

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 17, No. 4: December 2021 pp. 125-132

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2021.17.4.125>

분광학적 방법을 이용한 바이오매스 연소 배출 유기 입자의 화학적 특성

손 세 창¹⁾ · 박 태 언¹⁾ · 박 승 식^{1)*}

¹⁾전남대학교 환경에너지공학과

(2021년 11월 23일 투고, 2021년 12월 7일 수정, 2021년 12월 14일 게재확정)

Characterization of fine organic aerosols from biomass burning emissions using FTIR method

Se-Chang Son¹⁾ · Tae-Eon Park¹⁾ · Seungshik Park^{1)*}

¹⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea

(Received 23 Nov 2021; Revised 7 Dec 2021; Accepted 14 Dec 2021)

Abstract

Fresh PM_{2.5} smokes emitted from combustion of four biomass materials (pellet, palm fruit fiber (PFF), PKS, and sawdust) in a laboratory-controlled environment were characterized using an attenuated total reflectance-fourier transform infrared (ATR-FTIR) technique. In smoke samples emitted from combustion of pellets, PFF and PKS, which is being used as boiler fuels for greenhouses in rural areas, the organic carbon/elemental carbon (OC/EC) ratios in PM_{2.5} were very high (14.0-35.5), whereas in sawdust smoke samples they were significantly low (<4.0) due to the combustion method close to flaming combustion.

ATR-FTIR analysis showed that OH(3400-3250 cm⁻¹), CH₃(2958-2840 cm⁻¹), CH₂(2910 cm⁻¹ and 2850 cm⁻¹), ketone(1726-1697 cm⁻¹), C=C(1607-1606 cm⁻¹ and 1515-1514 cm⁻¹), lignin (1463-1462 cm⁻¹ and 1430-1428 cm⁻¹) and -NO₂(1360-1370 cm⁻¹) peaks were identified in all biomass burning (BB) smoke samples. However, additional peaks appeared depending on the type of biomass. Among the four types of biomass materials, an additional peak of the methylene group CH₃(2872-2870 cm⁻¹) appeared only in PFF and PKS smoke samples, and a peak of C=O(1685 cm⁻¹) was also confirmed. And in the case of PKS smoke samples, a peak of aromatic C=C(1593 cm⁻¹ and 1476 cm⁻¹) that did not appear in other BB samples was also observed. This indicates that the molecular structure of organic compounds emitted during BB differs depending on the type of biomass materials. The results of this study are expected to provide valuable information to more specifically reveal the effect of BB on PM_{2.5} collected in the atmospheric environment.

Keywords: Biomass materials, Fresh PM_{2.5} smokes, ATR-FTIR, OC/EC, Organic molecular structures

*Corresponding author.

Tel : +82-62-530-1863

Email : park8162@chonnam.ac.kr

1. 서 론

바이오매스(biomass) 연소로 배출되는 에어로졸 입자는 자연적 또는 인위적 원인으로 배출되며, 이중 인위적인 배출 원으로는 요리용 목재 연소, 볏짚과 같은 농업폐기물 소각, 그리고 펠릿(pellet)과 톱밥(sawdust) 등과 같은 바이오 연료를 통한 주거지의 난방 등이 있다. 바이오매스 연소 배출 입자는 직접적으로 태양복사에너지를 흡수 또는 산란하거나 간접적으로 구름응결핵(cloud condensation nuclei, CCN)으로 작용하여 지구 기후 변화에 영향을 미친다(Linuma et al., 2007).

바이오매스 연소에 의하여 생성된 유기 에어로졸 입자는 주로 다양한 극성, 작용기를 특징으로 하는 바이오폴리머(biopolymers), 리그닌(lignin), 셀룰로오스(cellulose) 및 헤미셀룰로오스(hemicellulose)의 분해 또는 열분해 생성물로 구성되어 있으며(Popovicheva et al., 2019), 염기성 당, 지방산 및 알데하이드(aldehyde)의 불완전 산화에 의해 배출 입자의 생성에 영향을 미친다(Lammers et al., 2009). 목재(wood)는 연소 시 온도가 증가할수록 다환 방향족 탄화수소화합물과 산(acid)을 방출하고, 낮은 온도에서는 산소화된 페놀화합물과 당유도체를 생성하며(Fitzpatrick et al., 2007), 비-산성 카르보닐기(carbonyl groups)는 바이오매스 연소 시 생성 가능성이 큰 것으로 알려져 있다(Liu et al., 2009). 이전의 연구에 의하면, 바이오매스 연소로부터 배출된 유기탄소(organic carbon, OC) 및 원소탄소(elemental carbon, EC)는 지구 대기에 존재하는 OC와 EC의 39%와 85%를 차지하는 것으로 추정했으며(Andreae, 1991), 바이오매스 연소 실험을 통한 PM_{2.5}의 화학적 성분 분석 결과에 의하면 바이오매스의 종류와 연소 온도에 따라 다르나 OC와 EC는 각각 PM_{2.5}의 46.5~58.3%와 1.1~7.5%를 차지하는 것으로 나타났다(Sheesiey et al., 2003; Park and Yu, 2016).

