

주거용 화목난로의 대기오염 배출량 추정에 관한 연구

A Study on Estimation of Air Pollutants Emission from Residential Wood Stove

김필수* · 장영기 · 김 정 · 신용일 · 김정수¹⁾ · 안준영¹⁾
수원대학교 환경에너지공학과, ¹⁾국립환경과학원 기후대기연구부
(2010년 1월 21일 접수, 2010년 3월 30일 수정, 2010년 4월 23일 채택)

Pil-Su Kim*, Young-Kee Jang, Jeong Kim, Yong-Il Shin,
Jeong-Soo Kim¹⁾ and Jun-Young An¹⁾
Department of Environmental & Energy Engineering, Suwon University
¹⁾*Climate and Air Quality Research Department, National Institute
of Environmental Research*

(Received 21 January 2010, revised 30 March 2010, accepted 23 April 2010)

Abstract

Recently the Korean government has tried to cut down the PM₁₀ concentration by the Special Law for Air Quality Improvement. But the concentrations of PM₁₀ have exceeded the air quality standard at most monitoring stations. Primary PM₁₀ emitted from various sources and emission data have large uncertainty. The biomass burning is one of the major sources of PM₁₀ emission. The biomass burning is composed of wood stove usage, meat cooking and agricultural combustion etc.. Activity data and emission factors for the biomass burning are limited, and it is hard to calculate the air pollution emissions from these sources.

In this study, we tried to estimate the air pollution emission from residential wood stove usage. The number of total wood stoves is estimated by the survey of wood stove manufacturer. And air pollution emission factors for the wood stove are investigated using the flue gas measurement by U.S. EPA particulate test method (Method 5G). As the results, the PM₁₀ and CO emission factors of wood stove are estimated as 7.7 g/kg-wood and 78.8 g/kg-wood respectively. The annual PM₁₀ and CO emissions from wood stove are calculated as 1,200~3,600 ton/year and 12,600~36,400 ton/year in Korea. It is confirmed that wood stove is the one of major sources of biomass burning, and the survey for activity data and the measurement for emission factors are needed for reducing the uncertainty of these emission data.

Key words : Emission factor, Wood stove, Air pollution, Emission

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)31-220-2147, E-mail : dduryman@nate.com

1. 서 론

2008년 현재 우리나라의 대기환경기준 항목 중 PM₁₀은 전국 측정망에서 연간 기준인 50 µg/m³에 대한 기준달성율이 28.7%, 24시간 기준인 100 µg/m³에 대한 기준달성율이 1.3%로 대기환경기준을 크게 초과하고 있는 실정이다(국립환경과학원, 2009). 대기환경기준을 달성하기 위해서는 배출원에 대한 파악과 이에 대한 관리대책이 강화되어야 한다. 국내 대기오염물질 배출자료는 사업장, 지자체, 유관기관 등을 통해 입수하는 자료를 바탕으로 구축된 배출 통계시스템인 대기정책지원 시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)을 통해 작성되고 있다. 이 대기정책지원 시스템은 지역별 대기오염 배출자료를 행정구역별 격자별로 산출 제공하여 국가 대기오염 배출자료 시스템의 역할을 하고 있다. 하지만 PM₁₀에 대해서는 아직 배출량 산출 방법론의 불확실성이 커서 도로 이외의 비산먼지와 노천소각과 생물성 고체연료 사용 등에 대해서는 배출자료를 산출하지 않고 있다.

유럽연합의 2006년 배출자료(EEA, 2008)에 의하면 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대하여 주거용 연료연소(residential fuel combustion) 부문이 각각 21.7%, 29.6%의 높은 비중을 차지하고 있으며, 미국 2002년 배출자료에 의하면 연료연소 부문 중 주거용 나무연소 부문(Residential wood combustion)이 PM₁₀에 대하여 21%, PM_{2.5}에 대하여 25%를 차지하는 것으로 보고되고 있다. 유럽연합과 미국에서 큰 비중을 차지하고 있는 주거용 연료연소 부문 배출은 벽난로나 화목난로에서 나무연소에 의한 배출이 대부분이다. 국내의 주요 오염원 기여도 분석에 관한 여러 연구에서도 PM의 경우 생물성 연소(biomass burning) 오염원이 상당부분 포함된 것으로 보고되고 있다(Lee *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009; Oh *et al.*, 2009; Hwang *et al.*, 2008). 이러한 생물성 연소는 연료로 사용하는 나무의 연소, 농업부산물의 소각 그리고 고기구이 등으로 추정된다.

