



논문

# 에어로졸 총량 변화에 따른 각도와 파장 의존 산란 신호 세기 특성 변화에 관한 연구

## Study on the Angle and Wavelength Dependent Scattering Signals Characteristics according to the Total Aerosol Mass Concentration Changes

노영민, 신주선, 김덕현<sup>1),\*</sup>

부경대학교 지구환경시스템과학부 환경공학전공, <sup>1)</sup>한밭대학교 기초과학부

Youngmin Noh, Juseon Shin, Dukhyeon Kim<sup>1),\*</sup>

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

<sup>1)</sup>School of Basic Science, Hanbat National University, Daejeon, Republic of Korea

접수일 2023년 1월 12일  
수정일 2023년 2월 3일  
채택일 2023년 2월 5일

Received 12 January 2023  
Revised 3 February 2023  
Accepted 5 February 2023

\*Corresponding author  
Tel : +82-(0)42-821-1739  
E-mail : dhkim7575@hanmail.net

**Abstract** To investigate the relationship between the scattering coefficient and the total amount of suspended aerosol particles in the air, a measurement chamber that can measure scattering signals dependent on angle and wavelength was constructed, and its scattering characteristics were analyzed. Generally, it is known that there is no correlation between the total amount of aerosol and its size because the total amount of aerosol is physically independent of the aerosol physical-chemical characteristics. However, we found that the total scattering intensity and the forward and backward scattering signal ratio were inversely proportional. To verify this, we analyzed the relationship between the ratio of the scattered signals introduced by the two wavelengths and the total scattered signal. The ratio of the total amount of suspended particles and the scattered signal by the two different wavelengths also yielded similar results. We also analyzed extinction coefficients at three wavelengths and their Ångström exponent (AE) for several months of observation. The result indicated that the larger the extinction coefficient, the smaller the AE value. By calculating the scattering phase function for various aerosol distribution parameters, we suggested the change of total mass might be derived from that of fine aerosol sizes.

**Key words:** Aerosol, Light scattering coefficients, PM<sub>2.5</sub>, Aerosol size, Scattering angle

### 1. 서론

기상, 기후, 환경, 보건 등의 분야에서 대기 부유 에어로졸을 중요한 물질로 인식하면서 이를 측정하기 위한 다양한 방법을 도입하여 집중 및 상시 관측을 국가차원에서 진행하고 있다. 일반적으로 대부분의 국가에서는 PM<sub>2.5</sub>나 PM<sub>10</sub>으로 정해진 질량(부피 × 밀도)과 관계된 물리량을 주요 지역에서 매시간 간격으로 연속 측정하고 있으나, 입자의 면적과 굴절률에 의존하는 광 산란과 관련된 물리량에 대해서는 충분

히 측정하고 있지 못한 실정이다.

대기 부유 에어로졸의 기초 물리량 측정은 기후변화 예측분야에서도 중요한 요소이다. 기초 물리량에는 입자의 평균 굴절률, 크기 분포, 총 질량(부피) 그리고 다양하게 정의되는 밀도 등이 있으며, 기후변화 예측오차는 에어로졸의 기초 물리량과 관련된 시공간적인 변화와 광학적 특성의 불확도 때문에 발생하므로 광의 산란과 직접적인 관계에 있는 에어로졸의 알베도나 굴절률의 흡수부가 중요한 변수가 된다(Li *et al.*, 2022). 그러므로 다양한 방법으로 부유 에어로

졸을 측정하고 이를 통합하여 에어로졸의 주요 파라미터를 추출하는 것이 광산란과 관련된 오차를 줄이는 방법이다. 에어로졸의 광학 물리량을 측정하는 방법에는 라이다(Light Detection and Range, LiDAR), sunphotometer, Sun-sky radiometer, OPC (optical particle counter), 비탁계 (nephelometer) 등이 주로 활용된다. 이러한 방법들은 소산계수, 후방산란계수, 라이다비, 산란 위상함수 (scattering phase function) 등의 가공된 측정 물리량을 간접 측정하는 것이므로 관측값을 종합적으로 판단하여 에어로졸의 기초 물리량을 역산하는 과정이 필요하다.

측정하기 어렵거나 기초 물리량이나 측정 물리량으로부터 유추(계산)되거나 얻을 수 있는 양을 응용 물리량이라 한다. 에어로졸의 대기 흡수량이나 알베도 (albedo), 시정거리 등이다 (Shang *et al.*, 2018). 응용 물리량을 활용하여 기초 물리량을 산출하는 연구는 최근에 적극적으로 진행되고 있다 (Zhao *et al.*, 2019). 특히 산란 정보는 입자의 산란 각도, 굴절률, 크기, 파장 등과 관련이 있으므로 (Liu and Daum, 2008) 다양한 파장과 각도에서 산출하여 정보를 다각화하고 질량농도와 연계하여 기초 물리량을 역산하는 연구는 중요한 의미를 가진다.

