

화목 난로와 보일러 사용에 의한 대기오염물질과 블랙카본의 배출 특성

박성규* · 최상진* · 김대근** · 김동영*** · 장영기**** · 전의찬*****

(주)케이에프, ** 서울과학기술대학교 환경공학과, *** 경기개발연구원 환경연구실,
**** 수원대학교 환경에너지공학과, ***** 세종대학교 지구환경과학과

Emission Characteristics of Air Pollutants and Black Carbon from Wood Stove and Boiler

Park, Sung Kyu*, Choi, Sang Jin*, Kim, Dae keun**, Kim, Dong Young***,
Jang, Young Kee**** and Jeon, Eui Chan*****†

*KOFIRST R&D Center, KF Co. Ltd., 437-120, Korea

**Dept. of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Jinju, Korea

***Dept. of Environment, Gyeonggi Research Institute, Suwon, Korea

****Dept. of Environment Energy Engineering, The University of Suwon, Suwon, Korea

*****Dept. of Earth and Environment Sciences, The University of Sejong, Seoul, Korea

ABSTRACT

Manually fed firewood burning appliances, i.e., stove and boiler, were tested in order to determine emission factors (EFs) of macro-pollutants, i.e., carbon monoxide, nitrogen oxides, sulfur oxides, ammonia, particulate matters (total suspended particulate, PM₁₀, PM_{2.5}, black carbon) and trace pollutants (i.e., ten different volatile organic compounds). The composite pollutants EFs for the wood stove were: for TSP 15.45 g/kg, for PM₁₀ 6.53 g/kg, PM_{2.5} 4.16 g/kg, CO 175.49 g/kg, NO 1.58 g/kg, SO₂ 0.15 g/kg, TVOC 48.02 g/kg, NH₃ 0.02 g/kg and emissions were similar to the wood boiler appliance: for TSP 12.23 g/kg, for PM₁₀ 5.84 g/kg, PM_{2.5} 3.66 g/kg, CO 146.74 g/kg, NO 1.42 g/kg, SO₂ 0.15 g/kg, TVOC 47.78 g/kg, NH₃ 0.01 g/kg.

Key words : Wood Stove, Wood Boiler, Biomass Burning, Black Carbon, Emission Factor

1. 서 론

생물성 연소(biomass burning)는 인간의 활동 또는 자연 현상에 의하여 생체(biomass)가 연소하는 것을 의미하며, 농업 잔재물의 연소와 산불 등의 식생(vegetation)의 연소를 포함한다. 전 지구적으로 약 90%의 생물성 연소는 인간 활동에서 직접적 원인을 찾을 수 있다. 일상생활 주변에서 흔히 확인할 수 있는 생물성 연소로는 농업잔재물 또는 생활폐기물 등의 노천소각, 나무 등을 연료로 쓰는 아궁이 또는 화목 난로, 고기 직화구이, 숯 제조 등이 있다. 생물성 연소는 다양한 입자상, 가스상의 대기오염물질을 배출할 뿐만 아니라, 이산화탄소, 메탄, 아산화질소 등 온실가스도 대량으로 배출하여 지구온난화의 중요한 원인이

된다. 국내의 선행연구에서도 생물성 연소의 미세먼지 배출량의 심각성을 보고하고 있다. 일반적으로 생물성 연소는 적절한 관리가 이루어지지 않기 때문에 불완전 연소가 수반되면서 대기오염물질이 다량 배출되고, 다이옥신 등의 유해물질이 동시에 발생할 가능성이 높으며, 생활 주변에서 발생하는 경우가 많기 때문에 연소에 의해 발생된 대기오염물질은 인간에게 직접적으로 위해를 끼치게 된다.