현재까지 바이오매스 연소로 배출되는 에어로졸의 특성을 밝히기 위한 연구가 다양한 방법으로 수행되었다(Sheesiey et al., 2003; Linuma et al., 2007; Park and Yu, 2016; Park et al., 2020; Popovicheva

et al., 2020). 특히, 푸리에 변환 적외선(fourier transform infrared, FTIR) 분광법을 이용하는 방법은 복잡한 유기 물질로 구성된 에어로졸 특성, 거동 및 오염원을 조사하는데 매우 유리하다(Popovicheva et al., 2020). 이들은 러시아 모스크바에서 봄철에 PM₁₀을 포집한 후 FTIR 분석과 주성분 분석(principal component analysis)을 수행하여, 바이오매스 연소 기간에 알켄(alkenes), 에스테르(esters), 카르복실산(carboxylic acid), 알데하이드 및 C=C의 존재를 확인했다. 또한, Popovicheva et al. (2019)은 러시아의 버려진 토탄 광산에서 화재가 발생한 기간에 PM₁₀을 포집하여 FTIR을 분석했으며, 화재 발생 시 주로 연소된 바이오매스의 종류에 따라 PM₁₀을 구성하는 유기 물질이 다르게 나타났다. 가문비나무 및 소나무가 연소할 때 배출된 입자에서는 지방족, 방향족, 탄산염, 방향족 질소화합물의 피크가 관찰되었다. 또한, 풀의 연소 시에는 배출되는 연기의 밀도에 따라 피크가 달랐으며, 약한 연기가 발생할 때는 질소 함유 화합물이 강하게 나타났으며, 연기가 강할 때는 carboxyl acid가 우세하였다. Fan et al. (2016)은 볏짚, 옥수수 짚, 소나무 가지 및 석탄을 연소시켜 PM_{2.5}에 존재하는 수용성 유기물질인 humic-like substances (HULIS)를 FTIR로 분석했다. 바이오매스 연소로부터 배출된 HULIS에서 리그닌(lignin) 유사 물질 및 탄수화물 구조가 많았고, 반면에 석탄 연소로 배출된 HULIS는 방향족 구조가 더 많이 존재했다.

우리나라는 가을철에서 봄철까지 교외 지역에서 농업폐기물의 불법 소각과 바이오 연료를 이용한 난방 등으로 주변 대기질을 악화시키고 있다. 바이오매스는 보통 연기연소(smoldering combustion) 방식으로 연소가 이루어지므로 화석 연료를 이용하는 고온 연소 방식의 내연기관보다 입자 내 OC/EC 비가 훨씬 높은 상태로 배출된다. 즉, 탄소 성분의 대부분이 유기물질로 이루어져 있다. 대기 중 에어로졸 입자 내 바이오매스 연소에 의한 영향을 확인하고 정량화하기 위해 일반적으로 OC/EC 비, K⁺, levoglucosan 등의 추적자 성분을 활용하고 있다(Jo et al., 2018; Liang et al., 2020; Son et al., 2021). 그러나 이와 같은 방법들은 관측된 바이오매스 연소가 어떤 종류의 바이오매스 물질의 연소에 의해 이루어졌는지는 확인하기 어려웠

다. 따라서 본 연구에서는 시골 지역에서 바이오 연료로 많이 사용되는 펠릿, palm fruit fiber (PFF), PKS 및 톱밥을 연소시켜 채취한 PM_{2.5}의 탄소 성분(OC 및 EC) 감쇄 전반사 (attenuated total reflectance, ATR) FTIR 분석을 수행하여 바이오매스 물질의 차이에 의한 연소 배출 유기입자의 특성을 조사하였다.