입자의 농도를 추출하는 기술은 많이 연구되고 상용화되어 있으나, 입자의 크기와 굴절률의 변화를 좋은 시공간 분해능으로 도시나 특정 지역을 모니터링하는 것은 여러 가지 이유로 쉽지 않다 (Virkkula *et al.*, 2006). 또한, 특정 방향으로 산란되는 신호가 그 입자의 크기와 직접적인 상관관계를 지니고 있지 않기 때문에 산란 신호를 이용하여 광학적 입자크기를 유도하기 위한 다양한 방법들이 제시되고 있다 (Höpner *et al.*, 2019). 이러한 입자의 크기 변화를 정성적으로 얻기 위하여 특정 파장에서 두 가지 모드의 분포에서 옹스트롬 지수 (Ångström exponent, AE)를 측정하여 그 분포를 정성적으로 결정하는 연구도 수행되었지만 (Schuster *et al.*, 2006), 미세 및 조대 입자의 bimodal 분포에 대한 매개변수 정보를 얻기 위해서는 여러 측정자료를 복합적으로 고려하는 것이 필

요하다.

부유 입자의 물리-화학적 특성의 변화는 지역, 계절, 시간 등에 따라 차이가 있지만 (Jose *et al.*, 2021) 현재 대부분의 연구가 주로 입자의 농도와 크기 변화를 서로 독립변수로 간주하고 있으며 (Zhou *et al.*, 2018) 이 둘 사이의 관계에 대한 측정 연구는 미흡한 실정이다. 이와 관련하여 특정 기상 및 환경 조건에서 에어로졸 성장에 따른 입자 수, 그리고 AE 변화에 대한 측정을 수행한 연구도 있으며 (Jung *et al.*, 2012), Engine Exhaust Particle Sizer™ EEPS™를 이용하여 입자의 총 농도와 크기를 하루 동안 관측하여 오전중에 입자크기분포와 농도가 최대임을 보고한 연구도 있었다 (Shi *et al.*, 2007). 미세먼지의 크기와 농도변화에 대해 시계열변화를 확인한 다른 연구도 있으나 (Hussein *et al.*, 2018), 논의한 모든 연구들은 히터를 이용하여 부유입자의 습기를 제거한 상태에서 수행하였고, 실제 부유입자를 대상으로 한 연구는 없다. 또한 질량과 입자 특성과 관련하여 PM<sub>2.5</sub>가 차지하는 비율에 관한 연구 (Duan *et al.*, 2015), 습도 등을 고려한 질량 비율의 변화에 대한 연구 (Xing and Sun, 2022), 기상학적 변화에 따른 PM<sub>10</sub>이나 PM<sub>2.5</sub>의 증가와 그 비의 변화에 대한 연구 등이 있었으나 (Gupta *et al.*, 2020), 아직까지 총량 변화가 입자크기 비에 미치는 효과에 대한 연구는 많지 않다.

본 연구에서는 서로 독립적일 것 같은 부유 에어로졸의 총량과 크기의 두 변수 사이 상관관계를 알아보기 위하여 간단한 측정 시스템을 구성하고 이를 분석하고자 한다. 저가의 광학적 측정법을 이용하여 여러 지역에서 빠른 속도로 24시간 동안 입자의 총량과 크기 변화 정보를 얻을 수 있는지에 대한 방법론적인 가능성을 다룬다. 에어로졸의 질량 농도 측정을 대신하여 미세먼지의 총량을 추출하는 방법은 광학적 측정법의 장점이나 (Shin *et al.*, 2022a; Um *et al.*, 2020; Jung *et al.*, 2018), 산란 신호가 입자의 크기, 즉 면적 분포와 굴절률에 의존하는 복잡한 상관관계를 가지고 있으므로 (Guo *et al.*, 2022), PM과 광산란 신호의 상관관계를 결정하는 인자가 상황에 따라 바뀌어 상