본 연구에서는 생물성 연소 중 상당부분을 차지할 것으로 예상되는 주거용 화목난로에서 발생하는 대기오염물질 배출량을 추정하고자 하였다. 이를 위하여 주거용 화목난로의 이용대수를 추정하고 국내 주거용 화목난로를 이용한 현장실험을 통하여 오염물질별 배출계수를 확인하고, 외국 배출계수와 비교하여 오염물질별 배출량을 추정하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 주거용 화목난로 이용대수 추정

주거용 화목난로에 대한 배출량을 추정하기 위해 가장 중요한 활동도 자료는 국내에서 사용되고 있는 화목난로의 대수이다. 하지만 국내에는 화목난로의 전체적인 시장규모나 판매량에 대한 통계 자료가 구축되어 있지 않기 때문에 설문조사를 실시하여 이용대수를 추정하였다. 설문조사는 검토 결과 이용자에 대한 조사보다는 제조판매자에 대한 조사가 불확실성을 줄일 수 있다고 판단되었다. 그래서 국내에서 화목난로를 제작 판매하는 업체를 전화번호부와 인터넷으로 조사한 결과 60여개 업체가 파악되었고, 이를 대상으로 우편과 전화를 통한 설문조사를 실시하였다. 이 조사에서 화목난로의 연간 총 판매대수와 화목난로의 예상 평균 수명, 그리고 연간 국내 총 예상 판매량에 대한 설문을 실시하였다.

파악된 60여개의 업체를 대상으로 실시한 설문조사 결과 총 24개 업체가 응답을 하였고, 이 응답 내용으로 분석을 실시하였다. 설문 응답 업체를 대상으로 조사한 결과 연간(2008년 4월~2009년 3월) 총 판매량은 9,362대로 조사되었다. 그러나 분석된 총 판매량은 전체 업체의 모든 판매량이 아니기 때문에 조사된 화목난로의 평균 수명 자료와 국내 예상시장규모(연간 국내 예상 판매량)를 통해 국내에서 이용되고 있는 화목난로의 대수를 추정하고자 하였다. 화목난로의 국내 예상시장규모 예상치는 판매업체별로 큰 차이를 보였다. 따라서 조사된 업체를 대상으로 연간 화목난로 판매량이 100대 이상인 판매업체의 자료 중 극한치(최소값과 최대값)를 제외하고 평균값을 산출하였는데 국내 예상 시장규모는 6,300~18,200(12,250 ± 0.5σ)대/년으로 추정되었다. 한편 화목난로의 수명은 화목난로 모델에 따라 차이를 보였는데 화목난로의 예상 평균 수명은 약 7.9년으로 산출되었다. 평균 수명과 예상 시장규모로 국내에서 연간 가용되고 있는 주거용 화목난로의 대수를 추정하면 약 5.0만~14.4만(평균 97,500)대로 추정되었다.

2.2 국내 주거용 화목난로 에너지 소비량 산출

국내 주거용 화목난로에서 연소되는 장작량을 추정하기 위해서는 화목난로 사용에 따른 에너지 소비량을 산출하기 위한 미국 환경청(U.S. EPA)의 EIIP

Table 1. The results of a survey of wood stove suppliers.

Location	Shop name	Sales volume (EA/yr)	Average span (expectation) (Year)	Estimating market (domestic) (EA/yr)
Suwon-si, Gyeonggi-do	A	250	5	3,000
Gimpo-si, Gyeonggi-do	B	102	10	-
Buk-gu, Daegu	C	728	10	1,000
Gangseo-gu, Busan	D	2	2	-
Yongin-si, Gyeonggi-do	E	2,500	7	30,000
Gwacheon-si, Gyeonggi-do	F	0	20	5,000
Namyangju-si, Gyeonggi-do	G	0	10	10,000
Suwon-si, Gyeonggi-do	H	0	5	-
Yangju-si, Gyeonggi-do	I	0	5	-
Hwaseong-si, Gyeonggi-do	J	30	5	5,000
Hwaseong-si, Gyeonggi-do	K	120	10	3,000
Bucheon-si, Gyeonggi-do	L	1,500	3	10,000
Gimhae-si, Gyeongsangnam-do	M	0	5	3,000
Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do	N	2,000	5	500,000
Suseong-gu, Daegu	O	50	3	30,000
Chilgok-gun, Gyeongsangbuk-do	P	500	5	10,000
Seo-gu, Incheon	Q	350	4	10,000
Namwon-si, Jeollabuk-do	R	150	7	20,000
Wonju-si, Gangwon-do	S	50	3	6,000
Naju-si, Jeollanam-do	T	250	3	5,000
Nam-gu, Busan	U	300	8	10,000
Naju-si, Jeollanam-do	V	300	10	40,000
Masan-si, Gyeongsangnam-do	W	80	6	-
Pocheon-si, Gyeonggi-do	X	100	40	5,000
		Sum. (EA)	Aver. (yr)	Average ¹⁾ (EA)
		9,362	7.9	12,250

¹⁾Average value except a limiting value, maximum and minimum, among the shop that more than 100 sell wood stove

