

Biomass-burning에서 배출되는 미세입자 (PM_{2.5})의 배출원 구성물질 성분비 개발에 관한 연구

A Study on the Source Profile Development for Fine Particles (PM_{2.5}) Emitted from Biomass Burning

강 병 욱 · 이 학 성^{1),*}

한국교통대학교 환경공학과, ¹⁾서원대학교 환경건설정보학과
(2012년 3월 7일 접수, 2012년 4월 5일 수정, 2012년 6월 7일 채택)

Byung-Wook Kang and Hak Sung Lee^{1),*}

Department of Environmental Engineering, Korea National University of Transportation

¹⁾*Department of Environmental, Civil and Information System, Seowon University*

(Received 7 March 2012, revised 5 April 2012, accepted 7 June 2012)

Abstract

This study was performed to develop the source profiles for fine particles (PM_{2.5}) emitted from the biomass burning. The multi-method research strategy included a usage of combustion devices such as field burning, fireplace, and residential wood burning to burn rice straw, fallen leaves, pine tree, and oak tree. The data were collected from multiple sources and measured water-soluble ions, elements, elemental carbon (EC), and organic carbon (OC).

From this study, it turned out that OC (34 ~ 67%) and EC (1.2 ~ 39%) are the major components emitted from biomass burning. In the case of burning rice straw at field burning, OC (66.6%) was the most abundant species, followed by EC (4.3%), Cl⁻ (3.6%), Cl (2.1%), and SO₄²⁻ (1.9%). Burning rice straw, fallen leaves, pine tree, and oak tree at fireplace, the amount of OC was 58.5%, 52.7%, 52.5%, and 61.2%, and that of EC was 1.2%, 18.4%, 36.5%, and 2.7%, respectively. The ratio of OC for the burning of pine tree and oak tree from the residential wood burning device was 56.9% and 34.3%, and that of EC was 25% and 38.6%, respectively. Applying the measured data with respect to the proportion of components emitted from biomass burning to reference model, it turned out that self-diagnosed result was appropriate level, and the result based on the model is in highly corresponding to actual timing of biomass burning.

Key words : Biomass burning, Source profiles, PM_{2.5}, Receptor model

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)43-299-8722, E-mail : hsl@seowon.ac.kr

1. 서 론

식물연소(biomass burning)로 인한 대기 중 입자상 물질 및 가스상 물질에의 기여도는 인간의 건강에 미치는 영향 등과 관련하여 세계의 여러 지역에서 사람들의 관심의 대상이 되어왔다(Dennis *et al.*, 2002). 또한 식물연소로 인하여 배출된 오염물질들은 대기 중에서 복사평형 또는 구름, 비와 안개의 산성화 등과 같이 대기과정에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Hu *et al.*, 2008). 더 나아가서 식물연소에서 배출된 오염물질들은 장거리를 이동하여 영향을 미치기 때문에 극지방을 포함하여 지구 전체에 영향을 미칠 수 있다(Hegg *et al.*, 2010; Dibb *et al.*, 1996; Swap *et al.*, 1996).

식물연소는 여러 가지 종류로 구분되는데, 자연적인 식물연소로는 초원화재(savanna fire)와 산림화재(forest fire) 등이 주요 형태로 여러 연구자에 의해 연구된 바 있다(Abas *et al.*, 2004; Formenti *et al.*, 2003; Yamaseo *et al.*, 2000; Allen and Miguel, 1995). 또한, 인위적인 식물연소로는 연료로서의 이용과 농작물 폐기물처리 등 두 가지로 구분할 수 있다.

세계 여러 지역에서 식물연소 때문에 영향을 받고 있으며, 자료에 따르면 매년 사바나 지역에서 500~1000백만 ha, 열대 및 아열대지역의 산림이 4백만 ha가 연소되는 것으로 알려져 있다(Uherek, 2004). 1987년 동남아시아 지역의 산림 14백만 ha가 연소되었고(Cahoon *et al.*, 1992), 1994년과 1997년 인도네시아에서 20백만 ha 이상의 산림이 연소되어 소실되었다(Nichol, 1997). 이와 같은 이유로 동남아시아 지역에서는 식물연소에서의 오염물질 배출로 인하여 지역 대기 질과 기후 등에 미치는 영향과 관련하여 폭넓은 연구가 이루어졌다(Stone *et al.*, 2010; Gustafsson, 2009; Ramanathan *et al.*, 2007). 오스트레일리아에서 식물연소로 연간 40~130백만 ha의 면적이 연소되고 있으며, 1998~1999년과 1999~2000년 사이의 산불로 각각 31, 71백만 ha가 소실되었다(Gill and Moore, 2005; WHO, 2000).

아시아 지역에서 식물연소는 인위적인 식물연소형태가 주를 이루는데, 농작물의 잔재물과 목재 등을 난방과 취사목적으로 이용하거나 농경지 생산성 증대 또는 농작물 폐기물처리를 위한 노천에서의 연소

등이 주요 형태이다. Streets *et al.* (2003)에 의하면 한국에서 식물연료로 이용하는 식물의 양은 1.1 Tg이고 목재와 농업잔재물 연소량은 1.8 Tg이고, 북한의 경우에는 각각 18 Tg, 1.9 Tg이며, 중국의 경우 각각 460 Tg, 180 Tg에 달하는 것으로 알려져 있다. Hedberg *et al.* (2002)에 의하면 벽난로에서 나무(자작나무)연소 시 배출되는 입자상물질 중 PM_{2.5}에서 대부분 0.9 μm 이하이고 0.5 μm 크기의 입자상물질 비율이 가장 높은 것으로 나타났다.

현재 국내·외에서 대기 중 미세먼지(PM_{2.5})의 배출원을 파악하기 위한 방법으로 CMB (Chemical Mass Balance)모델이 사용되고 있다(Stone *et al.*, 2008; Chowdhury *et al.*, 2007; Kang *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2005; Schauer *et al.*, 2002; Kang *et al.*, 2000). CMB 모델은 해당지역 대기 먼지시료 중의 화학적 구성성분과 주요 미세먼지 배출원의 화학적 구성성분비간의 최적선형결합이 되도록 계산하는 것이며, 이 경우에 모델의 중요한 입력자료로서 주요 배출원에 대한 배출원 구성물질 성분비(source profile) 자료는 배출원 기여도 추정에 필수적이다. 현재 국내에서는 식물연소의 배출원 구성물질 성분비 자료는 연소물이나 연소조건이 다른 미국 EPA자료(U.S. EPA, 2006)를 이용하고 있어서 CMB 결과 해석의 오류를 초래할 수 있다(Park, 2001).