관관계가 늘 일정한 것은 아니라는 점을 고려하였다. 이는 같은 총 질량(부피)에서 입자의 면적크기분포와 굴절률이 시공간적으로 변하기 때문이며 대기 상황, 특히 상대습도(relative humidity, RH)에 따라 변하기 때문이다(Cheng *et al.*, 2017). 두 입자 사이의 상관관계를 높이기 위하여 두개 이상의 파장을 이용하여 AE를 구하고 이로부터 질량소산효율(Mass extinction efficiency, MEE)을 AE의 함수로부터 얻는다면 입자의 크기 변화 특히 미세 입자의 크기 변화를 보정하는 효과로 더 좋은 상관관계를 얻을 수 있을 것이다(Nemuc *et al.*, 2013). PM<sub>2.5</sub>나 PM<sub>10</sub> 총량의 변화는 그 자체로 매우 중요한 의미를 가지고 있으므로 다양한 분야에서 PM의 총량 변화를 측정하고 있지만 이를 이용하여 입자의 물리-화학적 특성을 찾기는 매우 어렵다. 그러나 광학적인 측정으로 한정한다면 대부분의 산란이나 소산효율은 미세 입자 영역에서 큰 값을 지니며(Um *et al.*, 2020), 산란에 의한 AE의 변화나 시정의 변화 등은 미세 입자의 변화에 기인하고 그 입자는 주로 입자의 성장에 의하여 이루어진다(Shin *et al.*, 2022b)고 볼 수 있다. 미세 먼지의 총량 변화와 미세 먼지의 물리-화학적 특성 변화는 독립적인 변수이므로 둘 사이의 상관관계에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구의 목적은 간단한 이론적 계산을 통하여 입자의 크기 변화가 각도에 따른 산란에 어떤 영향을 미치는지를 실험적으로 측정하기 위한 장치를 구축하고, 최종적으로는 다양한 각도와 파장에서 얻은 신호로 미세먼지의 총량 변화를 감지하여 그 크기 변화를 알 수 있는 방법에 대하여 논의하는 것이다. 즉, 부유 입자를 24시간 동안 365일 연속 모니터링하기 위한 방법으로 1) Mie 산란 이론을 바탕으로 산란 각도에 따라 입자의 크기/굴절률 등의 물리 변수가 바뀌면 산란 신호세기가 어떻게 변하는지 살펴보고, 2) 카메라와 레이저(Laser diode, LD)를 이용하여 주어진 파장에서 산란 각도에 따른 신호 세기를 얻을 수 있는 장치를 구축하였으며, 3) 산란각도와 파장에 따른 신호의 세기가 어떤 물리량을 대표할 수 있는지 분석하였다.

## 2. 이론적 배경 및 장치의 구성

### 2.1 이론적 배경

대기 부유 입자에 의한 산란은 구형 입자의 미 산란(Mie scattering) 이론으로 대부분 계산이 이루어지는데, 입력 변수는 입자의 크기, 굴절률과 파장이며, 산출값은 각도에 따른 산란 효율 값과 흡수율이다. 대부분의 광학적 측정 값은 이 값을 통해 유도된다. 크기에 따른 분포도 입자 생성 기원에 따라 로그 스케일에서 크게 Nucleation (Aitken)/Accumulation (fine)/Coarse mode의 세 가지 가우시안 분포를 가진다. 이 중 nucleation 모드는 입자의 크기(radius, 이하  $r$ )가 일반 가시 파장 영역에서 파장( $\lambda$ )보다 작으므로( $\lambda \gg r$ ) 다른 입자들에 비해 산란 효율이 매우 작아 무시해도 무방하다. 그러므로 일반 대기 상태에서 산란에 기여하는 입자의 크기 분포는 다음과 같이 두개의 크기를 지닌 미세(fine)와 조대(coarse) 모드의 bimodal 분포로 가정할 수 있다. 각각의 중심 크기는 0.12~0.18  $\mu\text{m}$ 와 2~4  $\mu\text{m}$  영역에 해당한다.

$$\frac{dV(r)}{d \ln(r)} = \sum_{i=1}^2 \frac{V_i}{\sqrt{2\pi} \log(\sigma_i)} e^{-\left[\frac{(\ln(r) - \ln(R_i))^2}{2(\log \sigma_i)^2}\right]} \quad (1)$$

