

논문

영농부산물 연소 시 배출되는 입자상·가스상 물질의 화학적 특성 분석 및 배출계수 산정

Chemical Composition and Emission Factor Estimation of Particulate and Gaseous Substances from Biomass Burning of Agricultural Residues

김주한, 김경훈, 안준영¹⁾, 임용재¹⁾, 박진수¹⁾, 남일권¹⁾, 정소영¹⁾, 이재운¹⁾, 박성규²⁾, 이태형*, 최진수¹⁾.*

한국외국어대학교 환경학과, ¹⁾국립환경과학원 대기환경연구과, ²⁾(주)케이에프

Juhan Kim, Kyunghoon Kim, Junyoung Ahn¹⁾, Yongjae Lim¹⁾, Jinsoo Park¹⁾, Ilkwon Nam¹⁾, Soyoung Jung¹⁾, Jaeyun Lee¹⁾, Seongkyu Park²⁾, Taehyoung Lee*, Jinsoo Choi¹⁾.*

Department of Environmental Science, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Republic of Korea

¹⁾Air Quality Research Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea

²⁾KF Co., Ltd., Hwaseong, Republic of Korea

접수일 2025년 8월 13일
수정일 2025년 9월 26일
채택일 2025년 9월 29일

Received 13 August 2025
Revised 26 September 2025
Accepted 29 September 2025

*Co-corresponding authors
Tel: +82-(0)31-330-4039
E-mail: thlee@hufs.ac.kr
Tel: +82-(0)32-560-7260
E-mail: reonjs@korea.kr

Abstract This study aims to analyze the chemical composition of particulate and gaseous substances in real time during the burning of agricultural crop residues (i.e., rice straw, barley stalk, corn stalk, sesame stalk, perilla stalk, peach branch, apple branch, grape branch, pear branch), and to quantitatively evaluate the impact of biomass burning by calculating emission factors by combustion fuel. An open chamber system for crop residue burning was constructed in compliance with EPA5G regulations and utilized mass flow controllers to provide precise flow rate control. The chemical composition and emission factors of PM_{1.0} sub-compounds (organics, nitrate (NO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻), ammonium (NH₄⁺), chloride (Cl⁻), black carbon (BC)), gaseous substances (CO, CO₂, CH₄, O₃, NOx, SO₂, NH₃), and 12 types of volatile organic compounds (VOCs) were investigated for nine types of crop residues. In the case of agricultural residue incineration, the average PM_{1.0} emission factor was 0.01575 kg/kg, with the highest value observed in barley stalk. Rice straw and barley stalk recorded relatively high Cl⁻ emission factors of 0.0029 kg/kg and 0.004 kg/kg, respectively, compared to other fuels. This is likely due to the accumulation of Cl⁻ within the crops, attributed to the use of KCl fertilizer in paddy fields for cadmium contamination remediation. The average emission factors of CO, CO₂, CH₄, O₃, NOx, SO₂, NH₃ were 0.18, 4.54, 0.012, 0.0093, 0.0049, 0.00108, 0.0032 kg/kg, respectively while the average emission factor of VOCs was 0.001 kg/kg, with acetaldehyde, benzene, and acetone accounting for 64% of the total VOC emissions. The results provide fundamental data to support domestic air quality impact assessments, particularly in relation to emissions from agricultural residue combustion.

Key words: Particulate Matter of diameter 1.0 μm or less (PM_{1.0}), Volatile organic compounds (VOCs), Nitrogen oxide (NOx), ozone (O₃), Agricultural burning

1. 서론

생물성 연소는 식물과 동물과 같은 유기물이 자연

적 또는 인위적 요인으로 연소되는 복합적 과정으로, 지구 대기질과 기후변화에 중요한 영향을 미치고 있다(Koppmann *et al.*, 2005). 이러한 연소는 주로 인위

적 요인(90%)과 자연적 요인(10%)으로 발생하며, 인위적 요인에는 영농부산물 노천소각, 시료 연소, 채굴 활동 등이 포함된다(Chuvieco *et al.*, 2021). 반면, 자연적 요인으로는 평지 및 산림에서의 식생 연소가 있으며(Yan *et al.*, 2006), 이 과정에서 다양한 형태의 화학물질과 입자상 오염물질이 배출된다.

영농부산물은 작물 수확 이후 남겨진 줄기, 잎, 껍질 등으로, 이를 처리하기 위해 소각하는 경우가 많다. 이 과정은 극미세먼지(Particulate Matter of diameter 1.0 μm or less; $\text{PM}_{1.0}$), 블랙카본(Black carbon; BC), 휘발성유기화합물(Volatile organic compounds; VOCs), 일산화탄소(Carbon monoxide; CO) 등의 대기오염물질을 대기 중으로 방출하여, 인근 지역 이외에도 광역적 오염을 유발할 수 있다(Yu *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2016; Seo, 2014). 특히 국내에서는 영농부산물 소각이 생물성 연소 전체 배출량의 약 68%를 차지하며(CAPSS, 2021), 중요한 비점오염원으로 간주된다.

소각 시 배출되는 주요 물질은 극미세먼지(Particulate Matter of diameter 1.0 μm or less; $\text{PM}_{1.0}$), 블랙카본(Black carbon; BC), 일산화탄소(Carbon monoxide; CO), 이산화탄소(Carbon dioxide; CO_2), 메탄(Methane; CH_4), 아황산가스(Sulfur dioxide; SO_2), 일산화질소(Nitric oxide; NO), 이산화질소(Nitrogen dioxide; NO_2), 오존(Ozone; O_3) 등이 있으며, 연소 특성과 온도에 따라 VOCs의 배출량과 조성은 크게 달라진다(Akherati *et al.*, 2020). VOCs와 NO_x 는 대기 중에서 광화학 반응을 통해 O_3 를 생성하는 주요 전구물질이며, 이들 간의 상대적인 VOCs/ NO_x 비율은 O_3 생성 민감도를 결정짓는 핵심 변수로 작용한다(Zhao *et al.*, 2022; Sillman, 1999). 일반적으로 VOCs/ NO_x 비율이 4 미만인 경우 VOCs 저감이 효과적이고, 8 초과인 경우에는 NO_x 저감이 O_3 농도 감소에 더 효과적인 것으로 알려져 있으며, 이러한 전환 구간(transition regime)은 지역별 연소 유형, 배출원 특성, 기상 조건 등에 따라 차이를 보인다(An *et al.*, 2024; Berezina *et al.*, 2020). 이처럼 영농부산물 연소로부터 배출되는 VOCs와 NO_x 는 단순한 1차 오염원이 아니라, 광화학 반응을 통해 O_3 형성에 영향을 미치는 주요 기체로 알려져 있

다(Han *et al.*, 2022).

현재 국내에서는 영농부산물 노천소각에 대한 필터 분석과 가스상 물질의 농도 분석을 통한 입자상 및 가스상 물질의 조성 연구와 배출량 산정이 활발히 진행되고 있으나, 실시간 분석 기반의 연구는 상대적으로 부족하다. 실시간 측정은 현장에서 연소 조건 및 연료 유형에 따른 오염물질 농도 변화를 즉각적으로 관측할 수 있으며, 보다 정밀한 배출계수 산정이 가능하다. 이에 따라 본 연구는 영농부산물 소각 시 배출되는 입자상 및 가스상 오염물질의 화학적 특성을 실시간으로 분석하였고, 시료별로 입자상 및 가스상 오염물질의 배출계수를 각각 도출하였다. 또한 본 연구에서는 시료별로 연소 시 발생하는 VOCs와 NO_x , O_3 를 측정하고 분석함으로써 각 시료별 VOCs/ NO_x 비율을 통해 오존 생성 조건을 비교하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 연소 시료 선정

실험에 사용된 연소 시료는 총 9가지 연소 시료를 포함하였다. 연소 시료는 국내에서 주로 배출되는 영농부산물의 특성을 반영하여 과수, 특수작물, 맥류, 잡곡 등으로 분류되었다(표 1).

