여과지의 무게를 정밀히 칭량하여 사용하였다. 먼지 시료채취에 사용된 여과지는 건조로(110±5)°C에서 2~3시간 건조시킨 후, 데시케이터에서 2시간 이상 항량하고 여과지의 무게를 3번 이상 반복 칭량하여 그 값을 대표 값으로 하였다. 측정이 완료된 여과지는 탄소분석기(Desert Research Institute, Model 2001A)를 이용하여 OC/EC를 정성, 정량 분석하였다.

2.3.2 가스상 오염물질

연소 조건을 확인하고자 전기 화학셀 방식의 휴대용 가스분석기(BACARACHI, ECA450)를 이용하여 CO, SO_x, NO_x의 농도를 연속적으로 측정하였다.

휘발성 유기화합물의 경우, 대기오염공정시험기준 ES 01113.1 배출가스 중 휘발성유기화합물질 시료채취 방법 중 테들라 백(Tedlar bag) 방법에 의하여 1L/min의 속도로 시료를 채취하였고, 채취한 시료는 시료의 변질을 막기 위해 차광된 상태로 보관하였고 GC/MS(Agilent Technologies, GC7890A/MS5975C)를 이용하여 분석하였다.

PAHs의 경우에는 대기오염공정시험기준 ES 01505.1의 배출가스 중 다환방향족탄화수소류-기체크로마토그래피 법을 이용하여 분석하였다. PAHs는 배출가스 중에 입자상 및 가스상으로 존재하며 입자상 PAHs는 먼지 시료채취 방법과 동일하게 등속흡인을 하였으며, 가스상의 경우는 흡수액과 흡착제를 이용하여 시료를 채취하였다. 시료채취 장치는 그림 3과 같이 먼지포집부, 가스흡수부, 가스흡착부, 배출가스 유속 및 유량측정부, 진공펌프 및 흡인가스 유량측정부 등으로 구성된다. 흡수액으로는 hexan포화중류수를 사용하였으며, 가스흡착부에는 암버라이트(Amberlite) XAD-2(Supelco, 1-0357) 수지와 PUF(Poly Urethane Foam)을 사용하였다. 시료채취에 사용되는 원통형 여지는 850°C에서 2시간 강열한 후 아세톤, hexan 및 톨루엔을 사용하여 30분간 초음파 세정한 후 진공 건조하여 사용하였다. 또한 암버라이트 XAD-2는 아세톤+중류수(1+1), 아세톤(2회), hexan(2회)을 이용하여 각각 30분간 초음파 세정 후 30°C 이하의 진공건조기에서 건조한 후 사용하였다. PUF는 전처리가 완료된 제품(Supelco, 27577)을 밀봉상태로 보관하여 시료채취 시 사용하였다. 시료의

Table 3. PM and OC/EC concentration by fuel type.

Fuel	(unit: mg/m ³)								
	PM			PM ₁₀			PM _{2.5}		
	PM	OC	EC	PM	OC	EC	PM	OC	EC
Wood	133.6	61.1	7.9	118.5	47.7	15.4	108.6	45.5	6.9
Wood pellet	103.09	34.9	9.7	65.97	27.9	3.6	56.79	2.7	2

분석은 주사기 첨가용 내부표준물질을 사용하여 공정 시험기준의 내부표준분석법으로 분석하였다.

2.4 배출계수 및 배출량 산정

본 연구에서는 연탄, 화목, 목재펠릿에 대해 농도, 시료채취량, 시료채취 시간 등의 실측 조건을 이용하여, 각 항목별 배출계수를 식(1)과 같은 방법으로 산정하였다. 또한, 산정된 배출계수와 각각의 활동도를 이용하여 배출량을 산정하였다.

$$\text{배출계수}(g/kg) = \frac{\text{농도}(mg/Sm^3) \times \text{건조배출가스유량}(m^3/hr) \times 10^3}{\text{소각량}(kg)/\text{소각시간}(hr)} \quad (1)$$