화목 난로 및 보일러는 장작을 주 연료로 사용하고 있으며, 겨울철 난방을 목적으로 사용된다. 화목 난로, 화목 보일러는 일반적으로 가정에서 전기나 기름 연료 대신 장작을 이용하여 난방용으로 사용한다. 가정용 이외에 비닐하우스나 화훼농원, 카페 등 영업점에서도 난방을 목적으로 사용하기도 한다. 국내

† Corresponding author : mincheon@chol.com

Received December 30, 2014 / Revised February 17, 2015(1st), March 12, 2015(2nd) / Accepted March 24, 2015

화목 난로 및 보일러의 사용대수는 각각 126,830대, 45,447대로 나타났으며¹⁾, 설문 결과, 화목 난로의 1대당 연간 평균 연료 사용량은 2,144.2 kg/yr, 화목 보일러의 1대당 연간 평균연료사용량은 4,341.5 kg/yr로 조사되었다(Han *et al.*, 2014).

본 연구에서는 주로 동절기 실내 난방을 목적으로 사용하는 화목 난로 및 가정용 보일러에서 배출되는 대기오염물질의 배출특성을 파악하고자 하였으며, 이를 위하여 국내에서 가장 보편적으로 많이 활용하고 있는 화목 난로 및 보일러의 모형을 활용하였다.

2. 연구 방법

2.1 현황조사

화목 난로의 사용대수는 국립환경과학원(2009) 연구 결과와 업체 설문을 통하여 추정된 결과, 전국 화목 난로 사용대수는 100,600대로 나타났으며, 화목 보일러는 업체 설문조사 결과, 약 12,000대로 나타났다. 또한, 화목 난로 및 보일러 사용자를 대상으로 실시한 설문조사 결과, 화목 난로의 1일 평균 연료 사용량은 14.9 kg/day(95% 신뢰수준에 $\pm 1.5\%$ 오차범위)이며, 화목 보일러의 1일 평균 연료 사용량은 31.9 kg/day(95% 신뢰수준에 $\pm 2.2\%$ 오차범위)로 나타났다. 화목 난로 및 보일러의 1대당 연간 평균 연료 사용량은 월별로 사용비율이 다르기 때문에 화목 난로와 화목 보일러의 1일 평균 연료사용량을 1월 기준이라 가정하였고, 월별 사용비율과 일수를 적용하여 연간 연료량을 산출하였으며, 각각 2,144.2 kg/yr, 4,341.5 kg/yr로 나타났다.

2.2 측정항목 및 분석방법

화목 난로 및 보일러의 배출계수를 산정하기 위하여 시중에 유통되고 있는 연료를 사용하였으며, 시장조사를 통하여 가장 보편적인 제품을 선택하여 실시하였다.

화목 난로 및 보일러 사용 시 발생하는 배출가스의 입자상 및 가스상 오염물질을 측정하기 위하여 각각의 측정장비를 사용하였으며, 재현성 확보를 위하여 “수집 → 계근 → 연소 → 측정 및 분석 → 항량 및 칭량 → 배출가스 분석”의 순으로 동일하게 수행하였다.

입자상 오염물질은 총 3개의 등속흡인 시료채취 장치(stack sampler)를 이용하여 연소가스 중에서 총 먼지(Total Suspended Particle; TSP), PM₁₀, PM_{2.5}를 각각 채취하였다. 시료채취 장치에는 TSP 홀더, PM₁₀ Cyclone Kit, PM_{2.5} Cyclone Kit를 각각 장

Table 1. Firewood consumption by stove and boiler appliances

Month	Wood-stove			Wood-boiler		
	(kg/day)	(kg/yr)	(%)	(kg/day)	(kg/yr)	(%)
Jan.	14.9	462.8	21.0	31.3	970.8	21.8
Feb.	13.8	386.7	19.5	27.5	769.2	19.1
Mar.	9.6	298.6	13.6	18.8	582.1	13.1
Apr.	1.9	56.4	2.6	8.8	263.7	6.1
May.	0.8	25.6	1.2	1.0	31.7	0.7
Jun.	0.2	7.2	0.3	0.0	0.3	0.0
Jul.	0.1	2.5	0.1	0.0	0.3	0.0
Aug.	0.3	10.1	0.5	0.0	0.3	0.0
Sep.	1.1	32.9	1.5	0.1	3.1	0.1
Oct.	4.8	147.9	6.7	9.7	300.2	6.7
Nov.	9.7	290.3	13.6	16.4	492.9	11.4
Dec.	13.7	423.4	19.3	29.9	926.9	20.8
Total	70.9	2,144.2	100.0	143.5	4,341.5	100.0

Table 2. Description of the tested appliances

Item	Burning duration	Number of experimental runs	Fuel input
Wood stove	70 min	6	10 kg/run
Wood boiler	70 min	6	10 kg/run



Fig. 1. The tested commercial scale stove and boiler.

