

노천소각에서 배출되는 불완전연소생성물 특성 연구 The Characterization of Incomplete Combustion Products in Open Burning

정노을 · 허선화 · 조명란 · 김형천 · 장세경
홍지형 · 동종인¹⁾ · 이상보*

국립환경과학원 대기공학연구과, ¹⁾서울시립대학교 환경공학부
(2013년 7월 29일 접수, 2013년 10월 21일 수정, 2013년 11월 5일 채택)

No-El Jung, Sun-Hwa Heo, Myeong-Ran Jo, Hyung-Chun Kim,
Se-Kyung Jang, Ji-Hyung Hong, Jong-In Dong¹⁾ and Sang-Bo Lee*
Air Pollution Engineering Division, National Institute of Environmental Research
¹⁾*Department of Environmental Engineering, University of Seoul*

(Received 29 July 2013, revised 21 October 2013, accepted 5 November 2013)

Abstract

It is very important to investigate air pollutants emissions emitted from open burning in order to control non-point sources effectively. In this study, we utilized incineration simulator proposed by U.S EPA and investigated emissions of CO, OC/EC, from household waste and biomass burning to estimate pollutant emissions by illegal incineration of biomass wastes.

Emission factor of OC was estimated as 17.1 g/kg for rice strew, 23.5 g/kg for barley, 10.3 g/kg for corn stover, 4.3 g/kg for unseasoned wood, respectively. In case of EC, it was calculated as 1.6 g/kg for rice strew, 4.3 g/kg for barley, 1.4 g/kg for corn stover, 0.6 g/kg for unseasoned wood, respectively.

Most of the pollutants emissions were emitted at the stage 1 and 2. In the stage 3, the pollutants concentration decreased gradually.

To estimate emissions and build inventory for biomass burning, we need to know accurate activity data. We, therefore, used activity data of both survey results of previous study and statistical data of National Statistical Office. However, we need to perform additional experiments in the future to obtain more accurate activity data for various cases.

Key words : Biomass burning, Open burning, PM_{2.5}, OC/EC, CO, Incomplete Combustion Products

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7347, Email : lhi1113@korea.kr

1. 서 론

비관리형 연소 배출원은 산불이나 화재, 생활폐기물이나 농어촌 쓰레기, 농업잔재물, 건설 폐기물, 레저 및 야영장 등에서의 소각, 어촌에서 어업용 도구나 폐그물 소각, 화목난로, 고기구이와 같은 생물성 연소 등이 있으며, 이들 배출원에서 오염 물질은 불완전 연소의 가능성이 많고, 먼지, 중금속 등 인체에 유해한 물질이 방지시설을 거치지 않고 대기 중으로 배출된다(Park *et al.*, 2011). 또한 비관리형 연소 배출원은 단시간 내에 비정기적으로 이루어지기 때문에 통상적인 관리나 조사가 체계적으로 이루어지지 않고 있다. 특히 농촌지역의 경우 폐기물 수거를 위한 예산이 부족하고 읍·면 소재지 이외에 자연부락 지역은 가옥이 산발적으로 분포되어 있어 생활폐기물의 수거가 원활하지 않아 대부분 노천소각을 통해 처리하기 때문에 오염물질이 대기 중으로 직접 배출되고 있다(Kim, 2008). 이러한 폐기물 소각 등 비관리형 연소는 '06~'12년까지 산불 발생원인의 16~38%를 차지할 만큼 빈번하게 발생하였다(Statistics Korea, 2013).

비관리형 연소 배출원에서 발생하는 유해대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs) 배출 특성을 규명하기 위한 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되어 왔다. 국내의 경우 '11년 국립환경과학원에서 폐목재 및 생활쓰레기 노천 소각 시 미세먼지(PM₁₀ 및 PM_{2.5}), 다환방향족탄화수소류(Polycyclic Aromatic Hydrocar-

bons, PAHs), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 등 HAPs 배출 특성에 대한 연구를 수행하였다. 또한, Kim and Choi (2011)은 생물성 연소에 의한 수도권 대기오염물질 중 생활폐기물 및 농업잔재물의 노천소각과 아궁이 및 화목난로 등 면오염원을 대상으로 생물성 연소에 대한 대기오염물질 배출량을 분석하여 기여도를 평가하고, 각 배출원에 대한 관리방안을 검토 제시하였다. 그러나 소각물질 혼합비율 및 소각량, 함수율, 연소 환경 등 다양한 변수가 작용하는 노천소각의 특성상 아직까지 대표적인 배출계수와 활동량을 제시하지 못해 배출량 산정이 어려운 실정이다.

따라서 본 연구에서는 노천소각을 재현할 수 있는 모의 소각 장치에서 농업잔재물 및 생목을 대상으로 연소시켜 배출되는 오염물질의 배출 특성 파악, 배출계수 산정 등의 연구 결과를 토대로 국내 활동도를 가정하여 배출량을 산정하였다. 특히, 노천소각 시 불완전연소에 의해 생성되는 CO, PM_{2.5} 및 PM_{2.5}의 탄소성입자(Organic Carbon (OC), Elemental Carbon (EC)) 함량을 중점적으로 분석하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 모의 소각장치 및 시료 선정