3. 연구결과

3.1 입자상 오염물질 및 OC/EC

입자상 오염물질 및 OC/EC 분석을 위해 등속흡인조건에서 각각 3회 시료를 채취하여 분석하였으며 결과는 표 3에 나타냈다. 연탄 연소 시 먼지의 발생이 0.01 mg 이하로 분석되어 연탄 연소에 의한 먼지는 거의 배출되지 않는 것으로 나타났다. 화목은 목재펠릿보다 연료의 크기가 매우 크며, 나무의 종류가 상이하여 연소 성향이 달랐으며 불완전 연소에 의하여 PM의 농도가 높게 나타났다. 화목의 경우, PM₁₀, PM_{2.5}는 PM의 89%, 81% 수준이었고, PM_{2.5}는 PM₁₀의 92%를 차지하였다. 목재펠릿의 경우, PM₁₀, PM_{2.5}는 PM의 64%, 55% 수준이었고, PM_{2.5}는 PM₁₀의 86% 수준으로 나타났다. 두 연료 모두 PM₁₀, PM_{2.5}보다 PM이 높게 나왔으며 PM₁₀이 PM_{2.5}보다 높게 나타난다.

탄소 성분의 분석 결과는 모든 입자에서 OC가 EC보다 농도가 높게 나타났다. 화목에서 OC/EC는 3.1~7.7의 범위를 나타냈고, PM의 OC/EC가 가장 높게 나타났다. 목재펠릿의 경우, OC/EC는 1.4~3.6의 범위를

나타냈고, 마찬가지로 PM의 OC/EC가 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 연소 시에 유기성 물질이 다량 발생한다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 PM, PM₁₀, PM_{2.5}를 각각 측정하여 분석한 결과로 PM보다 PM₁₀의 EC가 높은 농도를 나타내는데 이는 입경별 먼지농도 측정 시 연소 규모가 작고, 연소가 불규칙하여 불완전 연소가 많이 되고 비산되는 재가 일반적인 농도패턴에 영향을 주는 것으로 사료된다.

3.2 CO, SO_x, NO_x

연탄, 화목, 목재펠릿 모두 CO가 가장 높은 농도를 나타내며 그 결과는 그림 4와 같다. CO의 최대 농도는 연탄 385 ppm, 화목 1,276 ppm, 목재펠릿 632 ppm이었다. 같은 성분인 화목과 목재펠릿의 경우, 화목에서 CO의 최대 농도는 연소가 활발히 이루어지는 지점에서 최고치를 나타냈고 목재펠릿은 화목에 비해 연료가 간헐적으로 투입되는 관계로 투입시점에서 CO의 농도가 높게 나타났다.

SO_x의 평균농도는 연탄 7 ppm, 화목 5 ppm, 목재펠릿 1 ppm이며, NO_x의 평균농도는 연탄 2 ppm, 화목 12 ppm, 목재펠릿 12 ppm으로 나타났다.

3.3 VOCs

본 연구에서 VOCs를 측정한 결과는 평균값으로, 상대표준편차(RSD, %)는 표준편차를 평균으로 나눈 값으로 표 4에 나타내었다. 참나무와 소나무로 이루어진 화목 및 목재펠릿보다 연탄의 VOCs 배출농도가 더 높게 나타났다.

연탄의 경우에는 총 VOCs 농도 288.53 ppb 중 acrylonitrile이 146.47 ppb (50.7%)로 가장 많은 배출특성을 나타냈고, toluene 45.14 ppb, m,p-xylene 22.11 ppb 순으로 나타났다. 화목의 경우에는 총 VOCs 농도 211.98 ppb 중 benzene이 112.79 ppb(53.2%), 1,3-butadiene 86.88 ppb, toluene 11.09 ppb 순으로 나타났으며, 목재펠릿의 경우에는 benzene이 58.83 ppb로 나타났