따라서 본 연구의 목적은 우리나라에서 아직 연구가 전무한 식물연소 시 배출되는 미세먼지의 배출원 구성물질 성분비 자료를 직접 측정·분석하여 개발하고자 한다. 본 연구의 결과는 향후 국내에서 CMB 수용모델 이용 시 중요한 자료를 제공할 수 있다고 사료된다.

2. 실험방법

2.1 연소시설 및 연료 종류

농촌에서 이루어지는 식물연소는 목적에 따라서 두 가지 종류로 구분할 수 있으며, 그 중 하나는 농업잔재물 소각(field burning)이 목적이며, 잔재물은 작물에 따라서 다양한 종류로 구분할 수 있다. 그 중에서 대표적인 것은 가을철 벼를 추수하고 난 후에 눈에 잘게 썰어서 두었다가 가을 또는 봄철에 태우는 볏짚(rice straw)이 대표적이라고 볼 수 있다. 또

한 봄철에 경작지 인근의 논두렁 및 밭두렁에 자연적으로 서식하는 잡풀을 태우는 것도 이 범주에 포함할 수 있다. 다른 하나는 난방목적으로 이루어지는 연소형태를 들 수 있다. 이는 난방형태에 따라서 여러 가지 종류로 구분할 수 있으며 대표적으로는 아궁이 연소(fireplace)와 벽난로 연소(residential wood

burning) 등을 들 수 있다. 난방의 경우에 연소형태에 따라서 연소대상물로는 볏짚, 산에서 나는 잎, 땔나무 등을 들 수가 있다. 본 연구에서 실험대상 연소시설 및 연소대상물의 종류는 표 1과 같다.

노천에서 이루어지는 농업잔재물 연소 시 배출되는 미세입자의 대상 시료는 볏짚을 실험대상으로 선정하였다. 농촌지역에서 볏짚은 자연적으로 논에서 장시간 동안 놓아두기 때문에 상당량의 수분을 머금고 있어서, 볏짚 연소 시에 불완전한 연소조건이 형성되게 된다. 농촌지역에서 식물연소 배출원 구성물질 성분비 작성을 위한 시료는 대부분 가을철에 추수한 후 장시간 동안 논에서 수분을 머금은 볏짚을 대상 시료로 하였다.

난방형태의 대표적 시설로는 아궁이 연소와 벽난로 연소를 실험대상으로 선정하였으며 아궁이에서 이루어지는 연소대상물로는 볏짚, 산에서 채취한 소나무와 참나무 잎, 소나무, 참나무 등 식물과 나무를 대상 시료로 하였다. 벽난로 연소는 소나무와 참나무를 연소 대상 시료로 선정하였다.

Table 1. Summary of combustion facility and biomass fuels.

Combustioan facility	Biomass fuels	
Field burning	8 samples of agricultural burning of rice straw	
Fireplace	Rice straw	13 samples of agricultural burning of rice straw
	Fallen leaves	6 samples of fallen leaves of pine tree and oak tree
	Pine tree	11 samples of wood burning of pine tree
	Oak tree	9 samples of wood burning of oak tree
Residential wood burning	Pine tree	12 samples of wood burning of pine tree
	Oak tree	10 samples of wood burning of oak tree

2. 2 미세입자 시료채취 및 분석방법

식물연소 시 배출되는 미세입자(PM_{2.5})의 시료채



Fig. 1. Sampling system for field burning.



Fig. 2. View of fireplace.

취를 위한 모든 실험은 실제 연소조건과 가장 유사한 조건에서 수행하기 위해서 연소가 이루어지는 현장에서 모든 실험을 진행하였다. 노천연소의 경우에는 실제 경작된 논바닥에 준비된 시료를 소량씩 연소 시키면서 연소 시에 발생하는 연기를 레시버식 후드에 모아서 직경 20cm 연결 관을 통하여 크기가 1 m 80 cm×1 m 80 cm×1 m 80 cm인 비닐로 밀폐시킨 챔버에 연결되도록 하였다. 이와 같은 장치는 연소 시 고온의 배가스 온도를 낮추어 주면서 대기 중에서 공기와 자연적인 반응이 일어나도록 일정한 체류시간을 유지하도록 하는 목적을 가지고 있다. 또한 다량의 수분을 함유한 볏짚의 연소 시에 발생하는 수분 응축으로 발생하는 문제점을 챔버의 크기를 충분히 크게 하였기 때문에 챔버내에서 응축이 발생하지 않았다. 챔버 내에서 시료 채취 장치를 이용하여 시료를 채취하는데, 시료채취시간은 분석에 필요한 적당량이 시료포집용 여과지에 채취될 때까지 시료를 채취하였다. 노천에서 볏짚연소 시 배출되는 미세입자의 시료 채취용 챔버는 그림 1과 같다.

난방용 연소시설인 아궁이와 벽난로의 경우에도 각각 실제 시설에서 실험을 수행하였으며, 각각의 연소배가스가 배출되는 굴뚝에서 배가스를 직경 20cm

연결 관을 통하여 크기가 1 m 80 cm×1 m 80 cm×1 m 80 cm인 비닐로 밀폐시킨 챔버에 연결되도록 하여, 챔버 내에서 시료 채취 장치를 이용하여 시료를 채취하였다. 노천연소 시료 채취 시 자연적으로 유입되는 배경공기에 의한 영향을 보정하기 위하여 시료채취와 동시에 배경공기 측정이 이루어졌으며 배경공기 시료채취시간은 최대 시료채취시간을 고려하여 30분 동안 공기를 포집하였으나 시료채취량이 많지 않고 또한 실험을 수행한 곳이 교외지역의 청정지역이기 때문인지 필터 blank 수준으로 나타났다. 실험에 이용한 아궁이와 벽난로의 형태는 그림 2, 3에 나타내었다.

시료채취용 챔버 내에서 미세입자를 채취하기 위한 장치는 이온, 원소, 탄소 측정을 위하여 3대의 싸이클론이 장착된 필터 팩을 이용하였다. 3대의 싸이클론을 이용한 동시 시료채취에 대한 채취효율의 비교를 위하여 예비실험을 수행하였으며 단시간에 대하여는 효율평가를 위한 도구가 적절하지 않아서 24시간 동시 시료채취를 통하여 예비실험을 수행하였으며 채취장치간 평균적인 유량차이는 6.7% (최대치: 11.7%)로 펌프 유량변동으로 인하여 유량차이를 나타내었다. 미세입자의 시료채취를 위하여 첫 번째 측



Fig. 3. View of residential wood burning.

