

Article

라이다 데이터를 이용한 PM₁₀, PM_{2.5} 질량소산효율 특성 연구

김태경¹⁾ · 주소희²⁾ · 김가형¹⁾ · 노영민^{3)†}

The Study of PM₁₀, PM_{2.5} Mass Extinction Efficiency Characteristics Using LIDAR Data

TaeGyeong Kim¹⁾ · Sohee Joo²⁾ · Gahyeong Kim¹⁾ · Youngmin Noh^{3)†}

Abstract: From 2015 to June 2020, the backscattering coefficients of 532 and 1064 nm measured using LIDAR and the depolarization ratio at 532 nm were used to separate the backscattering coefficient at 532 nm as three types as PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5} according to particle size. The mass extinction efficiency (MEE) of three types was calculated using the mass concentration measured on the ground. The overall mean values of the calculated MEE were 5.1 ± 2.5 , 1.7 ± 3.7 , and 9.3 ± 6.3 m²/g in PM₁₀, PM_{2.5-10}, and PM_{2.5}, respectively. When the mass concentration of PM₁₀ and PM_{2.5} was low, higher than average MEE was calculated, and it was confirmed that the MEE decreased as the mass concentration increased. When the MEE was calculated for each type according to the mixing degree of Asian dust, PM_{2.5-10} was twice at pollution aerosol as high as 2.1 ± 2.8 m²/g, compare to pollution-dominated mixture, dust-dominated mixture, and pure dust of 1.1 ± 1.8 , 1.4 ± 3.3 , 1.1 ± 1.5 m²/g, respectively. However, PM_{2.5} MEE showed similar values irrespective of type: 9.4 ± 6.5 , 9.0 ± 5.8 , 10.3 ± 7.5 , and 9.1 ± 9.0 m²/g. The MEE of PM₁₀ was 5.6 ± 2.9 , 4.4 ± 2.0 , 3.6 ± 2.9 , and 2.8 ± 2.4 m²/g in pollution aerosol (PA), pollution-dominated mixture (PDM), dust-dominated mixture (DDM), and pure dust (PD), respectively, and increased as the dust ratio value decreased. Even if the same type according to the same mass concentration or Asian dust mixture was shown, as the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio decreased, the MEE of PM_{2.5-10} decreased and the MEE of PM_{2.5} showed a tendency to increase.

Key Words: mass extinction efficiency, lidar, PM₁₀, PM_{2.5}

요약: 2015년 1월부터 2020년 6월까지 라이다를 이용하여 측정된 532와 1064 nm의 후방산란계수와 532 nm의 편광소멸도를 이용하여 532 nm의 후방산란계수를 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}에 해당하는 세 유형으로 구분하고 지상에서 측정된 질량 농도를 이용하여 각각의 질량소산효율을 산출하였다. 산출된 질량소산효율의 전체 평균값

Received November 11, 2021; Revised December 3, 2021; Accepted December 10, 2021; Published online December 14, 2021

¹⁾ 부경대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 (Master Student, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University)

²⁾ 부경대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 (PhD Student, Division of Earth Environmental System Science, Pukyong National University)

³⁾ 부경대학교 환경공학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Environmental Engineering, Pukyong National University)

† Corresponding Author: Youngmin Noh (nym@pknu.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ 에서 각각 5.1 ± 2.5 , 1.7 ± 3.7 , 9.3 ± 6.3 m^2/g 으로 $PM_{2.5}$ 가 가장 높은 값을 보였다. PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도가 낮을 때 평균 이상의 높은 질량소산효율이 산출되었으며 질량 농도가 높아질수록 질량소산효율이 감소되는 경향을 확인하였다. 황사의 혼합 정도에 따른 유형별로 질량소산효율을 산출하였을 때, $PM_{2.5-10}$ 는 황사의 영향으로 오염입자(pollution aerosol, PA)가 2.1 ± 2.8 m^2/g 으로 오염입자가 주요한 혼합입자(pollution-dominated mixture, PDM), 황사가 주요한 혼합입자(dust-dominated mixture, DDM), 순수황사(pure dust, PD)의 1.1 ± 1.8 , 1.4 ± 3.3 , 1.1 ± 1.5 m^2/g 보다 두 배 정도 높은 값을 보였다. 하지만, $PM_{2.5}$ 는 9.4 ± 6.5 , 9.0 ± 5.8 , 10.3 ± 7.5 , 9.1 ± 9.0 m^2/g 으로 유형 구분 없이 비슷한 값을 보였다. PM_{10} 의 질량소산효율은 PA, PDM, DDM, PD에서 각각 5.6 ± 2.9 , 4.4 ± 2.0 , 3.6 ± 2.9 , 2.8 ± 2.4 m^2/g 으로 황사의 비율이 감소할수록 증가하는 경향을 보였다. 동일한 질량 농도 또는 황사 혼합에 따른 동일한 유형을 보이더라도 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 값이 낮아질수록 $PM_{2.5-10}$ 의 질량소산효율은 감소하고, $PM_{2.5}$ 의 질량소산효율은 증가하는 경향을 보였다.

1. 서론

미세먼지에 대한 국민의 관심도가 높아짐에 따라 미세먼지는 가장 주요한 대기 오염물질로 인식되고 있으며, 다양한 발생원이 존재함에 따라 국내뿐만 아니라 국외영향도 큰 비중을 차지하고 있다(Noh and Lee, 2013; Shin and Noh, 2016; Kumar *et al.*, 2021). 이러한 미세먼지의 국내 및 국외의 발생원을 파악하고 국외 유입 미세먼지의 양과 특성을 파악하기 위하여 위성, 선포도미터, 라이다와 같은 원격탐사 기술을 이용한 연구가 많이 이루어지고 있다.