2. 연구 방법

2.1 바이오매스 연소 배출 PM_{2.5} 시료 채취

그림 1은 바이오매스의 연소 배출 PM_{2.5}의 샘플링 시스템의 개략도이다. 그림 2는 연소 실험에 사용한 네 종류의 바이오매스와 연기 배출 후 채취된 PM_{2.5}의 모습을 보여준다. 네 종류의 바이오매스 중 펠릿, PFF 및 PKS는 농촌 지역의 비닐 온실 가정용 보일러를 제조하는 소규모 회사에서 공급 받았으며, 톱밥은 실내 난방을 위해 사용 중인 목공소에서 수집하였다. 바이오매스 연소 실험에 사용한 연소로는 세로 0.40 m, 가로 0.25 m, 높이 0.25 m 크기의 스테인리스 스틸 재질로 만들어졌으며, 단열에 유리하도록 내부를 유리섬유로 처리했다. 연소로 내부의 온도는 열선을 이용하여 조절이 가능하며, 열선은 온도 제어기와 연결되어 연소로 내부 온도가 목표 온도의 ±20°C에 도달하면 온도 제어기는 열선을 자동으로 종료시켜 내부 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 되어있다. 또한, 연소 실험 중 연소로 내부에 온도계를 연결하여 실시간으로 연소로 내부 온도를 확인했다. 각 바이오매스의 연소는 300°C의 온도에서 시작하였으며, 화염의 발생을 최소한으로 하는 연기 연소로 수행하였다. 그러나 톱밥의 경우는 연소성이 매우 뛰어나 연기 발생 후 그 열기에 의해 쉽게 화염이 발생하여 연소 배출 연기 입자의 색깔이 다른 세 종류의 연기 입자와 달리 약간 검은색을 띄었다(그림 2). 톱밥의 경우는 목공소에서 태우는 실제 상황에 가깝게 연소 환경을 유지하도록 하였다. 연소로 내부에서 연소되어 배출된 연기 입자는 연소로 후면에 위치한 0.15 m 직경의 덕트를 통하여 약 10 m 떨어진 세로 1.5 m, 가로 0.7 m, 높이 1.2 m 크기의 희석 챔버로 이송된다. 바이오매스 연소 배출 입자

는 희석 챔버에서 실내 공기로 희석하여 대기로 배출한 후 47 mm 직경의 석영 필터(Pallflex Tissu-quartz 2500 QAO, Whatman)가 장착된 두 대의 사이클론 샘플러(URG-2000-30EH, 16.7 L/min)에 의하여 약 10~15분 동안 채취되었다. 시료 채취는 동일한 바이오매스 및 온도 조건하에서 3회 반복 수행하였다. 두 대의 샘플러 중 한 대는 탄소 디뉴더(Sunset Lab., OR, USA)를 설치하였으며, 채취한 시료는 OC와 EC 성분을 분석하였다. 그리고 다른 한 대의 샘플러에서 채취한 시료는 ATR-FTIR 분석에 사용하였다.

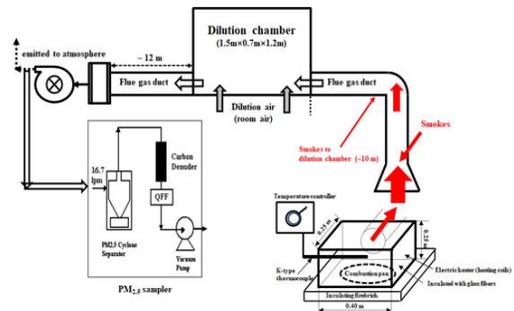


Figure 1. A schematic diagram of sampling facility for biomass burning smokes.

2.2 PM_{2.5} 질량 농도 및 탄소성분 분석

PM_{2.5} 질량 농도는 바이오매스 연소 실험에 사용한 석영 필터의 시료 채취 전과 후의 무게 차이를 이용하여 산정하였으며, 무게는 마이크로밸런스(CP2P-F, Satorius, Germany)로 칭량하였다. 탄소성분 중 OC 및 EC 분석은 시료가 포함된 석영 필터를 0.28 cm² 크기로 잘라 OC/EC 분석기(OC/EC Carbon Aerosol Analyser, Sunset Laboratory, USA)로 분석하였으며, OC/EC의 분석기는 NIOSH Method 5040 (National Occupational Safety and Health) 온도 프로토콜 기반의 열-광학 투과법(Thermal-Optical Transmittance)으로 분석된다. OC 및 EC 성분의 최종 농도는 공 시료의 배경 농도를 보정하여 산정하였다.

2.3 ATR-FTIR 분석

시료의 ATR-FTIR 분석은 FTIR (FT-IR/NIR Spectrometer Frontier, PerkinElmer, USA)을 사용하였다.