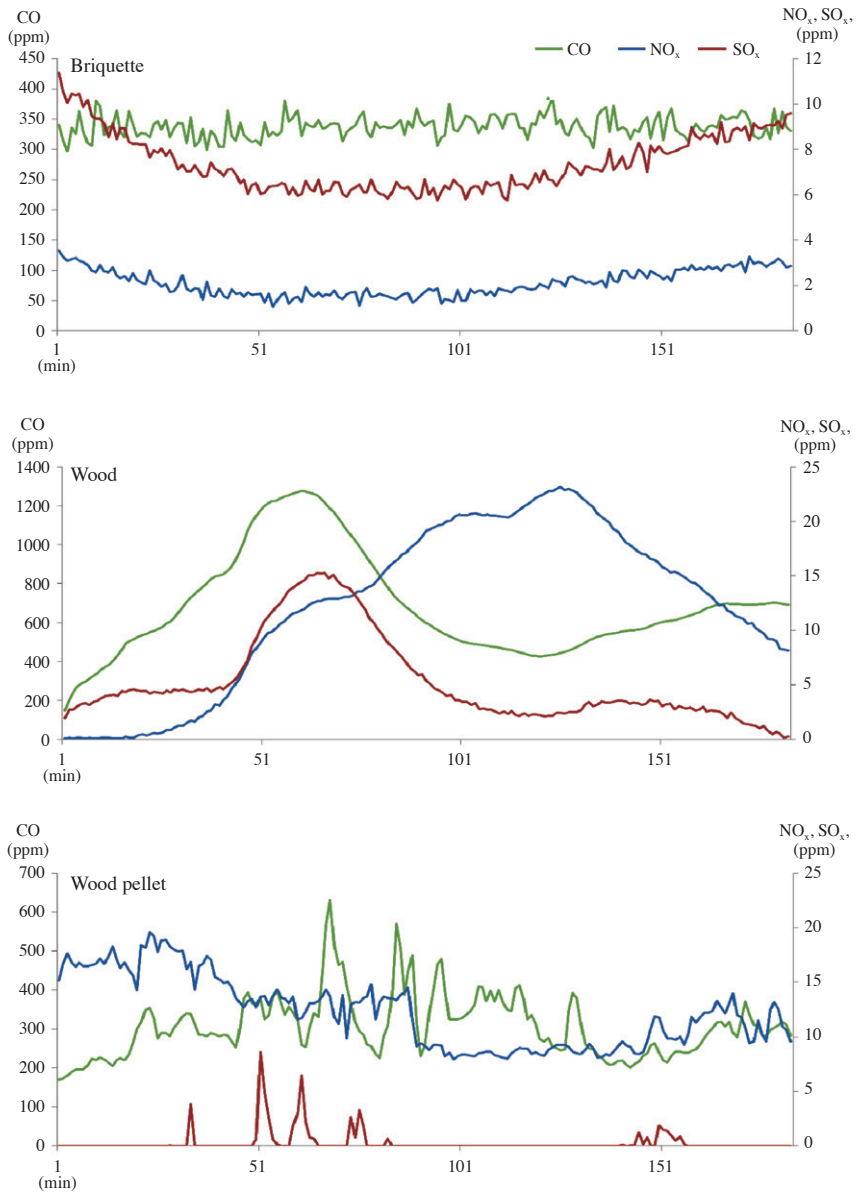


Fig 4. Emission Characteristics of CO, SO_x and NO_x.

다. 화목과 목재펠릿의 원료가 비록 나무의 종류는 다르지만 연소할 때에는 벤젠이 가장 높게 배출되는 것을 알 수 있었다. 목재펠릿의 연소 시 VOCs의 종류가 적게 나타나는 이유로 펠릿을 성형할 때에 압축하는 과정에서 고온이 발생되며 증기로 인하여 VOCs 중 일부가 휘발되었을 것으로 판단된다.

3.4 PAHs

Lee *et al.*(2010) 등에 따르면, PAHs는 2개 이상의 벤젠고리를 가지는 방향족탄화수소로, 대부분 불완전 연소에 의해서 발생한다고 기술하고 있다.

PAHs의 경우, 입자상 및 가스상으로 존재하는 총 PAHs에 대한 측정결과 값을 그림 5와 표 5에 나타냈

Table 4. VOCs concentrations by fuel type.

