



논문

스캐닝 라이다를 이용한 농촌지역 불법소각 미세먼지 배출량 추정 연구

Estimation of Emission Flux of Particulate Matter by Agricultural Burning in Rural Areas using Scanning LIDAR

김가형, 신주선, 김덕현¹⁾, 심주현, 주소희, 김정훈²⁾, 조성환²⁾, 강천웅²⁾, 노영민*
부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, ¹⁾한밭대학교 기초과학부,
²⁾국립환경과학원 대기공학연구과

접수일 2022년 5월 18일
수정일 2022년 5월 27일
채택일 2022년 5월 31일

Received 18 May 2022
Revised 27 May 2022
Accepted 31 May 2022

Gahyeong Kim, Juseon Shin, Dukhyeon Kim¹⁾, Juhyeon Sim, Sohee Joo,
Jeong Hun Kim²⁾, Sung Hwan Cho²⁾, Cheon Woong Kang²⁾, Youngmin Noh*

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-629-6529
E-mail : nym@pknu.ac.kr

Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University,
Busan, Republic of Korea

¹⁾School of Basic Science, Hanbat National University, Daejeon, Republic of Korea

²⁾Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research,
Incheon, Republic of Korea

Abstract The Korean government enforces a fine dust seasonal management system to reduce aerosols emitted from illegal incineration in rural areas during the winter and spring period. The burning of agricultural by-products in rural areas is prohibited by law but is still prevalent. Illegal incinerations mainly occur on a small scale in a wide area, so managing and controlling them is difficult. To estimate the emission flux of PM from agricultural burning, we used scanning Light Detection and Range (Lidar). The scanning Lidar can observe mass concentration in an area with a radius of 5 km at 30-minute intervals with a distance resolution of 30 m. We calculated the upward velocity using the relationship between the plume central velocity and mass entrainment rate in the plume rise model, then estimated the emission flux using mass concentration and plume distribution range. The emission fluxes of PM_{2.5} in stagnant and diffused cases were 1.17 kg/h and 2.09 kg/h, respectively. Annualized values of the emission flux were 0.11 tons/year and 0.20 tons/year according to the number of observations. These were slightly lower than the national emission inventory (4.98 tons/year). The difference might be because the emission inventory was overestimated or there were errors in the process of annualization.

Key words: Scanning LIDAR, Particulate matter, Biomass burning, Flux, Agricultural burning

1. 서론

농촌지역은 지역이 넓고 거주인구가 적기 때문에 대도시 및 산업단지에 비해 대기오염 연구 분야에서 상대적으로 소외되어 있다(Jeong *et al.*, 2018). 그러나 고령화로 인해 농촌지역의 거주민 대부분이 미세먼지 오염에 취약한 계층이므로 오염수준 파악 및 배출원에 대한 엄격한 관리가 필요하다.

농촌지역의 주요 미세먼지 배출원은 이차생성 에어로졸 (secondary aerosols), 토양기원 먼지 (soil/road dust), 생물성 연소 (biomass burning), 불법소각 (incineration/fuel combustion), 차량 배출 (vehicle exhaust), 해염 (sea-salt) 순이다 (Jeong *et al.*, 2018). 특히, 생물성 연소와 불법소각은 불완전연소를 유발하여 기후변화 원인물질인 블랙카본을 발생시키고 (Chakrabarty *et al.*, 2006; Reid *et al.*, 2005; Martins *et*

al., 1998; Reid and Hobbs, 1998), 초미세입자로서 인체에 미치는 영향이 크다(Murray et al., 2020; Schraufnagel et al., 2019; Cohen et al., 2017; Lelieveld et al., 2015). 또한, 불법소각은 영농부산물 뿐만 아니라 플라스틱, 비닐류 등 쓰레기가 포함되어 있어 심각한 매연을 유발하며 유독가스가 배출될 수 있어 인체에 악영향을 미친다(Lee et al., 2021; Prato and Huertas, 2019; Jeong et al., 2018; Kim et al., 2016). 불법소각행위의 경우 가을~봄철에 집중 발생하고, 단속을 피해 주로 오전이나 이른 아침, 저녁시간에 소각하기 때문에 도시보다 상대적으로 낮은 대기혼합층을 유지하고 있는 농촌지역에서는 오염물질이 대기 역전층에 갇혀 확산하지 못하고 축적될 가능성이 크다(Prato and Huertas, 2019).