(Emission Inventory Improvement Program) Volume IV의 방법론을 적용하였다. 이 방법론은 주거용 화목난로의 연소로 인해 배출되는 오염물질 배출량을 추정하기 위해 사용되는 것으로 일반적으로 화목난로와 벽난로에 사용되는 화목량을 산정하기 위해 사용된다. 본 연구에 적용된 화목난로의 에너지 소비량을 추정하기 위한 산출식은 다음과 같다.

$$E = C_D(16.86 \times q_L \times DD) / (k \times V)$$

E=주거용 화목난로 1 대당 연간 에너지 소비량 (Cords)

C_D=화씨 65도일에 대한 열효과의 경험적 수정계수. 이 값은 0.8

q_L=침투와 환기를 포함한 가정에서의 열손실(BTU/hour)

DD=난방도일, 표준기온(19°C) 이하의 날의 횟수(매년 또는 매달)

k=최고 부하율, 부분 부하율, 에너지 전환장치의 효율을 포함한 수정 계수. 이 값은 예전 집이나 새 집의 평균치로 0.6을 사용한다.

V=연료의 열량(BTU/cord). 이 값은 국가특성에 따른 값이다.

연간 에너지 소비량 단위로 사용되는 Cords는 난로의 연료로 사용되는 일정한 장작단의 부피(8 ft long × 4 ft wide × 4 ft height)로 정의되며, 이는 약 3.6 m³로 환산된다. 연료의 열량(BTU/cord)은 EIIP에 제시되어 있는 장작에 대한 열량 값인 2.0 × 10⁷ BTU/Cord를 적용하였다. 난방도일 자료는 에너지경제연구원의 Energy Info. Korea에서 제공하는 지역별 난방도일 자료(에너지경제연구원, 2008)를 사용하였고, 2007년 전국 난방도일 평균값은 2,404(hour)이다. 이에 따라 산출된 연간 에너지 소비량은 약 122,041 cords(442,348 m³)이며 나무의 평균비중 0.706 ton/m³(산림청, 2009)

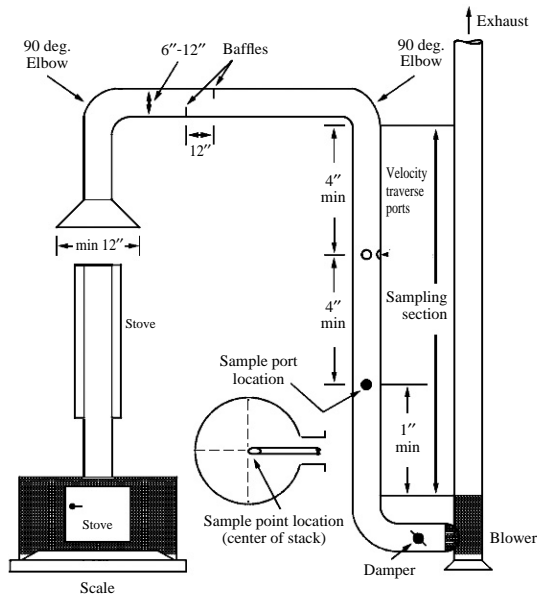


Fig. 1. The woodstove test facility used in U.S. EPA method 5G.

를 적용하면 화목난로당 연간 화목 사용량은 약 3.2 ton/년으로, 전국 규모 화목난로 대수를 추정치 5만~14.4만대로 가정하면 전국의 화목사용량은 약 160~461천ton/년으로 추정된다.

2.3 배출계수 실험법

화목난로에서 배출되는 오염물질을 측정하기 위해 U.S.A particle test method (TTN EMC Method 5G-PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel) (U.S. EPA, 2007)를 적용하였다. 이 방법은 미국에서 화목난로를 판매하기 이전에 실시하는 인증 실험방법으로 EPA 품질인증 실험실에서 대기오염 배출량 산출에 적용하고 있다. 이에 대한 실험 장치 구조는 그림 1과 같고 이를 참조하여 제작한 장치는 그림 2와 같다.

시료를 채취하기 위해서는 Method 5G 방법으로 실시하였으며, 이에 따른 착화과정이나 연료에 대한 조건은 Method 28(U.S. EPA, 2006)에 따라 실시하였다. Method 5G는 주거용 화목난방 기구로부터의 오염물질 배출농도를 측정하기 위한 방법으로 그림 1과 같은 실험장치를 통해 측정하며, 희석터널 내부의 통풍조절장치(damper)를 사용하여 일정 유량을 유지하여야 한다. 화목난로의 배출가스를 희석터널 내부

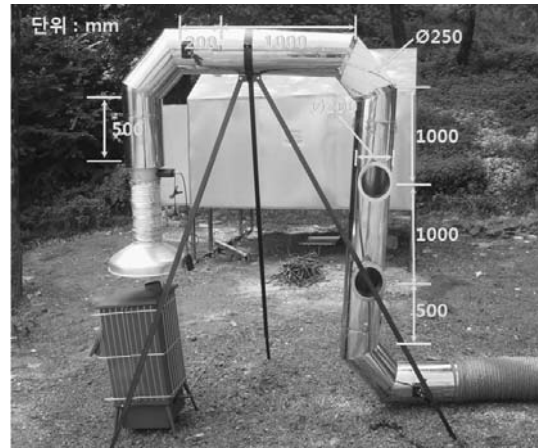


Fig. 2. The dilution tunnel and chamber for this study.