노천소각과 같은 비관리형 연소에서 배출되는 대

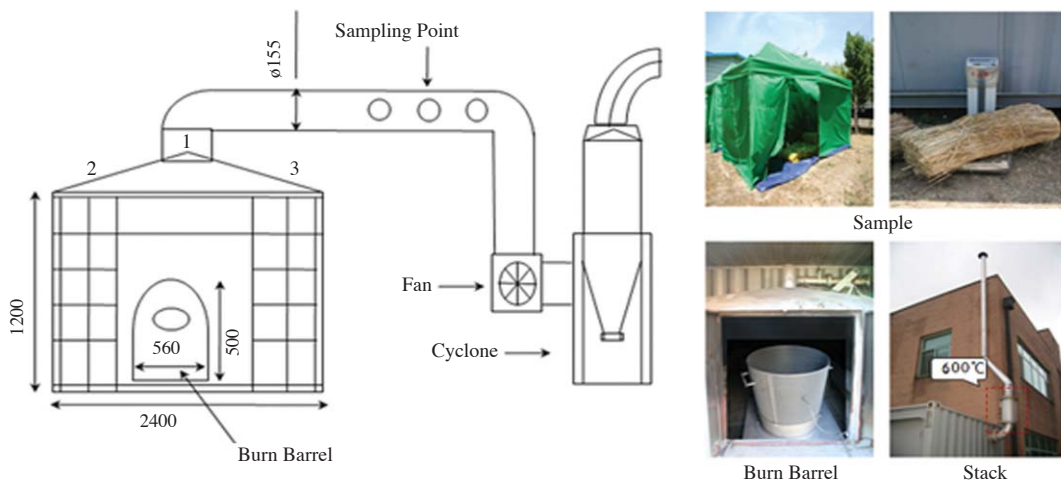


Fig. 1. Diagram of open burning simulation chamber and samples.

기오염물질 배출 특성을 파악하기 위해 모의 소각장치를 설치하고, 소각물질별로 발생하는 대기오염물질을 실측 조사하였다. 미국 EPA에서 시험용으로 사용한(Christopher *et al.*, 1996) 장치를 참고하여 <그림 1>과 같이 제작하였다. 시료의 점화는 챔버 안에서 자동점화장치로 이루어지며, 배출가스는 방지시설(사이클론)을 거쳐 굴뚝으로 배출 되기 전 600°C의 열을 가해준다.

본 연구에서의 소각 대상물질은 곡식 수확 후 발생한 볏짚, 보릿짚 및 옥수수대 등 농업잔재물과 난로나 아궁이 등에서 주로 사용되는 생목을 시료로 선정하였다. 생목은 건설 폐기물과 같은 폐목과 달리 가공되지 않은 목재로, 시판되는 참나무 장작을 사용하였다.

2.2 시료소각, 시료채취 및 분석

2.2.1 시료의 소각 및 연소가스 분석

시료의 소각 전에 챔버 내의 이물질들을 완전히 제거한 후 본 실험을 실시하였다. 소각시료는 약 3~5 kg 수준으로 정확히 저울로 칭량하여 기록한 후 소각하였다. 실제 노천소각과 가장 유사한 조건을 만들기 위하여 산소를 충분히 공급하여 연소하였으며, 배출가스 중 산소농도가 20.5%가 넘고 잔 불씨가 완전히 사라지면 연소가 종료된 것으로 판단하여 실험

을 종료하였다. 초기점화부터 종료 시까지의 연소 지속시간을 기록하였으며, 연소가 이루어지는 동안 연소 조건을 판단하기 위하여 휴대용가스분석기(ECA 450, BACARACHI)를 이용하여 연소가스(O₂, CO, NO_x, SO_x 등)를 15초 간격으로 저장·분석하였다.

2.2.2 PM_{2.5} 시료채취 및 분석

본 연구에서 PM_{2.5}를 채취를 위해 석영 재질의 원형여과지(Pall Pallflex Tissuquartz Filters, 직경 47 mm)를 이용하였다. 측정을 위한 여과지 전처리에는 회화로 900°C에서 4시간 이상 강열하여 탄소 성분 및 유기물질을 완전히 제거 한 후, 테시케이터에서 실온까지 냉각한 후 여과지의 무게를 정밀히 칭량하여 사용하였다. 여과지 무게는 1분 간격으로 3회를 0.01 mg 단위까지 정밀하게 달아 그 평균값을 여과지의 무게로 하였으며, 무게를 칭량하는 동안 오차를 줄이기 위하여 여과지는 습도가 50% 이상인 실험실 환경에 2분 이상 노출되지 않도록 하였다. 시료채취는 소각물질별(볏짚, 보릿짚, 옥수수대, 생목)로 각 3회씩 12회 시료를 채취하였다. 모든 측정은 Stack Sampler (Clean Air Experiment, Method-5)를 이용하여 배출가스의 유속, 온도, 압력(동압, 정압), 수분량 등을 측정하여 등속흡인 속도 및 유량을 조절하고, 흡인펌프의 흡인 능력을 감안하여 최적의 노즐 직경을 선택한 후, 필요 유량 확보를 위한 시료채취 시간을 결정하였다(Kim

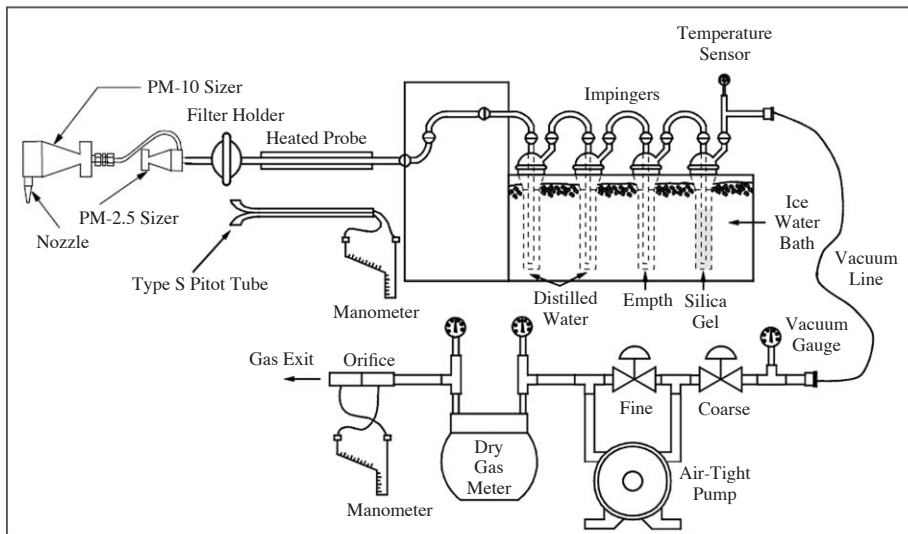


Fig. 2. Sampling device of the PM₁₀ and PM_{2.5} (US EPA METHOD 201A).