불법소각은 현재 폐기물 관리법 제8조에 의거하여 엄격히 금지되고 있으나, 농촌지역에서는 공공연하게 이루어지고 있다. 또한 발생 지역이 광범위하고 소규모로 짧은 시간 동안 소각이 이루어지기 때문에 단속에 어려움이 있다. 본 연구에서는 반경 5 km 구역에서 30 m 간격의 거리해상도로 연속 관측이 가능한 수평 스캐닝 라이다(Scanning Light Detection and Range)를 활용하여 발생 지역을 확인하고 배출량을 산정하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 관측 지역

관측 지역은 불법소각이 발생하고, 라이다 관측에 방해가 없는 평야 지대인 전라북도 김제시에서 실시했다. 스캐닝 라이다는 '김제시 공공하수처리장(전북 김제시 북죽동 442-1, 35.48°N, 126.51°E)' 옥상에 설치되었으며, 관측 기간은 2021년 1월 31일부터 3월 13일까지 실시했다. 유효관측일은 24일간이고, 총 209회의 루프관측을 수행했다.

2.2 관측 장비

스캐닝 라이다는 수평 방향으로 반경 5 km 이내 거

리 분해능 30 m 정도로 관측이 가능하며, 관측 수평 각도는 시작지점을 0도로하여 시계방향으로 0, 9, 14, 24, 44, 67, 75, 85, 95, 104, 116, 126, 132, 139, 146, 175, 182, 189도로 18방향의 레이저 출력이 있었다. 각 각도당 20초 동안 관측을 수행하고 다음 각도로 이동하는 방식으로 관측을 수행하였다. 스캐닝 라이다 시스템에 사용되는 레이저 파장은 532 및 1064 nm이고, 빔 퍼짐도는 0.3 mrad이다. 본 연구에서 사용한 스캐닝 라이다 시스템은 두 파장 관측 채널 및 비편광도(depolarization ratio)를 이용해 조대 및 미세입자를 구분하여 미세먼지 농도 산출이 가능하다(Noh et al., 2020, 2017). 라이다 후방산란 신호 강도를 이용하여 에어로졸의 광학적 농도인 소산 계수(Extinction coefficient, m^{-1})를 산출한다.

2.3 소각 배출량 산출 방법

농업 잔재물 소각에 의한 배출량은 일반적으로 경작지 면적과 작물단위당 소각량(fuel loading), 소각 물질에 따른 대기오염물질 배출계수(emission factor)를 고려하여 산출된다(Kim et al., 2016). 그러나 이러한 방법은 실제 대기중으로 확산되어 영향을 주는 양을 측정하는 것이 아니므로, 실제 관측 농도를 기반으로 배출량을 산정하는 것이 필요하다. 소각에 의해 배출되어 대기중으로 확산될 때 소각 규모, 희석 속도, 배경 에어로졸 농도, 입자 크기 및 응결 등 변화에 따라 관측시의 에어로졸 농도와 광학 특성이 다르게 나타나기 때문에 이에 대한 면밀한 평가가 필요하다(Hodshire et al., 2019; Pierce and Sakamoto, 2016; Alvarado et al., 2015; Vakkari et al., 2014; Akagi et al., 2011; Hecobian et al., 2011).

관측 배출량은 일반적으로 배출 위치에서의 농도와 관측 방향에서 수직인 방향의 속도를 이용하여 구한다. 본 연구에서는 지상 약 10 m 높이(18 m above sea level)에서 수평 방향으로 플룸을 관측하는데, 관측방향에 수직인 속도를 확인할 수 없으므로 연행률(entrainment rate)를 고려한 플룸 상승속도를 이용하여 배출량 산정을 시도했다(그림 1).