시료에 적외선 빔을 직접적으로 투과시켜 분석하는 일반적인 FTIR과 달리 ATR-FTIR은 적외선 빔이 기기 내부에 설치된 ATR crystal로 전반사 된 후 시료 표면과 접촉한 빛을 측정하여 생기는 변화로 흡수 스펙트럼을 얻는다. 분석에 사용한 FTIR의 ATR crystal과 detector는 각각 Diamond/KRS-5 crystal과 deuterated triglycine sulfate (DTGS) detector이며, beam splitter의 재질은 KBr로 구성되었고, 광원은 Air cooled ceramic를 사용한다. 또한, 측정 파장 및 해상도는 각각 4000~450 cm^{-1} , 4 cm^{-1} 로 설정하여 분석을 수행했다. 분석은 탄소 디뉴터를 설치하지 않은 샘플러로 시료를 포집한 석영 필터를 사용했으며, 분석 전 수분을 충분히 제거하였다. ATR-FTIR에서 측정된 흡수 스펙트럼은 PerkinElmer Spectrum 프로그램으로 출력한 후 투과율을 정규화 하여 스펙트럼의 특성을 분석했다.



Figure 2. Photographs of raw biomass materials and their smoke samples. Four different biomass materials used in this study are (a) pellet, (b) palm fruit fiber (PFF), (c) PKS, and (d) sawdust.

3. 결과 및 고찰

3.1 바이오매스 연소 배출 $\text{PM}_{2.5}$ 의 탄소 성분 특성

펠릿과 PFF의 연소 배출 $\text{PM}_{2.5}$ 내 OC와 EC의 농도는 각각 3.11 ± 1.22 와 $0.23 \pm 0.11 \text{ mgC/m}^3$, 19.24 ± 0.45 와 $0.69 \pm 0.05 \text{ mgC/m}^3$ 이었다. 이들의 OC/EC는 각각 14.0 ± 0.8 와 28.1 ± 1.4 이었다. 또한 PKS와 톱밥의 연소 배출 $\text{PM}_{2.5}$ 내 OC와 EC의 농도는 각각 37.87 ± 0.79 와 $1.08 \pm 0.13 \text{ mgC/m}^3$, 16.29 ± 1.46 와 $4.30 \pm 1.19 \text{ mgC/m}^3$ 이었다. 이들의 OC/EC는 각각 35.514 ± 4.0 과 3.9 ± 0.8 이었다. 톱밥 연기 시료를 제외한 다른 3종류의 시료에서는 매우 높은 OC/EC 비(14.0 - 35.5)를 보여줌에 이들 세물은 확실하게 화염 연소보다는 연기 연소를 통해 입자들이 배출된 것으로 볼 수 있다. 그림 2의 이들의 채취된 연기 시료들의 색깔을 보더라도 노란색에 가까운 필터 색깔을 보여주었다. 그러나 톱밥 연소 시료의 경우는 원료의 상태가 매우 얇고 분말 형태(그림 2 원료 모양 참조)로 되어 있어서 연소 방식의 제어가 매우 어려웠다. 즉, 실험 시 연소 형태가 연기 연소보다는 연기-화염 연소에 가까워(목공소에서 태우는 방법) 채취된 시료들의 색깔 역시 노란색보다는 검정색이었다. 이와 같은 연소 조건은 톱밥 연소 시료의 OC/EC 비를 다른 바이오매스 연소 시료들보다 매우 낮게 유지시켰을 것이다.

3.2 ATR-FTIR 분석을 통한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 화학적 특성

표1과 그림3은 펠릿, PFF, PKS 및 톱밥을 각각 $\sim 300 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 연소 시킨 후 생성된 $\text{PM}_{2.5}$ 를 채취하여 ATR-FTIR로 분석한 결과이다. 또한, 그림 3에 바이오매스 연소 입자와 비교를 위해 광주 도심지역에서 채취한 $\text{PM}_{2.5}$ 의 ATR-FTIR 분석 결과(그림 3의 연두색 곡선)도 포함시켰다. 대기환경 $\text{PM}_{2.5}$ 의 ATR-FTIR 분석 결과는 이전의 연구(Son et al., 2020)에 자세히 기술되었으며, 분석 결과를 간단히 설명하면 $\text{PM}_{2.5}$ 의 구성 성분 중 큰 비중을 차지하는 수용성 이온 성분인 NH_4^+ (3213 - 3191 , 3048 - 3040 , 1425 - 1417 cm^{-1}), NO_3^- (1356 - 1331 cm^{-1}) 및 SO_4^{2-} (672 - 599 cm^{-1})의 피크가 강하게 보이며, $\text{PM}_{2.5}$ 에 영향을 미치는 오염원의 특성에 따라서 C-H(2910 , 2850 cm^{-1}), C=O(1770 - 1700 cm^{-1}) 피크도 나타난다. 그림