위성과 라이다와 같은 원격탐사로부터 산출되는 결과물은 미세먼지의 질량 농도가 아닌 미세먼지 광학적 두께(Aerosol Optical Depth, AOD)나 소산계수(extinction coefficient)와 같은 광학적 농도로 표출된다. 광학적 농도는 대기 중 미세먼지가 태양광이나 레이저와 같은 광원으로부터 빛이 산란과 흡수되어 손실되는 정도를 나타내는 요소로 미세먼지의 농도와 상관성이 있으나 선형적인 상관관계를 보이지는 않는다. 미세먼지의 광학적 특성은 미세먼지의 종류, 성분, 크기, 혼합 등을 포함하는 물리-화학적 특성에 따라 변화된다(Jung *et al.*, 2018).

입자의 질량소산효율(Mass Extinction Efficiency, MEE)은 미세먼지 단위 질량당 소산 단면적(또는 소산강도)을 나타내는 요소로서 입자의 광학적 특성을 나타내는 중요한 인자이다. 특히, 위성이나 라이다로 측정된 광학적 농도를 질량 농도로 변환하기 위해 반드시 필요한 인자이다(Kim *et al.*, 2015; Wei *et al.*, 2021). MEE는 입자의 종류와 성분에 따라 다양한 값을 가진다. 황사와 같은

사막에서 유래한 먼지입자는 MEE가 $0.2-1.2$ m^2/g 으로 낮으나(Hansell Jr *et al.*, 2011), Black carbon과 같은 광흡수 특성이 높은 입자는 $9.1-10.0$ m^2/g 으로 높은 값을 가진다(Dillner *et al.*, 2001; Tao *et al.*, 2021).

한국이 위치하고 있는 동북아시아 지역은 황사를 포함하여 다양한 성분의 미세먼지 종류가 발생하고 장거리 이동하여 국내 대기환경에 영향을 미치면서 다양한 특성을 보여주게 된다. 특히, 황사는 다른 미세먼지 종류와는 물리적, 화학적, 광학적 특성이 확연히 구분되며 혼합 정도에 따라서 전체 미세먼지의 특성을 변화시키게 된다(Noh *et al.*, 2017). 국내에서 미세먼지의 여러 특성에 대한 다양한 연구가 이루어졌지만 MEE에 대한 연구는 미약하다. Jung *et al.* (2018)은 황사와 오염입자의 혼합에 따른 MEE의 변화를 2012년 3월 25일부터 31일 사이에 측정된 데이터를 기반으로 연구하였고, Joo *et al.* (2021)은 2015년부터 2019년까지 부산과 울산에서 측정된 시정(Visibility) 자료를 이용하여 MEE 변화 특성을 연구하였다. 하지만, 황사와 오염입자의 혼합 정도를 고려하여 국내 미세먼지 MEE의 장기 관측 데이터를 분석한 연구는 이루어지지 않았다.

본 연구는 2015년 1월부터 2020년 6월까지 라이다 관측으로 산출된 532와 1064 nm의 후방산란계수(Backscattering coefficient)와 532 nm에서의 편광소멸도(Depolarization ratio)를 이용하여 미세먼지 입자 크기(PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$)와 황사 혼합비율에 따른 MEE 변화를 연구하였다.

2. 연구방법

1) 라이다 데이터를 이용한 PM₁₀, PM_{2.5} 소산계수 산출

라이다 관측으로부터 기본적으로 산출되는 한 파장에서의 후방산란계수는 입자의 크기나 종류에 상관없이 전체 에어로졸에 대한 산란 값을 나타낸다. 하지만, 두 파장에서의 후방산란계수 각각의 값을 확보하게 되면 입자 크기에 대한 정보를 확인할 수 있다. 본 연구에서는 Noh *et al.* (2020)이 개발한 라이다 관측에서 기본이 되는 파장인 532 nm와 Nd:YAG 레이저의 발진 파장인 1064 nm의 두 파장을 이용하여 입자 크기를 PM_{2.5}와 PM₁₀으로 구분하는 방법을 기본으로 활용하였다. 자세한 방법은 아래와 같다.

라이다 관측을 통하여 확보된 후방 산란광을 Klett method (Klett, 1981)로 분석하여 대기 에어로졸 전체에 대한 후방산란계수(β_T)를 산출할 수 있다. β_T 는 조대입자에 의한 후방산란계수(β_C , Course-mode particle)와 미세입자에 해당하는 후방산란계수(β_F , Fine-mode particle)로 구성되어 있으며 아래의 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\beta_{C,\lambda} + \beta_{F,\lambda} = \beta_{T,\lambda} \quad (1)$$

여기서, λ 는 532와 1064 nm 파장을 의미한다.

532와 1064 nm의 두 파장에서의 입자크기에 따른 후방산란계수는 옵스트롬 지수(\AA : Ångström Exponent)로서 식 (2)에서 설명할 수 있다.

$$\text{\AA} = -\frac{\ln\beta_{T,532} / \beta_{T,1064}}{\ln(532 / 1064)} \quad (2)$$

식 (2)의 형태로 표현된 \AA 는 532와 1064 nm 파장의 후방산란계수 각각의 관계를 표시하기 위하여 식 (3)으로 변형이 가능하다.

$$\ln \frac{\beta_{T,532}}{\beta_{T,1064}} = 0.693A \quad (3)$$

식 (3)은 다시 β_C 와 β_F 에 대한 형태인 식 (4), (5), (6), (7)로 변경이 가능하다.

$$B = -\frac{\ln\beta_{C,532} / \beta_{C,1064}}{\ln532 / 1064} \quad (4)$$

$$\ln \frac{\beta_{C,532}}{\beta_{C,1064}} = 0.693B \quad (5)$$

$$C = -\frac{\ln\beta_{F,532} / \beta_{F,1064}}{\ln532 / 1064} \quad (6)$$

$$\ln \frac{\beta_{F,532}}{\beta_{F,1064}} = 0.693C \quad (7)$$

두 파장에서 β_T 와 β_C 및 β_F 와의 관계로 표현되는 식 (8)과 (9)로 변형하여 최종적으로 β_T 로부터 β_F 또는 β_C 를 산출할 수 있다.