로 통과시키기 위해 희석터널 후드를 화목난로 배출구 위의 정중앙에 위치시킨 후 송풍기를 가동하고, 측정공에서 희석터널내 유속을 측정하여 설정된 송풍기 흡인유량과의 차이를 확인하여야 한다. 점화 후에는 화목난로 배출가스 전체가 희석터널 후드로만 포집되어야 하며, 그렇지 않다면 배출가스가 벗어나지 않도록 화목난로 배출구와 희석터널 후드 사이의 거리를 조절하여야 한다. 또한 희석터널 이음부의 결합을 확실히 하여 배출가스가 새어나오지 않도록 해야 한다. 본 실험에서는 통풍조절장치의 설치와 일정 유량을 흡인할 수 있는 송풍기를 장착하여 희석터널 내 유량이 일정하게 유지되도록 하고, 배출가스가 희석터널 후드로 모두 포집되도록 화목난로 배출구에 연통을 추가 설치하여 희석터널 후드와 연통사이의 거리를 10cm 이하로 설치하였다. 또한 두 개의 측정공을 이용하여 오염물질의 농도와 희석터널 내 유속, 온도를 측정하고 이를 보정하여 오염물질별 배출량을 산출하였다. 미세먼지 시료의 채취는 측정공을 통해 희석터널 내부의 유속과 동일하게 Stack Sampler의 채취 유속을 설정하여 농도분석의 오차를 최소화 하였다.

Method 28은 실험에 사용되는 연료의 발화과정이나 최초 연료 부하 밀도, 연료의 수분 함량 측정법 등 연료 연소과정의 전반적인 내용이 담겨있다. 시료를 채취하기 위해서 열린 상자 형태의 장치를 설치하고, Method 5G에서의 실험장치열과 동일하게 설치하였다(그림 2). 그림 3과 그림 4는 Chamber 내부와



Fig. 3. The inside of chamber.



Fig. 5. Fuel(Wood) for this experiment.



Fig. 4. The outside of chamber.



Length × Width × Height
(42 cm × 42 cm × 84 cm)

Fig. 6. Wood stove for this experiment.

외부에 설치되어있는 실험장치열에 대한 현장 모습이다.

본 실험에 사용된 나무는 일반적으로 국내에서 화목 공급업체를 통하여 가장 많이 판매되는 참나무 장작(그림 5)을 시판되는 형태로 구입하였으며, 장작 하나의 무게는 약 0.5~2.5 kg 정도였다. 또한 연료

(장작)의 수분 함량을 측정하기 위해 건조를 실시하였는데 본 연구에 사용된 장작 내 수분함량은 평균 약 16.3%로 분석되었다.

최초 시험 연료 부하 밀도는 습윤상태에서 화목난로의 내부용적에 따라 결정해야 하며, Method 28에서는 초기 연료 부하 밀도를 $112 \pm 11.2 \text{ kg/m}^3$ 으로 제

Table 2. Burn rate categories of EPA Method 5G (Average kg/hr).

Category 1	Category 2	Category 3	Category 4
< 0.8	0.8 ~ 1.25	1.25 ~ 1.9	> 1.9

안하고 있다. 본 연구에 사용된 화목난로는 국내에서 가장 많이 판매되는 38평형 (125.6m²형)으로 그림 6과 같고, 내부 용적이 0.148m³이므로 초기 연료 부하 밀도는 16.6±11.2kg으로 산출된다. Method 28에 따라 초기 연료(약 15kg) 투입 후 착화를 시키고, 이를 안정화 시킨 후 Method 5G에서 제안하고 있는 카테고리별 연료투입량에 따라 연료를 투입하고 오염물질의 농도를 측정하였다. 실험에 적용된 카테고리별 연료투입량은 표 2와 같다.

시료를 채취하고 농도를 분석하기 위해 사용된 장비는 그림 7, 그림 8과 같이 연소가스 분석기(KANE MAY, KM-9106)와 굴뚝먼지 채취장치(ASTEK Stack Sampler)를 사용하였다.