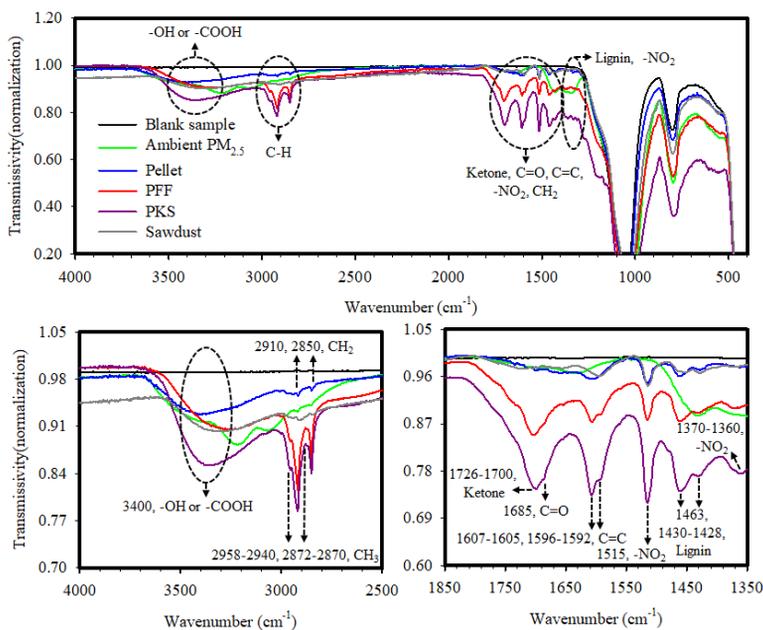


Figure 3. FTIR spectra of PM_{2.5} collected by four types of biomass burning. Black line indicates spectra for blank quartz filter. Yellow-green, blue, red, purple, and dark grey lines represent FTIR spectra for ambient PM_{2.5} sample, pellet, PFF, PKS, and sawdust, respectively.

Table 1. FTIR spectra of PM_{2.5} collected from combustion of four types of biomass materials.

Functional groups		Appearance spectra (cm ⁻¹)			
		Pellet	PFF	PKS	Sawdust
O-H	Alcohol or carboxylic acid	3400	3250	3350	3300
CH ₃	Methylene groups	2958	2955, 2870	2955, 2872	2940
CH ₂	Methylene groups	2910, 2850	2910, 2850	2910, 2850	2910, 2850
R ₁ -(C=O)-R ₂	Ketone	1697	1703	1700	1726
C=O	Aldehydes	-	1685	1685	-
C=C	Aromatic compounds	1605, 1514	1607, 1592, 1515	1605, 1593, 1515, 1476	1596, 1514
C-H asymmetric vibration	Lignin	1463	1463	1463	1462
Aromatic ring skeleton vibration	Lignin	1428	1430	1429	1428
-NO ₂	Nitroaromatic compounds	1362	1370	1360	1368

3에서 제시한 대기환경 PM_{2.5}의 FTIR 결과도 이전의 연구와 동일하게 NH₄⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, C-H 및 C=O의 피크가 확인되었다.