$$\beta_{F,532} = \frac{e^{0.693(A-B)} - 1}{e^{0.693(A-B)} - e^{0.693(A-C)}} \beta_{T,532} \quad (8)$$

$$\beta_{C,532} = \frac{1 - e^{0.693(A-C)}}{e^{0.693(A-B)} - e^{0.693(A-C)}} \beta_{T,532} \quad (9)$$

여기서, β_C 에 해당하는 부분은 PM_{2.5-10}, β_F 는 PM_{2.5}에 해당한다고 판단할 수 있다. 산출된 각각의 β_T 에 라이다 비(Lidar ratio)를 곱하여 미세먼지 전체의 소산계수 (Extinction coefficient, α_T)를 산출할 수 있다. 라이다 비는 통상적으로 50~100 sr의 값으로 일반적인 오염입자의 경우 광흡수 특성이 높거나 미세입자의 경우에 70 sr 이상의 높은 값을 가지고, 황사와 같은 조대입자의 경우에는 50 sr 이하의 낮은 값을 가진다(Noh *et al.*, 2007; Noh *et al.*, 2008). 본 연구에서는 편광소멸도(depolarization ratio, δ)를 이용하여 황사비(dust ratio, R_D)를 산출하고, Shin *et al.* (2019)가 제안한 R_D 를 이용하여 에어로졸 유형을 구분하여 유형에 따라 구분되는 라이다 비를 적용하였다. RD의 범위가 0.89 이상일때는 순수황사(Pure Dust, PD), 0.89 미만에서 0.53이상에서는 황사가 주요한 혼합(Dust-dominated mixture, DDM), 0.53 미만에서 0.17 이상은 오염입자가 주요한 혼합(Pollution-dominated Mixture, PDM), 그리고 0.17 미만은 오염입자(Pollution aerosol, PA)로 구분하였다. PD, DDM, PDM, PA에 라이다 비는 조대입자에는 각각 40, 45, 50, 60 sr, 미세입자에는 50, 55, 60, 70 sr을 적용하여 조대입자에 의한 소산계수(α_C)와 미세입자에 해당하는 소산계수(α_F) 산출하였다. 여기서, α_F 는 PM_{2.5}에 해당하고 α_C 는 PM_{2.5-10}에 해당한다.

2) 질량소산효율 산출

질량소산효율(Mass extinction efficiency, MEE)는 미세먼지에 대한 광학적 농도인 소산계수를 질량농도로 변환하기 위한 필수적인 인자로 단위 질량당 소산면적 (m²/g)을 나타낸다. MEE와 질량농도와의 관계는 다음과 같다.

$$MEE_a \left(\frac{m^2}{g} \right) = \frac{\alpha_b (m^{-1})}{\text{Mass concentration}_c \left(\frac{\mu g}{m^3} \right)} \times 10^6 \quad (10)$$

여기서, a 는 미세먼지 입자 크기에 대한 정보로 PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ 를 적용할 수 있다. b 는 입자크기에 따른 소산계수를 구분하는 것으로 $\alpha_T, \alpha_C, \alpha_F$ 를 대입한다. c 는 입자크기에 따른 질량농도로서 PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ 를 적용하며, $PM_{2.5-10}$ 은 동일 시점에서 측정된 PM_{10} 에서 $PM_{2.5}$ 를 빼서 산출하였다.

3) 분석 데이터

본 연구에서는 서울(129.95E 37.46N)에서 장기관측되고 있는 라이다 자료를 일본 국립환경과학원 사이트에서 확보하여 분석에 활용하였다. 확보된 β_T 와 δ 는 지상에서부터 수직으로 12 km고도까지의 결과를 보여주나 본 연구에서는 지상에서 측정된 미세먼지 질량농도

와의 비교가 필요하여 1 km 이내의 고도에서는 대기의 혼합이 균일하다고 가정하여 지상에서부터 1 km까지의 평균 β_T 와 δ 를 산출하여 분석하였다.

MEE 산출에 필요한 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 질량농도는 라이다 관측 지점에서 4 km 거리에 위치한 서울 관악구의 Airkorea (<http://airkorea.or.kr>) 사이트 자료를 이용하였다. 공인된 $PM_{2.5}$ 질량농도 자료는 2015년부터 존재하여서 라이다, PM_{10} , $PM_{2.5}$ 자료가 모두 존재하는 2015년부터 2020년까지 관측된 자료를 분석에 활용하였다.

3. 연구내용

2015년부터 2020년 6월까지 관측된 라이다 데이터를 분석하여 소산계수를 산출하고, 산출된 소산계수와 동일 시간에 측정된 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 의 질량 농도가 존재

Table 1. The average value of PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ mass extinction efficiency. Classified into good, moderate, poor, and very bad grades according to the range of PM_{10} mass concentrations. It is also displayed as an average value divided into four types according to the $PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio at each stage