et al., 2012). 시료채취 시간은 벧짚과 보릿짚의 경우 14~29분, 옥수수대는 9~25분, 생목은 39~73분이었다. PM_{2.5}의 시료 채취는 미국 EPA 201A (Determining PM₁₀ and PM_{2.5} Emissions from Stationary Sources) 방법으로 사이클론 채취기(PM10-2.5-SS Combination PM₁₀ and PM_{2.5} Cyclone and Nozzle Set, Environmental Supply Company)를 사용하였으며, 시료채취기 및 장치 구성도는 <그림 2>와 같다. 측정 후 여과지의 회수는 여과지 홀더로부터 여과지를 회수하고, 아세톤으로 여과지 홀더를 세척한 후 세척액을 저장용기에 담아 밀폐하였다. 여과지는 건조기는 건조기(110 ± 5°C에서 2~3시간 건조시킨 후, 테시케이터에서 2시간 이상 실온까지 냉각한 후 여과지의 무게를 3번 이상 반복 칭량하여 그 값을 대표값으로 하였다. 또한, 아세톤 세척액은 비커에 옮기고 방치하여 아세톤을 증발시킨 후, 테시케이터에서 24시간 동안 건조시킨 후 무게를 칭량하였다. 여과지와 아세톤에 용해된 입자상 물질의 포집 전·후 무게차를 중량 농도로 나타냈다.

2. 2. 3 OC/EC 분석

OC/EC의 분석은 탄소분석기(Desert Research Institute, Model 2001A)를 이용하여 분석하였다. OC/EC의 분석원리는 각기 다른 온도에서 OC와 EC를 선택적으로 산화하는데 기초를 두고 있다.

시료가 채취된 석영 여과지에서 적당한 크기로 분취된 시료로부터 다른 온도와 산화 환경 하에서 탄

소 화합물이 분리된다. 분석을 위한 열적변화는 순차적으로 총 7단계로 나뉘어 진행되고 OC의 경우 산소가 없는 환경에서 550°C까지 처음부터 총 4단계, EC의 경우 800°C까지 총 3단계에 걸쳐 분석된다. 산소가 있는 환경에서 탄소성분이 열분해 할 때 EC뿐만 아니라 OC 화합물 일부가 열분해 되어 결과적으로 OC 화합물은 과소평가 되고 EC는 과대평가 되어 오차가 발생한다. 이를 보정하기 위해 본 연구에서는 “Thermal Optical Reflectance (TOR)”법을 사용하였다. TOR법은 헬륨-네온 레이저와 photodetector를 통한 필터의 레이저 반사율을 연속적으로 모니터링 하는 방법으로 현재 OC/EC를 교정 분석하는데 많이 사용되고 있는 방법이다. 즉, <그림 3>의 red light laser는 여과지 위에 포집된 입자의 어두움 정도를 모니터링 하는데 EC를 분석하기 위해 산소를 공급할 때 열분해 되는 일부 OC 화합물을 보정하여 과대평가되는 EC를 정량하고 동시에 석영 여과지 위에 탄소는 오로지 EC만이 남아 이후 분석되는 탄소는 EC로서 정성, 정량 분석하는 것이다.

2. 3 배출계수 및 배출량 산정

소각물질에 따른 항목별 배출계수는 식(1)과 같이 산정하였다. 각 오염물질의 농도(mg/Sm³)는 실측값이며, 유량은 덕트의 내경(m)과 유속(m/sec)으로 계산하였다. 연료사용량(kg/min)은 소각시간(min) 당 소각량(kg)으로 하였다.

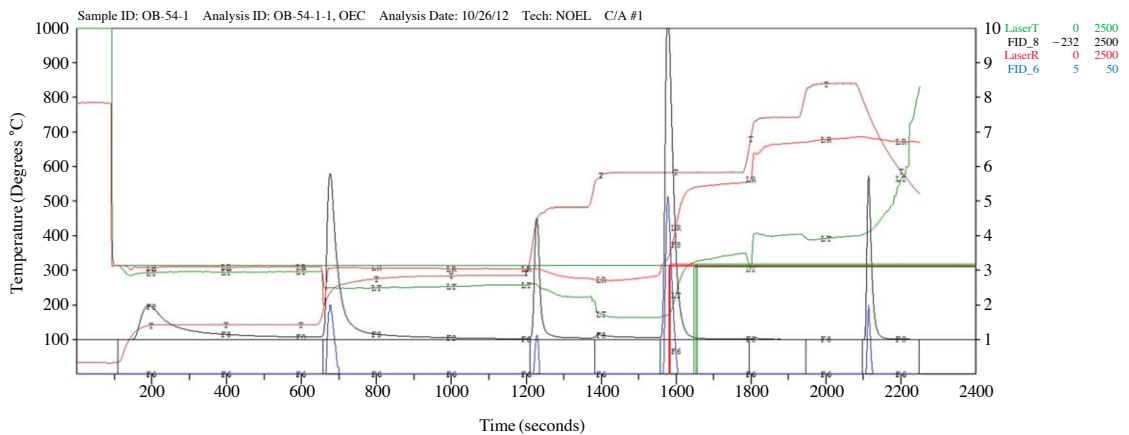


Fig. 3. Thermogram of OC/EC fraction in organic and elemental carbon analysis.