(unit: ppb)

Pollutants	Briquette			Wood			Wood pellet		
	ConC	SD	RSD	ConC	SD	RSD	ConC	SD	RSD
1,3-Butadiene	—	—	—	86.88	62.35	71.77	—	—	—
Acrylonitrile	146.47	41.66	28.44	—	—	—	—	—	—
Benzene	—	—	—	112.79	101.11	89.65	58.83	72.75	123.67
trans-1,3-Dichloropropene	—	—	—	0.51	0.44	87.01	—	—	—
Toluene	45.14	10.58	23.44	11.09	12.13	109.34	—	—	—
Ethylbenzene	5.39	3.46	64.21	—	—	—	—	—	—
m,p-Xylene	22.11	5.77	26.08	—	—	—	—	—	—
Styrene	18.08	10.94	60.50	0.05	0.04	86.60	—	—	—
1,2,4-Trichlorobenzene	21.87	8.77	40.10	—	—	—	—	—	—
1,2,4-Trimethylbenzene	—	—	—	0.28	0.01	4.13	—	—	—

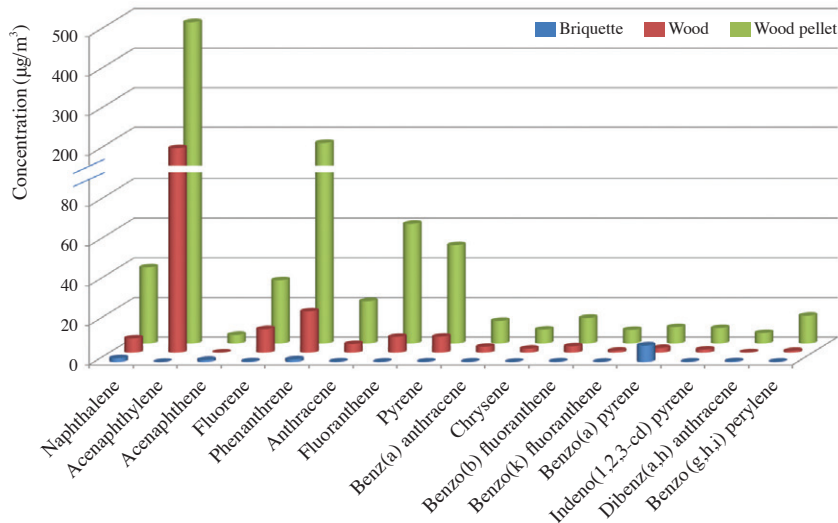


Fig. 5. PAHs concentrations by fuel type.

으며 결과 값은 VOCs의 배출특성과 달리 화목 및 목재펠릿에서 배출농도가 높게 나타났다.

연탄은 총 PAHs 농도 $14.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 benzo(a) pyrene이 $8.39 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (57.5%)로 가장 많은 배출특성을 나타냈고, naphthalene $1.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, acenaphthene $1.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났다. 화목은 총 PAHs 농도 $261.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 acenaphthylene이 $186.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (71.4%), phenanthrene $20.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, fluorene $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 나타났으며, 목재펠릿의 경우에는 총 PAHs 농도 $937.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 중 acenaphthylene이 $481.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (51.4%), phenanthrene $176.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, fluoranthene $60.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 배출특성을 나타냈다.

본 연구결과, 대표적인 PAHs 화합물 중 하나로서 원료유나 방향족화합물 제품의 불순물로 존재할 수 있는 naphthalene이 연탄 $1.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 화목 $7.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 목재펠릿 $38.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 연료에 있어서 입자상 PAHs 물질인 Phenanthrene, Fluoranthene 등이 고농도로 검출되었으며, 특히 가스상 PAHs인 Acenaphthylene이 화목 및 목재펠릿에서 가장 높게 검출되었다.

3.5 배출계수 및 배출량 산정

본 연구결과를 토대로 각 연료별 배출계수 및 배출량을 산정하였다. 배출계수는 주요 대기오염물질 배출량 산정과 대기정책 수립을 위한 기초자료로 활용되

Table 5. PAHs concentration by fuel type.