과수는 복숭아나무 가지, 사과나무 가지, 포도나무 가지, 배나무 가지가 선정되었으며, 이는 과수원에서 주로 발생하는 가지 치기 작업 후 잔재물을 대표한다.

Table 1. Fuel types of agricultural residues.

Number	Type	Name
1	Cereal crops	Barley stem
2	Cereal crops	Rice stem
3	Fruit trees	Pear branch
4	Fruit trees	Peach branch
5	Fruit trees	Apple branch
6	Fruit trees	Grape branch
7	Minor grains	Corn stem
8	Specialty crops	Sesame stem
9	Specialty crops	Perilla stem

과수 잔재물은 리그닌과 셀룰로오스 함량이 높아 연소 시 유기성 입자상물질(Organics) 및 BC, VOCs 배출 특성을 파악하는 데 적합하다(Suh *et al.*, 2020).

특수작물로는 참깨대와 들깨대가 포함되었으며, 이는 참깨와 들깨 수확 후 발생하는 줄기 잔재물로서, 농촌 지역에서 일반적으로 소각 처리되는 물질이다. 맥류 잔재물로는 벧짚과 보릿대가 포함되었으며, 이는 곡물 수확 후 남겨진 줄기 잔재물로서, 농업 부산물 소각 과정의 주요 배출원으로 작용한다. 잡곡으로는 옥수수대가 선정되었으며 옥수수대는 사료용 및 폐기물로 사용된다. 모든 연소 시료는 실험 전 연소 시료의 수분 함량을 제거하기 위해 모든 잔재물을 한 달 이상 자연 건조하였으며, 이를 통해 수분 함량을 낮춰 연소 실험에서 물리적, 화학적 특성이 명확히 반영되도록 하였다.

2.2 연소효율

생물성 연소 과정은 연기 연소(Smoldering Fire)와 화염 연소(Flaming Fire), 혼합 연소(Smoldering Fire + Flaming Fire)로 구분되며(Yu *et al.*, 2022; Kim *et al.*,

2018), 구분하는 기준은 Modified Combustion Efficiency (MCE)를 통해 계산되어 구분된다. MCE는 연소 시 배출되는 CO₂와 CO의 농도 비율로 평가되며(Garg *et al.*, 2023), 식 (1)을 이용하여 계산된다:

$$MCE = \frac{\Delta [CO_2]}{\Delta [CO_2] + \Delta [CO]} \quad (1)$$

식 (1)에서 사용된 각 항목은 다음과 같이 정의된다. Δ[CO₂]와 Δ[CO]는 각각 연소로 인해 발생한 CO₂ 및 CO의 농도에서 배경농도를 보정한 농도를 의미하며, 연소 시 발생한 대기오염물질 중 측정된 CO₂ 농도와 CO 농도에서, 각 성분의 배경농도를 차감하여 계산된다. CO₂ 및 CO의 배경농도는 각 연료별 연소 시작 전 30초 데이터를 평균낸 값으로 설정하였다. MCE 값이 0.9에서 1 사이인 경우 화염 연소, 0.8에서 0.9 사이인 경우 혼합 연소, 0.8 미만인 경우 연기 연소가 이루어진 것으로 간주된다.

2.3 영농부산물 노천소각 재현 시스템

생물성 연소 챔버는 그림 1과 같이 EPA Method 5G

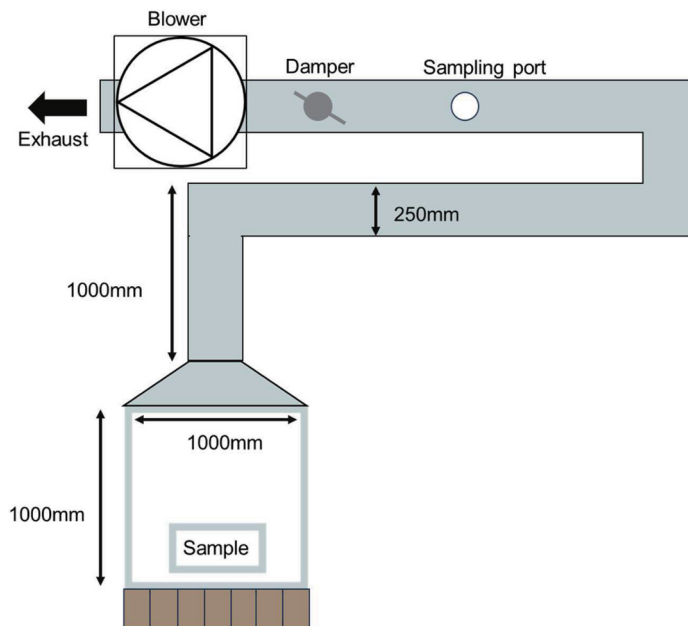


Fig. 1. Schematic diagram of open chamber.

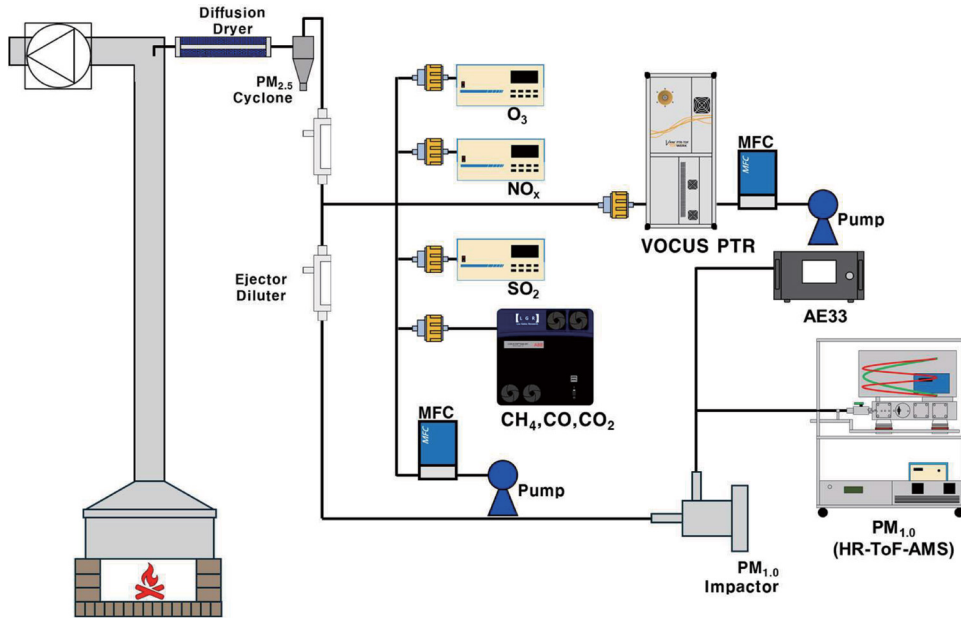


Fig. 2. Schematic diagram of open chamber system for agricultural residues biomass burning.

에 따라 제작하여 연구에 사용되었다(Park *et al.*, 2015).

챔버의 내부는 1 m³ 크기의 황토 벽돌로 이루어졌고, 후드와 배관의 재질은 대기오염물질이 배관 벽면에 코팅되어 발생하는 손실과 오차를 줄이기 위해 스테인리스를 혹은 알루미늄을 사용하였으며, 배관 내부에는 공기 및 배출오염물질의 이송을 위하여 송풍기가 설치되었다. 연소에 주입되는 공기는 전처리를 따로 수행하지 않은 일반 대기 중의 공기를 사용하였다. 그림 2는 본 연구에서 영농부산물 노천소각 실험에 사용한 챔버 및 트레일러 사진과 장비 구성 모식도를 나타내었다.