| | PM _{2.5} Ratio* | Mass Extinction Efficiency | | | RD |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|
| | | PM ₁₀ | PM _{2.5-10} | PM _{2.5} | |
| x > 150 (Very bad) | Total | 1.3 ± 0.5 | 0.5 ± 0.4 | 4.0 ± 4.7 | 0.59 ± 0.26 |
| | x ≥ 0.8 | 1.6 ± 0.4 | 0.8 ± 0.3 | 1.9 ± 0.4 | 0.17 ± 0.07 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 1.7 ± 0.4 | 0.6 ± 0.5 | 2.3 ± 0.6 | 0.42 ± 0.16 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 1.4 ± 0.4 | 0.7 ± 0.4 | 2.2 ± 0.9 | 0.40 ± 0.23 |
| | 0.4 > x | 1.5 ± 0.5 | 0.5 ± 0.4 | 7.3 ± 5.5 | 0.77 ± 0.18 |
| 150 ≥ x > 80 (Bad) | Total | 2.5 ± 0.8 | 1.1 ± 1.3 | 4.7 ± 3.8 | 0.31 ± 0.22 |
| | x ≥ 0.8 | 2.2 ± 0.7 | 2.1 ± 2.6 | 2.6 ± 0.8 | 0.20 ± 0.13 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 2.5 ± 0.8 | 1.2 ± 1.2 | 3.4 ± 1.2 | 0.21 ± 0.14 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 2.7 ± 0.8 | 1.0 ± 0.8 | 4.5 ± 1.7 | 0.31 ± 0.17 |
| | 0.4 > x | 2.4 ± 0.9 | 0.5 ± 0.5 | 9.5 ± 6.1 | 0.59 ± 0.24 |
| 80 ≥ x > 30 (Moderate) | Total | 4.4 ± 1.8 | 1.6 ± 2.4 | 7.7 ± 4.4 | 0.19 ± 0.16 |
| | x ≥ 0.8 | 4.2 ± 1.8 | 4.6 ± 6.2 | 4.8 ± 1.9 | 0.13 ± 0.12 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 4.3 ± 1.8 | 2.1 ± 2.4 | 5.9 ± 2.8 | 0.13 ± 0.12 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 4.5 ± 1.7 | 1.1 ± 1.3 | 8.4 ± 3.6 | 0.21 ± 0.14 |
| | 0.4 > x | 4.1 ± 1.6 | 0.7 ± 0.8 | 13.5 ± 6.3 | 0.37 ± 0.19 |
| 30 ≥ x (Good) | Total | 7.3 ± 3.2 | 1.9 ± 3.2 | 14.2 ± 7.6 | 0.13 ± 0.15 |
| | x ≥ 0.8 | 8.6 ± 4.6 | 6.5 ± 7.6 | 10.0 ± 5.6 | 0.11 ± 0.17 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 7.2 ± 3.4 | 2.6 ± 3.5 | 10.5 ± 5.4 | 0.10 ± 0.14 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 7.2 ± 3.1 | 1.4 ± 2.1 | 14.5 ± 6.8 | 0.14 ± 0.14 |
| | 0.4 > x | 7.0 ± 2.3 | 0.7 ± 0.9 | 22.0 ± 7.8 | 0.20 ± 0.15 |
| Total | 5.1 ± 2.5 | 1.7 ± 3.7 | 9.3 ± 6.3 | 0.18 ± 0.18 | |

*PM_{2.5}/PM₁₀ ratio

하는 21,341개의 데이터를 확보하였다. 이를 분석하여 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}에 해당하는 미세먼지의 MEE를 산출하였다.

Table 1은 분석된 데이터 전체에 대한 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}의 전체평균 MEE와 PM₁₀ 농도에 따라 대기 미세먼지 상태가 좋음(0-30 µg/m³), 보통(31-80 µg/m³), 나쁨(81-150 µg/m³), 매우 나쁨(150 µg/m³ 이상)으로 구분한 MEE를 보여준다. 전체 평균 MEE는 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}에서 각각 5.1±2.5, 1.7±3.7, 9.3±6.3 m²/g으로 PM_{2.5}가 가장 높은 값을 보이고 조대입자로 구성된 PM_{2.5-10}는 가장 낮은 값을 보였다. Kim *et al.* (2015)는 2006년 6월부터 2014년 5월까지 8년간 서울에서 관측된 라이다 데이터와 PM₁₀ 농도 자료를 이용하여 PM₁₀의 MEE가 3.69±1.67 m²/g임을 확인하였다. Cheng *et al.* (2013)은 중국 동부 해안지역에서 시정자료와 PM₁₀, PM_{2.5} 질량 농도를 이용하여 산출한 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}의 MEE가 각각 2.25±1.02, 0.58±0.02, 4.08±0.03 m²/g임을 확인하였다. Qu *et al.* (2015)도 2007년 5월부터 2008년 6월까지의 시정자료와 질량농도 자료 분석을 통하여 PM₁₀과 PM_{2.5}의 MEE가 각각 6.9와 9.4 m²/g이라고 보고하였다. 이와 같이 많은 선행연구결과들이 PM_{2.5}의 MEE가 PM₁₀보다 높은 결과를 보여주었다. 이는 입자 크기가 적을수록 높은 MEE를 보이는 일반적인 특징에서 비롯된 것으로 판단되며 본 연구에서도 동일한 결과를 보이고 있다.

Table 1에는 PM₁₀ 농도에 따라 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨으로 구분한 네 유형의 MEE 값도 보여주고 있다. PM₁₀의 MEE는 네 유형에 따라 각각 7.3±3.2, 4.4±1.8, 2.5±0.8, 1.3±0.5 m²/g으로 PM₁₀ 농도가 낮을수록 높은 MEE를 보였다. 이와 같은 PM₁₀ 농도에 따른 MEE 값의 변화 경향은 PM_{2.5-10}과 PM_{2.5}에서도 동일하게 확인되었다. Table 1에는 MEE와 함께 RD의 평균값도 전체와 네 유형에 따라 정리되어 있다. 전체 RD평균값은 0.18±0.18이지만, 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨의 유형에 따라서는 각각 0.13±0.15, 0.19±0.16, 0.31±0.22, 0.59±0.26으로 PM₁₀의 농도가 높을수록 높은 값을 보였다. 이 결과는 PM₁₀이 고농도일 때 황사의 비율이 높다는 것을 의미한다. Table 1에는 PM₁₀ 농도에 따른 네 유형에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따라 다시 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.8 이상, 0.8미만에서 0.6이상, 0.6 미만에서 0.4 이상, 그리고 0.4 미만으로 분류를 하였다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따른 PM₁₀

MEE의 평균값은 PM_{2.5}/PM₁₀ 비와는 상관없이 유사한 값을 보이고 있다. 하지만, PM_{2.5-10}은 매우 나쁨 유형을 제외하고 나머지 세 유형에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높아질수록 MEE가 높아지는 경향을 보였다. 이와 달리 PM_{2.5}에서는 PM_{2.5-10}과는 반대로 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높아질수록 MEE가 낮아지는 특징을 보였다.

PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높아질수록 PM_{2.5-10} MEE가 높아지는 경향은 미세먼지에 포함된 황사와 관련된 것으로 판단된다. 앞서 언급했듯이 조대입자의 MEE가 미세입자에 비하여 높은 값을 보이는 것은 많은 사전 연구로부터 확인되었고, 조대입자 중 황사입자는 MEE가 0.2-1.2 m²/g으로 매우 낮은 값을 가진다(Clarke *et al.*, 2004; Hand and Malm, 2007; Hansell Jr *et al.*, 2011). Table 1은 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮아질수록 RD가 높아지는 경향이 PM₁₀ 농도에 따른 네 유형에서 모두 확인된다.

Fig. 1은 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따라 0.1 단위로 10개의 구간으로 나누어 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}의 MEE 변화를 확인한 것이다. Fig. 1에서는 Table 1과는 달리 PM₁₀ 농도에 따른 유형을 구분하지 않았다. PM_{2.5-10}은 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0-0.19에서는 MEE가 0.2±0.1 m²/g으로 매우 낮으나 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 높아짐에 따라 MEE도 증가하여 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.9-1.0에서는 9.8±8.9 m²/g이었다. PM_{2.5}/PM₁₀ 비와 RD는 반대의 경향을 보여 PM_{2.5} 비율이 낮아지면 황사의 비율이 증가됨을 확인시켜 주고 있다. PM₁₀은 전반적으로는 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 감소함에

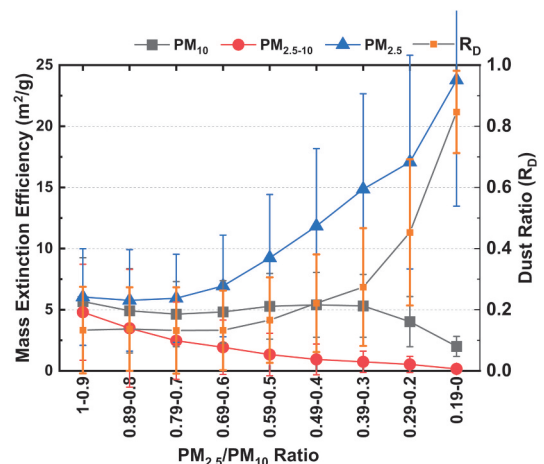


Fig. 1. The average value of PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5} mass extinction efficiency and dust ratio (RD) separated according to PM_{2.5}/PM₁₀ ratio.

따라 MEE도 감소하는 경향을 보이고 있으나 0.30-0.39 구간까지는 감소추세가 거의 없거나 매우 미약하다 그 이후의 구간에서 급격히 감소하고 있다. 급격히 감소하는 0.20-0.29와 0.0-0.19 구간에서의 RD는 각각 0.45와 0.85로 전체 질량 농도에서 황사의 비율이 급격히 높아지고 있음을 보여준다. 이와 같이 황사 입자는 다른 오염입자에 비하여 낮은 MEE를 보이므로 황사의 비율이 높을수록 PM_{2.5-10}의 MEE가 낮아지고, PM_{2.5-10}의 낮은 MEE의 영향으로 PM₁₀의 MEE도 낮아지는 것으로 판단된다.

Fig. 1에서 PM_{2.5}의 MEE는 PM₁₀, PM_{2.5-10}과는 달리 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 감소함에 따라 증가하는 추세를 보이고 있다. 특히, PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.60-0.69 구간부터는 급격히 증가하고 있다. Fig. 2는 PM_{2.5} MEE의 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따른 특성을 분석하기 위하여 PM₁₀ 농도에 따른 네 유형과 PM_{2.5}/PM₁₀ 비를 고려한 박스 플롯(Box-and-Whisker Plot)을 보여준다. 전체적으로는 Table 1에서 확

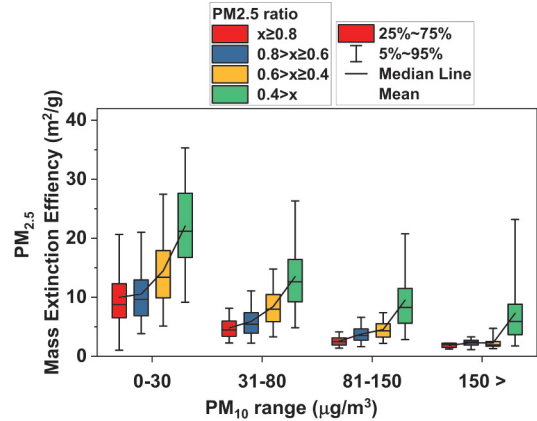


Fig. 2. Box-and-Whisker Plot considering four types classified as good, normal, bad, and very bad according to PM₁₀ concentration and the ratio of PM_{2.5}/PM₁₀.

인되었듯이 PM₁₀ 농도가 높을수록, 그리고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮을수록 PM_{2.5}의 MEE가 높은 경향을 보여주고 있다. 평균값(Mean value)이 중간값(Median value)보다

Table 2. The average value of PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5} mass extinction efficiency. Classified into pure dust (PD), dust-dominated mixture (DDM), pollution-dominated mixture(PDM), and pollution aerosol (PA) according to the range of dust ratio (RD). It is also displayed as an average value divided into four types according to the PM_{2.5}/PM₁₀ ratio at each stage. The average value of PM₁₀ and PM_{2.5} mass concentration is also listed