3. 실험 결과

3.1 대기오염 배출계수의 산정 결과

3.1.1 오염물질별 배출 농도 측정

배출계수를 산출하기 위하여 오염물질별 배출농도를 실측하여 분석하였다. 오염물질별 측정농도와 배가스 평균온도, 화목난로 가동시간, 그리고 연료투입량을 나타내면 표 3과 같다. 유량은 화목난로의 연소가스가 충분히 덕트로 모두 뿔러 나갈 수 있도록 하고, 측정공에서 유속측정의 불확실성을 줄이기 위하여 덕트 끝에 장착한 송풍기의 흡인유량(950m³/hr)을 일정하게 적용하였다.

시료 채취는 총 43회 실시하였으며 측정회차별 오염물질별 농도는 실험시간과 연료 투입량에 따라 다소 큰 차이를 보였다. CO의 경우 49.9~1828.2ppm의 다소 큰 농도 차이로 나타났고, NO_x의 경우 0.7~9.2ppm의 농도 범위를, SO₂는 0~77.41ppm의 농도 범위로 분석되었다.

미세먼지의 경우 시료채취를 위해 여과지를 105°C에서 24시간 건조를 시키고 방랭시킨 후 사용하였다. 시료는 1시간당 연소시키는 연료의 양에서 배출되는



Fig. 7. Flue gas analyzer (KANE-May).

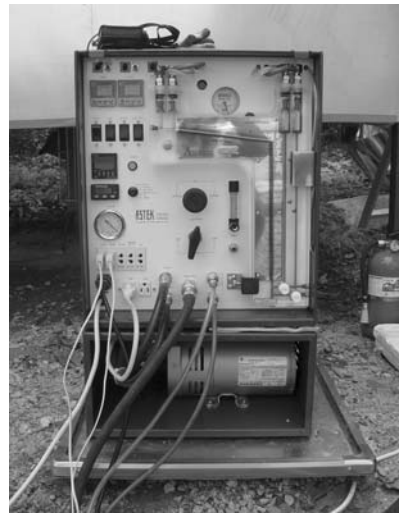


Fig. 8. Stack Sampler (ASTEK).

미세먼지를 포집하기 위해 기본적으로 1시간 동안 채취를 하였다. 여지의 전/후 무게 차이와 굴뚝먼지 채취장치(ASTEK Sampling System)의 흡인유량으로 실험회차별 미세먼지의 농도를 분석하였다.

미세먼지 시료 채취는 측정 기준시간(1시간)을 만족시키는 시료 21개에 대하여 분석하였고, 분석된 미세먼지의 농도는 그림 9와 같이 12.2~141.7mg/m³

Table 3. Concentration result of this study.

Test number	Test run time (hr)	Fuel consumption (kg)	Average temp. (°C)	Average concentration		
				CO (ppm)	NO _x (ppm)	SO ₂ (ppm)
1	0.5	2.0	127.7	1,614.2	7.8	45.1
2	1.5	10.5	116.6	817.1	6.8	33.5
3	0.5	2.8	105.4	641.2	8.5	20.8
4	0.5	2.6	95.4	416.8	6.3	14.0
5	0.5	2.2	91.9	315.4	3.4	2.9
6	0.5	2.5	70.0	476.2	5.6	14.8
7	0.5	2.4	113.7	605.1	7.0	22.5
8	0.5	2.0	82.8	118.5	3.5	1.4
9	0.5	2.7	56.3	49.9	2.4	0.0
10	0.9	8.5	122.4	706.8	4.8	32.2
11	0.4	3.0	138.0	1,606.9	5.2	77.4
12	0.5	3.0	121.2	1,137.1	5.2	53.6
13	0.5	3.0	104.8	177.7	2.3	10.3
14	0.5	5.0	128.1	124.2	1.6	9.0
15	0.5	4.0	130.3	138.7	1.0	7.6
16	0.5	4.0	137.1	131.1	0.9	6.9
17	0.5	4.0	105.0	177.9	1.1	7.9
18	0.5	4.0	102.8	203.9	0.8	7.3
19	1.0	8.5	85.1	327.8	2.0	14.8
20	0.4	4.0	128.7	1,085.2	2.8	41.8
21	0.6	4.0	113.1	882.3	3.4	31.4
22	0.5	4.0	112.3	1,655.6	5.8	68.4
23	0.5	4.0	120.2	1,440.6	9.2	61.3
24	0.5	4.0	116.5	729.2	4.8	28.2
25	0.5	4.0	120.3	501.9	3.1	20.7
26	0.5	4.0	121.1	254.3	2.1	10.5
27	0.5	4.0	119.2	723.1	2.7	24.4
28	1.0	5.0	94.5	450.9	6.8	23.3
29	1.0	8.5	111.3	376.4	1.9	12.4
30	0.5	4.0	127.9	1,179.6	4.1	41.1
31	0.5	4.0	131.5	1,828.2	4.7	67.8
32	0.5	4.0	129.6	1,543.1	4.5	60.5
33	0.5	4.0	125.9	1,263.0	3.2	51.1
34	0.5	4.0	129.8	630.8	2.3	23.9
35	0.2	4.0	130.0	653.3	1.2	23.9
36	0.5	4.0	120.0	907.9	1.3	35.1
37	0.5	4.0	117.4	741.9	0.7	26.8
38	0.5	4.0	121.4	467.0	0.8	14.5
39	0.5	3.9	113.8	942.9	3.4	39.3
40	0.5	4.0	113.4	379.9	3.6	19.2
41	0.5	4.0	109.7	198.3	3.1	10.5
42	0.5	4.1	115.7	191.9	2.8	10.7
43	0.5	3.9	135.7	186.5	2.1	9.2
Average			114.3	674.4	3.6	26.5
Standard deviation (σ)			± 17.5	± 497.8	± 2.2	± 20.0