플룸 상승 모델(Plume rise model)에서 플룸의 운

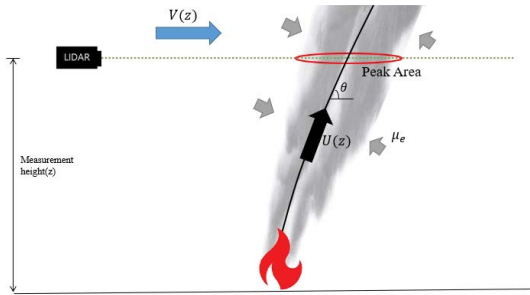


Fig. 1. LIDAR measurement for agricultural waste burning.

동에 따른 질량연행률 (mass entrainment rate, E_m)은 플룸의 이동과 대기 난기류(turbulence)에 따라 변하는 연행속도 (entrainment velocity, u_e)에 의해 계산된다(Bennett *et al.*, 1992; Ooms, 1972).

$$E_m = 2\pi b \rho_a u_e \quad (\text{Eq. 1})$$

여기서 b 는 플룸의 직경, ρ_a 는 ambient 밀도(1.25 kg/m^3)를 의미한다. 농촌지역은 대기 경계층 고도가 높고 고층 건물이 적어 수평 고도에 따른 풍속 변화는 무시할 수 있다고 보고, 소각 플룸의 질량연행률(E_m)을 문헌 값으로 가정하였다(Dembsey *et al.*, 1995). 질량연행률은 플룸의 온도 및 이동 속도와 관계가 있으나, 라이다 관측 높이가 지상 약 10 m이므로 소각량 또는 발생열에 의해 주변 공기가 연행되는 정도가 고도에 따라 큰 변화를 보이지 않을 것으로 판단했다. 배출 위치로부터의 거리를 고려하지 않으면 질량연행률은 소각 규모 (fire size)에 따라 달라진다. 실험을 통해 소각 규모에 따른 질량연행률의 범위는 $0.74 \sim 0.98 \text{ kg/s}$ 로(Dembsey *et al.*, 1995), 본 연구에서는 범위의 평균값인 0.86 kg/s 로 가정했다.

Equation 1에 의하여 플룸의 상대속도는 plume 축에 수직인 요소로 구성된다. 여기서 연행속도는 수평 풍속에 의해 변하는 플룸의 진행방향과 관련된 식으로 정의할 수 있다(Hewett *et al.*, 1971).

$$u_e = k_s |U - V \cos \theta| + k_w |V \sin \theta| \quad (\text{Eq. 2})$$

U 는 고도에 따른 플룸의 중심축 속도, V 는 수평 풍

속, θ 는 수평방향에 대해 플룸이 이루는 각도이다 (그림 1 참고). k_s 와 k_w 는 각각 플룸의 상대적인 이동 및 풍속에 대한 연행계수 (entrainment velocity)이다. 본 관측에서는 수평풍속이 10 m/s 미만이므로 플룸의 각도 θ 는 80° 로 가정하고, k_s 와 k_w 는 2010년 Eyjafjallajökull 화산 분출 시 연행계수를 계산한 논문에서 제시한 0.09와 0.9를 각각 이용했다(Woodhouse *et al.*, 2013).

수평풍속 V 는 관측 고도에 따라 다르게 영향을 줄 수 있다.

$$V(z) = \begin{cases} V_1 z / H_1, & \text{for } z < H_1, \\ V_1, & \text{for } z \geq H_1 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3})$$

z 는 관측 고도를 나타내며 소각 위치인 지상으로부터의 높이인 10 m 로 볼 수 있고, V_1 는 실제 수평 풍속, H_1 는 대류권계면 고도 (tropopause begins, 11 km)이다(Woodhouse *et al.*, 2013). 라이다 관측 고도는 H_1 보다 낮으므로 $V(z) = V_1 / 1100$ 으로 계산할 수 있다.