정장치는 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 입자만을 분리 포집할 수 있는 싸이클론(cyclone) (URG-2000-30EH), 미세 입자의 중량 및 수용성 이온성분을 측정하기 위한 47mm 직경의 Teflon 여과지 ($1\mu\text{m}$ pore size; Gelman Science)와 입자에서 휘발되는 NO_3^- 를 포집하기 위한 47mm 직경의 나일론 여과지 ($1\mu\text{m}$ pore size; Gelman Science)를 넣을 수 있는 필터 팩(filter pack)과 펌프로 구성되며, 시료 채취 유량은 $16.7\text{L}/\text{min}$ 이었다. 미세입자의 원소 및 탄소성분을 측정하기 위한 시료 채취 장치는 두 번째 및 세 번째의 $2.5\mu\text{m}$ 절단 입경의 싸이클론과 여과 팩으로 구성되었다. 원소 성분 측정용 여과지는 수용성 이온성분과 같은 47mm 직경의 테프론 여과지 ($1\mu\text{m}$ pore size; Gelman Science)를 사용하였고, 탄소성분을 측정하기 위한 여과지는 여과지 자체에 포함된 유기물질을 사전에 고온 (650°C)에서 가열하여 탄소의 함량이 낮은 47mm 직경의 석영섬유여과지(Quartz fiber filter, Whatman사제)를 사용하였다. 원소 및 탄소성분을 측정하기 위한 시료 채취 유량은 수용성 이온성분과 같이 $16.7\text{L}/\text{min}$ 이었

다. 식물연소 시 배출되는 미세입자를 채취하기 위한 시료채취시간은 각각의 분석법에 따라서 필요한 먼지 포집량을 고려하여 경험적으로 결정하였으며, 배출원에 따라서 차이가 있지만 1~5분 동안 시료를 채취하였다. 벽난로에서 미세입자의 시료 채취 장치의 전체적인 모습은 그림 4와 같다.

식물연소 시 채취된 $\text{PM}_{2.5}$ 의 중량은 전자저울을 이용하여 무게를 측정하였고, 수용성 이온성분들(Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+)의 농도를 측정하기 위하여 이온크로마토그래피(IC, Dionex DX-1000)를 이용하였다. 미세입자의 원소분석은 먼지시료의 양이 매우 적기 때문에 분석감도, 분석가능원소 등 여러 가지를 고려하여 결정하여야 하며 본 연구에서는 ICP (Inductively Coupled Plasma spectrometry), PIXE (Proton Induced X-ray Emission), XRF (X-Ray Fluorescence) 등 여러 가지 분석방법에 대하여 분석감도와 정확도 등에 대하여 비교분석하여 가장 결과가 우수하게 나타난 XRF를 이용하여 원소분석을 수행하였다. 원소 성분은 미국 DRI (Desert Research Institute)에 의뢰하여 XRF (PANalytical Epsilon 5, NL)를 이용하여 분석하였다. DRI는 전체 원소들에 대하여 감도를 최대화하기 위하여 단일 분석 시 8개의 각기 다른 분석 조건을 이용하였으며, 원소농도의 검정은 thin film standard (Micromatter, Inc사제)를 사용하여 정확도를 평가하였다. 측정항목은 Na부터 U까지이며, 시료 중 검출한계 이상의 원소는 23개 원소들이고, 공시료 (blank filter) 분석에 의하여 검출된 원소의 농도를 보정한 후, 필터포집면적을 곱하고, 필터를 통과한 공기량으로 나누어 대기 중 농도를 구하였다. XRF를 이용하여 분석한 결과 최대로 검출된 성분은 Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Rb, Zr, Pb 등 23가지 성분이 검출한계 이상으로 검출되었다.

유기탄소와 원소탄소의 분석은 미국 리버사이드에 위치한 캘리포니아 주립대학 환경연구센터를 통해 이루어졌으며 NIOSH 5040 OC/EC 분석기 (Sunset Inc 사제)를 사용하였다. 유기탄소의 열분해로 인해 생성된 원소탄소의 양을 보정하기 위해서 빛 투과 성질을 응용한 TOT (Thermal/Optical Transmittance) 방법이 적용되었다. 시료를 분석하기 전에 먼저 OC/EC 분석기 내부를 500°C 이상으로 유지한 상태에서 헬륨을 10분간 흘리면서 시료가 분석되는 석영관 내부



Fig. 4. Sampling system of residential wood burning.

를 청소하였다. 실제 시료 분석에 앞서, 석영여과지를 섭씨 650°C에서 3시간 가열하여 모든 유기 불순물을 석영 여과지로부터 제거시켜 얻은 공시험용 석영 여과지(blank quartz filter)를 분석하여 분석기기 기본 성능을 점검하였다. 분석기의 검량선을 점검하기 위해서 3개의 공시험 석영 여과지에 수용액상의 sucrose를 각각 28.5 µg, 57.0 µg, 그리고 85.5 µg을 주입한 후 농도를 분석하여 분석기의 선형성을 점검하였다. 분석에 사용된 석영 여과지의 크기는 0.5 cm²이었다. 최종 유기탄소/원소탄소의 값은 단위 cm² 당 얻은 분석치를(µg/cm²) 실제 석영 여과지에 채취된 면적에 곱해서 얻었다.

탄소 성분 채취용 석영여과지는 사용 전에 여과지에 잔존하는 오염물질(탄소성분)을 제거하기 위하여 650°C에서 3시간 동안 전처리 한 후 페트리디쉬에 밀봉하여 사용 전까지 냉장 보관하였다. 이들 여과지 중 3장은 공시험용 여과지로 사용하였으며, 채취된 시료의 탄소성분 정량 시 공시험용 여과지의 값을 보정해 주었다. 시료채취가 끝난 필터는 육안 검사를 통하여 여과지의 손상여부를 확인한 후 페트리디쉬에 밀봉하여 분석을 실시할 때까지 냉장 보관하였다. 식물연소 시 발생하는 미세입자의 배출원 구성물질

Table 2. Summary of analytical method for chemical composition of fine particle.