네 종류의 바이오매스 연소에서 채취한 PM_{2.5}의 ATR-FTIR 분석 결과는 일반적인 대기환경의 결과와 매우 달랐다. 3400-3250 cm⁻¹에서 나타난 피크는 alcohol(-OH) 및 carboxyl acid(-COOH)의 O-H이다. Methylene groups의 피크는 두 파장에서 나타나며 2958-2940 cm⁻¹와 2872-2870 cm⁻¹의 피크는 CH₃이고, 2910 cm⁻¹와 2850 cm⁻¹은 CH₂이다(Palen et al., 1992). CH₃의 피크 중 2958-2940 cm⁻¹의 피크는 PFF와 PKS에서만 나타났으며, 펠릿과 톱밥은 각각 2958 cm⁻¹와 2940 cm⁻¹의 피크만 존재하였다. CH₂ 피크는 모든 바이오매스 연소 시료에서 나타났다. Methyl 및 methylene groups는 식물의 표면에 존재하는 왁스 성분(cuticle)의 연소로 생성되며(Medeiros et al., 2006), 산불의 영향이 강한 기간에 포집한 대기 에어로졸에서 2910 cm⁻¹과 2850 cm⁻¹의 피크가 존재한다고 하였다(Corrigan et al., 2013). 1726-1697 cm⁻¹의 파장에서 나타난 피크는 ketone으로(Hawkins et al., 2010; Kubovský et al., 2020), 바이오매스 연소의 영향을 받은 PM₁에서 ketone의 농도와 분율이 증가했다(Hawkins et al., 2010). 1685 cm⁻¹ 피크는 aldehydes의 C=O(Popovicheva et al., 2019)로 PFF 및 PKS에서만 나타났다. 1607-1606 cm⁻¹ 피크는 방향족 C=C이며(Popovicheva et al., 2019), 1596-1592 cm⁻¹, 1514-1514 cm⁻¹ 및 1476 cm⁻¹에서도 피크를 보인다(Fan et al., 2016; Ruggeri and Takahama, 2016). Fan et al. (2016)의 연구에서 바이오매스 연소 연기의 PM_{2.5}에 존재하는 HULIS의 FTIR 분석 결과에 의하면 방향족 C=C는 일반적인 대기환경에서는 나타나지 않아 바이오매스 연소의 추적자로 사용될 수 있다고 보고되었다(Fan et al., 2016). 본 연구에서는 바이오매스의 종류에 따라서 방향족 C=C 피크가 다르게 나타났다. PKS는 네 종류의 방향족 피크가 모두 나타난 반면에, PFF는 세 종류의 피크(1607-1606 cm⁻¹, 1596-1592 cm⁻¹ 및 1514-1514 cm⁻¹)만 확인되었다. 그리고 펠릿은 1605 cm⁻¹과 1514-1514 cm⁻¹ 피크만 보였으며, 톱밥은 1596 cm⁻¹과 1514-1514 cm⁻¹에서 피크가 확인되었다. 1463-1462 cm⁻¹ 피크는 C-H 비대칭 진동에 의한 것이며, 1430-1426 cm⁻¹은 방향족 고리의 골격

진동으로 나타난다(Lee et al., 2020). 1370-1360 cm⁻¹의 피크는 방향족 질소화합물(nitroaromatic compound)의 -NO₂이다(Dekermenjian et al., 1999; Li et al., 2020). 방향족 질소화합물은 갈색탄소의 발색단 역할을 하는 인자이며(Lin et al., 2017), 바이오매스 연소는 갈색탄소 입자의 주요한 생성원으로 알려져 있다(Chakrabarty et al., 2010; Chen and Bond, 2010). 본 연구에서 나타난 피크들은 리그닌(lignin)의 FTIR 결과와 비슷하며(Boeriu et al., 2004; Lee et al., 2020), 리그닌에서 나타나지 않은 방향족 질소화합물의 -NO₂ 피크가 추가적으로 나타났다. 특히, 리그닌의 열분해는 바이오매스 연소에서 생성되는 유기 에어로졸의 주요 생성원으로 보고되고 있다(Sheesley and Schauer, 2003; Linuma et al., 2007).

바이오매스 연소 배출 입자에서는 대기환경에서 강하게 보인 NH₄⁺, NO₃⁻ 및 SO₄²⁻의 피크가 존재하지 않았다. 반면에 대기환경에서 약하게 나타난 methylene groups의 피크가 강했으며, 대기환경의 분석 결과보다 더 다양한 유기물질이 나타나 바이오매스 연소 배출 입자를 구성하는 주요 화학 성분이 유기물질임을 보여준다. 또한, 바이오매스 종류에 따라 다르게 나타나는 피크는 바이오매스의 종류마다 연소 시 배출되는 화학 성분이 다르다는 것을 의미한다.

4. 요약 및 결론

연구에서는 농촌지역 및 목공소에서 온실 및 난방용 연료로 사용 중인 네 종류의 바이오매스(펠릿, PFF, PKS 및 톱밥)를 실험실 환경에서 연기 또는 연기-화염 방식으로 연소시킨 후 발생하는 PM_{2.5} 시료를 채취하여 이들의 탄소 성분 특성과 분광학적 방법으로 화학적 특성을 조사하였다. 온실용 보일러 연료로 사용 중인 펠릿, PFF 및 PKS의 연기 시료에서는 PM_{2.5} 내 OC/EC 비(14.0-35.5)가 매우 높게 조사된 반면에, 톱밥 연기 시료에서는 화염 연소에 가까운 연소 방식으로 인해 상당히 낮은 OC/EC 비(<4.0)가 측정되었다.