본 연구에서 영농부산물을 연소하였을 때 발생하는 시료에는 수분이 다수 함량되어 있고 고농도의 대기오염물질이 배출되기 때문에 실시간 분석 장비의 검출 한계를 초과하여 측정 오류가 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 선행 연구에서도 보고된 바와 같이, 생물성 연소에서 발생하는 입자상 및 가스상 전구물질은 수분 제거 및 희석한 상태에서 측정을 수행하였다(Jiménez and Ballester, 2005). 수분을 제거하기 위해 실리카 겔을 사용한 Diffusion Dryer를 사용하고

채취되는 입자상 물질을 크기별로 분류하기 위해 PM_{2.5} Cyclone과 PM_{1.0} Impactor를 사용하였다. 희석 장치로는 Ejection Dilution 원리에 기반하여 작동하는 Ejector Diluter를 사용하였다. 해당 희석 장치로 유입된 샘플은 장치 내부에서 연소 시료 흐름과 동일한 방향으로 보조 공기(Air)가 주입되어 유량이 흐르며, 동일한 방향으로 유량을 제어하기 때문에 장치 내에서 입자상 물질의 손실을 최소화하면서 희석할 수 있다. 희석은 총 두 단계로 나누어 희석하였으며, 가스상 물질은 1차 희석, 입자상 물질은 2차 희석하여 시료 공기를 채취하여 분석하였다. 1차 희석에서는 보조 공기 10.64 SLPM을 주입하여 5.23배의 희석배수가 적용되었고 2차 희석에서는 보조 공기를 10.64 SLPM을 주입하여 희석배수는 5.39배로 관측되었으며, 입자상 물질의 총 희석배수는 28.19배로 나타났다.

2.4 측정 장비

본 연구에서는 국내 영농부산물 노천소각 시 발생하는 입자상 물질 및 가스상 전구물질의 화학적 특성을 실시간으로 분석하기 위해 다양한 고해상도 분석

장비를 활용하였다. 입자상 물질의 화학적 조성을 분석하기 위해 High-Resolution Time-of-Flight Aerosol Mass Spectrometer (HR-ToF-AMS, Aerodyne Research Inc., USA)를 이용하였다(Park *et al.*, 2017). HR-ToF-AMS는 PM_{1.0}을 실시간으로 측정하여 유입되는 시료에 대하여 실시간으로 Organics, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Cl⁻을 시계열로 분석할 수 있으며, 또한 입경에 따른 화학적 성분을 분석할 수 있다. 에어로졸 입자를 고온으로 기화시킨 뒤 이온화하여 챔버 질량분석기 내부에서 V자 경로로 이동하여 자료획득장치로 전송되어 디지털 신호로 저장된다. HR-ToF-AMS는 입자의 속도를 측정함으로써 입자 크기를 산출하는 데 입자 속도는 챔버를 비행하는 입자의 비행시간을 측정하여 계산된다. 이러한 비행시간형 질량분석기로 화학적 조성을 분석하는 방식을 통해 입자상 물질의 질량 농도를 고해상도로 분석하여 농도를 산출한다.

영농부산물을 연소시켰을 때 배출되는 BC를 측정하기 위해 Aethalometer (AE33, Magee Scientific, USA)를 사용했다. AE33은 시료를 필터 테이프의 특정 지점을 통해 에어로졸이 포함된 시료를 지속적으로 수집한다. 필터 테이프의 부하된 영역과 비 부하 영역을 통과하는 빛의 투과율을 비교하여 BC의 농도를 분석하며 분석은 근적외선에서 근자외선까지의 7개 광학 파장에서 수행된다. 필터를 통과하는 빛의 변화율을 기반으로 에어로졸 입자의 광학적 흡수를 계산하고 이를 통해 BC의 농도를 도출한다. 실험에 사용된 BC는 880 nm 파장에서 측정된 BC 농도를 채택했다.

Volatile Organic Compounds (VOCs)의 실시간 측정은 Proton Transfer Reaction Mass Spectrometer (PTR-MS, TOFWERK AG, Switzerland)를 사용하여 진행했다. VOCs는 반응 챔버 내에서 H₃O⁺ 이온과 반응해 양이온화된 형태로 검출되며, Acetaldehyde, Toluene, Benzene 등 총 12종의 VOCs를 고감도로 측정했다.

O₃ 측정은 자외선 흡수 법(UV Absorption) 원리로 시료 공기를 자외선 광원으로 조사해 오존 분자의 자외선 흡수 강도를 분석하여 농도를 계산하는 O₃ monitor (Thermo 49C, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)

를 사용했다. NO_x, NO, NO₂의 농도는 화학 발광 법(Chemiluminescence)을 통해 측정하는 NO_x monitor (Thermo 42C, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 사용하였다. 화학발광법은 NO와 O₃가 반응하여 생성된 화학 발광 신호를 통해 NO가 검출되고, NO₂는 측정된 NO_x에서 NO를 뺀 값으로 농도가 산출된다. SO₂의 농도를 실시간으로 측정하기 위해 자외선 형광법(UV Fluorescence)의 SO₂ monitor (Thermo 43C, Thermo Fisher Scientific Inc., USA)를 사용하였으며, SO₂ monitor는 대기 중에서 유입된 SO₂ 분자가 자외선을 흡수한 뒤 방출하는 형광 신호를 검출하여 농도를 산출하였다.

CO, CO₂, CH₄는 Cavity 내부에서 레이저 빛의 다중 반사를 통해 얻어진 흡수 신호를 분석하여 CO, CO₂, CH₄를 정밀 계산 후 농도를 산출하는 OA-ICOS (Off Axis Intergrated Cavity Output Spectroscopy) 방식의 장비 (GLA331-MCEA1, Asea Brown Boveri Ltd., Switzerland)를 통해 농도를 측정하였다. 해당 장비를 통해 측정된 CO 및 CO₂ 데이터를 사용하여 Modified Combustion Efficiency (MCE)를 계산했다.

또한 영농부산물 연소 후 입자상 및 가스상 전구물질의 배출계수는 각 성분별로 측정된 농도(mg/m³) 및 관 후미에 설치되어 있는 팬과 모든 장비들의 유량, 영농부산물의 연소 무게를 고려하여 다음의 식 (2)와 같이 산출하였다.

$$EF = \frac{C \cdot Q \cdot t \cdot DF}{M} \quad (2)$$

여기서 C는 측정된 정량값(mg/m³), Q는 시료 공기의 유량(m³/sec), t는 측정시간(sec), DF는 희석배수, M은 연소된 시료 양(g)이다.