Species	Analytical Method ^a
Mass	Gravimetric
Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe Ni, Cu, Zn, Br, Cd, Pb	XRF
NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NH ₄ ⁺ , Na ⁺ Cl ⁻ , K ⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺	IC
OC ^b , EC ^c	TOT

^aAnalytical methods are energy dispersive X-ray fluorescence (XRF), ion chromatography (IC), and thermal/optical transmittance (TOT)

^bOrganic carbon

^cElemental carbon

성분비 분석을 위한 분석항목과 분석방법을 요약하여 표 2에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 노천연소 시 미세입자 화학적특성

식물연소 시 발생하는 미세입자의 배출원 구성물질

Table 3. Field burning source profiles (weight percent of mass).

Species	Rice straw (n=8)	U.S. EPA (2006) (profile 423202.5) (field burning) (composite)
	PM _{2.5} ±Uncertainty	PM _{2.5} ±Uncertainty
Na	0.299±0.192	0.134±0.215
Mg	0.067±0.108	—
Al	0.110±0.015	0.313±0.247
Si	0.012±0.021	0.411±0.384
P	0.000±0.017	—
S	0.565±0.019	0.638±0.425
Cl	2.094±0.016	1.125±1.157
K	0.942±0.008	2.321±1.454
Ca	0.004±0.017	0.660±0.605
Ti	0.001±0.003	0.005±0.010
Cr	0.000±0.001	0.002±0.004
Mn	0.001±0.015	0.121±0.088
Fe	0.001±0.002	0.202±0.377
Ni	0.000±0.007	—
Cu	0.000±0.017	0.037±0.231
Zn	0.008±0.017	0.011±0.012
Br	0.024±0.003	0.020±0.024
Cd	0.002±0.010	—
Pb	0.005±0.004	0.012±0.024
Cl ⁻	3.556±0.355	—
NO ₃ ⁻	0.621±0.062	0.649±0.888
SO ₄ ²⁻	1.909±0.190	1.988±2.492
Na ⁺	0.079±0.007	—
NH ₄ ⁺	1.619±0.161	0.309±0.265
K ⁺	1.341±0.134	—
Mg ²⁺	0.013±0.001	—
Ca ²⁺	0.223±0.022	—
OC	66.573±4.307	31.62±8.7
EC	4.296±0.416	5.183±2.303

질 성분비 자료를 개발하기 위하여 노천에서 8개 시료의 벧짚을 이용하여 미세입자 질량, 이온, 원소, 원소탄소 및 유기탄소성분을 분석하였다. 노천연소에 대한 배출원 구성물질 성분비 결과는 표 3에 나타내었다.

표 3에서 노천에서 벧짚연소 시 미세입자의 주요 성분은 OC (66.573%) > EC (4.296%) > Cl⁻ (3.556%) > Cl (2.094%) > SO₄²⁻ (1.909%) > NH₄⁺ (1.619%) > K⁺ (1.341%) > K (0.942%) > NO₃⁻ (0.621%) > S (0.565%) > Na (0.299%) 이었으며, 탄소성분의 함량이 70% 수준으로 매우 높았다. 본 연구의 결과와 U.S. EPA (2006)의 자료를 비교해 보면, EC, SO₄²⁻, NO₃⁻의 성분비는 유사한 값을 나타낸 반면에 OC와 Cl의 비율

은 본 연구에서 두 배 정도 높게 나타났으며, K의 성분비는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다.

Sheesley *et al.* (2003)이 동남아시아에서 연구한 바에 따르면 벧짚연소 시 주요 구성성분은 OC (56.3%) > Cl⁻ (3.18%) > Cl (3.05%) > K (2.5%) > EC (1.1%) > SO₄²⁻ (0.35%)으로 본 연구결과에 비하여 OC와 EC의 비율이 상대적으로 약간 낮은 결과를 보였으며, K의 비율은 본 연구에 비하여 높은 값을 나타내었다. 이와 같이 타 연구와 본 연구의 결과가 차이를 나타낸 것은 벧짚의 연소조건의 차이가 중요한 요인 중의 하나로 사료된다. 본 연구에서 벧짚연소는 노천에서 수분을 많이 함유한 상태에서 연소하였기 때문에 불완전 연소되는 비율이 높았으며 이로 인하여 OC와 EC의 비율이 상대적으로 높게 나타난 것으로 보여진다.

3. 2 아궁이 연소 시 미세입자 화학적특성

아궁이 연소시설에 대하여 벧짚, 낙엽, 소나무, 참나무 등의 연료를 종류별로 총 39개 시료에 대하여 미세입자 질량, 이온, 원소, 원소탄소 및 유기탄소성분을 분석하였다. 아궁이 연소에 대한 배출원 구성물질 성분비 결과는 표 4에 나타내었다.

표 4에서 아궁이 연소시설에서 벧짚연소 시 미세입자의 주요성분은 OC (58.483%) > Cl⁻ (1.814%) > K⁺ (1.301%) > EC (1.194%) > Cl (0.979%) > K (0.884%) > SO₄²⁻ (0.699%) > NH₄⁺ (0.602%) > Ca²⁺ (0.348%) > Na (0.280%) > S (0.227%) 이었으며, 탄소성분의 함량이 60% 수준으로 매우 높았다. 벧짚의 노천연소에 비하여 아궁이 연소의 경우 상대적으로 탄소성분의 비율이 약 10% 낮은 비율을 나타내었는데, 이는 연소 시 온도가 노천연소에 비하여 높고 연소조건이 좋은 관계로 탄소의 함량이 낮아진 것으로 보인다.

아궁이 연소시설에서 낙엽연소 시 미세입자의 주요 성분은 OC (52.711%) > EC (18.409%) > K⁺ (1.809%) > K (1.734%) > Cl⁻ (1.548%) > SO₄²⁻ (1.300%) > Cl (1.248%) > NH₄⁺ (0.680%) > S (0.498%) 이었으며, 탄소성분의 함량이 전체의 70% 수준으로 매우 높았다. 낙엽연소의 경우 벧짚과는 달리 EC의 비율이 매우 높아졌으며, S와 SO₄²⁻의 비율이 벧짚에 비하여 약 2 배 이상 높은 비율을 나타내었다. 이는 낙엽성분에 의한 배출비율의 증가로 볼 수 있다.

아궁이 연소시설에서 소나무연소 시 미세입자의

Table 4. Fireplace source profiles (weight percent of mass).