ATR-FTIR 분석에서는 모든 바이오매스 연기 시료에서 O-H(3400-3250 cm⁻¹), CH₃(2958-2840 cm⁻¹), CH₂(2910 cm⁻¹, 2850 cm⁻¹), R₁-(C=O)-R₂(1726-1697

cm⁻¹), C=C(1607-1606 cm⁻¹, 1515-1514 cm⁻¹), 리그닌(1463-1462 cm⁻¹, 1430-1428 cm⁻¹) 및 -NO₂(1360-1370 cm⁻¹) 피크가 존재했으나, 바이오매스의 종류에 따라서 추가적인 피크들이 나타났다. 네 종류의 바이오매스 중 PFF와 PKS에서만 methylene group인 CH₃(2872-2870 cm⁻¹)의 추가적인 피크가 나타났으며, C=O(1685 cm⁻¹)의 피크도 확인되었다. 그리고 PKS의 경우, 다른 바이오매스에서 나타나지 않은 방향족 C=C(1593 cm⁻¹, 1476 cm⁻¹)의 피크도 보였다. 이는 바이오매스의 종류에 따라서 연소 시 배출되는 유기 성분의 분자 구조가 다르다는 것을 보여준다. 이와 같은 연구 결과는 향후 일반 대기 환경에서 관측되는 바이오매스 연소의 영향 유무 또는 연기 내 유기물질들의 화학적 특성을 파악하는데 연구의 의의가 크다고 할 수 있다. 또한 제한된 실험실 환경과 대기 환경에서 이루어지는 바이오매스의 연소 조건과 두 환경에서 채취되는 바이오매스 연기 시료(fresh vs. aged)의 물리·화학적 특성이 다를 수 있으므로, 본 연구에서 얻은 결과는 실제 대기 환경에서 물리·화학적 변환이 수반된 바이오매스 연소 시료의 분석 결과와 차이가 있을 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2020년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-기후변화대응 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M1A2A2103953).

참고문헌

- Andreae, M.O. (1991). Biomass burning: Its history, use and distribution and its impact on environmental quality and global climate, *Environmental Sciences*, 24(3), 3-21.
- Boeriu, C.G., Bravo, D., Gosselink, R.J.A., and Dam, J.E.G.V. (2004). Characterization of structure dependent functional properties of lignin with infrared spectroscopy, *Industrial Crops and Products*, 20(2), 205-218.
- Chakrabarty, R.K., Moosmüller, H., Chen, L.-W.A., Lewis, K., Arnott, W.P., Mazzoleni, C., Dubey, M.K., Wold, C.E., Hao, W.M., and Kreidenweis, M. (2010). Brown carbon in tar balls from smoldering biomass combustion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 6363-6370.
- Chen, Y., and Bond, T.C. (2010). Light absorption by organic carbon from wood combustion, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1773-1787.
- Corrigan, A.L., Russell, L.M., Takahama, S., Aijala, M., Ehn, M., Junninen, H., Rinne, J., Petaja, T., Kulmala, M., and Vogel, A.L. (2013). Biogenic and biomass burning organic aerosol in a boreal forest at Hyytiälä, Finland, during HUMPPA-COPEC 2010, *Atmospheric Chemistry Physics*, 13, 12233-12256.
- Dekermenjian, M., Allen, D.T., Atkinson, R., and Arey, J. (1999). FTIR analysis of aerosol formed in the photo-oxidation of naphthalene, *Aerosol Science and Technology*, 30(3), 273-279.
- Fan, X., Wei, S., Zhu, M., Song, J., and Peng, P. (2016). Comprehensive characterization of humic-like substances in smoke PM_{2.5} emitted from the combustion of biomass materials and fossil fuels, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 13321-13340.
- Fitzpatrick, E.M., Ross, A.B., Bates, J., Andrews, G., Jones, J.M., Phylaktou, H., Pourkashanian, M., and Williams, A. (2007). Emission of oxygenated species from the combustion of pine wood and its relation to soot formation, *Process Safety and Environmental Protection*, 58(5), 430-440.
- Hawkins, L.N., and Russell, L.M. (2010). Oxidation of ketone groups in transported biomass burning aerosol from the 2008 northern California lightning series fires, *Atmospheric Environmental*, 44, 4142-4154.
- Jo, G., Kim, D., and Song, M. (2018). PM_{2.5} concentration and chemical compositions in Jeonju from 2017 to 2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 876-888.
- Kubovský, I., Kačíková, D., and Kačík, D. (2020). Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification, *Polymers*, 12(2), 485.
- Lammers, K., Arbuckle-Keil, G., and Dighton, J. (2009). FT-IR study of the changes in carbohydrate