3. 결 과

3.1 입자상 물질 분석 결과

그림 3은 영농부산물 노천소각 시 입자상물질의 실시간 측정 결과를 나타내었다. 모든 연료에서 MCE가

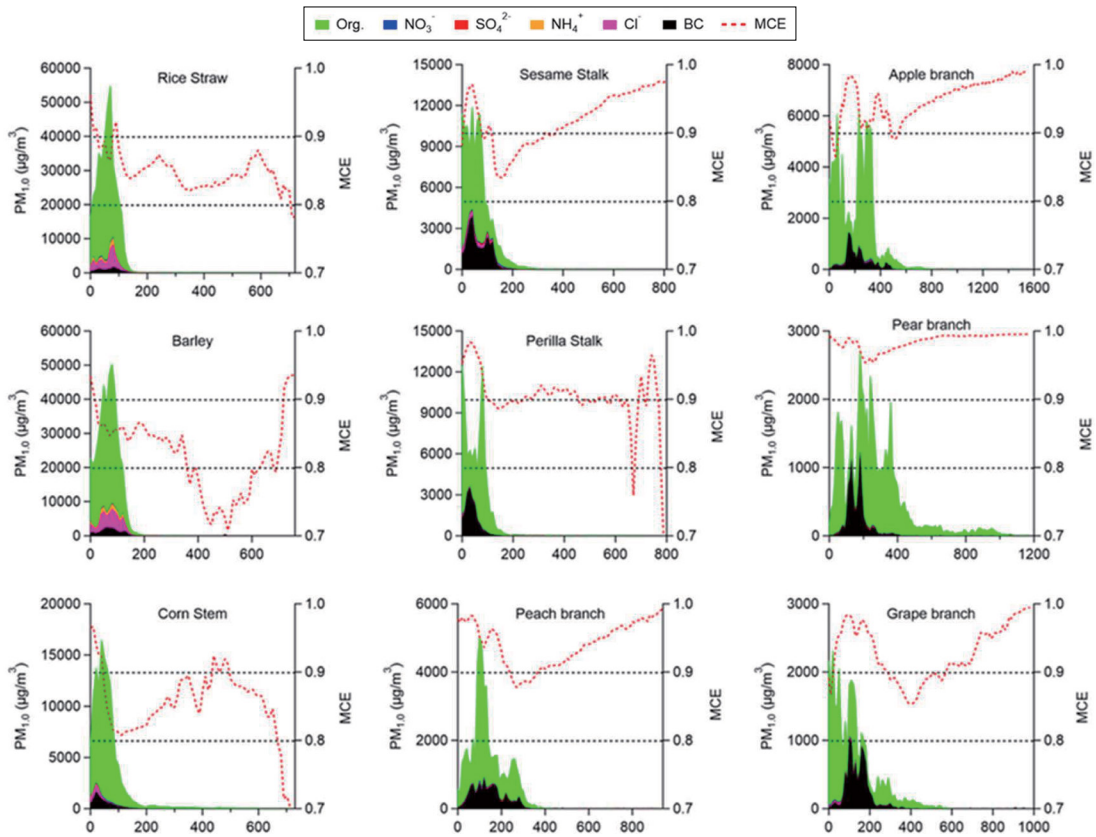


Fig. 3. Timeline of concentration of $PM_{1.0}$ and chemical composition and Modified Combustion Efficiency (MCE) during combustion of agricultural residues.

평균 0.8 이상으로 나타나 연소 단계를 명확히 구분하기 어려웠으며, 이는 선행 연구들과 비교해 연소시간이 상대적으로 짧았기 때문으로 해석된다. 벧짚과 보릿대에서 $PM_{1.0}$ 의 최대 농도가 벧짚 54.82 mg/m^3 , 50.38 mg/m^3 로 최대 농도가 관측되었으며, Cl^- 의 최대 농도가 벧짚에서 6.62 mg/m^3 , 보릿대에서 5.57 mg/m^3 로 측정되었다. 옥수수대 0.62 mg/m^3 , 참깨대 0.39 mg/m^3 , 들깨대 0.09 mg/m^3 , 복숭아나무 가지 0.02 mg/m^3 , 사과나무 가지 0.03 mg/m^3 , 배나무 가지 0.005 mg/m^3 , 포도나무 가지 0.02 mg/m^3 로 측정되었으며 맥류에서 배출된 Cl^- 의 최대 농도가 고농도임을 확인할 수 있었다. Cl^- 의 고농도 배출은 맥류의 생장 과정에서 Cl^- 가 작물 조직에 축적되었기 때문이며, 이는 논 토양에서 관개용수로 사용되는 지하수 또는 하수처리수 등에

포함된 Cl^- 성분에 기인한다는 연구 결과와 유사하다 (Soothar *et al.*, 2018). 또한 논 지역에서는 카드뮴 정화를 위해 KCl 기반 비료를 사용하는 사례도 있어 작물 내 Cl^- 의 축적이 활발히 진행될 수 있다. 벧짚과 보릿대에서 BC는 상대적으로 낮은 농도를 배출하였으며, 이는 벧짚과 보릿대가 셀룰로오스 함량이 리그닌 함량보다 높은 비중을 차지하여 BC의 배출 비율이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 셀룰로오스는 직선적인 다당류 구조로 주로 탈휘발화 과정에서 기체화되어 연소되기 쉽고, 응축 반응을 통해 고형 탄소 잔류물을 형성하지 않는 경향이 있다(Chen *et al.*, 2022). 반면, 리그닌은 방향족 고분자로 구성되어 있어 열분해시 응축성 잔류물(char)을 생성하며, 이는 BC 생성의 주요 전구물질로 작용한다(Shrestha *et al.*, 2010; Simo-

neit, 2002). 따라서 셀룰로오스 비율이 높은 벧짚과 보릿대는 열분해 시 휘발 성분으로 대부분 방출되며, BC로 응축되는 탄소 비율이 낮아지는 경향을 보이는 것이다. 이는 리그닌 함량이 높은 과수나무 연료(예: 포도 가지, 배나무 가지)에서 상대적으로 높은 BC 농도가 나타나는 결과와 대조된다. 특수작물(참깨대, 들깨대)과 잡곡(옥수수대)에서 10 mg/m³ 이상의 PM_{1.0} 농도를 배출하였고, 과수(복숭아 가지, 포도 가지, 배나무 가지, 사과 가지)는 저농도의 PM_{1.0}을 배출하였고 BC의 비율이 상대적으로 높게 나타났다.

그림 4는 각 시료의 연소 시 배출된 입자상 물질의 배출계수 및 구성 비율을 나타낸다. 분석 결과, 모든 연소 시료에서 Organics이 평균 72.7%로 가장 높은 비중

을 차지하였다. 특히, 특수작물과 과수에선 Organics과 BC가 주요 성분으로 나타났으며, 참깨대에서 BC가 44.4%로 연소 시료 중 가장 높은 BC 비율을 보였다. 반면, 벧짚과 보릿대에서는 BC의 비율이 벧짚에서 9%, 보릿대에서 6%로 타 연소 시료 대비 낮은 BC 구성비를 보이고, Cl⁻의 비율이 벧짚에서 8.2%, 보릿대에서 5.9%로 두 연소 시료의 평균 Cl⁻ 비율이 다른 연소 시료 대비 약 5배 높은 것이 확인되었다. Organics 벧짚과 보릿대에서 측정된 Organics의 평균농도가 타 연소 시료 대비 약 6.7배 높은 것을 확인했으며, 맥류가 생물성 연소 시 가장 높은 배출을 하는 것을 확인할 수 있었다.

표 2는 식 (2)에 근거하여 계산된 입자상 물질에 대한 배출계수를 나타내었다. Organics 배출계수는 보릿대(0.05747 kg/kg)에서 가장 높게 나타났으며, 벧짚(0.02793 kg/kg)은 보릿대의 약 절반 수준이었다. 이러한 결과는 벧짚과 보릿대가 리그닌이 각 7.13%, 9.0%로 비율이 낮고 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스 함량이 높아(Kim and Dale, 2004), 연소 과정에서 불완전 연소가 발생하기 쉬운 구조적 특성을 가지기 때문으로 판단된다. 표 3은 본 연구와 GRI (2014)에서 보고된 PM 배출계수를 비교한 것이다. 대부분의 시료에서 두 연구의 배출계수 값은 유사한 범위로 나타났다. 특히 본 연구(시료 약 60g)와 경기개발연구원(시료 약 9.5kg)의 연료 투입 규모가 크게 다름에도 불구하고 유사한 배출계수가 도출되었다.