Species	Rice straw (n=13)	Fallen leaves (n=6)	Pine tree (n=11)	Oak tree (n=9)
	PM _{2.5} ± Uncertainty			
Na	0.280 ± 0.475	0.239 ± 0.467	0.254 ± 0.863	0.125 ± 0.440
Mg	0.055 ± 0.275	0.085 ± 0.270	0.071 ± 0.505	0.038 ± 0.256
Al	0.054 ± 0.036	0.076 ± 0.036	0.088 ± 0.067	0.019 ± 0.034
Si	0.006 ± 0.052	0.006 ± 0.051	0.020 ± 0.096	0.008 ± 0.049
P	0.000 ± 0.044	0.000 ± 0.043	0.002 ± 0.080	0.000 ± 0.041
S	0.227 ± 0.044	0.498 ± 0.044	0.200 ± 0.080	0.201 ± 0.041
Cl	0.979 ± 0.028	1.248 ± 0.028	1.446 ± 0.051	0.359 ± 0.025
K	0.884 ± 0.019	1.734 ± 0.019	1.621 ± 0.034	0.518 ± 0.017
Ca	0.005 ± 0.043	0.011 ± 0.042	0.019 ± 0.080	0.006 ± 0.040
Ti	0.001 ± 0.008	0.001 ± 0.008	0.000 ± 0.015	0.000 ± 0.008
Cr	0.000 ± 0.003	0.002 ± 0.003	0.001 ± 0.005	0.001 ± 0.002
Mn	0.001 ± 0.039	0.002 ± 0.038	0.004 ± 0.072	0.002 ± 0.036
Fe	0.003 ± 0.004	0.007 ± 0.004	0.003 ± 0.008	0.003 ± 0.004
Ni	0.000 ± 0.018	0.000 ± 0.018	0.001 ± 0.033	0.001 ± 0.017
Cu	0.001 ± 0.044	0.004 ± 0.043	0.002 ± 0.080	0.001 ± 0.041
Zn	0.005 ± 0.044	0.017 ± 0.043	0.059 ± 0.080	0.004 ± 0.041
Br	0.005 ± 0.007	0.009 ± 0.007	0.010 ± 0.012	0.002 ± 0.006
Cd	0.003 ± 0.026	0.003 ± 0.025	0.008 ± 0.047	0.004 ± 0.024
Pb	0.004 ± 0.010	0.006 ± 0.010	0.011 ± 0.019	0.006 ± 0.010
Cl ⁻	1.814 ± 0.181	1.548 ± 0.154	1.167 ± 0.116	0.508 ± 0.050
NO ₃ ⁻	0.034 ± 0.003	0.194 ± 0.019	1.913 ± 0.191	0.121 ± 0.012
SO ₄ ²⁻	0.699 ± 0.069	1.300 ± 0.130	0.461 ± 0.046	0.476 ± 0.047
Na ⁺	0.178 ± 0.017	0.147 ± 0.014	0.171 ± 0.017	0.107 ± 0.010
NH ₄ ⁺	0.602 ± 0.060	0.680 ± 0.068	0.577 ± 0.057	0.391 ± 0.039
K ⁺	1.301 ± 0.130	1.809 ± 0.180	1.134 ± 0.113	0.524 ± 0.052
Mg ²⁺	0.019 ± 0.001	0.020 ± 0.002	0.005 ± 0.000	0.009 ± 0.000
Ca ²⁺	0.348 ± 0.034	0.234 ± 0.023	0.294 ± 0.029	0.403 ± 0.040
OC	58.483 ± 4.040	52.711 ± 3.664	52.471 ± 3.680	61.180 ± 4.030
EC	1.194 ± 0.508	18.409 ± 1.307	36.468 ± 2.501	2.729 ± 0.582

주요성분은 OC (52.471%) > EC (36.468%) > NO₃⁻ (1.913%) > K (1.621%) > Cl (1.446%) > K⁺ (1.134%) > NH₄⁺ (0.577%) > SO₄²⁻ (0.461%) 이었으며, 탄소성분의 함량이 전체의 약 90% 수준으로 가장 높은 비율을 나타내었다. 탄소성분 중 상대적으로 EC의 비율이 36%로 높은 비율을 나타내었다. 또한 NO₃⁻의 비율도 타 연소물과 달리 높게 나타나는 특징을 보였다. 아궁이 연소시설에서 참나무연소 시 미세먼지의 주요성분은 OC (61.180%) > EC (2.729%) > K⁺ (0.524%) > K (0.518%) > SO₄²⁻ (0.476%) > Ca²⁺ (0.403%) > NH₄⁺ (0.391%) 이었으며, 탄소의 비율은 전체의 64%로 몇짚과 같이 탄소의 비율이 가장 낮은 비율을 나타내었으며 특히 EC의 비율이 낮게 나타난 것이 특징이다. 다른 성분들의 배출비율도 다른 연소대상물과 달리 낮은 비율을 나타내었다.

표 5에 나타낸 바와 같이 CMB 수용모델 이용 시

Table 5. Emission sources and their marker elements (Chow, 1995; Huang et al., 1994).

Source	Elements
Soil	Si, Al, Ca, Fe, Mn, Ti, Sc
Motor vehicles	OC, EC, S, Sb, Br, Zn
Coal-fired power plants	S, OC, EC, As, Se
Oil-fired power plants	V, Ni, Mo
Refuse incineration	OC, Cl, Zn, Cu, V, Mn, Sn, Ag, In
Steel-making	Fe, Mn
Refineries	La, Ce, Na
Marine	Na, Cl
Limestone/concrete	Ca, Mg
Wood burning	K, OC, EC
Sulfide smelters	In

여러 가지 배출원의 특성을 나타내는 지표원소(marker element)의 결과에서 볼 수 있듯이 wood burning의 경우 OC, EC, K가 지표원소인데 (Chow, 1995; Huang

Table 6. Source profiles for residential wood burning (weight percent of mass).