| Type | PM _{2.5} ratio | Mass Extinction Efficiency (m ² /g) | | | Mass Concentration (µg/m ³) | |
|------|-------------------------|--|----------------------|-------------------|---|--------------------|
| | | PM ₁₀ | PM _{2.5-10} | PM _{2.5} | PM ₁₀ | PM _{2.5} |
| PD | Total | 2.8 ± 2.4 | 1.1 ± 1.5 | 9.1 ± 9.0 | 78.1 ± 94.7 | 20.2 ± 14.7 |
| | x ≥ 0.8 | – | – | – | – | – |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 3.4 ± 3.6 | 2.6 ± 3.5 | 4.4 ± 4.6 | 30.2 ± 15.3 | 21.2 ± 11.6 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 2.3 ± 2.1 | 1.0 ± 1.0 | 3.9 ± 3.8 | 32.3 ± 26.3 | 15.7 ± 11.2 |
| | 0.4 > x | 2.8 ± 2.4 | 0.5 ± 0.5 | 13.8 ± 9.8 | 138.0 ± 114.8 | 22.0 ± 17.6 |
| DDM | Total | 3.6 ± 2.9 | 1.4 ± 3.3 | 10.3 ± 7.5 | 76.9 ± 48.2 | 26.6 ± 22.1 |
| | x ≥ 0.8 | 6.7 ± 6.5 | 14.3 ± 10.0 | 6.1 ± 7.1 | 56.4 ± 31.5 | 47.7 ± 26.8 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 4.8 ± 4.5 | 3.4 ± 5.8 | 6.0 ± 5.0 | 75.0 ± 57.2 | 51.7 ± 40.2 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 4.6 ± 3.4 | 1.8 ± 2.9 | 8.2 ± 6.3 | 59.1 ± 37.5 | 28.6 ± 18.4 |
| | 0.4 > x | 3.0 ± 1.6 | 0.5 ± 0.5 | 12.1 ± 7.6 | 85.1 ± 48.4 | 20.4 ± 12.5 |
| PDM | Total | 4.4 ± 2.0 | 1.1 ± 1.8 | 9.0 ± 5.8 | 50.8 ± 25.3 | 28.0 ± 18.8 |
| | x ≥ 0.8 | 4.0 ± 2.7 | 3.4 ± 5.3 | 4.7 ± 3.0 | 63.4 ± 30.2 | 54.3 ± 26.0 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 4.0 ± 2.0 | 1.3 ± 1.9 | 5.8 ± 3.1 | 58.7 ± 30.0 | 39.9 ± 21.2 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 4.5 ± 2.0 | 0.9 ± 1.2 | 8.9 ± 4.5 | 47.9 ± 21.4 | 24.3 ± 11.6 |
| | 0.4 > x | 4.7 ± 1.9 | 0.6 ± 0.7 | 15.2 ± 7.2 | 43.2 ± 21.9 | 13.6 ± 7.5 |
| PA | Total | 5.6 ± 2.9 | 2.1 ± 2.8 | 9.4 ± 6.5 | 40.7 ± 20.6 | 25.5 ± 15.3 |
| | x ≥ 0.8 | 5.4 ± 3.6 | 5.1 ± 6.4 | 6.3 ± 4.3 | 45.0 ± 25.1 | 38.6 ± 21.6 |
| | 0.8 > x ≥ 0.6 | 5.1 ± 2.7 | 2.4 ± 2.7 | 7.1 ± 4.3 | 44.8 ± 20.7 | 30.5 ± 14.6 |
| | 0.6 > x ≥ 0.4 | 6.0 ± 2.9 | 1.4 ± 1.7 | 11.4 ± 6.4 | 35.7 ± 17.5 | 18.7 ± 15.5 |
| | 0.4 > x | 6.6 ± 2.8 | 1.0 ± 1.1 | 19.6 ± 9.1 | 31.7 ± 20.4 | 10.7 ± 15.3 |

높은 값을 보여 전체적으로 PM_{2.5} MEE의 분포는 모든 경우에서 평균값보다 낮은 case의 숫자가 많지만 평균 값 이상의 값에서 매우 높은 값을 가지는 경우가 많이 있음을 확인할 수 있다. 하지만, Fig. 2만으로는 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮을 때 PM_{2.5}의 MEE가 높은 것에 대한 설명이 부족하다. 앞서 언급하였듯이 PM_{2.5}/PM₁₀ 비와 가장 상관성이 높은 것은 RD이기에 Shin *et al.* (2019)가 제안한 RD를 이용하여 황사의 혼합정도에 따라 유형을 구분하고 각 유형을 다시 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따라 분류하여 보았다.

Table 2는 RD를 이용한 유형 구분과 각 유형에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따른 PM₁₀, PM_{2.5-10}, PM_{2.5}의 MEE와 PM₁₀, PM_{2.5} 질량농도의 평균값을 보여준다. PM_{2.5-10}은 각각 PA가 2.1±2.8 m²/g으로 다른 세 유형에 비하여 두 배 정도 높은 값을 보였고, PDM, DDM, PD는 각각 1.1±1.8, 1.4±3.3, 1.1±1.5 m²/g으로 비슷한 값을 보였다. PM_{2.5}는 각 유형별로 9.4±6.5, 9.0±5.8, 10.3±7.5, 9.1±9.0 m²/g으로 유사한 값을 보였다. PM₁₀의 MEE는 PA, PDM, DDM, PD에서 각각 5.6±2.9, 4.4±2.0, 3.6±2.9, 2.8±2.4 m²/g으로 RD 값이 낮아짐에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 황사의 MEE가 낮은 값을 가지므로 황사가 많이 혼합되어 있을수록 PM₁₀의 MEE도 낮아짐을 확인시켜준다.

각 유형별에 따라 다시 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따라 구분한 경우에는 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮을수록 PM_{2.5-10}의 MEE는 감소하고 PM_{2.5}의 MEE는 증가하는 특징이 확인되었다. 황사는 대부분 조대입자로 구성되어 있지만 미세입자로 분포하는 황사입자도 존재한다. Hand and Malm (2007)은 조대황사와 미세황사의 MEE각 각각 0.9±0.8과 1.2±0.3 m²/g으로 미세황사의 MEE가 조대황사에 비하여 높음을 확인하였다. 하지만, 미세황사의 MEE는 미세 오염입자의 MEE에 비해서는 상당히 낮음을 알 수 있다. RD가 높고 PM_{2.5}/PM₁₀ 비도 높다는 것은 PM_{2.5}에 미세황사가 많이 포함되어 있다고 해석할 수 있다. 따라서, Table 2에서 각 유형에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮아짐에 따라 PM_{2.5}의 MEE가 증가하는 것은 PM_{2.5}에서 황사가 아닌 오염입자의 비율의 증가로 유발되는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Qu *et al.* (2015)가 시정자료를 이용한 중국 동부 해안에서의 PM_{2.5}와 PM₁₀의 MEE를 산출하였을 때, PM_{2.5}와 PM₁₀에서 황사의 비율이 높을수록 MEE가 낮