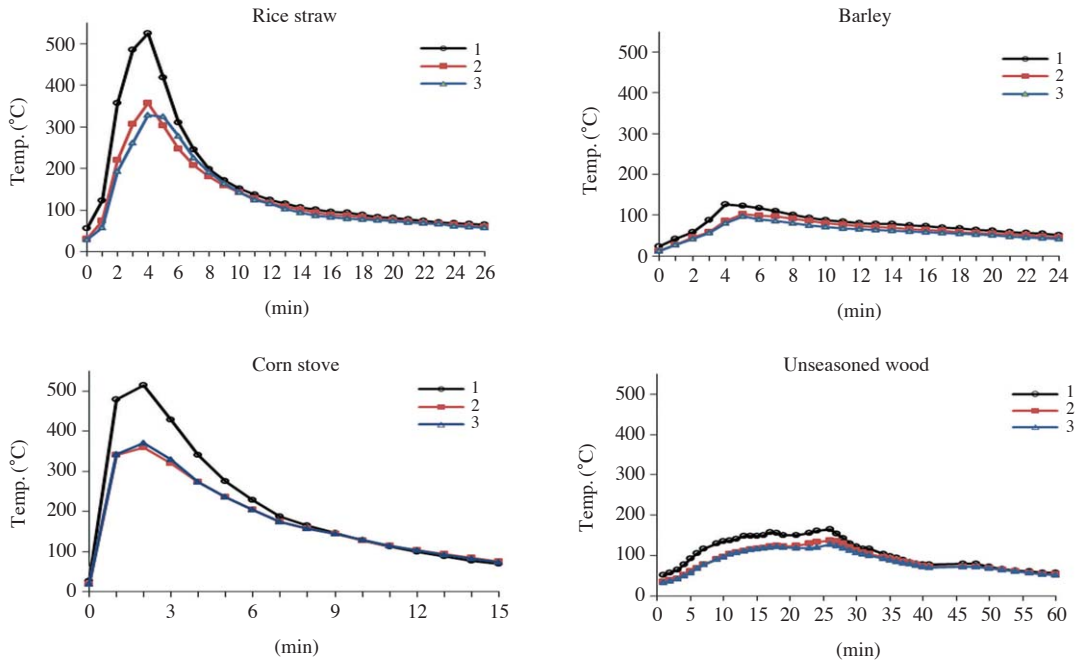


Fig. 4. Temperature variation in combustion time.

배출계수 (g/kg)

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

노천소각에서의 오염물질 배출량 산정은 CARB (2006)에서 제시한 식(2)와 같다. 식(2)는 본 연구를 통하여 개발된 배출계수(g/kg)와 연간 총 소각되는 활동도(ton/yr)를 적용하여 산정하였다. 활동도는 (Statistics Korea, 2013)의 전국 경작지 면적(m²)과 Kim and Choi (2011)의 설문조사를 바탕으로 제시한 연간 단위작물면적 당 소각량(ton/m² · yr)으로 계산하였다.

배출계수 (ton/yr)

$$= \text{배출계수} (\text{g}/\text{kg}) \times \text{활동도} (\text{ton}/\text{yr}) \times 10^{-3} \quad (2)$$

3. 연구 결과

3.1 연소 특성

시료의 연소과정은 3단계로 구분할 수 있다. 1단계는 점화가 시작되어 연소가 활발하게 일어나기까지

Table 1. Analysis results of O₂ in open burning. (unit: %)

Test waste	O ₂		
	Max	Min	Mean
Rice straw	20.9	8.7	17.9
Barley	20.9	12	19.8
Corn stover	20.9	6.5	19.1
Unseasoned wood	20.9	18.5	20.2

의 단계이고, 2단계는 연소가 활발히 진행되고 있는 단계, 3단계는 잔 불씨가 남아 완전하게 연소가 마무리되는 단계이다. 점화가 시작되면 1단계에서 온도가 점점 상승하고, 2단계에서 소각 물질별로 연소실 온도가 최고 127°C에서 628°C까지 큰 차이를 보이고 점차 감소하였다. 연소실 상부와 연결된 덕트에 1개, 편향판 좌, 우에 각 1개씩 총 3개의 온도센서를 설치하여 연소실 내부의 공기 혼합을 관찰하였다. 편향판 좌, 우에 설치된 온도는 거의 유사한 값을 보여, 연소실 내부 혼합이 원활하게 진행된 것으로 판단된다. 연소실 상부에 연결된 덕트에서 측정된 온도는 편향판 좌, 우지점보다 다소 높았으며 <그림 4>와 같다.