1) 국가통계지표인 농업총조사 보고서의 “지역별 읍면동 단위 농업가구 현황”을 활용하였으며, 설문을 통해 조사한 마을 단위 화목 난로와 화목 보일러 사용비율 결과를 농업가구 현황에 적용하여 보유현황 추정

착하였다. 시료채취용 여지는 원통형 여지(ADVANTEC 88R)와 원형 여지(Whatman QMA 47 mm)가 사용되었으며, 중량농도를 분석하기 위해 마이크로 천칭(0.1×10^{-4} mg 단위)를 사용하였다. 먼지의 입경분포는 입도분석기(Grimm aerosol technik, German)를 사용하여 측정하였다.

가스상 오염물질 중 CO, NO, NO₂, SO₂는 실시간 가스분석기(ENERAC 500, USA)을 사용하여 연소가스에서 직접 측정하였다. 그리고 TVOC 및 VOCs는 진공가스포집기를 사용하여 시료채취 주머니(Tedlar bag)에 포집하여 실험실 이동 후 분석하였으며, TVOC는 FID-200을 이용하여 분석하였다. VOCs는 포집가스 중 3L를 분취하여 고체흡착관(Tenax-TA, Supelco, USA)를 이용하여 전량 흡착시킨 후 열탈착장치(Thermal desorber)가 장착된 가스크로마토그래피(Gas Chromatograph; GC) 및 질량분석기(Mass Spectrometer; MS)를 사용하여 VOCs의 성분을 분석하였다. 암모니아 분석은 연소가스를 봉산(0.5 w%) 흡수액에 흡수하여 인도페놀법으로 분석하였다.

발열량은 자동열량계(C2000 basic version, IKA, German)를 사용하여 분석되었으며, 원소 조성은 자동원소 분석기(EA1112, Thermo Fisher Scientific, USA)를 사용하여 분석하였다.

오염물질 별 배출계수는 식 (1)의 방법으로 산정하였다. 오염물질 농도(mg/m³)는 실측에 의한 값이며, 총 유량(m³)은 배출구 직경(m²), 유속(m/s), 측정시간(min)을 이용하여 계산하였고, 연료투입량은 실험 당시 나무 사용량이다.

배출계수(g/kg) =

$$\frac{\text{오염물질 농도(mg/m}^3\text{)} \times \text{총 유량(m}^3\text{)}}{\text{연료투입량(kg)}} \times 10^{-3} \quad (1)$$

3. 연구 결과

3.1 연료의 발열량 및 원소조성

화목 난로 및 보일러에 사용된 연료는 2종류의 장작으로 각각 3회씩 측정하였다. 화목 난로의 연소실 평균 출구 온도는 341.6°C, 화목 보일러의 연소실 평균 출구 온도는 118.8°C로 나타났다. 화목 난로 및 보일러의 연료 수분 함유량은 61.1%로 나타났다. 총발열량은 4,341.0 kcal/kg으로 나타났다. 또한, 화목 난로 및 보일러에 사용한 참나무 장작의 원소 조성은 탄소가 47.80%, 수소 5.70%, 질소 0.06%, 황 0.00%, 산소 및 기타 46.46%로 나타났다.

3.2 입자상 대기오염물질

화목 난로 및 보일러의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도 및 배출계수 결과는 Table 5와 같다. 화목 난로의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도는 각각 413 mg/m³, 175 mg/m³, 111 mg/m³로 나타났으며, 화목 보일러의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도는 각각 424 mg/m³, 202 mg/m³, 127 mg/m³로 나타났다.