으로 평균 농도는 약 45.7 mg/m³으로 분석되었다. 시료에 따라 큰 농도 차이를 보이는 것은 실제 화목난로를 사용할 때와 유사하게 다양한 조건들을 반영하

기 위하여 화목의 전체 양은 실험 조건을 충족시키도록 하였으나 화목크기는 조금씩 달리하여 다양하게 연소시켰기 때문으로 생각된다.

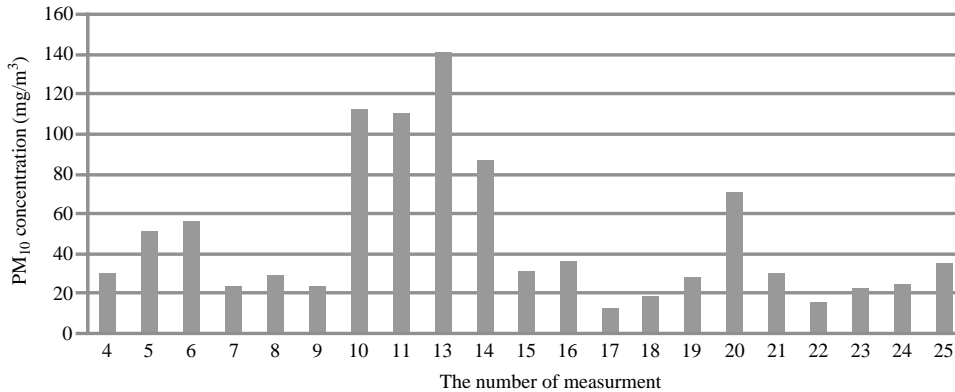


Fig. 9. PM₁₀ concentration from wood stove.

3.1.2 오염물질별 배출계수 산출

농도 분석 결과와 평균 유량 그리고 배가스 평균온도를 이용하여 시간당 오염물질별 배출량을 산출하였다. 가스상 배출량을 산출하기 위한 식은 다음과 같다.

$$\text{오염물질별배출량 (g/hr)} = \text{평균유량} \times \text{오염물질별농도} \times \frac{\text{오염물질분자량}}{22.4} \times \frac{273}{(273 + \text{희석터널내평균온도})}$$

PM₁₀ 배출량 산출결과는 약 11.6~134.7 g/hr로 분석되었으며, 시료채취 시간이 1시간인 분석 자료를 기초로 분석하면 평균적으로 약 43.5 g/hr의 PM₁₀이 배출되었다.

위 분석 자료를 토대로 장작사용량과 가동(시료채취)시간을 이용하여 배출계수를 산출하였다. 오염물질별 배출계수 산출 식은 다음과 같으며, 본 연구를 통해 산출된 CO, NO_x, SO₂, PM₁₀의 평균 배출계수는 표 4와 같다.

$$\text{오염물질별배출계수} \left(\frac{\text{g-pollutants}}{\text{kg-wood}} \right) = \frac{\text{오염물질별배출량 (g/hr)} \times \text{측정시간 (hr)}}{\text{장작사용량 (kg)}}$$

3.1.3 배출계수의 비교/분석

본 연구를 통해 산출된 오염물질별 배출계수와 미국 EPA의 EIIP Volume III에 제안되어 있는 화목난로의 오염물질별 배출계수 중 비축매 화목난로에 대한 배출계수와 비교하면 표 5와 같다.

미국 EPA의 배출계수와 본 연구에 의한 배출계수

Table 4. Emission factors for wood stove.

(unit: g-pollutants/kg-wood)

Category	CO	NO _x	SO ₂	PM ₁₀
Number of samples		43		21
Emission factor (average)	78.8	0.5	6.9	7.7
Standard deviation (σ)	±63.1	±0.41	±5.3	±4.7

Table 5. Comparison of Emission Factor for wood stove.

Category	EPA		This study
	(lb/ton)	(g/kg)	(g/kg)
PM ₁₀	14.6	6.6	7.7
CO	140.8	63.9	78.8
NO _x	2.0	0.9	0.5
SO ₂	0.4	0.2	6.9

U.S. EPA, EIIP Volume III (2001).