연행률과 연행속도를 이용하여 플룸 중심 속도 (U)를 계산하는 식을 정리하면 다음과 같다.

$$|U - V \cos \theta| = \frac{E_m / 2\pi b \rho_a - k_w |V \sin \theta|}{k_s} \quad (\text{Eq. 4})$$

관측 배출량은 수평 스캐닝 농도 자료를 이용하여 플룸 피크가 나타난 격자의 농도 평균에 Equation 4로 계산한 상승속도 (U)를 곱하여 격자 배출량을 산정하고 피크가 나타난 면적에 대해 적분하여 산출한다(Willis *et al.*, 2017). 본 연구에서는 문헌 값을 이용하여 연행률을 0.86 kg/s 로, 상수는 $k_s = 0.09$ 와 $k_w = 0.9$ 로 가정했고(Woodhouse *et al.*, 2013; Dembsy *et al.*, 1995), Equation 4를 이용하여 구한 $U = 0.04 \sim 0.05 \text{ m/sec}$ 를 배출량 산정을 위한 아래식에 적용했다.

$$\bar{F}'_{PM_{10} \text{ or } PM_{2.5}}(x, y) = \bar{C}_{PM_{10} \text{ or } PM_{2.5}}(x, y) \bar{U}(z) \quad (\text{Eq. 5})$$

여기서 x, y 는 위경도에 해당하는 수평 위치를 의미하고, z 는 관측 고도이다. Equation 5에서 바(overbar)는 시간 평균을 의미하는데 수평 스캐닝이 진행되는 시간 동안의 평균으로 본다. F' 은 격자(x, y)에서