NO₃⁻ 배출계수는 벧짚(0.00020 kg/kg)과 보릿대(0.00019 kg/kg)가 유사한 값을 보였으며, 옥수수대, 참

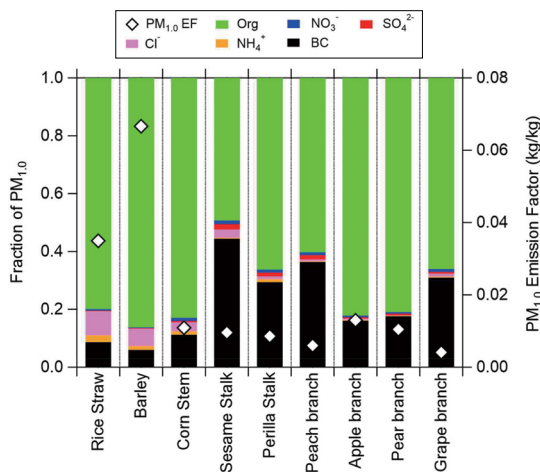


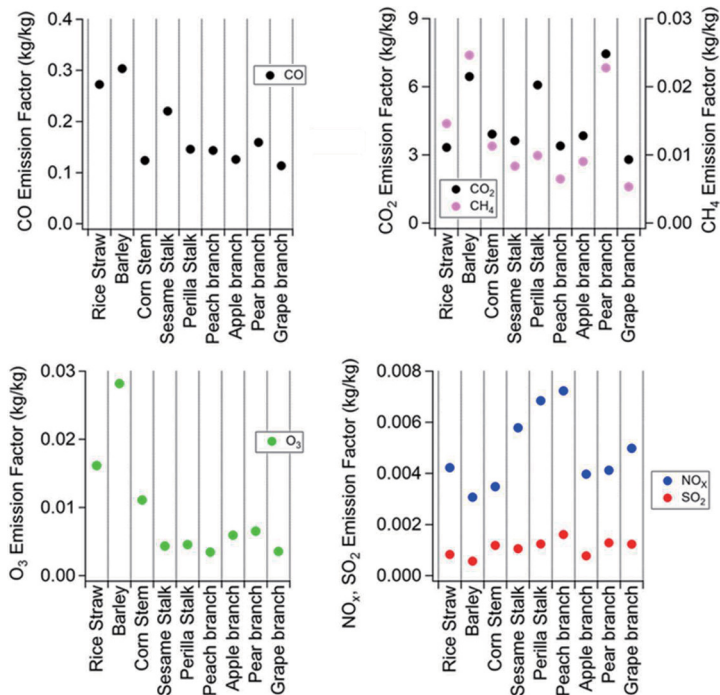
Fig. 4. Fraction and emission factor of PM_{1.0} about agricultural residues.

Table 2. Average emission factor of total PM_{1.0} and chemical species of agricultural residues (kg/kg).

Fuel	Org	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Cl ⁻	BC
Rice stem	0.02793	0.0002	0.00008	0.00082	0.0029	0.00302
Barley stem	0.05747	0.00019	0.00011	0.0009	0.00399	0.00397
Corn stem	0.00904	0.00011	0.00006	0.00013	0.00034	0.00122
Sesame stalk	0.00472	0.00012	0.00018	0.00004	0.00027	0.00425
Perilla stalk	0.00568	0.00009	0.00011	0.00009	0.00008	0.00252
Peach branch	0.00361	0.00006	0.00009	0.00001	0.00004	0.00218
Apple branch	0.01064	0.00008	0.00005	0.00003	0.00007	0.00208
Pear branch	0.00847	0.00005	0.00006	0.00001	0.00002	0.00184
Grape branch	0.0027	0.00004	0.00002	0.00001	0.00004	0.00126

Table 3. Comparison of emission factors of agricultural residues between this study and Gyeonggi Research Institute (GRI) 2014 (kg/kg).

PM	Fuel (kg)	Rice stem	Barley stem	Corn stem	Sesame stalk	Perilla stalk	Peach branch	Apple branch	Pear branch	Grape branch
Study (PM _{1.0})	0.06	0.035	0.064	0.01	0.010	0.009	0.006	0.013	0.010	0.004
GRI 2014 (PM _{2.5})	9.5		0.035		0.014	0.021	0.010	0.017	0.009	0.010

**Fig. 5.** Gaseous emission factor of agricultural residues.

깨대, 들깨대 등 다른 시료에서는 0.00011~0.00012 kg/kg의 낮은 수준으로 나타났다. SO_4^{2-} 배출계수는 벧짚 (0.00008 kg/kg)과 보릿대(0.00011 kg/kg)에서 다소 높게 관찰되었으나, 전반적으로 낮은 수준을 유지하였다. NH_4^+ 배출계수는 벧짚(0.00082 kg/kg)과 보릿대(0.0009 kg/kg)에서 가장 높게 나타났으며, Cl^- 배출계수 역시 벧짚(0.0029 kg/kg)과 보릿대(0.00399 kg/kg)에서 높은 배출계수를 보였으며, 재배에 사용되는 관개용수의 염분 농도의 영향이 있을 것으로 사료된다. BC 배출계수는 보릿대(0.00397 kg/kg)와 벧짚(0.00302

kg/kg)에서 가장 높게 나타났지만, 배출 비율로 고려했을 때 참깨대의 비율이 가장 높았다.

3.2 가스상 물질 분석 결과

영농부산물 노천소각 시, 가스상 물질 배출에서 CO_2 가 평균 4.66 kg/kg으로 전체 배출계수의 90% 이상을 차지하였다. 연료 1 kg당 CO_2 의 배출계수가 높게 나오는 것은, 연소 시 직접 배출되는 CO_2 뿐만 아니라 연소 후 방출된 탄화수소 등의 유기 화합물(C-compounds)이 대기 중 산화 반응을 거쳐 2차적으로 CO_2 를 생성하기

때문으로 판단된다. 배나무 가지, 보릿대, 들깨대에서 6 kg/kg 이상의 배출계수를 보이며 다른 시료들보다 높은 배출량을 기록하였다(그림 5).

CO는 평균 0.18 ± 0.08 kg/kg으로 검출되었으며, 벧짚과 보릿대에서 CO가 다른 연소 시료에 비해 상대적으로 높은 배출계수를 나타냈다. NOx는 0.005 ± 0.0015 kg/kg, SO₂는 0.001 ± 0.0005 kg/kg 수준으로 배출되었으며, 특히 참깨대, 들깨대, 복숭아나무 가지에서 NOx와 SO₂ 배출계수가 다른 시료에 비해 높은 경향을 보였다. O₃는 평균 0.01 ± 0.008 kg/kg이었으며, 보릿대에서 0.028 kg/kg으로 가장 높은 배출계수를 기록하였으며, VOCs 또한 보릿대에서 높은 배출계수를 보이고 NOx의 낮은 배출계수로 O₃와 상관성을 보였다.

그림 6은 각 시료에서 배출된 VOCs의 화학적 구성 비율 및 배출계수를 나타낸다. VOCs는 Oxygenated Volatile Organic Compounds (OVOCs), Anthropogenic Volatile Organic Compounds (AVOCs), Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs)로 구분되며, OVOCs는 Acetaldehyde, Acetone 등과 같이 산소를 포함한 화합물군으로, 광화학 반응에 적극적으로 참여하여 O₃ 및 2차 유기 에어로졸 형성에 중요한 역할을 한다 (Han *et al.*, 2019). AVOCs는 Benzene, Toluene 등 방향

족 구조를 가진 화합물로, 인위적 배출원이 주를 이루며 독성과 광화학 반응성이 높다(Saarikoski *et al.*, 2023). BVOCs는 Isoprene, Pinene과 같이 식물에서 주로 배출되는 화합물군으로, 대기 중 반응성이 매우 커서 국지적 오존 및 에어로졸 형성에 크게 기여한다 (Luo *et al.*, 2025). OVOCs는 Acetaldehyde, Acetone, Methyl Ethyl Ketone (MEK)이 주를 이루었으며, 복숭아 가지를 제외한 모든 시료에서 주요 성분으로 검출되었다. 연소 연료 중 사과 가지가 57%로 OVOC 비율이 가장 높았으며 복숭아 가지에서 38.6%로 가장 낮은 비율을 보였다(그림 7). AVOCs는 Acetonitrile, Acrylonitrile, Benzene, Toluene, C₈ compound (xylene + ethylbenzene), Trimethylbenzene이 포함된다. 복숭아나무 가지는 AVOCs가 VOCs 중 57.1%로 주요 구성 성분이었으며 보릿대에서는 28.5%로써 가장 낮은 AVOCs 비율이 관측되었다. BVOCs는 맥류(보릿대, 벧짚)에서 배출 비율이 과수보다 더 높았으며, 특히 Pinene의 비율이 두드러졌다.