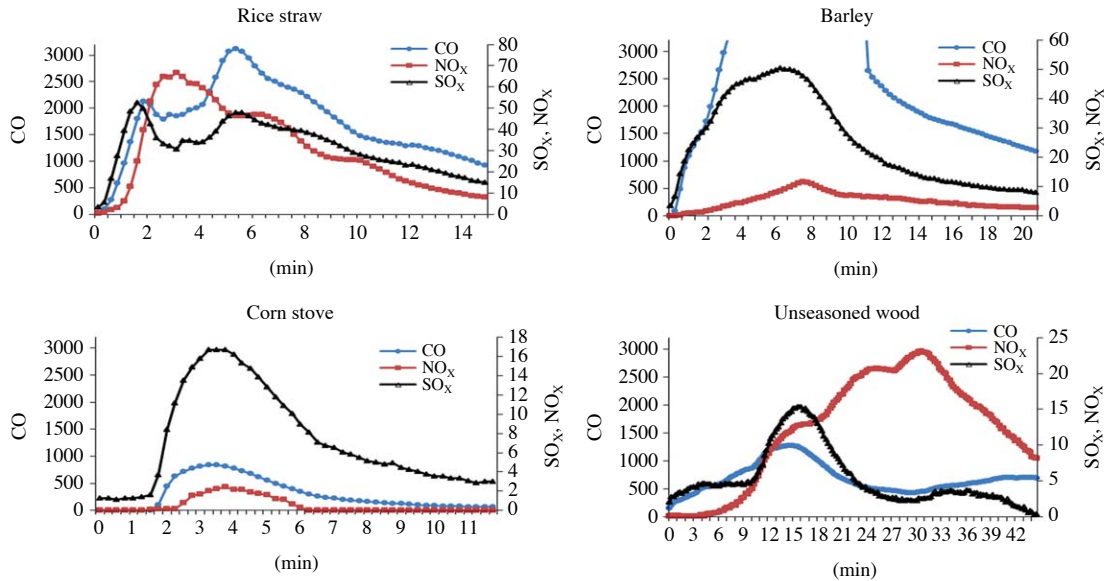


Fig. 5. Emission characteristics CO, NO_x and SO_x in time.

Table 2. Analysis results of SO_x, NO_x, CO in open burning.

(unit: ppm)

Test waste	CO		NO _x		SO _x	
	Mean		Mean		Mean	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Rice straw	4000.0≤	2360.0	199.3	43.2	283.1	30.4
Barley	4000.0≤	2586.8	25.2	0.6	91.0	13.9
Corn stover	4000.0≤	2088.2	59.2	10.0	309.8	25.7
Unseasoned wood	1275.9	429.5	23.5	7.5	15.3	3.8

3.2 CO 배출특성

연소가 진행되는 동안 시간대별로 CO 농도 특성은 <그림 5>와 같다. 연소가 가장 활발하게 일어나는 2단계에서 대상 시료 모두 CO의 배출이 높게 나타났고, 연소가 마무리되는 3단계에서는 배출 농도가 현저하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 완전 연소가 일어날수록 CO의 최고 생성 농도에 도달하는 시간이 지연되는데(Park *et al.* (2005)), 생목의 경우 같은 무게의 농업잔재물에 비해 CO 최고 생성 농도 도달 시간이 가장 늦은 경향을 보였다. 부피와 표면적이 작아, 연소 속도가 상대적으로 느린 생목의 연

소는 <표 1>에서와 같이 측정이 진행되는 동안 충분한 산소가 꾸준히 공급되어 상대적으로 불완전연소가 적게 일어난다. 이와 같은 이유로 볏짚, 보릿짚, 옥수수대에서의 CO는 생목의 CO 평균농도(430 ppm)보다 약 5~6배 높게 배출된다.

볏짚, 보릿짚, 옥수수대에서 CO 농도는 분석시 측정기(BACHARACH, 모델 ECA450)의 측정범위를 초과하여 최대 측정한계 4000 ppm으로 나타냈으며(표 2), 이러한 측정기기 상의 한계로 본 연구결과의 CO 값은 실제 농도보다 과소평가 되었다. 그럼에도 불구하고 본 연구의 CO값은 다른 연구결과보다 높게 나

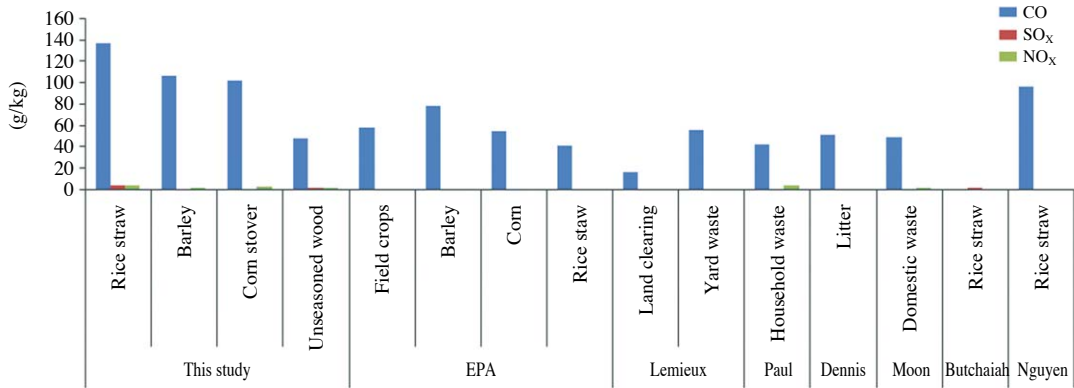


Fig. 6. Emission factors of CO, SO_x, NO_x in reference.

Table 3. Comparison of emission levels of CO, SO_x, NO_x in different studies.

(unit: g/kg)

Source	CO	SO _x	NO _x	
This study	Rice straw	136.9	4.3	3.9
	Barley	107.1	0	1.3
	Corn stover	102	0.9	2.9
	Unseasoned wood	47.6	1.3	0.9
EPA (1992)	Field crops	58		
	Barley	78		
	Corn	54		
	Rice staw	41		
Lemieux (2004)	Land clearing	16		0.1
	Yard waste	56		
Paul (2004)	Household waste	42	0.5	3
Dennis (2004)	Litter	50.9		
Moon (2007)	Domestic waste	49	0.7	1.4
Butchaiah (2009)	Rice straw		2	
Nguyen (2011)	Rice straw	97		

타났다. 또한 최소값이 0.1인 이유는 산소가 20.5%까지 도달하고 거의 소화가 되는 시점까지 시료를 채취하였기 때문이다.