Species	Pine tree (n=12)	Oak tree (n=10)	U.S. EPA (2006) (profile 3921) (Residential wood burning)
			PM _{2.5} ±Uncertainty
Na	0.467±0.840	0.612±1.279	0.032±0.060
Mg	0.243±0.491	0.229±0.739	0.019±0.019
Al	0.041±0.065	0.158±0.098	0.016±0.012
Si	0.052±0.093	0.034±0.141	0.001±0.026
P	0.033±0.078	0.000±0.117	0.004±0.008
S	0.284±0.079	1.230±0.120	0.080±0.010
Cl	0.273±0.047	0.900±0.072	0.150±0.027
K	0.652±0.033	3.034±0.051	0.373±0.040
Ca	0.038±0.077	0.060±0.116	0.002±0.018
Ti	0.007±0.015	0.001±0.022	0.000±0.034
Cr	0.002±0.005	0.002±0.007	0.000±0.006
Mn	0.029±0.070	0.001±0.105	0.000±0.003
Fe	0.009±0.007	0.006±0.011	0.000±0.005
Ni	0.014±0.032	0.002±0.049	0.000±0.002
Cu	0.033±0.078	0.009±0.117	0.000±0.003
Zn	0.052±0.078	0.021±0.117	0.051±0.006
Br	0.008±0.012	0.014±0.018	0.003±0.001
Cd	0.020±0.046	0.011±0.069	0.004±0.014
Pb	0.008±0.018	0.009±0.028	0.001±0.004
Cl ⁻	0.582±0.058	1.794±0.179	0.166±0.064
NO ₃ ⁻	0.924±0.092	1.749±0.174	0.152±0.039
SO ₄ ²⁻	0.960±0.096	3.488±0.348	0.227±0.055
Na ⁺	0.196±0.019	0.578±0.057	-
NH ₄ ⁺	0.721±0.072	1.837±0.183	-
K ⁺	0.928±0.092	3.746±0.374	-
Mg ²⁺	0.065±0.006	0.075±0.007	-
Ca ²⁺	0.560±0.056	1.054±0.105	-
OC	56.883±4.212	34.319±4.264	67.60±5.850
EC	24.993±2.179	38.612±3.000	17.46±1.589

et al., 1994), 본 연구에서도 아궁이에서 소나무와 참나무 연소 시 이들 원소들이 높은 비율을 나타내었다.

3.3 벽난로 연소 시 미세입자 화학적특성

벽난로 연소시설(화목보일러)에 대하여 소나무와 참나무 등의 연료의 종류별로 총 22개 시료에 대하여 미세먼지 질량, 이온, 원소, 원소탄소 및 유기탄소 성분을 분석하였다. 벽난로 연소에 대한 배출원 구성물질 성분비 결과는 표 6에 나타내었다.

벽난로 연소시설에서 소나무연소 시 미세입자의 주요성분은 OC (56.883%) > EC (24.993%) > SO₄²⁻ (0.960%) > K⁺ (0.928%) > NO₃⁻ (0.924%) > NH₄⁺ (0.721%) > K (0.652%) > Cl⁻ (0.582%) > Ca²⁺ (0.560%)

> Na (0.467%) 이었으며, 탄소성분의 함량이 전체의 80% 수준으로 높은 비율을 나타내었다. 탄소성분 중 상대적으로 EC의 비율이 25%로 비교적 높은 비율을 나타내었으며, 다른 연소시설과 달리 벽난로 연소의 경우 Na의 비율이 상대적으로 높은 비율을 나타낸 것이 특징이다.

벽난로 연소시설에서 참나무연소 시 미세입자의 주요성분은 OC (34.319%) > EC (38.612%) > K⁺ (3.746%) > SO₄²⁻ (3.488%) > K (3.034%) > NH₄⁺ (1.837%) > Cl⁻ (1.794%) > NO₃⁻ (1.749%) > S (1.230%) > Ca²⁺ (1.054%) 이었으며, 탄소의 비율은 전체의 73%로 비교적 높은 비율을 나타내었으며 다른 연소시설 및 연소대상물과 달리 EC의 비율이 가장 높게 나타난 것이 특징이라고 할 수 있다. 또한 K⁺와 SO₄²⁻의 비율도 3% 이상으로 가장 높은 비율을 나타내었고, NH₄⁺와 NO₃⁻의 비율도 다른 식물연소에 비하여 높은 비율을 나타내었다.

표 6에서 본 연구의 결과와 U.S. EPA (2006)의 자료를 비교해 보면 본 연구의 경우 EC의 성분비가 미국 벽난로 연소 시 (17.46%) 보다 높은 비율을 나타내었으나, OC의 경우에는 상대적으로 낮은 비율을 나타내었다. 또한 K, Cl, S, SO₄²⁻, NO₃⁻의 성분비가 전체적으로 미국의 벽난로 연소 시 보다 높은 비율을 나타내었다. 특히, 지표원소인 K의 경우 2~10배 높은 비율을 나타내었다.

표 7에서는 주요 성분들에 대하여 본 연구의 결과를 US. EPA 자료 이외의 연구결과와 비교하였는데, 소나무의 OC는 Fine et al. (2004)의 연구결과와 유사한 비율을 나타내었으나, 참나무의 OC는 다른 연구에 비하여 매우 낮은 비율을 나타내었다. 참나무의 EC는 타 연구에 비하여 매우 높은 비율을 나타내었다. 또한, 참나무의 Cl과 K의 비율은 외국의 연구결과에 비하여 약간 높은 수준이었고, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺의 비율은 전체적으로 본 연구결과가 높은 비율을 나타내었으며 특히, 참나무의 경우에 높은 비율을 보였다. 전체적으로 주요 성분의 배출구성비는 본 연구결과와 다른 지역의 연구결과와 많은 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 연구결과 간의 차이는 나무가 자라는 토양환경의 차이, 영양상태 등 여러 가지 요인이 작용할 수 있지만 무엇보다도 연소유형 (fire type)의 차이가 크기 때문에 나타난 결과로 보여진다.

Table 7. Comparison of major chemical composition for residential wood burning (weight percent of mass).

Species	This study		Fine <i>et al.</i> (2004)	Schmidl <i>et al.</i> (2008)	Fine <i>et al.</i> (2001)
	Fine	Oak	Oak	Oak	Oak
OC	56.9	34.3	55.1 ~ 55.4	48.1	87.5
EC	25.0	38.6	3.3 ~ 10.4	15.0	3.8
Cl	0.273	0.900	0.278 ~ 0.488	—	0.357
K	0.652	3.034	1.514 ~ 2.740	—	1.001
Cl ⁻	0.582	1.794	0.39 ~ 0.48	0.196	0.40
NO ₃ ⁻	0.924	1.749	0.38 ~ 0.52	0.134	0.40
SO ₄ ²⁻	0.960	3.488	0.97 ~ 1.37	0.178	0.42
NH ₄ ⁺	0.721	1.837	0.05 ~ 0.06	0.101	0.06

3. 4 배출원 구성물질 성분비의 CMB모델 적용

본 연구에서 개발한 식물연소 배출원의 배출원 구성물질 성분비를 CMB 수용모델에의 활용가능성을 평가하기 위하여 CMB모델 (version 8.2)을 이용하여 배출원 기여도를 추정하였다. 모델적용을 위한 연구 자료는 2010년 2월 1일 서울 구로지역에서 측정된 미세먼지 시료에 적용하였다. 비교 평가를 위하여 동일한 측정자료에 대하여 배출원별 구성물질 성분비 자료에 식물연소 배출원을 포함한 것과 포함하지 않은 것을 수행하여 얻은 결과를 비교 평가하여 표 8에 정리하여 나타내었다. 배출원 기여도 추정에 사용한 배출원별 구성물질 성분비 자료는 본 연구진이 자체적으로 개발한 값을 사용하였다.