를 비교/분석하면 PM₁₀, CO, NO_x의 배출계수는 유사한 수준을 보이고 있다. SO₂의 경우는 큰 차이를 보이고 있어서 국내 장작 내 황(S)함량을 검토하기 위하여 표 6과 같이 기존 조사자료(Ministry of Knowledge Economy, 2007)의 국내 수종별 원소함량 조사 결과를 검토하였다.

국내에서 장작으로 사용되는 수종별 내목(Inside)의 평균 황 함량은 약 0.25% (0.24~0.28%)이며, 화목난로에서 사용되는 장작 중량의 대부분은 내목이다. 사용되는 장작이 95% 연소되는 것으로 가정할 경우 물질수지법에 의한 국내 화목의 SO₂ 배출계수는 5.0g-SO₂/kg-wood으로 예상되어 미국의 배출계수(0.2g-

Table 6. Elementary characteristics of trees in Korea.

Tree species		Contents (%)			
		C	H	N	S
Oak trees	Inside	47.96	6.28	—	0.28
	Bark	46.95	5.36	0.46	0.09
Cherry trees	Inside	48.25	6.04	—	0.25
	Bark	50.34	6.22	0.46	0.13
Chestnut trees	Inside	49.40	5.88	—	0.24
	Bark	50.30	5.86	0.27	0.05
Ginkgo trees	Inside	49.15	6.15	—	0.23
	Bark	44.34	5.63	1.46	0.10
Acacia trees	Inside	49.66	6.81	—	0.26
	Bark	50.36	6.40	1.92	0.20

Ministry of Knowledge Economy (2007).

SO₂/kg-wood)보다 본 실험의 결과(6.9 g-SO₂/kg-wood)가 더 국내 특성을 반영하고 있는 것으로 판단된다.

4. 주거용 화목난로에 의한 대기오염 배출량 산출

주거용 화목난로에 의한 대기오염 배출량은 본 연구에서 조사된 오염물질별 배출계수와 활동도 추정치를 적용하여 산출하였다. 화목난로에 의한 오염물질별 배출량 산출결과 표 7과 같이 CO가 12,626~36,363 ton/yr, PM₁₀이 1,235~3,557 ton/yr으로 추정되었다.

월별 배출량을 추정하기 위해서는 배출량을 시간적으로 배분할 수 있는 인자가 필요하다. 본 연구에서는 화목난로에 의한 월별 배출량을 산출하기 위해 앞서 이용한 난방도일 자료를 적용하였다. 지역의 월별 난방도일은 3개 권역 중 대표 지역의 2007년 난방도일을 적용하였다. 수도권은 춘천 지역의 난방도일 자료를 사용하였고, 중부권은 대전광역시, 남부권은 부산광역시의 자료를 사용하였다. 권역별 대표 지역의 난방도일 비율을 평균화하고, 그 비율을 적용하여 지역별 월별 배출비율을 추정하였다. 그림 10은 평균화된 월별 배출비율을 나타낸 것이며, 난방 수요에 따라 1월, 2월, 11월, 12월에 오염물질 배출량이 높게 나타났다.

Table 7. Estimated emissions of pollutants from wood stove (2007).

Category	NO _x	CO	PM ₁₀	SO ₂
Min ¹⁾ (ton/yr)	82	12,626	1,235	1,105
Max ²⁾ (ton/yr)	235	36,363	3,557	3,183

¹⁾Min: minimum emission; In case of 50,000 wood stoves

²⁾Max: maximum emission; In case of 144,000 wood stoves

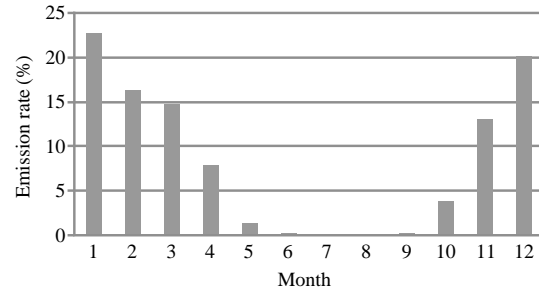


Fig. 10. Monthly variation of pollutant emission from wood stove.

5. 결 론

본 연구를 통해 생물성 연소의 상당 부분을 차지한 것으로 예상되는 주거용 화목난로 사용에 의한 오염물질 배출량을 산출하기 위하여 화목난로 사용대수를 추정하고 현장실험을 통하여 배출계수를 산출하고자 하였다. 이를 위해 미국 환경청에서 제안하고 있는 Method 5G의 기본적인 실험장치의 구성은 동일하게 적용하였으며, 연료에 대한 기본적인 조건은 Method 28에 따랐다. 조사 결과 다음과 같은 연구 결과를 얻을 수 있었다.