〈그림 6〉과 〈표 3〉은 본 실험에서 산정한 배출계수와 타 문헌의 배출계수를 비교한 것이다. SO_x와 NO_x는 본 연구와 타 문헌에서 전체적으로 미량이 검출되었다. CO의 경우 볏짚이 136.9 g/kg으로 Nguyen *et al.* (2011) 및 EPA에서 조사한 값보다 다소 높았고, 보릿짚과 옥수수대, 생목에서 각각 107.1, 102.0, 47.4 g/kg으로 검출되었다. 불완전 연소 생성물인 CO는 수분이 많은 볏짚, 보릿짚, 옥수수대가 상대적으로 건

조한 생목보다 높은 양이 배출되는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 PM_{2.5} 배출특성

PM_{2.5} 시료는 등속흡입조건에서 소각 시료별로 각 3회 시료를 채취하여 분석하였으며 결과는 〈그림 7〉에 정리하였다. 배출 계수는 볏짚과 보릿짚이 각각 60.44, 81.81 g/kg으로 옥수수대와 생목에 비해 많은 양의 오염물질을 배출하였다. 이러한 결과는 표면적이 작은 생목의 연소가 농업잔재물 소각에 비하여 속도가 느려, 소각 주변의 산소농도가 거의 20%를 유

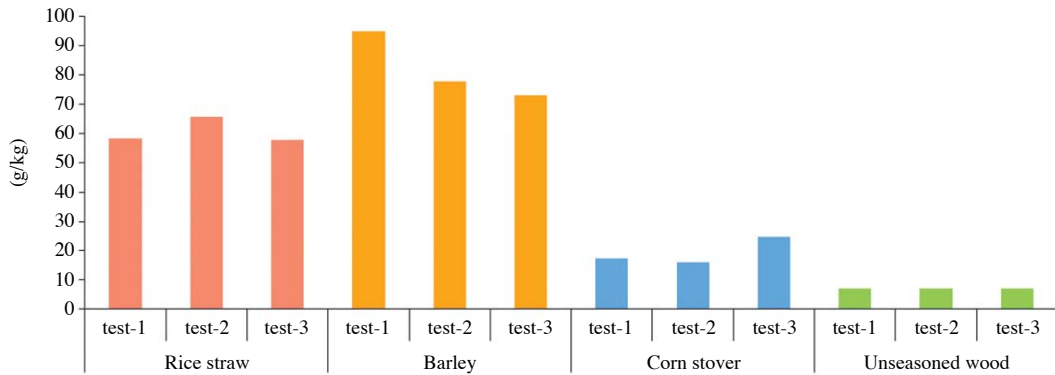


Fig. 7. Comparison on of PM_{2.5} emission factors.

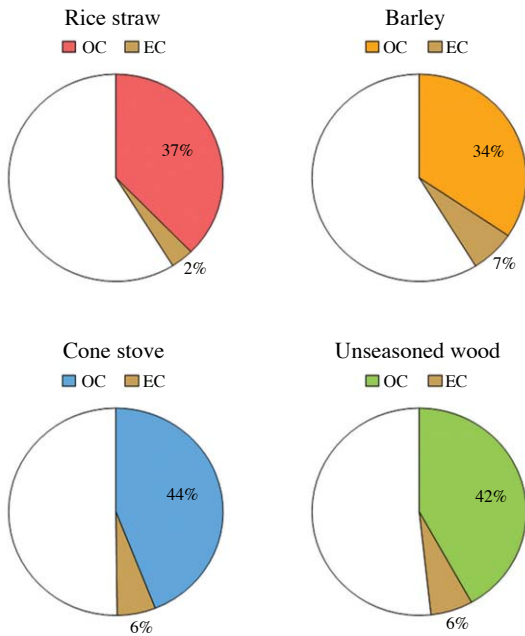


Fig. 8. OC/EC profiles for biomass burning.

지하여 상대적으로 완전 연소가 일어났기 때문이다. 옥수수대의 연소는 ‘잎’ 부분에서 시작하여 ‘대’ 부분으로 진행된다. ‘대’의 표면은 그을음을 생성하지만 연소가 종료된 후에도 그 모양을 유지하고 있다. 이와 같은 이유로, 같은 무게를 칭량하여 소각을 하였을 경우 옥수수대의 소각 시간이 다른 생물성 연소 시료에 비해 짧고 배출계수가 낮다. Jung *et al.* (2012)에서 산정한 생활폐기물의 PM_{2.5} 배출계수는 본 연구

Table 4. Contribution of OC and EC in particulate matter in open burning. (unit: %)

Species	U.S. EPA		Fine	Schmidl	Fine
	(2006)	(2006)	<i>et al.</i>	<i>et al.</i>	<i>et al.</i>
	Residential wood burning	Field burning	(2004)	(2008)	(2001)
OC	67.6 ± 5.8	31.6 ± 8.7	55.1 ~ 55.4	Oak	Oak
EC	17.5 ± 1.6	5.2 ± 2.3	3.3 ~ 10.4	Oak	Oak

에 비해 확연히 낮아 생물성 연소에서 다량의 미세 먼지가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 4 OC/EC 배출특성

PM_{2.5}에서 측정된 OC와 EC 성분비는 <그림 8>에 나타내었다. 시료채취가 끝난 PM_{2.5} 여과지는 밀봉하여 분석을 실시할 때까지 냉장 보관하였다. 농업잔재물과 생목의 소각에서 OC가 전체 함량의 34~44%로 높은 비율을 차지하고, EC는 2~7%로 OC에 비해 상대적으로 낮게 나타났다.

본 실험의 농업잔재물에서 발생된 OC의 함량은 <표 4>의 EPA (2006)의 field burning의 OC 함량과 유사한 값을 보였고, EC의 경우는 다소 낮게 나타났다. 생목은 OC 함량이 42%로 Schmidl *et al.* (2008)과 유사하게 조사되었다.