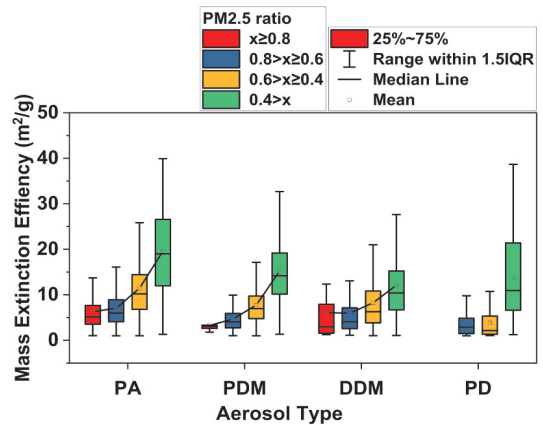


Fig. 3. Box-and-Whisker Plot considering four types classified as pure dust (PD), dust-dominated mixture (DDM), pollution dominated mixture (PDM), and pollution aerosol (PA) according to dust ratio. In each type, it is divided into four types according to the ratio of PM_{2.5}/PM₁₀.

아지는 경향과 일치된 결과를 보여준다.

Fig. 3은 RD에 따른 미세먼지 유형과 각 유형에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따른 PM_{2.5} MEE의 박스 플롯을 보여준다. Fig. 3에서 확인되는 유형별 PM_{2.5}/PM₁₀ 비에 따른 PM_{2.5} MEE의 분포도 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 낮을 때 높은 값을 보여주고 있다. Qu *et al.* (2015)는 PM_{2.5}와 PM₁₀의 질량농도가 고농도 일 때 MEE가 상대적으로 낮은 값을 보이나 질량 농도가 감소하다 각각 50과 100 µg/m³ 이하로 감소할 때 MEE가 급격히 증가함을 확인하였다. 이는 본 연구의 Fig. 2에서 확인된 PM₁₀ 질량 농도가 낮은 농도일수록 PM₁₀과 PM_{2.5}의 MEE가 높은 값을 보이는 것과 일치한다.

Table 2와 PD 유형에서 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.4 미만에서 PM_{2.5} MEE가 13.8±9.8 m²/g로 DDM에서의 값보다 높고, Fig. 3에서 확인되는 분포는 DDM과 PDM보다 높고 PA와 유사한 분포를 보이고 있다. PD의 경우 강한 황사가 발생한 경우를 뜻할 수 있는데, 이중 PM_{2.5}/PM₁₀ 비가 0.4 미만의 PM₁₀ 질량 농도가 138.0±114.8 µg/m³으로 다른 유형에 비하여 강한 황사가 발생했음을 알 수 있다. 상대적으로 높은 PM_{2.5} MEE는 황사가 이동할 때 포함된 중국지역에서 발생한 오염입자의 영향이 높아서 유발된 것으로 판단된다. Qu *et al.* (2015)는 PM_{2.5}와 PM₁₀의 성분에서 황산염의 비율이 높아질수록 MEE가 증가됨을 확인하였다. Noh *et al.* (2011)은 중국으로부터

장거리 이동된 미세먼지의 단산란 알베도가 0.87 ± 0.02 로 국내 발생 미세먼지의 0.97 ± 0.01 에 비하여 낮음을 확인하였다. 단산란 알베도가 낮다는 것은 성분 중에 Black carbon의 비율이 높다는 것을 의미하며, Black carbon의 MEE는 다른 성분에 비하여 높은 값을 보인다. 이러한 선행 연구 결과를 바탕으로 PD에서 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 0.4 미만일 때 높은 $PM_{2.5}$ MEE는 중국으로부터 황사 유입 시 동시에 유입된 장거리 이동된 오염입자의 영향인 것으로 유추된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 서울에서 라이다를 이용하여 2015년부터 2020년 6월까지 측정된 532와 1064 nm의 후방산란 계수와 532 nm의 편광소멸도를 이용하여 PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ 의 MEE를 산출하였다. 산출된 MEE의 전체 평균값은 PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ 에서 각각 5.1 ± 2.5 , 1.7 ± 3.7 , 9.3 ± 6.3 m^2/g 으로 $PM_{2.5}$ 가 가장 높은 값을 보였다. 미세먼지의 질량 농도에 따른 MEE 값은 PM_{10} 과 $PM_{2.5}$ 에서 모두 질량 농도가 낮을수록 높은 MEE가 확인되었다. $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비와의 연관성에서는 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 비가 높아질수록 $PM_{2.5-10}$ 의 MEE는 황사의 영향으로 낮아지고, $PM_{2.5}$ 의 MEE는 오염입자의 영향으로 높아지는 경향을 보였다.

R_D 에 따른 유형별로 MEE를 산출하였을 때, $PM_{2.5-10}$ 는 황사의 영향으로 PA가 2.1 ± 2.8 m^2/g 으로 PDM, DDM, PD의 1.1 ± 1.8 , 1.4 ± 3.3 , 1.1 ± 1.5 m^2/g 보다 두 배 정도 높은 값을 보였다. 하지만, $PM_{2.5}$ 는 9.4 ± 6.5 , 9.0 ± 5.8 , 10.3 ± 7.5 , 9.1 ± 9.0 m^2/g 으로 유형 구분 없이 비슷한 값을 보였다. PM_{10} 의 MEE는 PA, PDM, DDM, PD에서 각각 5.6 ± 2.9 , 4.4 ± 2.0 , 3.6 ± 2.9 , 2.8 ± 2.4 m^2/g 으로 R_D 값이 낮아짐에 따라 증가하였다.

이와 같이 국내 미세먼지의 MEE 값은 황사가 어느 정도 혼합되어 있는지에 따라 값이 변화됨을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 향후 위성이나 라이다 등 원격탐사로 관측될 데이터를 이용하여 광범위한 영역이나 고도별 미세먼지 질량 농도 산출을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한, MEE는 미세먼지 단위 질량 당 소산 정도를 파악할 수 있는 자료로서 국내 미세먼지의 특성 변화 연구에 중요하게 활용될 수 있다.