VOCs 전체 배출계수는 보릿대(0.052 kg/kg) > 벧짚(0.015 kg/kg) > 옥수수대(0.012 kg/kg) > 배나무 가지(0.01 kg/kg) > 사과 가지(0.0058 kg/kg) > 들깨대(0.0043 kg/kg) > 포도 가지(0.0039 kg/kg) > 참깨대(0.0037 kg/kg) > 복숭아 가지(0.0035 kg/kg)로 확인되

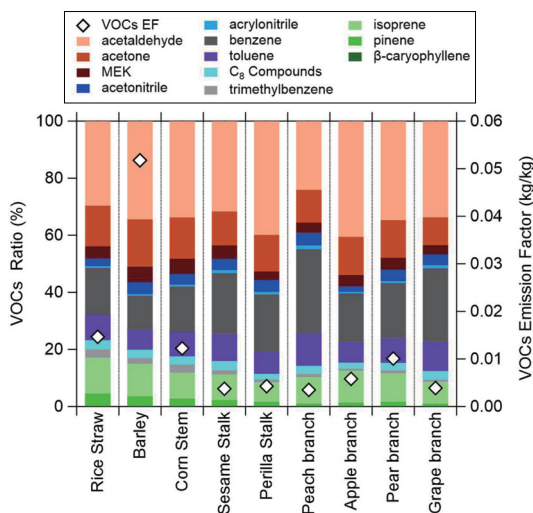


Fig. 6. VOCs emission factor and fraction of agricultural residues.

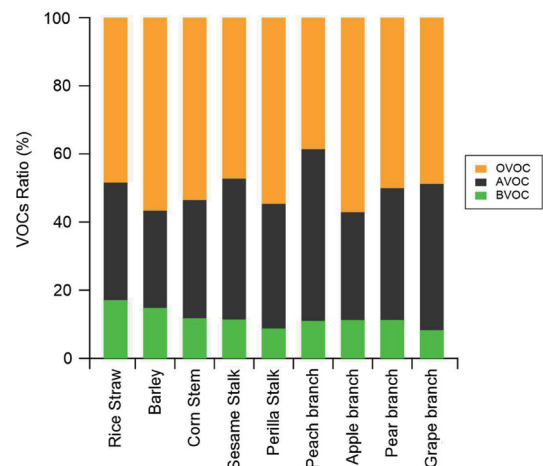


Fig. 7. The ratios of OVOCs, AVOCs and BVOCs during combustion of agricultural residues.

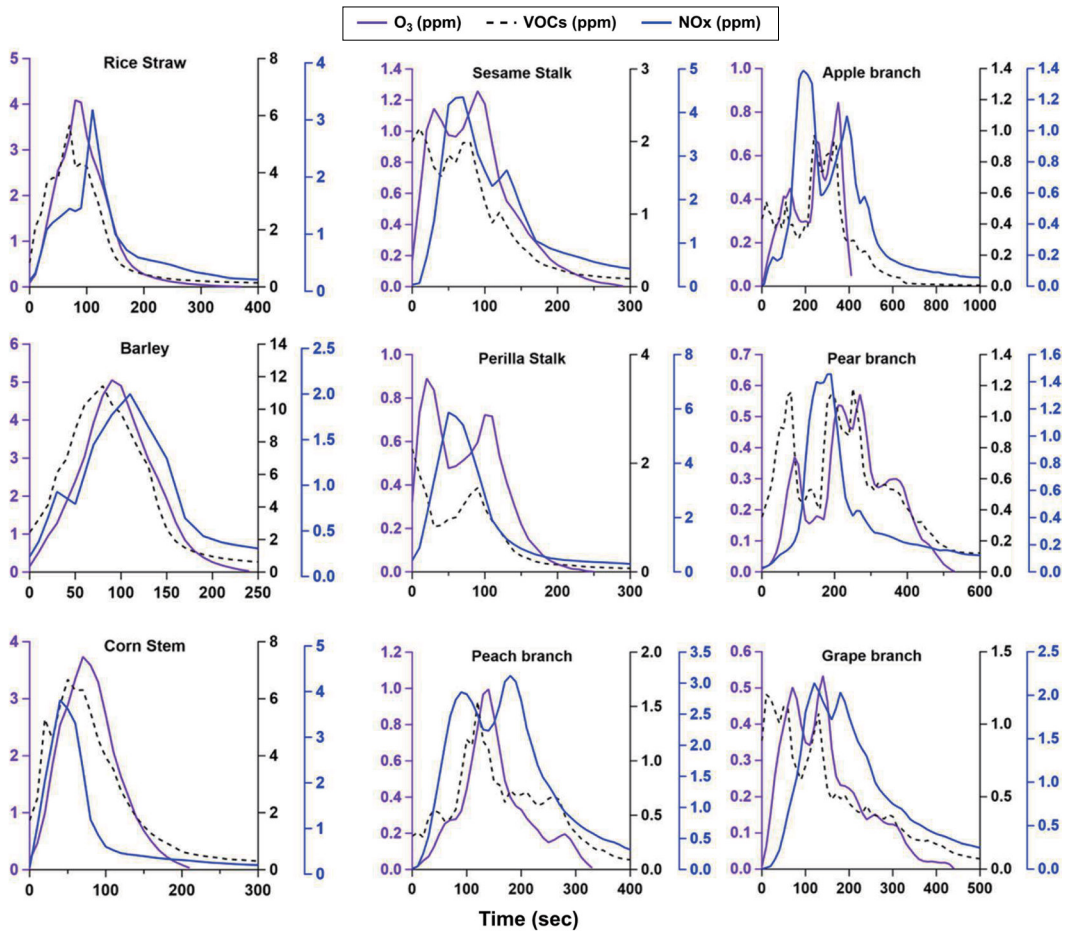


Fig. 8. Timeline of O₃, VOCs, and NO_x emissions during combustion of agricultural residues.

었다. 보릿대는 OVOCs 0.029 kg/kg, AVOCs 0.015 kg/kg, BVOCs 0.0077 kg/kg으로 모든 연소 시료 중 가장 높은 VOCs 배출계수를 보였으며, 벧짚은 OVOCs (0.0071 kg/kg), AVOCs (0.0051 kg/kg), BVOCs (0.0025 kg/kg)로 OVOCs가 주요 배출원으로 나왔고, 복숭아 가지를 제외한 나머지 시료에서도 OVOCs가 가장 높은 구성을 차지하였다. 복숭아 가지는 OVOCs (0.0013 kg/kg), AVOCs (0.0018 kg/kg), BVOCs (0.00038 kg/kg)로 확인되었다. 옥수수대, 참깨대, 들깨대는 OVOCs 배출이 주요 성분으로 나타났으며, 보릿대와 벧짚보다는 낮지만 과수보다는 높았다. 과수(사과, 배, 포도 가지)는 OVOCs 배출계수가 AVOCs와 BVOCs보다 상

대적으로 높았으나, 보릿대와 벧짚보다는 낮은 배출계수를 보였다.