현재 국내·외에서 대기 중 PM_{2.5}의 배출원을 파악하기 위한 방법으로 사용되고 있는 CMB (Chemical Mass Balance) 모델은 해당 지역 대기 먼지 시료 중의 화학적 구성성분과 주요 미세입자 배출원의 화학

적 구성성분비 간의 최적선형결합이 되도록 계산하는 것이며, 이 경우에 모델의 중요한 입력 자료로서 주요 배출원에 대한 배출원 구성물질 성분비(source profile) 자료는 배출원 기여도 추정에 필수적이다(Kang and Lee, 2012). 본 연구에서 제시한 PM_{2.5}에서의 OC/EC 성분비는 이러한 모델의 기초 자료로 이용될 수 있다.

3.5 배출량 산정결과

본 연구에서 도출한 CO 배출계수를 이용하여 옥수수대, 아궁이, 화목난로에 대한 전국 배출량을 산정하였다. 배출량 산정을 위해 각 물질별 활동도를 조사하였다. 옥수수대는 전국 경작지 면적 15,823 ha (Statistics Korea, 2010)과 단위 작물 당 소각량 39 g/m³ (Kim and Choi, 2011)을 고려해 활동도를 연간 6,174 ton으로 추정하였고, 추정된 활동도에 배출계수 102.0 g/kg을 적용하면 CO의 배출량은 630 ton/yr이었다. 생목은 아궁이에서 배출되는 배출량과 화목난로 사용 시 배출되는 배출량 두 가지 경우를 조사하였다. 난방시설 별 가구 통계에 따르면 39,052 가구가 재래식 아궁이를 사용한다. 한 가구당 하나의 아궁이를 사용한다고 가정하였을 때, 아궁이 하나당 연간 연료 사용량 1,989.66 kg/yr을 이용해 활동도를 77,700 ton/yr로 추정하였다. 추정된 활동도에 생목 배출계수 48 g/kg을 적용하면 아궁이에서의 CO 배출량은 3,699 ton/yr이다(Kim and Choi, 2011)의 설문조사에 따르면 농가의 3.78%가 화목난로를 사용하고, 화목난로 하나당 연간 연료 사용량 2,548.48 kg이다. 농림어업총조사(Statistics Korea, 2010)의 전국 농가수를 이용하여 화목난로의 활동도를 구하고, 본 연구에서 개발한 배출계수에 적용하면 화목난로에서 CO 배출량은 5,527 ton/yr이다(표 5).

이들 비관리형 연소는 전국 각지에서 산발적으로 이루어지고 있어 활동도 추정에 어려움이 있다. 통계자료와 선행연구의 설문조사를 바탕으로 활동도를 조사한 CO 배출량은 화목난로, 아궁이, 옥수수대 순으로 높게 나타났다. 특히, 불완전연소 생성물인 CO가 가장 많이 배출되는 것으로 파악된 화목난로는 에너지 가격의 급상승으로 주거 및 난방용으로 사용이 늘고 있어 주거지역 대기질 개선을 위해 그 관리가 필요한 실정이다. 그러나 본 연구에서 산정한 활동도는 농촌가구만을 대상으로 하였기 때문에 배출량이 과

Table 5. CO emissions by biomass burning.

	Emission factor (g/kg)	Activity (ton/yr)	Emission (ton/yr)
Corn stover	102	6,174	630
Furnace	48	77,700	3,699
Stove	48	116,114	5,527

소평가 되었을 것으로 판단된다. 배출량의 신뢰도를 높이기 위해서 향후 추가적으로 비관리형 연소 배출원의 활동도를 파악할 필요가 있다.

4. 결 론

이러한 노천소각의 효과적인 관리를 위해서는 발생하는 오염물질과 발생량을 파악하는 것이 매우 중요하다. 따라서 벧짚, 보릿짚, 옥수수대, 생목을 대상으로 노천소각 시 배출되는 불완전연소 생성물인 CO 등 가스상 물질과 PM_{2.5}, 탄소성입자의 배출 특성을 조사하고, 배출계수를 산정하였다. 실험 장치는 EPA에서 사용한 바 있는 콘테이너형 모의소각장치를 자체 제작하여 사용하였다. 소각 시료 중 농업잔재물과 생목은 별도로 시료를 건조시키지 않고 수분이 있는 상태 그대로 소각하였다. 농업잔재물의 연소 시 초기 점화 후 연소가 가장 활발하게 진행되는 2단계에서 많은 오염물질을 배출하였고, 그 후에는 배출 농도가 점점 감소하였다.

PM_{2.5}의 측정 결과 벧짚과 보릿짚에서 각각 60.44, 81.81 g/kg으로 옥수수대와 생목에 비하여 배출계수가 높았다. 이러한 결과는 같은 무게를 칭량하여 실험하더라도 각각의 연소 특성으로 소각 시간과 산소 농도가 다르게 나타나기 때문이다.

PM_{2.5}에서 측정된 OC의 함량은 농업잔재물에서 34~44%로 높은 비율을 차지하고 있고, EC는 2~7%로 OC에 비해 상대적으로 낮게 검출되어 생물성연소가 일어날 때 유기물이 다량 발생하는 것을 확인하였다. 그러나 이러한 결과는 분석값의 부족 등으로 인하여 불확도가 높다. 따라서 본 조사 자료의 활용을 위해, 향후에도 동일 시료에 대한 많은 조사가 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 현재 제대로 관리되지 않고 있는 농업잔재물 및 생목에 대한 노천소각에 대해 다루었다.