Table 3. Analytical methods of stove and boiler appliances

	Emission pollutant	Analytical method
Particulate matters	TSP	Stack sampler
	PM ₁₀ , PM _{2.5}	Stack sampler with PM ₁₀ & PM _{2.5} cyclone kit
	Particle size distribution	Number concentration
Gaseous air pollutants	SO _x , NO _x , CO, CO ₂ , O ₂	Gas analyzer
Hazardous air pollutants	TVOC	FID
	VOCs	GC-MS
Others	Caloric value, moisture, elementary composition	

Table 4. Characteristics of the tested firewood

Sample	Moisture content (w/w%)	Caloric value (kcal/kg)	Elementary composition(%)				
			C	H	N	S	Others
Wood	61.1	4,341.0	47.80	5.70	0.06	0.00	46.46

Table 5. Particulate emissions from stove and boiler appliances

Sample	Concentration (mg/m ³)			Emission factor (g/kg)		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
Wood stove	413	175	111	15.45	6.53	4.16
Wood boiler	424	202	127	12.23	5.84	3.66

화목 난로의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출계수는 각각 15.45 g/kg, 6.53 g/kg, 4.16 g/kg으로 나타났으며, 화목 보일러의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출계수는 각각 12.23 g/kg, 5.84 g/kg, 3.66 g/kg으로 나타났다.

Fig. 2는 연소가스 내 입자상 물질의 입경분포 특성을 보여 준다. 입자상 물질의 입자 개수 분포는 1 μm 이하의 입자에 의해 좌우되는 것을 확인할 수 있다. 또한, Table 6에 제시된 중량 농도의 측정값을 토대로 산정된 입경분율을 살펴보면, 화목 난로의 경우 총 먼지 중 PM₁₀이 차지하는 비율은 42.3%로 나타났으며, PM_{2.5}의 경우 26.9%로 나타났다. 화목 보일러의 경우, 총 먼지 중 PM₁₀이 차지하는 비율은 47.7%로 나타났으며, PM_{2.5}의 경우 29.9%로 나타났다.

3.3 가스상 대기오염물질

화목 난로 및 보일러 사용에서 배출되는 가스상 대기오염물질에서는 CO, NO, SO₂, VOCs, NH₃ 등이 검출되었다. 화목 난로의 CO, NO, SO₂, TVOC, NH₃의 배출계수는 각각 175.49 g/kg, 1.58 g/kg, 0.15 g/kg, 48.02 g/kg, 0.02 g/kg으로 산출되었으며, 화목 보일러는 각각 146.74 g/kg, 1.42 g/kg, 0.15 g/kg, 47.78 g/kg, 0.01 g/kg으로 산출되었다. 연소는 착화(ignition), 불꽃연소(flaming), 훈소(smoldering) 과정으로 구분된다. 훈소는 연소조건이 취약한 마지막 연소단계로서 연소온도가 낮고, 연소공기와 바

Table 6. Ratio of PM₁₀ and PM_{2.5} to TSP from stove and boiler appliances

Sample	Particle size distribution (PM/TSP) ¹⁾		
	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
Wood stove	1.000	0.423	0.269
Wood boiler	1.000	0.477	0.299

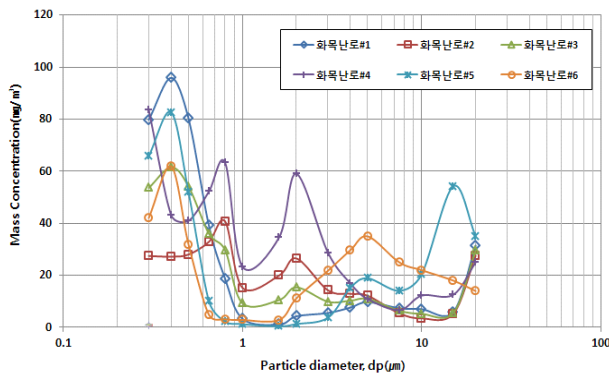
¹⁾ Calculated based on the measurement of mass concentration.