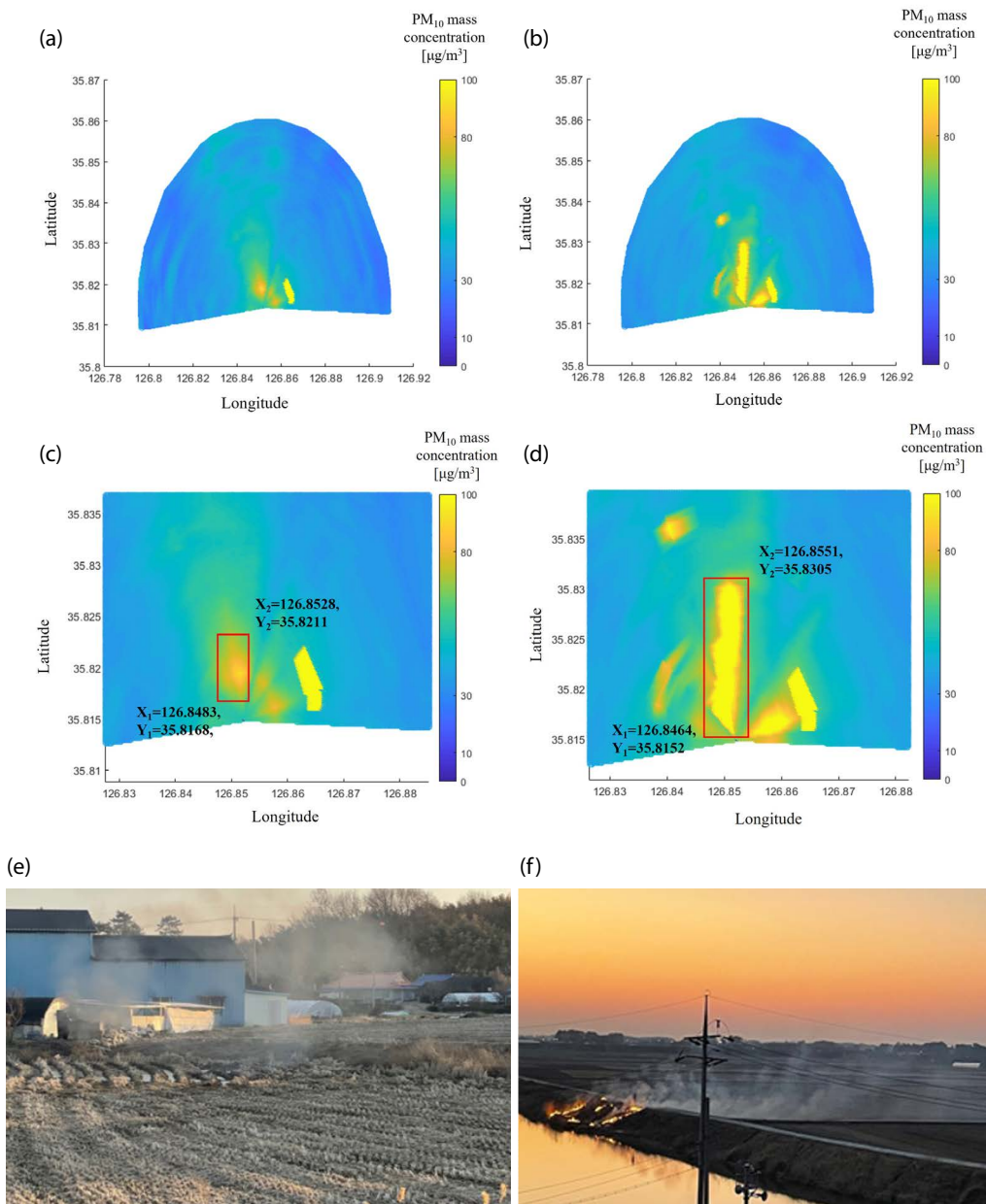


Fig. 2. PM₁₀ concentration from scanning Lidar and pictures of agricultural burning cases on 21 Feb 2021. Observation times of case 1 (a, c, and e) and case 2 (b, d, and e) were at 17:29 and 18:48, respectively.

의 배출량, C 는 미세 및 초미세먼지 (PM₁₀ 및 PM_{2.5})의 질량 농도를 의미한다.

$$F_{PM_{10} \text{ or } PM_{2.5}} = \sum_{x=x_1}^{x=x_2} \sum_{y=y_1}^{y=y_2} \bar{F}'_{PM_{10} \text{ or } PM_{2.5}}(x, y) \Delta x \Delta y \quad (\text{Eq. 6})$$

F 는 소각 플룸에 대한 미세 및 초미세먼지의 배출량을 의미하며, 수평 스캐닝 된 피크 면적을 고려하여 산출한다. 피크는 위경도의 x_1 - x_2 , y_1 - y_2 위치의 격자 내에 있다고 본다(그림 2(c)와 (d)). 즉, 그림 2에서

붉은색 사각형은 Equation 6에서 합산에 사용된 위경도 평면을 나타낸 것이다.

3. 연구 결과

미세먼지 계절관리제 기간 중 진행된 농촌지역 불법 소각 관측 결과, 11건의 의심 신호를 확인했고, 이 중 8건은 현장에서 즉시 소각 행위를 확인할 수 있었다. 농촌지역의 특성상 스캐닝 라이다로 관측된 대부분의 고농도 사례가 소각에 의한 것으로 추정된다. 본 연구에서는 불법소각이 명확하게 나타난 2가지 경우에 대해 관측 배출량 산출을 실시했다(그림 2).

Case 1과 2는 2021년 2월 21일 17:29과 18:48에 각각 발생했다. Case 1은 휴지 상태의 농경지에서 발생한 소각으로 정체된 모습의 플룸 형상을 보이며, case 2는 강 둔덕에서 발생했고 바람에 의해 확산되는 형태로 나타났다. Case 1과 2의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 평균, 중앙값, 최대값을 표 1에 나타냈으며, 각각의 피크 면적은 0.37 km²과 0.70 km²였다.