연구 결과에서 알 수 있듯이 노천에서 농업잔재물을 소각 할 경우 다량의 미세먼지와 유기성 화합물이 대기 중으로 배출되어 대기오염을 증가시키는 요인으로 작용할 수 있다. 따라서 대기오염물질을 저감을 위해 노천소각에 대한 지속적인 연구가 필요하다. 그러나 본 연구에서 사용한 활동도는 선행연구의 설문 조사와 통계청자료만을 이용한 것이므로 배출량에 대한 신뢰도를 높이기 위해서는 보다 정확한 배출량을 파악하는 것이 중요하고, 또한 연소 조건과 환경에 따라 추가적인 실험이 필요하다.

References

- Butchaiah, G., S. Bonnet, C. Menke, and S. Garivait (2009) Air pollutant emission from rice straw open field burning in India, Thailand and Philippines, *Environmental Pollution*, 157(5), 1554-1558.
- CARB (2006) *Areawide Emissions Inventory Methodologies -Agricultural Burning*.
- Pope, C.A. 3rd and W.D. Douglas (2006) Health effects of fine particulate Air Pollution: Lines that Connect, *Air & Waste Management Association*, 56, 709-742 pp.
- Dennis, A., M. Fraser, S. Anderson, and D. Allen (2002) Air pollutant emissions associated with forest, grassland, and agricultural burning in Texas, *Atmospheric Environment*, 36(23), 3779-3792.
- Fine, P.M., G.R. Cass, and B.R.T. SImoneit (2001) Chemical Characterization of Fine Particle Emissions from Fireplace Combustion of Woods Grown in the Northeastern United States, *Environmental Science & Technology*, 35, 2665-2675.
- Fine, P.M., G.R. Cass, and B.R.T. Simoneit (2004) Chemical characterization of fine particle emissions from the wood stove combustion of prevalent United States tree species, *Environmental Engineering Science*, 21(6), 705-724.
- Jung, N.-E., M.-R. Jo, S.-H. Heo, H.-C. Kim, J.-M. Park, D.-G. Lee, J.-H. Hong, S.-J. Lee, and Y.-J. Lee (2012) Estimation of particulate matter emission factors from open burning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(3), 348-356.
- Kim, Y.-J. (2008) Discharge of dioxine by open-air burning of domestic and agricultural wastes, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(1), 66-72.
- Kim, D.-Y. and M.-A. Choi (2011) Air Pollutant Mission Estimation by Biomass Burning in Seoul Metropolitan Area, 53rd Ed, Meeting of KOSAE, Gyeonggi Research Institute, 118pp.
- Kim, D.-K., T.-J. Lee, S.-C. Kim, and D.-S. Kim (2012) Source apportionment estimation of ambient PM_{2.5} and identification of combustion sources by using concentration ratios of PAHs, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(5), 538-555.
- Kang, B.-W. and H.-S. Lee (2012) A study on the source profile development for fine particles (PM_{2.5}) emitted from biomass burning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(4), 384-395.
- Kim, S.-H. (2012) The Characterization of Ambient PM_{2.5}-bound Carbonaceous Species and PAHs in Seoul Metropolitan Area, The Graduate School University of Seoul.
- Lutes, C.-C. and P.-H. Kariher (1996) Evaluation of Emission from the Open Burning of Land-clearing debris, EPA-600/S-96-128.
- Lemieux, P.-M., C.-C. Lutes, and D.-A. Santoianni (2004) Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review, *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 1-32.
- Lee, S.-B., N.-E. Jung, S.-K. Kim, J.-S. Han, S.-H. Heo, M.-S. Yu, H.-C. Kim, and J.-H. Hong (2012) Emission Source Inventory of Hazardous Air Pollutant from Stationary Sources (IX) - Open Burning -, National Institute of Environmental Research.
- Michael, D.H., M.-f. Philip, D.-G. Christopher, J.-K. Michael, and K.-G. Brian (2005) Open burning of agricultural biomass: Physical and chemical properties of particle-phase emissions, *Atmospheric Environment*, 39(36), 6747-6764.
- Moon, D.-H. (2007) A Study for Estimation of Emissions and Profile Characteristics of Dioxins, dioxin-like PCBs and PAHs by Open burning, The Graduate School Pukyong National University.
- Nguyen, T.K.O., T.-L. Bich, T. Danutawat, R.-M. Bhai, P. Pongkiatkul, D.-S. Christopher, and L.-J. Sally Liu (2011) Characterization of particulate matter emission from open burning of rice straw, *Atmospheric Environment*, 45(2), 493-502.
- Park, E.-Y., D.-S. Park, Y.-M. Cho, and B.-H. Park (2005) Combustion Characteristics of Rice-husk according to the Change of Heat Flux, *Proceeding of the 40th Meeting of KOSAE*, 440-442.
- Park, S.-K., S.-J. Choi, G.-J. Park, J.-Y. Kim, C.-K. Bong, S.-J.

- Park, J.-H. Kim, and U.-H. Hwang (2011) Collection characteristics of particulate matters from biomass burning by devices: Mainly commercial meat cooking, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(6), 641-649.
- Schmidl, C., I.-L. Marr, A. Caseiro, P. Kotianiva, A. Berner, H. Bauer, A. Kasper-Ciebl, and H. Puxbaum (2008) Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods Growing in mid-European Alpine region, *Atmospheric Environment*, 42(1), 126-141.
- Statistics Korea (2010, 2013) <http://kostat.go.kr/portal/korea/index.action>.
- U.S. EPA (1992) AP 42, Fifth Edition, Volume I, Chapter 2: Solid Waste Disposal.
- U.S. EPA (2010) Method 201A - Determination of PM₁₀ and PM_{2.5} emissions from stationary sources.
- U.S. EPA (2006) SPECIATE 4.0 speciation database development documentation.
- Ying, H., R. Strait, S. Roe, D. Holoman, and E.-H. Pechan (2006) SPECIATE 4.0 speciation database development documentation. U.S. EPA, EPA-600/R-06-161.