Table 7. Emission factors of gaseous pollutants from wood stove and boiler appliances

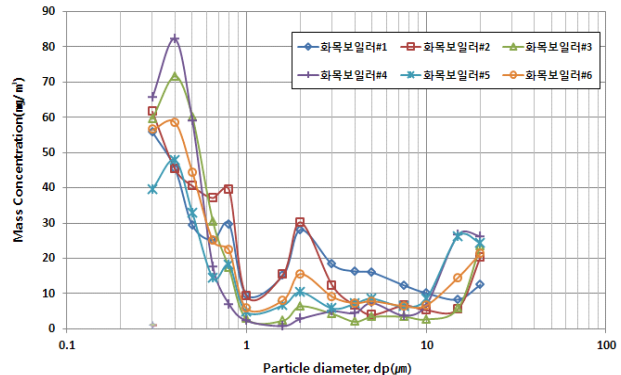
Sample	Emission factor (g/kg)				
	CO	NO	SO _x	TVOC	NH ₃
Wood stove	175.49	1.58	0.15	48.02	0.02
Wood boiler	146.74	1.42	0.15	47.78	0.01

이오매스와의 혼합이 불충분하고, 연소가스의 체류시간이 짧은 특징이 있다. 따라서 혼소과정에서 불완전 연소물인 CO, 암모니아, 비메탄계 탄화수소 등이 발생할 가능성이 매우 높다(Khan 2009).

화목 난로 및 보일러(장작)의 배출가스 중 VOCs 배출계수는



(a) Wood stove



(b) Wood boiler

Fig. 2. Particle size distribution of emission.

Table 8. Emission factors of volatile organic compounds from wood stove and boiler appliances

Item	Emission factor (g/kg)									
	Benzene	Toluene	Chloro-benzene	Ethyl-benzene	<i>p</i> -Xylene	<i>m,o</i> -Xylene	Styrene	1,3-Dichloro-benzene	1,4-Dichloro-benzene	1,2-Dichloro-benzene
Wood stove	4.10	2.97	0.30	0.31	0.24	1.36	0.96	1.13	1.37	1.19
Wood boiler	3.56	2.12	0.49	0.49	0.34	1.06	1.08	1.30	1.11	1.12

Table 8과 같다.

3.4 블랙카본

블랙카본은 연료의 불완전 연소에 의하여 배출되며, 기후변화를 유발하는 원인물질이다. 화목 난로 및 보일러(장작) 배출 가스 중 블랙카본의 배출계수는 Table 9와 같다. PM₁₀을 기준으로 블랙카본의 배출계수는 화목 난로, 화목 보일러에서 각각 1.68 g/kg, 2.80 g/kg으로 나타났다. 이는 PM₁₀ 중 블랙카본의 비중이 화목 난로의 경우 25.0%로 나타났으며, 화목 보일러의 경우 38.6%를 차지하는 것으로 나타났다.

3.5 배출계수 비교

화목 난로와 화목 보일러 부문의 오염물질별 배출계수는 본 연구결과와 U.S. EPA(2001), EIIP(Emission Inventory Improvement Program)의 Residential Wood Combustion 배출계수를 비

Table 9. Emission of black carbon from wood stove and boiler appliances

Item	OC	EC	TC	PM ₁₀	TC/PM
	g/kg				%
Wood stove	1.01	0.67	1.68	6.71	25.0
Wood boiler	1.85	0.95	2.80	7.26	38.6