Case 1과 2의 수평풍속은 5.2 m/s로 동일하며 Equation 6을 이용하여 산출한 플룸 중심의 상승속도(U)는 1.17 m/s였다. 여기에 각각의 평균 농도와 피크 면적을 고려하여 산출한 시간당 배출량은 표 2와 같다(Eq. 5, 6). 또한 시간당 배출량을 연 배출량과 비교하기 위하여 불법소각의 발생 횟수를 가정하여 환산했다. 관측이 진행되는 총 24일 동안 11회 발생했고, 연간 7개월(9월~3월)동안 집중 배출된다고 가정하였는데, 실제 24시간 관측이 아니고 관측 면적(반경 5 km의 189도 각도 내 관측으로 41.2 km²)도 지역 규모에 비해 작으므로 배출 빈도가 적게 환산되었을 수 있다.

2018년 기준 전북 지역에서 생물성 연소로 인한 연간 배출량은 PM₁₀과 PM_{2.5} 각각 1,204 ton/yr, 974 ton/yr로 이를 관측 면적 대비(라이다 관측 면적: 41.2 km², 전북 지역 면적: 8,067 km²)로 환산하면 각각 6.15 ton/yr, 4.98 ton/yr로 볼 수 있다(National Air Emission Inventory and Research Center, 2021). 관측

Table 1. Mean, standard deviation (Std.), median, max values of PM₁₀ and PM_{2.5} mass concentration on case 1 and 2. (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Results	Case 1		Case 2	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Mean \pm Std.	42.6 \pm 97.6	19.8 \pm 47.4	43.4 \pm 44.1	18.4 \pm 20.2
Median	34.9	16.4	37.5	15.6
Max	3628.0	1762.2	1355.3	622.7

Table 2. Estimated flux by scanning LIDAR on case 1 and 2.

Results	Case 1		Case 2	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Estimated flux (kg/h)	2.53	1.17	4.92	2.09
Annualized flux (ton/year)	0.24	0.11	0.47	0.20

구역 내 다른 배출원이 없으므로 스캐닝 라이다로 관측된 대부분의 배출이 소각에 의한 것이라고 볼 때, 관측 배출량이 배출계수 및 농작 면적, 인구수 등을 고려하여 산출한 배출량보다 다소 적게 나타남을 확인했다. 이러한 차이는 기존의 배출량 자료가 인구수, 경작지 면적 등에 의해 산정하기 때문에 다소 과대 평가되었기 때문일 수도 있고, 연 배출량 환산과정에서 발생 횟수를 과소평가하였기 때문으로 보인다.

4. 결 론

농촌지역에서 빈번하게 발생하는 농업 부산물 불법 소각에 의한 스캐닝 라이다 관측을 통해 소각 배출량 산정을 시도했다. 소각 플룸의 질량연행률에 따른 상승속도와 수평 관측 농도와 확산 면적을 이용하여 산출된 관측 배출량은 기존의 배출량 인벤토리보다 다소 높게 나타난 경향을 보였다. 소각 플룸의 수평 농도를 알고 있을 때, 플룸의 상승속도는 배출량 계산에 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 상승속도를 산출하는 데 있어 일반적인 소각 플룸에서의 질량연행률을 구하기 위하여 타연구의 실험 평균과 기존 연구의 상수 값을 사용하였다. 이러한 가정이

본 소각의 경우에 오차를 보일 수 있으나, 수십 배의 오차는 보이지 않을 것으로 판단하며 플룸의 선속도를 활용한 배출량 추정에서 원격 측정법의 실례를 구체적으로 보여준 하나의 사례로 생각한다. 그러나 상승속도 (U) 추정에 대한 미비점을 보완하기 위하여 향후 연구에서는 다른 장비를 이용하여 추가적으로 얻거나 플룸의 형상에 대한 정보를 통하여 계산치 혹은 실험치와의 비교를 통해 상승속도에 관한 정보를 얻을 예정이다.