- chemistry of three new jersey pine barrens leaf litters during simulated control burning, *Soil Biology & Biochemistry*, 41(2), 340-347.
- Lee, H., Seo, H.I., Kim, S., Youe, W.-J., Lee, T.J., and Park, M.-J. (2020) Isolation and characterization of lignin using coagulant treatment in black liquid, *Journal of Korea Technical Association of the Pulp and Paper industry*, 52(1), 20-30.
- Li, C., He, Q., Fang, Z., Brown, S.S., Laskin, A., Cohen, S.R., and Rudich, Y. (2020). Laboratory insights into the diel cycle of optical and chemical transformations of biomass burning brown carbon aerosols, *Environmental Science & Technology*, 24, 11827-11837.
- Liang, L., Engling, G., Cheng, Y., Liu, X., Du, Z., Ma, Q., Zhang, X., Sun, J., Xu, W., Liu, C., Zhang, G., and Xu, H. (2020). Biomass burning impacts on ambient aerosol at a background site in east China: Insights from a yearlong study, *Atmospheric Research*, 231, 104660.
- Lin, P., Bluvshstein, N., Rudich, Y., Nizkorodov, S., Laskin, J., and Laskin, A. (2017). Molecular chemistry of atmospheric brown carbon inferred from a nationwide biomass burning event, *Environmental Science & Technology*, 51(20), 11561-11570.
- Linuma, Y., Brüggemann, E., Gnauk, T., Müller, K., Andreae, M.O., Helas, G., Parmar, R., and Herrmann, H. (2007). Source characterization of biomass burning particles: The combustion of selected European conifers, African hardwood, savanna grass, and German and Indonesian peat, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D8), D08209.
- Liu, S., Takahama, S., Russell, L.M., Gilardoni, S., and Baumgardner, D. (2009). Oxygenated organic functional groups and their sources in single and submicron organic particles in MILAGRO 2006 campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(18), 6849-6863.
- Medeiros, P.M., Conte, M.H., Weber, J.C., and Simoneit, B.R.T. (2006). Sugars as source indicators of biogenic organic carbon in aerosols collected above the Howland Experimental Forest, Maine, *Atmospheric Environment*, 40(9), 1694-1705.
- Palen, E.J., Allen, D.T., Pandis, S.N., Paulson, S.E., Seinfeld, J.H., and Flagan, R.C. (1992). Fourier transform infrared analysis of aerosol for men in the photo-oxidation of isoprene and β -pinene, *Atmospheric Environment*, 26A(7), 1239-1251.
- Park, S., Yu, G.-H., and Bae, M.-S. (2020). Effects of combustion condition and biomass type on the light absorption of fine organic aerosols from fresh biomass burning emissions over Korea, *Environmental Pollution*, 26(B), 114841.
- Park, S.S., and Yu, J. (2016). Chemical and light absorption properties of humic-like substances from biomass burning emissions under controlled combustion experiments, *Atmospheric Environment*, 136, 114-122.
- Popovicheva, O., Lvanov, A., and Vojtisek, M. (2020). Functional factors of biomass burning contribution to spring aerosol composition in a megacity: Combined FTIR-PCA analyses, *Atmosphere*, 11(4), 319.
- Popovicheva, O.B., Engling, G., Ku, I.-T., Timofeev, M.A., and Shonija, N.K. (2019). Aerosol emissions from long-lasting smoldering of boreal peatlands: chemical composition, markers, and microstructure, *Aerosol and Air Quality Research*, 19, 484-503.
- Ruggeri, G., and Takahama, S. (2016). Technical note: Development of chemoinformatic tools to enumerate functional groups in molecules for organic aerosol characterization, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(7), 4401-4422.
- Sheesley, R.J., and Schauer, J.J. (2003). Characterization of organic aerosols emitted from the combustion of biomass indigenous to South Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108,(D9), 4285.
- Son, S.-C., Yu, G.-H., Park, S., and Lee, S. (2020). Analysis of chemical characteristics of PM_{2.5} during spring in Gwanju using attenuated total reflectance FTIR technique, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 171-184.
- Son, S.-C., Yu, G.-H., Park, S., and Lee, S. (2021). Comprehensive characterization of PM_{2.5} using chemical, optical, and spectroscopic methods during pollution episodes at an urban site in Gwangju, Korea, *Atmospheric Pollution Research*, 12(10), 101199.