교하였다. 비교 분석 결과, 입자상 오염물질의 경우, PM₁₀은 본 연구결과와 EIIP의 배출계수가 비슷한 수치를 보였다. 가스상 오염물질의 경우, NOx, CO, VOC는 EIIP의 배출계수보다 본 연구결과 값이 화목 난로(1.5~9배), 화목 보일러(1.5~7.4배) 정도 높은 수치로 나타났다. 이는 화목 난로의 구조 및 형태, 연료 특성, 연소 환경, 연소효율 등의 차이에 의한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 주로 동절기 실내 난방을 목적으로 사용하는 화목 난로 및 보일러(보일러)에서 배출되는 대기오염물질의 배출특성을 파악하고자 하였으며, 이를 위하여 국내에서 가장 보편적으로 많이 활용하고 있는 화목 난로 및 보일러의 모형을 활용하였다. 화목 난로 및 보일러 사용 시 발생하는 배출가스의 입자상 및 가스상 오염물질을 측정하기 위하여 각각의 측정장

Table 10. Summary of emission factors of macropollutants (unit : g/kg)

Item	PM ₁₀	NOx	SOx	CO	VOC	NH ₃
EIIP (wood stove)	6.6	0.9	0.2	63.9	5.4	-
Wood stove	6.5	1.6	0.2	175.5	48.0	0.02
Wood boiler	5.8	1.4	0.2	146.7	40.0	0.01

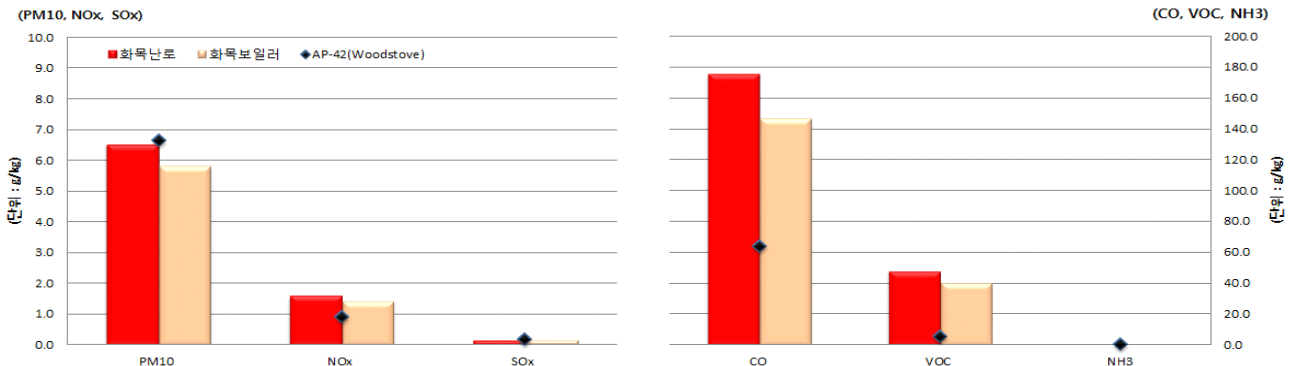


Fig. 3. Summary of emission factors of macropollutants.

비를 사용하였으며, 재현성 확보를 위하여 “수집 → 계근 → 연소 → 측정 및 분석 → 항량 및 칭량 → 배출가스 분석”의 순으로 동일하게 수행하였다.