각 연료의 연소 과정에서 O₃, VOCs, NO_x의 농도 변화를 비교한 결과, 연료의 종류에 따라 전구물질의 방출 양상 및 O₃ 생성 특성에 차이가 나타났다(그림 8). 맥류(보릿대, 벧짚), 잡곡(옥수수대)에서는 VOCs와 NO_x가 연소 직후 함께 증가하였으며, 이에 따라 O₃ 농도 또한 짧은 시간 내 최대값에 도달하였다. O₃의 최대 농도는 보릿대에서 5 ppm, 벧짚에서 4.1 ppm, 옥수수대에서 3.7 ppm으로 측정되었다. 특히 VOCs의 농도가 높게 나타난 이들 연료에서 고농도의 O₃가 확인되었다. 사과 가지, 배나무 가지, 복숭아 가지, 포도

가지에서는 VOCs의 농도 상승폭이 상대적으로 낮거나 빠르게 감소하는 양상이 나타났고, O₃ 농도는 전체 연소 연료 중 낮은 농도를 배출하였다. 들깨대(0.36)와 참깨대(1.32)의 경우에도 VOCs에 비해 NO_x가 상대적으로 우세하게 배출되었으며, 전반적인 O₃ 생성 경향은 VOC 제한 조건에서의 반응 특성을 반영하는 것으로 판단된다. 이러한 경향은 선행 연구에서도 확인할 수 있었다. Gilman *et al.* (2015)은 연료 성분에 따라 VOCs 조성과 방출량이 달라지며, 이로 인해 O₃ 형성 잠재력이 상이하다고 보고하였다. Coggon *et al.* (2019)은 furans 및 산소화 방향족 화합물과 같은 산소화 VOC들이 O₃ 및 2차 유기 에어로졸 형성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. Burling *et al.* (2010)과 Perera *et al.* (2019)에 따르면 VOCs 및 NO_x 배출 특성이 연료 구성과 지역적 특성에 따라 달라진다고 보고하였다. 본 연구에서도 포도 가지(6.17), 옥수수대(3.95), 보릿대(3.81)와 같이 VOCs/NO_x 비율이 높은 연료에서 상대적으로 높은 O₃ 농도가 측정되었으며, 이는 NO_x 제한 조건에서의 반응 가능성을 보여준다.

4. 결 론

본 연구는 국내 영농부산물 노천소각 과정에서 배출되는 입자상 및 가스상 물질의 화학적 특성을 실시간으로 분석하고, 연소 시료별 배출계수를 산정하여 영농부산물 연소 후 발생하는 입자상 물질과 가스상 물질의 영향을 정량적으로 평가하는 데 중점을 두었다. 본 연구에서는 시료의 종류에 따라 배출되는 물질의 농도 및 특성이 크게 달라지는 것으로 나타났다. 특히, 벧짚과 보릿대에서 높은 Cl⁻, NH₄⁺ 배출은 시료가 가지는 화학적 조성과 연소 조건(낮은 온도, 산소 부족)으로 인해 불완전 연소가 우세하게 발생하기 때문이다. 또한, 가스상 물질 분석 결과에서도 시료의 종류에 따라 CO₂, CO, VOCs의 배출 특성이 뚜렷하게 차이가 나는 것으로 확인되었으며, 보릿대와 벧짚이 전체적으로 높은 배출량을 기록하였다. VOCs/NO_x 비

율이 높은 연료에서 상대적으로 높은 O₃ 농도가 측정되었으며, 이는 해당 조건이 VOCs-limited임을 보여준다. 따라서 연소 시 O₃ 생성은 VOCs 농도의 변화에 더욱 민감하게 반응하는 것으로 확인되었다. 맥류 연료에서 VOCs와 NO_x가 높은 농도로 동시 배출된 구간에서 O₃ 농도가 뚜렷하게 상승하는 경향이 나타났으며, 이는 연료의 특성에 따른 O₃ 형성 잠재력을 구체적으로 보여준다.

본 연구는 생물성 연소로 인해 배출되는 입자상물질인 PM_{1.0}, BC를 실시간으로 측정함으로써 기존 필터 기반 분석 연구(Suh *et al.*, 2020; Simoneit *et al.*, 1999)보다 더 정밀한 결과를 도출하였다. 그러나 국내에서 접할 수 있는 영농부산물을 한정된 공간에서 수행하였기 때문에, 다른 지역이나 기후 조건으로 일반화하는 데에는 한계가 있다. 예를 들어, Chuvoieco *et al.* (2021)이 제시한 바와 같이, 영농부산물 노천소각은 지역적 농업 관행과 기후 조건에 따라 배출 특성이 달라질 수 있고, 실험실 환경에서 수행된 연소 재현을 기반으로 하고 있어, 실제 야외 소각 조건에서의 배출 특성과 차이가 있을 가능성이 있다. 이는 Yan *et al.* (2006)에서 지적된 바와 같이, 연소 조건에 따른 배출 특성의 차이를 고려한 추가적인 현장연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국립환경과학원의 “생물성 연소에 의한 극미세먼지 및 가스상 전구물질 배출 특성 연구(II)”(NIER-2025-01-02-018)에서 지원받아 수행되었으며, 국가연구시설장비진흥센터의 연구장비 지원(2019R1A6C1020041)을 받아 수행되었습니다.

References

- Akherati, A., He, Y., Coggon, M.M., Koss, A.R., Hodshire, A.L., Sekimoto, K., Warneke, C., De Gouw, J., Yee, L., Seinfeld, J.H. (2020) Oxygenated aromatic compounds are impor-