(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Pollutants	Briquette			Wood			Wood pellet		
	ConC	SD	RSD	ConC	SD	RSD	ConC	SD	RSD
Naphthalene	1.92	2.72	141.34	7.23	4.81	66.54	38.32	34.06	88.88
Acenaphthylene	—	—	—	186.72	232.78	124.67	481.46	601.15	124.86
Acenaphthene	1.08	0.03	2.99	0.13	0.16	122.64	4.30	6.86	159.34
Fluorene	0.30	0.05	15.28	11.94	7.95	66.57	31.89	20.23	63.44
Phenanthrene	1.30	0.45	34.83	20.81	14.31	68.78	176.55	126.35	71.57
Anthracene	0.19	0.02	8.18	4.40	2.90	65.92	21.37	16.46	77.05
Fluoranthene	0.13	0.04	27.74	7.94	4.96	62.50	60.30	38.24	63.42
Pyrene	0.18	0.04	22.04	8.03	4.88	60.74	49.52	31.30	63.20
Benz(a) anthracene	0.16	0.01	3.69	3.03	1.60	52.80	11.41	6.88	60.32
Chrysene	0.04	0.01	15.75	2.13	1.16	54.70	7.00	4.40	62.92
Benzo(b) fluoranthene	0.20	0.02	7.77	3.32	2.08	62.64	12.88	5.56	43.15
Benzo(k) fluoranthene	0.07	0.00	0.00	1.00	0.49	48.54	6.85	6.01	87.75
Benzo(a) pyrene	8.39	7.51	89.49	2.39	0.96	40.20	8.26	3.44	41.69
Indeno(1,2,3-cd) pyrene	0.18	0.01	3.27	1.64	0.55	33.34	7.71	2.03	26.38
Dibenz(a,h) anthracene	0.33	0.02	6.37	0.16	0.05	33.07	5.24	0.99	18.86
Benzo(g,h,i) perylene	0.11	0.01	5.41	0.89	0.24	27.31	13.97	13.02	93.20

며, 배출원의 영향을 확인하고 적절한 배출저감방법을 마련하는 데 중요한 역할을 한다.

연탄의 측정결과, 먼지 농도가 낮은 관계로 먼지 배출계수 및 OC/EC의 배출계수는 산정하지 못했으며, 가스상 물질인 CO, NO_x, SO_x와 PAHs, VOCs에 대한 배출계수를 산정하였다. CO의 배출계수는 14.09 g/kg, NO_x는 0.08 g/kg, SO_x는 0.29 g/kg으로 산정되었고, 총 PAHs는 0.48 mg/kg, 총 VOCs는 36.12 mg/kg으로 산정되었다.

화목 및 목재펠릿의 배출계수를 비교하면, 전반적으로 화목에서 대부분의 배출계수가 높게 산정되었다. 그 이유는 본 실험에서 사용된 연료는 캠핑용 또는 소형으로 그 연소 규모가 작고, 연소가 불규칙하여 불완전 연소가 많이 되고 비산되는 재가 결과 값에 영향을 주었기 때문이다. 먼지의 경우, 배출시설의 대기오염물질 배출계수 고시(국립환경과학원 제2015-9호)에서 명시한 목재펠릿의 먼지 배출계수 0.93 g/kg에 비해 화목은 약 15배인 13.54 g/kg, 목재펠릿은 약 10배인 9.15 g/kg으로 높게 나타났다.

또한, OC의 경우 화목은 61.10 g/kg, 목재펠릿은 2.73 g/kg으로 산정되었으며, EC의 경우 화목은 7.86 g/kg, 목재펠릿은 0.75 g/kg으로 산정되어 화목이 목재펠릿에 비해 높게 나타났다. PAHs의 경우 화목은 18.84 mg/kg, 목재펠릿은 101.62 mg/kg으로 목재펠릿이 5배 이

상 높게 나타났다.