표 8에 나타난 바와 같이 환경측정치에 대한 배출원 기여도를 추정한 결과 CMB 수용모델의 자체적인 진단요소인 R-square의 경우, 각각 0.97, 1.00으로 매우 양호한 값을 보였다. 두 번째 진단요소인 Chi-square의 경우, 각각 1.86, 0.17을 나타내어 적절한 범위의 값을 나타내었다. 세 번째 진단요소인 Percent mass는 각각 119, 99.8의 범위 값으로 적절한 값의 범위라고 할 수 있다. 모델수행결과 식물연소를 포함하여 기여도 추정한 결과 식물연소에 의한 기여도가 24.8 µg/m³으로 모델추정치 84.8 µg/m³에 29% 기여하는 주요 배출원임을 알 수 있다. 반면에 식물연소 배출원을 포함하지 않고 기여도를 추정한 결과 가솔린 자동차의 기여도가 2배 가량 증가하는 경향을 나타내었는데 Sheesley *et al.* (2007)에 의하면 식물연소 배출원 구성물질 성분비에서 OC와 EC가 차지하는 비율이 높기 때문에 식물연소 배출원이 제외될 경우 가솔린과 디젤 자동차의 기여도에 영향을 미치기 때문에 나타난 결과로 보여진다. 따라서 우리나라에서

Table 8. Source contributions obtained from CMB model.
(Unit: µg/m³)

Source type	Result (include biomass burning)	Result (except biomass burning)
Soil	1.40 ± 0.38	0.65 ± 0.77
Gasoline vehicles	6.86 ± 1.57	13.79 ± 5.03
Diesel vehicles	29.21 ± 4.94	31.65 ± 5.23
Municipal incinerator	0.63 ± 0.31	1.36 ± 3.61
Industrial Boiler	0.00 ± 0.00	2.27 ± 6.48
Marine aerosol	0.00 ± 0.00	0.07 ± 1.47
Biomass burning	24.8 ± 5.93	—
Coal-fired power plant	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00
Ammonium sulfate	13.99 ± 1.33	12.99 ± 3.04
Ammonium nitrate	7.90 ± 1.15	8.20 ± 1.23
Measured mass	71.2	71.2
Calculated mass	84.8	71.0
R-square	0.97	1.00
Chi-square	1.86	0.17
Percent mass	119	99.8

도시지역의 기여도 추정에 관한 모델수행 시 식물연소 배출원이 포함되어야 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 식물연소 시 배출되는 미세먼지(PM_{2.5})에 대한 배출원 구성물질 성분의 특성을 조사하였는데, 결과는 다음과 같다.

- 1) 벗짚의 노천연소 시 배출되는 미세먼지의 주요 구성성분은 OC (66.6%)와 EC (4.3%)를 합하여 탄소성분의 함량이 70% 로 매우 높은 수준을 보였으며, 원소성분으로는 Cl과 K의 비율이 높았고, 이는

- 성분은 Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , K^+ 의 비율이 높게 나타났다.
- 2) 아궁이 연소시설에서 벗짚연소 시 미세입자의 주요성분인 OC와 EC의 비율은 60% 수준으로 나타났다. EC의 비율은 상대적으로 낮았다(1.2%). 또한 아궁이에서 낙엽연소 시 미세입자의 배출특성은 S, K, SO_4^{2-} , K^+ 의 비율이 아궁이에서 다른 시료보다 높은 것이 특징이었다. 소나무 연소 시에는 EC와 NO_3^- 의 비율이 다른 시료보다 매우 높은 특성을 나타내었다. 반면에 참나무 연소 시 소나무에 비하여 EC의 비율이 매우 낮게 나타났다.
 - 3) 벽난로 연소시설에서 소나무나 참나무 연소 시 미세입자에 대한 탄소의 함량이 73~80%로 높은 비율을 나타내었다. 또한, EC의 경우에도 다른 연소 시설보다 25~39%로 높은 비율을 나타내었다.
 - 4) 식물연소에 대한 배출원 구성물질 성분비 자료를 모델에 적용한 결과 자체적인 진단결과가 적절한 수준을 나타내었으며, 모델결과도 실질적인 식물 연소 시기와 잘 일치되는 결과를 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원(R01-2007-000-20313-0)과 2012년도 한국교통대학교 교내 학술연구비의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- Abas, M.R.B., D.R. Oros, and B.R.T. Simoneit (2004) Biomass burning as the main source of organic aerosol particulate matter in Malaysia during haze episodes, *Chemosphere*, 55(8), 1089-1095.
- Allen, A.G. and A.H. Miguel (1995) Biomass burning in the Amazon-characterization of the ionic component of aerosols generated from flaming and smoldering rain-forest and savanna, *Environ. Sci. Technol.*, 29(2), 486-493.
- Cahoon, D.R., B.J. Stock, J.S. Levine, W.R. Cofer III, and C.C. Chung (1992) Evaluation of a technique for satellite-derived estimation of biomass burning, *J. of Geophysical Research*, 97(D4), 3805-3814.
- Chow, J.C. (1995) Measurement methods to determine compliance with ambient air quality standards for suspended particles, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 45, 320-382.
- Chowdhury, Z., M. Zheng, J.J. Schauer, R.J. Sheesley, L.G. Salmon, G.R. Cass, and A.G. Russell (2007) Speciation of ambient fire organic carbon particles and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in Indian cities, *J. Geophys. Res.*, 112, D15303, doi:10.1029/2007JD008386.
- Dennis, A., M. Fraser, S. Anderson, and D. Allen (2002) Air pollutant emissions associated with forest, grassland, and agricultural burning in Texas, *Atmos. Environ.*, 36(23), 3779-3792.
- Dibb, J.E., R.W. Talbot, S.I. Whitlow, M.C. Shipham, J. Winterle, J. McConnell, and R. Bales (1996) Biomass burning signatures in the atmosphere and snow at Summit, Greenland: An event on 5 August 1994, *Atmos. Environ.*, 30(4), 553-561.
- Fine, P.M., G.R. Cass, and B.R.T. Simoneit (2001) Chemical characterization of fine particle emissions from fire-place combustion of woods grown in the Northeastern United States, *Environ. Sci. Technol.*, 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, *Environ. Eng. Sci.*, 21(6), 705-724.
- Formenti, P., W. Elbert, W. Maenhaut, J. Haywood, S. Osborne, and M.O. Andreae (2003) Inorganic and carbonaceous aerosols during the Southern African Regional Science Initiative (SAFARI 2000) experiment: Chemical characteristics, physical properties, and emission data for smoke from African biomass burning, *J. Geophys. Res-Atmos.*, SAF24, 1-16.
- Gill, M. and P.H.R. Moore (2005) Fire situation in Australia, March 2005, <http://www.fao.org/docrep>.
- Gustafsson, O., M. Krusa, Z. Zencak, R.J. Sheesley, L. Granat, E. Engstrom, P.S. Praveen, P.S.P. Rao, C. Leck, and H. Rodhe (2009) Brown clouds over south Asia: biomass or fossil fuel combustion?, *Science*, 323, 495-498.
- Hedberg, E., A. Kristensson, M. Ohlsson, C. Johansson, P.-A. Johansson, E. Swietlicki, V. Vesely, U. Wideqvist, and R. Westerholm (2002) Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood syove, *Atmos. Environ.*, 36, 4823-4837.
- Hegg, D.A., S.G. Warren, T.C. Grenfell, S.J. Doherty, and A.D.