- tant precursors of secondary organic aerosol in biomass-burning emissions, *Environmental Science & Technology*, 54(14), 8568-8579. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01345>
- An, T., Li, J., Lin, Q., Li, G. (2024) Ozone formation potential related to the release of volatile organic compounds (VOCs) and nitrogen oxide (NOx) from a typical industrial park in the Pearl River Delta, *Environmental Science: Atmospheres*, 4(11), 1229-1238. <https://doi.org/10.1039/D4EA00091A>
- Berezina, E., Moiseenko, K., Skorokhod, A., Pankratova, N.V., Belikov, I., Belousov, V., Elansky, N.F. (2020) Impact of VOCs and NOx on ozone formation in Moscow, *Atmosphere*, 11(11), 1262. <https://doi.org/10.3390/atmos11111262>
- Burling, I.R., Yokelson, R.J., Griffith, D.W.T., Johnson, T.J., Veres, P., Roberts, J.M., Warneke, C., Urbanski, S.P., Reardon, J., Weise, D.R., Hao, W.M., de Gouw, J. (2010) Laboratory measurements of trace gas emissions from biomass burning of fuel types from the southeastern and southwestern United States, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(22), 11115-11130. <https://doi.org/10.5194/acp-10-11115-2010>
- Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y., Zhang, H. (2022) Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil, *Combustion and Flame*, 242, 112142. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142>
- Chuvieco, E., Pettinari, M.L., Koutsias, N., Forkel, M., Hantson, S., Turco, M. (2021) Human and climate drivers of global biomass burning variability, *Science of The Total Environment*, 779, 146361. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146361>
- Clean Air Policy Support System (CAPSS) (2021) 2021 National Air Pollutants Emission. <https://www.air.go.kr/file/download.do?fileId=508>
- Coggon, M.M., Lim, C.Y., Koss, A.R., Sekimoto, K., Yuan, B., Gilman, J.B., Hagan, D.H., Selimovic, V., Zarzana, K.J., Brown, S.S. (2019) OH chemistry of non-methane organic gases (NMOGs) emitted from laboratory and ambient biomass burning smoke: evaluating the influence of furans and oxygenated aromatics on ozone and secondary NMOG formation, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(23), 14875-14899. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14875-2019>
- Garg, P., Shan, I., Lin, S., Gollner, M., Fernandez-Pello, C. (2023) Limiting conditions of smoldering-to-flaming transition of cellulose powder, *Fire Safety Journal*, 141, 103936. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103936>
- Gilman, J., Lerner, B., Kuster, W., Goldan, P., Warneke, C., Veres, P., Roberts, J., De Gouw, J., Burling, I., Yokelson, R. (2015) Biomass burning emissions and potential air quality impacts of volatile organic compounds and other trace gases from fuels common in the US, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(24), 13915-13938. <https://doi.org/10.5194/acp-15-13915-2015>
- Gyeonggi Research Institute (GRI) (2014) Improvement of Air Pollution Emission Data by Biomass Burning. <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201500001374> (accessed on Oct. 2014).
- Han, K.M., Lee, B.T., Bae, M.-S., Lee, S., Jung, C.H., Kim, H.S. (2022) Crop residue burning emissions and the impact on ambient particulate matters over South Korea, *Atmosphere*, 13(4), 559. <https://doi.org/10.3390/atmos13040559>
- Han, Y., Huang, X., Wang, C., Zhu, B., He, L. (2019) Characterizing oxygenated volatile organic compounds and their sources in rural atmospheres in China, *Journal of Environmental Sciences*, 81, 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.01.017>
- Jiménez, S., Ballester, J. (2005) A comparative study of different methods for the sampling of high temperature combustion aerosols, *Aerosol Science and Technology*, 39(9), 811-821. <https://doi.org/10.1080/02786820500257800>
- Kim, D.Y., Choi, M.A., Han, Y.H., Park, S.K. (2016) A Study on Estimation of Air Pollutants Emission from Agricultural Waste Burning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(2), 167-175, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2016.32.2.167>
- Kim, S., Dale, B.E. (2004) Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues, *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 361-375. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.002>
- Kim, Y.H., Warren, S.H., Krantz, Q.T., King, C., Jaskot, R., Preston, W.T., George, B.J., Hays, M.D., Landis, M.S., Higuchi, M. (2018) Mutagenicity and lung toxicity of smoldering vs. flaming emissions from various biomass fuels: implications for health effects from wildland fires, *Environmental Health Perspectives*, 126(1), 017011. <https://doi.org/10.1289/EHP2200>
- Koppmann, R., Von Czapiewski, K., Reid, J. (2005) A review of biomass burning emissions, part I: gaseous emissions of

- carbon monoxide, methane, volatile organic compounds, and nitrogen containing compounds, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 5(5), 10455-10516. <https://doi.org/10.5194/acpd-5-10455-2005>
- Luo, R., Lun, X., Gao, R., Wang, L., Yang, Y., Su, X., Habibullah-Al-Mamun, M., Xu, X., Li, H., Li, J. (2025) A Review of Biogenic Volatile Organic Compounds from Plants: Research Progress and Future Prospects, *Toxics*, 13(5), 364. <https://doi.org/10.3390/toxics13050364>
- Park, S.-K., Hong, Y.-S., Kim, D., Kim, D.Y., Jang, Y.K. (2015) Emission of air pollutants from agricultural crop residues burning, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 31(1), 63-71, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2015.31.1.063>
- Park, T.h., Ahn, J.Y., Choi, J.S., Lim, Y.J., Park, J.S., Kim, J.H., Oh, J., Lee, Y.H., Hong, Y.D., Hong, J.H., Choi, Y.J., Lee, T.H. (2017) Physico-chemical Characteristics of Submicron Aerosol at West Inflow Regions in the Korean Peninsula III. Physical-Chemical Behavior and Long-range Transport of PM₁, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 124-138, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.124>
- Perera, G.B.S., Manthilake, M.M.I.D., Sugathapala, A.G.T., Huy, L.N., Lee, S.C. (2019) NO_x-VOC-O₃ Sensitivity in Urban Environments of Sri Lanka, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 13(1), 62-72. <https://doi.org/10.5572/ajae.2019.13.1.062>
- Saarikoski, S., Hellén, H., Praplan, A.P., Schallhart, S., Clusius, P., Niemi, J.V., Kousa, A., Tykkä, T., Kouznetsov, R., Aurela, M. (2023) Characterization of volatile organic compounds and submicron organic aerosol in a traffic environment, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(5), 2963-2982. <https://doi.org/10.5194/acp-23-2963-2023>
- Seo, Y.H. (2014) Source profile of PM₁₀ emitted upon agricultural biomass combustion, *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, 20(1), 1-7, (in Korean with English abstract).
- Shrestha, G., Traina, S.J., Swanston, C.W. (2010) Black carbon's properties and role in the environment: A comprehensive review, *Sustainability*, 2(1), 294-320. <https://doi.org/10.3390/su2010294>
- Sillman, S. (1999) The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments, *Atmospheric Environment*, 33(12), 1821-1845. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8)
- Simoneit, B.R. (2002) Biomass burning - a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion, *Applied Geochemistry*, 17(3), 129-162. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00061-0)
- Simoneit, B.R., Schauer, J.J., Nolte, C., Oros, D.R., Elias, V.O., Fraser, M., Rogge, W., Cass, G.R. (1999) Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles, *Atmospheric Environment*, 33(2), 173-182. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00145-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00145-9)
- Soothar, M., Bhatti, S., Saleem, M., Rajpar, I., Depar, N., Subhopoto, M. (2018) Assessment of K⁺, Na⁺ and Cl⁻ Content in Rice Tissues and Soil Irrigated With Wastewater, *Pakistan Journal of Analytical & Environmental Chemistry*, 19(1), 64-70. <https://doi.org/10.21743/pjaec/2018.06.06>
- Suh, H.W., Yoo, C.H., Lee, W.J. (2020) Reconstituted Biodegradable Composites with Cellulose Structure, *Textile Science and Engineering*, 57(5), 315-322. <https://doi.org/10.12772/TSE.2020.57.315>
- Yan, X., Ohara, T., Akimoto, H. (2006) Bottom-up estimate of biomass burning in mainland China, *Atmospheric Environment*, 40(27), 5262-5273. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.04.040>
- Yu, G.-H., Song, M.-K., Kim, M., Oh, S.-H., Yu, K.-B., Lee, B.-T., Han, K.-M., Bae, M.-S. (2022) Determination of Emission Factor for Chemical Compounds from Agricultural Crop Residues Burning using Closed Chamber System - Distributions of Organic Compounds, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(3), 470-483, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.3.470>
- Zhao, Y., Li, Y., Kumar, A., Ying, Q., Vandenberghe, F., Kleeman, M. J. (2022) Separately resolving NO_x and VOC contributions to ozone formation, *Atmospheric Environment*, 285, 119224. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119224>

Authors Information

- 김주한(한국외국어대학교 환경공학과 석사과정 학생)
(pedro35@naver.com)
- 김경훈(한국외국어대학교 환경공학과 박사과정 학생)
(khkim159@hufs.ac.kr)
- 안준영(국립환경과학원 대기환경연구과 연구관)
(nierair@korea.kr)

임용재(국립환경과학원 대기환경연구과 연구관)
(limyongjae@korea.kr)

박진수(국립환경과학원 대기환경연구과 연구관)
(airchemi@korea.kr)

남일권(국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(ilkwon93@korea.kr)

정소영(국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(syj6369@korea.kr)

이재운(국립환경과학원 대기환경연구과 전문위원)
(jaeyun2368@korea.kr)

박성규((주)케이에프 대표이사)
(mincheon@chol.com)

이태형(한국외국어대학교 환경학과 교수)
(thlee@hufs.ac.kr)

최진수(국립환경과학원 대기환경연구과 연구사)
(reconjs@korea.kr)