배출량 산정 시, 연탄은 민수용 무연탄 연간 소비량 1,882,000 톤(MIRECO, 2012)을 활동도로 적용하여 배출량을 산정하였다. 화목은 전국의 화목난로 개수 45,562개(통계청 2012)와 화목난로 1개당 연간연료사용량 2,548.48 kg(GRI, 2011)을 활동도로 적용하여 각각의 배출량을 산정하였다. 목재펠릿은 목재펠릿의 생산(공급)량(KFS, 2012)인 64,013톤/년을 활동도로 적용하여 배출량을 산정하였다. 국가대기오염물질 배출량 산정프로그램인 CAPPs에서는 현재 7개의 대기오염물질(PM, PM₁₀, CO, SO_x, NO_x, VOCs, NH₃)에 대한 배출량을 산정하고 있으며, 비교·분석을 위해 본 연구에서는 이를 포함한 10개(PM, PM₁₀, PM_{2.5}, OC, EC, CO, SO_x, NO_x, VOCs, PAHs)의 배출량을 산정하였다.

연탄에서 발생하는 오염물질별 배출량은 CO는 28,934.26 ton/yr, SO_x는 601.84 ton/yr, NO_x는 165.29 ton/yr로 산정되었으며, 총 VOCs 및 총 PAHs는 5.36 ton/yr, 2.19 ton/yr로 산정되었다.

화목 및 목재펠릿의 배출량은 배출량 산정 시 적용된 활동도가 목재펠릿보다 화목이 약 1,800배 정도 높게 나타났고 배출계수도 대부분 높게 나타나 화목의 배출량이 높게 산정되었다. 각각의 연료에 따른 배출계수 및 배출량은 표 6과 같다.

Table 6. Emission factor and emissions by pollutants.

Pollutants		Emission factor (g/kg)			Emissions (ton/yr)		
		Briquette	Wood	Wood pellet	Briquette	Wood	Wood pellet
PM	PM	—	13.54	9.15	—	1,572.19	585.53
	PM ₁₀	—	11.51	6.20	—	1,336.48	397.07
	PM _{2.5}	—	10.50	4.39	—	1,219.20	281.02
PM	OC	—	61.10	2.73	—	7,094.59	174.76
	EC	—	7.86	0.75	—	912.66	48.01
PM ₁₀	EC	—	5.28	2.55	—	613.08	163.23
	OC	—	1.50	0.42	—	174.17	26.89
PM _{2.5}	EC	—	4.26	0.48	—	494.65	30.73
	OC	—	0.62	0.35	—	71.99	22.40
Gaseous	CO	14.09	47.60	52.79	28,934.26	5,527.04	3,379.33
	SO _x	0.29	0.90	0.15	601.84	150.95	9.89
	NO _x	0.08	1.30	1.55	165.29	104.50	99.03
ΣVOCs (mg/kg)		36.12	46.13	18.26	67.98	5.36	1.17
ΣPAHs (mg/kg)		0.48	18.84	101.62	0.90	2.19	6.51

4. 결 론

본 연구에서는 상대적으로 비용이 저렴하여 가정 및 난방 부분에서 사용량이 늘어나고 있는 고체연료인 연탄과 화목, 목재펠릿을 대상으로 EPA-600/R-96-128의 모의소각장치를 이용하여 연소에 따른 대기오염물질 배출 특성을 연구하였으며 그 결과, 다음과 같은 결론을 낼 수 있었다.

먼지의 경우, 본 연구에서 진행한 연탄의 연소 시에는 측정 전·후의 여지무게차가 오차범위 이내로 측정되어 먼지의 배출계수를 구할 수 없었으며, 화목과 목재펠릿의 경우 PM 중 PM_{2.5}가 차지하는 비율이 81%, 55%로 고체연료의 연소 시 초미세먼지가 높게 나타났다. 화목의 먼지농도가 목재펠릿의 먼지 농도보다 높은 이유는 톱밥화하여 작게 성형한 목재펠릿이 화목보다 원활한 연소가 이루어졌기 때문이었다. 이에 따라 배출계수 및 배출량도 화목에서 더 높게 산정되었다.

탄소성분은 화목과 목재펠릿에서 OC 농도가 EC 농도에 비해 약 1.5배~8배 높게 나타나 연소가 일어날 때 유기성 물질이 다량 발생하는 것으로 나타났다. 가스상 물질의 경우, 모든 연료에서 SO_x와 NO_x에 비하여 CO가 매우 높은 농도로 배출되었다.