- Clarke (2010) Sources of light-absorbing aerosol in arctic snow and their seasonal variation, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 10923-10938.
- Hu, Y., M.T. Odman, M.E. Chang, W. Jackson, S. Lee, E.S. Edgerton, K. Baumann, and A.G. Russell (2008) Simulation of air quality impacts from prescribed fires on an urban area, *Environ. Sci. Technol.*, 42, 3676-3682.
- Huang, X., I. Olmez, N.K. Aras, and G.E. Gordon (1994) Emissions of trace elements from motor vehicles: potential marker elements and source composition profile, *Atmos. Environ.*, 28(8), 1385-1391.
- Kang, B.-W., H.S. Lee, and H.-K. Kim (2000) Source identification of fine particle (PM_{2.5}) in Chongju using a chemical mass balance model, *J. KOSAE*, 16(5), 477-485. (in Korean with English abstract)
- Kang, C.-M., B.-W. Kang, and H. S. Lee (2006) Source identification and trends in concentrations of gaseous and fine particulate principal species in Seoul, South Korea, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 56, 911-921.
- Lee, H.S., C.-M. Kang, B.-W. Kang, and S.-K. Lee (2005) A study on the PM_{2.5} source characteristics affecting the Seoul area using a chemical mass balance receptor model, *J. KOSAE*, 21(3), 329-341. (in Korean with English abstract)
- Nichol, J. (1997) Bioclimatic impacts of the 1994 smoke haze event in southeast Asia, *Atmos. Environ.*, 31(8), 1209-1219.
- Park, S.S. (2001) A combined methodology for estimating atmospheric aerosol sources using PM_{2.5} particles and PAH compounds, Doctoral dissertation, Kwangju Institute of Science and Technology, 115.
- Ramanathan, V., M.V. Ramana, G. Roberts, D. Kim, C. Corrihan, C. Chung, and D. Winker (2007) Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, *Nature*, 448, 575-578.
- Schauer, J.J., M.P. Fraser, G.R. Cass, and B.R.T. Simoneit (2002) Source reconciliation of atmospheric gas-phase and particle-phase pollutants during a severe photochemical smog episode, *Environ. Sci. Technol.*, 36, 3806-3814.
- Schmidl, C., I.L. Marr, A. Caseiro, P. Kotianova, A. Berner, H. Bauer, A. Kasper-Giebl, and H. Puxbaum (2008) Chemical characterisation of fine particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European alpine regions, *Atmos. Environ.*, 42, 126-141.
- Sheesley, R.J., J.J. Schauer, M. Zheng, and B. Wang (2007) Sensitivity of molecular marker-based CMB models to biomass burning source profiles, *Atmos. Environ.*, 41, 9050-9063.
- Sheesley, R.J., J.J. Schauer, Z. Chowdhury, G.R. Cass, and B.R.T. Simoneit (2003) Characterization of organic aerosols emitted from the combustion of biomass indigenous to South Asia, *J. Geophys. Res.* 108(D9), 4285, doi:10.1029/2002JD002981.
- Streets, D.G., K.F. Yarber, J.-H. Woo, and G.R. Carmichael (2003) Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions, *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4), 1099, doi:10.1029/2003GB002040.
- Stone, E.A., D.C. Snyder, R.J. Sheesley, A.P. Sullivan, R.J. Weber, and J.J. Schauer (2008) Source apportionment of fineorganic aerosol in Mexico city during the MILARGO experiment 2006, *Atmos. Chem. Phys.* 8, 1249-1259.
- Stone, E.A., J.J. Schauer, B.B. Pradhan, P.M. Dangol, G. Habib, C. Venkataraman, and V. Ramanathan (2010) Characterization of emissions from south Asian biofuels and application to source apportionment of carbonaceous aerosol in the Himalayas, *J. of Geophysical Research*, 115, doi:10.1029/2009JD011881.
- Swap, R., M. Garstang, S.A. Macko, P.D. Tyson, W. Maenhaut, P. Artaxo, P. Kallberg, and R. Talbot (1996) The long-range transport of southern African aerosols the tropical South Atlantic, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 101(D19), 23777-23791.
- Uherek, E. (2004) (Vegetation fire), Max Planck Institute for chemistry, Mainz, Accessed Mei 2004, <http://www.atmosphere.mpg.de/enid/238.html>.
- U.S. EPA (2006) SPECIATE 4.0 speciation database development documentation.
- WHO (2000) Vegetation fires, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs254/en/print.html>.
- Yamaseo, M.A., P. Artaxo, A.H. Miguel, and A.G. Allen (2000) Chemical composition of aerosol particles from direct emissions of vegetation fires in the Amazon basin: water-soluble species and trace elements, *Atmos. Environ.*, 34(10), 1641-1653.