사사

이 논문은 2021학년도 부경대학교 국립대학육성사업 지원비(PhiNX 보호학문 차세대육성)에 의하여 연구되었음.

References

- Cheng, Z., S. Wang, J. Jiang, Q. Fu, C. Chen, B. Xu, J. Yu, X. Fu, and J. Hao, 2013. Long-term trend of haze pollution and impact of particulate matter in the Yangtze River Delta, China, *Environ Pollut*, 182: 101-10.
- Clarke, A.D., Y. Shinozuka, V.N. Kapustin, S. Howell, B. Huebert, S. Doherty, T. Anderson, D. Covert, J. Anderson, X. Hua, K.G. Moore II, C. McNaughton, G. Carmichael, and R. Weber, 2004. Size distributions and mixtures of dust and black carbon aerosol in Asian outflow: Physiochemistry and optical properties, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D15): D15S09.
- Dillner, A.M., C. Stein, S.M. Larson, and R. Hitzenberger, 2001. Measuring the Mass Extinction Efficiency of Elemental Carbon in Rural Aerosol, *Aerosol Science and Technology*, 35(6): 1009-1021.
- Hand, J.L. and W.C. Malm, 2007. Review of aerosol mass scattering efficiencies from ground-based measurements since 1990, *Journal of Geophysical Research*, 112(D16): D16203.
- Hansell Jr, R.A., J.S. Reid, S.C. Tsay, T.L. Roush, and O.V. Kalashnikova, 2011. A sensitivity study on the effects of particle chemistry, asphericity and size on the mass extinction efficiency of mineral dust in the earth's atmosphere: from the near to thermal IR, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(4): 1527-1547.
- Joo, S.H. and Y.M. Noh, 2021. A Study on the Characteristic Variations of Fine Particle in Busan and Ulsan through Particle Extinction Efficiency Analysis, *Journal of Korean Society*

- for *Atmospheric Environment*, 37(1): 80-90 (in Korean with English abstract).
- Jung, C.H., J.Y. Lee, J.S. Um, S.S. Lee, and Y.P. Kim, 2018. Chemical Composition Based Aerosol Optical Properties According to Size Distribution and Mixture Types during Smog and Asian Dust Events in Seoul, Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 54(1): 19-32.
- Kim, M.-H., H.D. Yeo, N. Sugimoto, H.-C. Lim, C.-K. Lee, B.-H. Heo, Y.-S. Yu, B.-J. Sohn, S.-C. Yoon, and S.-W. Kim, 2015. Estimation of Particle Mass Concentration from Lidar Measurement, *Atmosphere*, 25(1): 169-177 (in Korean with English abstract).
- Klett, James D., 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics*, 20(2): 211-220.
- Kumar, N., R.J. Park, J.I. Jeong, J.-H. Woo, Y.H. Kim, J. Johnson, G. Yarwood, S.J. Kang, S.N. Chun, and E. Knipping, 2021. Contributions of international sources to PM_{2.5} in South Korea, *Atmospheric Environment*, 261: 118542.
- Noh, Y.M., D.H. Kim, S.C. Choi, C.G. Choi, T.G. Kim, G.H. Kim, and D.H. Shin, 2020. High Resolution Fine Dust Mass Concentration Calculation Using Two-wavelength Scanning Lidar System, *Korean Journal of Remote Sensing*, 36(6): 1681-1690 (in Korean with English abstract).
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, B.C. Choi, and T. Murayama, 2007. Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, Korea, *Atmospheric Research*, 86(1): 76-87.
- Noh, Y.M., Y.J. Kim, and D. Müller, 2008. Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn, *Atmospheric Environment*, 42(9): 2208-2224.
- Noh, Y.M., D. Müller, I. Mattis, H.L. Lee, and Y.J. Kim, 2011. Vertically resolved light-absorption characteristics and the influence of relative humidity on particle properties: Multiwavelength Raman lidar observations of East Asian aerosol types over Korea, *Journal of Geophysical Research*, 116(D6): D06206.
- Noh, Y.M. and K.-H. Lee, 2013. Characterization of Optical Properties of Long-range Transported Asian Dust in NorthEast Asia, *Korean Journal of Remote Sensing*, 29(2): 243-251 (in Korean with English abstract).
- Noh, Y.M., D. Müller, K.H. Lee, K.C. Kim, K.H. Lee, A. Shimizu, I. Sano, and C.B. Park, 2017. Depolarization ratios retrieved by AERONET sun-sky radiometer data and comparison to depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(10): 6271-6290.
- Qu, W.J., J. Wang, X.Y. Zhang, D. Wang, and L.F. Sheng, 2015. Influence of relative humidity on aerosol composition: Impacts on light extinction and visibility impairment at two sites in coastal area of China, *Atmospheric Research*, 153: 500-511.
- Shin, D.H. and Y.M. Noh, 2016. Aerosol Optical Properties Retrieval and Separation of Asian Dust using AERONET Sun/Sky Radiometer Measurement at the Asian Dust Source Region, *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(3): 245-251 (in Korean with English abstract).
- Shin, S.-K., M. Tesche, Y.M. Noh, and D. Müller, 2019. Aerosol-type classification based on AERONET version 3 inversion products, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(7): 3789-3803.
- Tao, J., Z. Zhang, L. Zhang, Y. Wu, R. Zhang, and B. Wang, 2021. Impact of deliquescence of aerosol on mass absorption efficiency of elemental carbon in fine particles in urban Guangzhou in south China, *Atmospheric Environment*, 256: 118476.
- Wei, Y., Z. Li, Y. Zhang, C. Chen, Y. Xie, Y. Lv, and O. Dubovik, 2021. Derivation of PM₁₀ mass concentration from advanced satellite retrieval products based on a semi-empirical physical approach, *Remote Sensing of Environment*, 256: 112319.