본 연구를 통하여 스캐닝 라이다 관측을 통하여 농촌지역에서 불법소각으로 배출되는 미세먼지의 농도 뿐만 아니라 배출량까지 산정할 수 있는 가능성을 확인하였다. 이는 스캐닝 라이다 시스템이 농촌지역에서 불법소각에 대한 감시 기능과 함께 현재까지 정확한 산출 근거가 마련되지 않았던 불법소각으로 인한 미세먼지의 배출량에 대한 정보를 제공할 수 있음을 시사한다. 이를 위해서는 추가적인 연구를 통하여 스캐닝 라이다 관측으로 산출된 배출량에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2021-04-02-185)을 받아 수행하였습니다.

References

- Akagi, S., Yokelson, R., Wiedinmyer, C., Alvarado, M., Reid, J., Karl, T., Crouse, J., Wennberg, P. (2011) Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 4039-4072.
- Alvarado, M., Lonsdale, C., Yokelson, R., Akagi, S.K., Coe, H., Craven, J., Fischer, E., McMeeking, G., Seinfeld, J., Soni, T. (2015) Investigating the links between ozone and organic aerosol chemistry in a biomass burning plume from a prescribed fire in California chaparral, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 6667-6688.
- Bennett, M., Sutton, S., Gardiner, D. (1992) Measurements of wind speed and plume rise with a rapid-scanning Lidar, *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 26, 1675-1688.
- Chakrabarty, R.K., Moosmüller, H., Garro, M.A., Arnott, W.P., Walker, J., Susott, R.A., Babbitt, R.E., Wold, C.E., Lincoln, E.N., Hao, W.M. (2006) Emissions from laboratory combustion of wildland fuels: Particle morphology and size, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111.
- Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R. (2017) Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, *The Lancet*, 389, 1907-1918.
- Dembsey, N.A., Pagni, P.J., Williamson, R.B. (1995) Compartment Fire Near-field Entrainment Measurements, *Fire Safety Journal*, 24, 383-419.
- Hecobian, A., Liu, Z., Hennigan, C., Huey, L., Jimenez, J., Cubison, M., Vay, S., Diskin, G., Sachse, G., Wisthaler, A. (2011) Comparison of chemical characteristics of 495 biomass burning plumes intercepted by the NASA DC-8 aircraft during the ARCTAS/CARB-2008 field campaign, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 13325-13337.
- Hewett, T., Fay, J., Hoult, D. (1971) Laboratory experiments of smokestack plumes in a stable atmosphere, *Atmospheric Environment* (1967), 5, 767-789.
- Hodshire, A.L., Bian, Q., Ramnarine, E., Lonsdale, C.R., Alvarado, M.J., Kreidenweis, S.M., Jathar, S.H., Pierce, J.R. (2019) More than Emissions and Chemistry: Fire Size, Dilution, and Background Aerosol Also Greatly Influence Near-Field Biomass Burning Aerosol Aging, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5589-5611. <https://doi.org/10.1029/2018jd029674>
- Jeong, J.-H., Lim, J.-M., Lee, J.-H. (2018) Source Apportionment and Chemical Characteristics of Atmospheric PM_{2.5} in an Agricultural Area of Korea, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(5), 431-446.
- 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, 167-175. <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.2.167>
- Lee, S.-Y., Park, J.-S., Hong, S.-U. (2021) Modeling Atmospheric Dispersion of Particulate Matters Emitted by Agri-