VOCs와 PAHs의 배출 특성은 화목과 목재펠릿의 원료가 되는 나무의 종류가 다르고, 연료성상 및 연소

조건 등으로 인하여 화목과 목재펠릿의 농도패턴이 다르게 나타났다. VOCs에서는 benzene이 PAHs에서는 acenaphthylene이 가장 높은 비중을 차지하였고 연탄의 경우에는 acrylonitrile과 naphthalene이 가장 높은 비중을 차지하였다. 화목 및 목재펠릿은 캠핑용 또는 소형으로 사용되어 그 연소 규모가 작고, 연소가 불규칙하여 불완전 연소가 많이 되고 비산되는 재가 결과 값에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

최근 캠핑장 및 비관리형 연소시설이 증가하고 있으며 불법 소각과 계절에 따른 소각량의 변화로 소규모 연소시설의 오염물질 배출특성을 정량화 하기는 어려운 실정이다. 따라서 고체연료의 다양한 사용 형태에 따른 지속적인 추가 연구를 통해 신뢰도 높은 배출계수 산정과 소규모 배출원 관리정책 마련이 시급히 추진되어야 할 것이다.

References

- Bates, L. (2005) Smoke-reduction technologies in developing countries, Proceeding of Institution of Civil Engineers: Municipal Engineer, 158(2), 137-143.
- Chaney, J. (2010) Combustion Characteristics of Biomass Briquettes, Ph D Thesis, University of Nottingham, 51-52.

- Christopher, C.L. and P.H. Kariher (1996) Evaluation of Emission from the Open Buring of Land-clearing debris Final Report, EPA-600/R-96-128, 4-12.
- GRI (2011) Analysis of Air Pollutants Emissions from Biomass Burning in Seoul Metropolitan Area, 2011-02, 30.
- Guo, H., T. Wang, D.R. Blake, I.J. Simpson, Y.H. Kwok, and Y.S. Li (2006) Regional and local contributions to ambient non-methane volatile organic compounds at a polluted rural/coastal site in Pearl River Delta, *Atmospheric Environment*, 40(13), 2345-2359.
- Guo, H., T. Wang, I.J. Simpson, D.R. Blake, X.M. Yu, Y.H. Kwok, and Y.S. Li (2004) Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in eastern China, *Atmospheric Environment* 38(27), 4551-4560.
- Jin, Y.L., Z. Zhou, G.L. He, H.Z. Wei, J. Liu, and F. Liu (2005) Geographical spatial and temporal distributions of multiple indoor air pollutants in four Chinese provinces, *Environmental Science and Technology* 39(24), 9431-9439.
- Kaung, M.W., P. Tomas, and B. Chris Bales (2012) Particles and gaseous emissions from realistic operation of residential wood pellet heating systems, *Atmospheric Environment*, 59, 320-327.
- KEEI (2012) Yearbook of Energy Statistics. ISSN 1226-606X, 146.
- KFS (2012) Statistical YearBook of Forest, No. 2012-42.
- Kim, S.D., S.H. Ku, K.S. Lee, and D.S. Hue (1975) A study of CO-Gas Analysis of Hole-Briquette, *Korean Society of Environmental Health*, 2(1), 33-36. (in Korean with English abstract)
- Lee, D.K., J.S. Choi, Y.M. Jo, and J.C. Kim (2010) Emission of Harmful Air Pollutants from Waste Open Burning, *Korea Society of Waste Management*, 27(2), 151-158. (in Korean with English abstract)
- MIRECO (2012) Yearbook of MIRECO Energy Statistics, 2012, 252.
- NIER (2013) Analysis of Atmospheric Environmental Impact due to the use of Solid Fuel, No. 2013-199, 7-9.
- Shuxiao, W., W. Wei, D. Li, and J.H. Guanghui (2009) Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China, *Atmospheric Environment*, 43(27), 4148-4154.
- Tonooka, Y., A. Kannari, H. Higashino, and K. Murano (2001) NMVOCs and CO emission inventory in East Asia, *Water, Air, and Soil Pollution*, 130(1), 199-204.
- Yan, X.Y., T. Ohara, and H. Akimoto (2006) Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China, *Atmospheric Environment*, 40(27), 5262-5273.