1) 국내 이용되고 있는 화목난로의 대수는 통계자료가 구축되어 있지 않아 화목난로 판매업체를 대상으로 설문조사를 실시하여 추정하였다. 설문내용을 분석한 결과 화목난로의 연간 판매대수는 평균 12,250대, 평균 예상수명은 약 7.9년으로 분석되었다. 이를 토대로 2007년을 기준으로 주거용 화목난로의 이용대수는 약 5.0만~14.4만대로 추정되었다.

2) 화목난로에 사용되는 장작소비량을 파악하기 위해 미국 환경청의 EIIP에서 제안한 방법론을 적용하여 추정하였다. 방법론의 주요인자인 난방도일은 국내 자료를 적용하였고, 이를 통해 산출된 장작소비량

은 화목난로당 약 3.2 ton/년, 전국 규모로는 약 160 ~ 461천ton/년으로 추정되었다.

3) 미국 AP-42의 화목난로 대기오염물질 배출계수와 본 실험을 통해 산출된 배출계수를 비교한 결과 NO_x와 PM₁₀, CO는 유사한 배출계수가 산정되었다. SO_x의 경우 국내 나무의 황(S)함량 원소 분석자료를 검토한 결과 미국의 배출계수보다 본 실험에서의 SO_x 배출계수가 더 국내 특성을 반영하는 것으로 판단되었다. 본 실험을 통해 분석된 오염물질별 배출계수는 NO_x가 0.5 g/kg, CO가 78.8 g/kg, PM₁₀이 7.7 g/kg 그리고 SO₂가 6.9 g/kg으로 산출되었다.

4) 본 연구를 통해 산정된 주거용 화목난로의 배출계수와 활동도 자료를 이용하여 오염물질별 연간 배출량을 추정하였다. 화목난로 이용대수 추정치 5만 ~ 14.4만대에 의한 전국 규모의 대기오염 배출량은 일산화탄소(CO)가 약 12,600 ~ 36,400 ton/yr, 황산화물(SO₂)이 1,100 ~ 3,200 ton/yr로 추정되었으며, 미세먼지(PM₁₀)는 약 1,200 ~ 3,600 ton/yr로 추정되었다.

5) 본 연구는 화목난로를 제작 판매하는 국내업체를 대상으로 전화 및 설문조사를 실시하여 화목난로 이용대수를 추정하였기 때문에 불확실성이 존재한다. 앞으로 정확한 화목난로의 판매자료나 이용대수에 대한 조사가 이루어진다면 더욱 신뢰도가 개선된 배출량을 산출할 수 있을 것이다. 특히 본 연구는 주거용 화목난로에 초점을 맞추었기 때문에 앞으로 농업용이나 산업용 화목난로에 대한 조사가 필요하다. 또한 본 연구에서는 대표적인 화목난로 한 종류만을 고려하였으나 화목난로 종류에 따른 차이를 고려하기 위해서는 앞으로 다양한 화목난로에 대한 실험이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원 “PM_{2.5} 배출특성 및 기여도 추정 연구”의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

국립환경과학원 (2009) 대기환경연보 2008.

산림청(2009) 임업통계연보, 산림청.
 에너지경제연구원 (2008) 에너지통계 보고서 Energy Info. Korea, 지식경제부.
 European Environment Agency (2008) Annual European Community LRTAP Convention emission inventory report 1990-2006.
 Hwang, I.J., Y.H. Cho, W.G. Choi, H.M. Lee, and T.O. Kim (2008) Quzntitative estimation of PM-10 source contribution in Gumi city by the positive matrix factorization model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 24(1), 100-107. (in Korean with English abstract)
 Lee, H.W., T.J. Lee, and D.S. Kim (2009) Identifying ambient PM_{2.5} sources and estimating their contributions by using PMF : Separation of gasoline and diesel automobile sources by analyzing ECs and OCs, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(1), 75-89. (in Korean with English abstract)
 Lee, T.J., J.B. Huh, S.M. Yi, S.D. Kim, and D.S. Kim (2009) Estimation of PM₁₀ source contributions on three cities in the metropolitan area by using PMF model, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(4), 275-288. (in Korean with English abstract)
 Ministry of Knowledge Economy (2007) A Study on the Energy Utilization of Ligneous Biomass-Focusing on Energy Production Facility Fueled by Wood-chips-, ministry of Knowledge Economy.
 Oh, M.S., T.J. Lee, and D.S. Kim (2009) Source identification of ambient size-by-size particulate using the positive matrix factorization model on the border of yongin and suwon, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 25(2), 108-122. (in Korean with English abstract)
 U.S. EPA (2001) Emission Inventory Improvement Program Volume 3: Chapter 2-Residential wood combustion, U.S. EPA.
 U.S. EPA (2006) Method 28-Certification and auditing of wood heaters, U.S. EPA.
 U.S. EPA (2007) TTN EMC Method 5G-PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel, U.S. EPA.