- cultural Activities Using AERMOD, Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers, 63, 55-61.
- Lelieveld, J., Evans, J.S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015) The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, *Nature*, 525, 367-371.
- Martins, J.V., Artaxo, P., Liousse, C., Reid, J.S., Hobbs, P.V., Kaufman, Y.J. (1998) Effects of black carbon content, particle size, and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in Brazil, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103, 32041-32050.
- Murray, C.J., Aravkin, A.Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K.M., Abbasi-Kangevari, M., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., Abdollahpour, I. (2020) Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019, *The Lancet*, 396, 1223-1249.
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAElaR) (2021) 2018 National Air Pollution Emission.
- Noh, Y., Kim, D., Choi, S., Choi, C., Kim, T., Kim, G., Shin, D. (2020) High resolution fine dust mass concentration calculation using two-wavelength scanning lidar system, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36, 1681-1690.
- Noh, Y., Müller, D., Lee, K., Kim, K., Lee, K., Shimizu, A., Sano, I., Park, C.B. (2017) Depolarization ratios retrieved by AERONET sun-sky radiometer data and comparison to depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 6271-6290. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6271-2017>
- Ooms, G. (1972) A new method for the calculation of the plume path of gases emitted by a stack, *Atmospheric Environment* (1967), 6, 899-909.
- Pierce, J., Sakamoto, K. (2016) Data for the article The evolution of biomass-burning aerosol size distributions due to coagulation: dependence on fire and meteorological details and parameterization, Colorado State University, Libraries.
- Prato, D.F., Huertas, J.I. (2019) Determination of the Area Affected by Agricultural Burning, *Atmosphere*, 10(6), 312. <https://doi.org/10.3390/atmos10060312>
- Reid, J.S., Hobbs, P.V. (1998) Physical and optical properties of young smoke from individual biomass fires in Brazil, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103, 32013-32030.
- Reid, J.S., Eck, T.F., Christopher, S.a., Koppmann, R., Dubovik, O., Eleuterio, D., Holben, B.N., Reid, E.A., Zhang, J. (2005) A review of biomass burning emissions part III: intensive optical properties of biomass burning particles, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5, 827-849.
- Schraufnagel, D.E., Balmes, J.R., Cowl, C.T., De Matteis, S., Jung, S.-H., Mortimer, K., Perez-Padilla, R., Rice, M.B., Rojas-Rodriguez, H., Sood, A. (2019) Air pollution and noncommunicable diseases: A review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 2: Air pollution and organ systems, *Chest*, 155, 417-426.
- Vakkari, V., Kerminen, V.M., Beukes, J.P., Tiitta, P., van Zyl, P.G., Josipovic, M., Venter, A.D., Jaars, K., Worsnop, D.R., Kulmala, M. (2014) Rapid changes in biomass burning aerosols by atmospheric oxidation, *Geophysical Research Letters*, 41, 2644-2651.
- Willis, W.B., Eichinger, W.E., Prueger, J.H., Hapeman, C.J., Li, H., Buser, M.D., Hatfield, J.L., Wanjura, J.D., Holt, G.A., Torrents, A., Pfenner, S.J., Clarida, W., Browne, S.D., Downey, P.M., Yao, Q. (2017) Lidar Method to Estimate Emission Rates from Extended Sources, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34, 335-345. <https://doi.org/10.1175/jtech-d-16-0130.1>
- Woodhouse, M.J., Hogg, A.J., Phillips, J.C., Sparks, R.S.J. (2013) Interaction between volcanic plumes and wind during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118, 92-109. <https://doi.org/10.1029/2012jb009592>

Authors Information

김가형 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 석사과정) (g9h22@pukyong.ac.kr)

신주선 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사과정) (juseonshin@pukyong.ac.kr)

김덕현 (한밭대학교 기초과학부 교수) (dhkim7575@hanmail.net)

심주현 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사과정) (sjh10120901@pukyong.ac.kr)

주소희 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 박사과정) (thgm1gh@pukyong.ac.kr)

김정훈 (국립환경과학원 대기공학연구과 연구사) (magnus@korea.kr)

조성환 (국립환경과학원 대기공학연구과 연구원) (joshwan@korea.kr)

강천웅 (국립환경과학원 대기공학연구과 연구원) (kcw90@korea.kr)

노영민 (부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공 조교수) (nym@pknu.ac.kr)