- 1) 화목 난로의 연소실 평균 출구 온도는 341.6℃, 화목 보일러의 연소실 평균 출구 온도는 118.8℃로 나타났다. 화목 난로 및 보일러의 연료 수분 함유량은 각각 61.1%로 나타났으며, 총 발열량은 4,341.0 kcal/kg으로 나타났다. 또한, 화목 난로 및 보일러에 사용한 참나무 장작의 원소 조성은 탄소가 47.80%, 수소 5.70%, 질소 0.06%, 황 0.00%, 산소 및 기타 46.46%로 나타났다.
- 2) 화목 난로의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도는 각각 413 mg/m³, 175 mg/m³, 111 mg/m³로 나타났으며, 화목 보일러의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 농도는 각각 424 mg/m³, 202 mg/m³, 127 mg/m³로 나타났다. 또한, 화목 난로의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출계수는 각각 15.45 g/kg, 6.53 g/kg, 4.16 g/kg으로 나타났으며, 화목 보일러의 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}의 배출계수는 각각 12.23 g/kg, 5.84 g/kg, 3.66 g/kg으로 나타났다.
- 3) 화목 난로의 CO, NO, SO₂, TVOC, NH₃의 배출계수는 각각 175.49 g/kg, 1.58 g/kg, 0.15 g/kg, 48.02 g/kg, 0.02 g/kg으로 산출되었으며, 화목 보일러는 각각 146.74 g/kg, 1.42 g/kg, 0.15 g/kg, 47.78 g/kg, 0.01 g/kg으로 산출되었다.
- 4) 화목 난로 및 보일러(장작) 배출가스 중 블랙카본의 배출계수는 PM₁₀을 기준으로 화목 난로, 화목 보일러에서 각각 1.68 g/kg, 2.80 g/kg으로 나타났다. 이는 PM₁₀ 중 블랙카본의 비중이 화목 난로의 경우 25.0%로 나타났으며, 화목 보일러의 경우 38.6%를 차지하는 것으로 나타났다.
- 5) 화목 난로와 화목 보일러 부문의 오염물질별 배출계수는 본 연구결과와 U.S. EPA(2001), EIIP의 Residential Wood Combustion 배출계수를 비교하였다. 비교 분석 결과, 입자상 오염물질의 경우 PM10은 본 연구결과와 EIIP의 배출계수가 비슷한 수치를 보였다. 가스상 오염물질의 경우, NO_x, CO, VOC는 EIIP의 배출계수보다 본 연구결과 값이 화목 난로(1.5~9배), 화목 보일러(1.5~7.4배)정도 높은 수치로 나타났다.

사 사

본 연구는 환경부의 2012년 차세대 에코노베이션기술개발사업(411-113-011)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

CARB. 2005. Emission Inventory Methodology-San Joaquin

Valley Unified Air Pollution Control District : Agricultural Burning.

Khan AA, Jong W, Jansens PJ, Spliethoff H. 2009. Biomass combustion in fluidized bed boilers : Potential problems and remedies. *Fuel Processing Technology* 90(1):21-50.

Kim DY. 2011. Analysis of air pollutants emissions from biomass burning in Seoul metropolitan area. Gyeonggi Research Institute.

Kim PS, Jang YK, Kim J, Shin YI, Kim Js, An JY. 2010. A study on estimation of air pollutants estimation from residential wood stove. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 26(3):276-285.

NASA Langley Research Center. 2001. Biomass burning: A hot issue in global change, FS-2001-02-56-LaRC.

National Institute of Environment Research(NIER). 2009. CAPSS(Clean Air Policy Support System).

National Institute of Environment Research(NIER). 2009. A study on the estimation and contribution rate for PM_{2.5}.

Park SK, Choi SJ, Ryu GJ, Hong YS, Kim DY, Jang YK. 2013a. Development of emission factors on black carbon from wood-stove and boiler. *Proceeding of the 2nd meeting of The Korean Society of Climate Change Research*. p 308.

Park SK, Choi SJ, Ryu GJ, Hong YS, Kim DY, Jang YK. 2013b. Development of emission factors on black carbon from wood-pellet stove and boiler. *Proceeding of the 2nd meeting of The Korean Society of Climate Change Research*. p 309.

Park SK, Choi SJ, Park GJ, Kim JY, Bong CG, Park SJ, Kim JH, Hwang UH. 2011. Collection characteristics of particulate matters from biomass burning by control devices : Mainly commercial meat cooking. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 27(6):641-649.

Statistics Korea. 2013. Agricultural Census Report.

Statistics Korea. 2013. Statistic of wood-pellet.

U.S. EPA. 2007. TTN EMC Method 5G-PM Wood Heaters from a Dilution Tunnel.

U.S. EPA. 2007. Emission Inventory Improvement Program Volume III : Chapter 2-Residential wood combustion.

Han YH, Kim DY, Choi MA, Park SK, Jang YK. 2014. A study on estimation of air pollutants estimation from wood stove and boiler, wood-pellet stove and boiler. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* 30(3):251-260.