위 식은 6개의 변수에 의하여 정의되는데,  $V_{i=1,2}$ ,  $\sigma_{i=1,2}$ ,  $R_{i=1,2}$ 는 각각의 모드에서 입자의 총 부피, 분포 폭, 그리고 입자의 중심 크기를 나타낸다. 여기서  $\sigma_i$ 는 각 모드 입자의 분포 폭을 결정하는 것으로 이 값의 변동이 산란계수에 미치는 영향은 미미하다(그림 1). Coarse 모드의 크기( $R_2$ )에 의한 변화도 산란계수에 미치는 효과가 작다. 이는 부피 산란 효율이 산란 효율에 역수를 곱한 값이므로  $\left(\frac{3}{4r} Q(r, \lambda)\right)$  fine 입자에 비해 coarse 입자의  $r$ 이 10배 이상 크기 때문에 상대적으로 기여도가 낮기 때문이다. 그러므로 본 절에서는 fine 입자의 크기 변화에 주목하여 소산계수의 변화 범위를 살펴보았다. 그림 1은 표 1의 입자 변수를 이용하여 얻은 소산계수이다. 표 1에서  $n$ 과  $k$ 는 각각 굴절률의 실수부(real part)와 허수부(imaginary

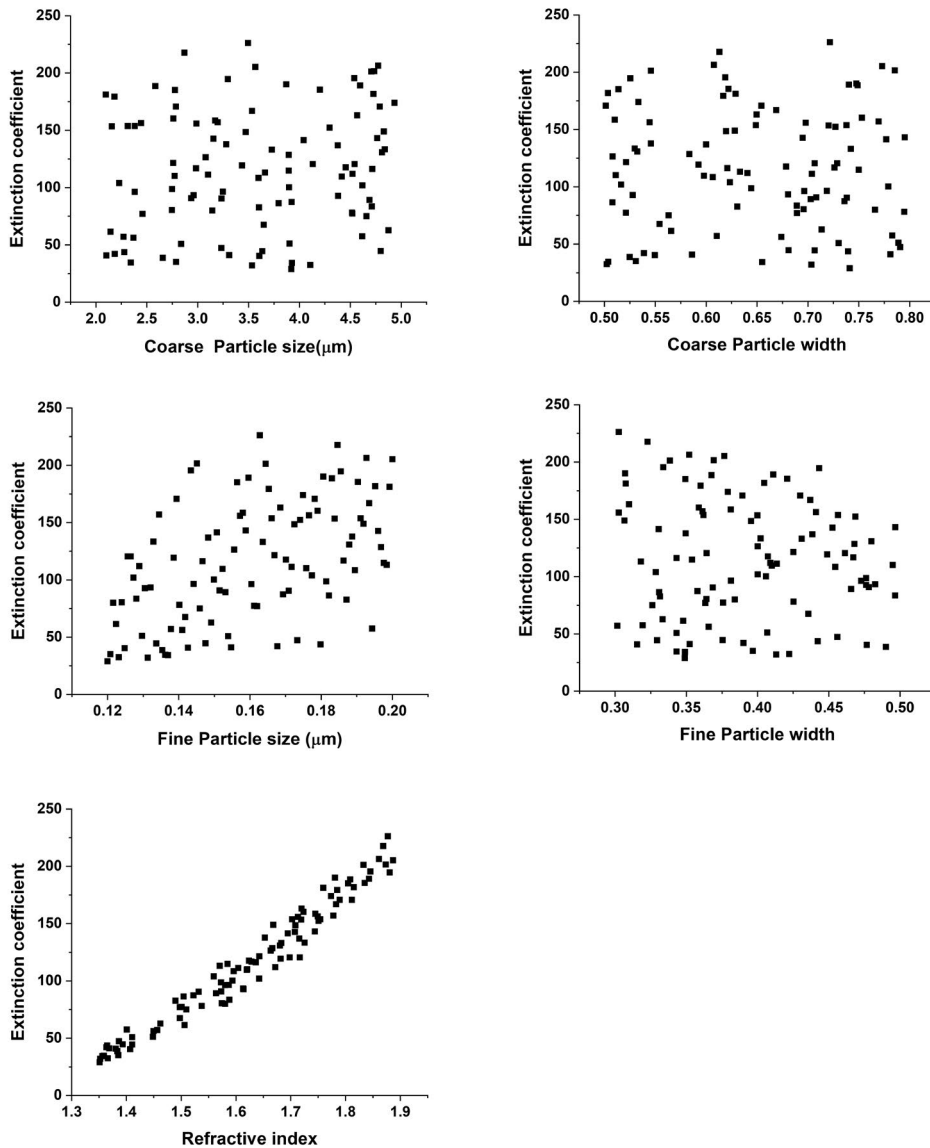


Fig. 1. Changes of extinction coefficient as aerosol parameters (Table 1).

part)를 의미한다. 다섯 개의 변수( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $\log(\sigma_1)$ ,  $\log(\sigma_2)$ ,  $n$ )를 모두 주어진 범위(표 1)에서 임의로(randomly) 변화시켰으며, 그림에서 x-축은 하나의 주어진 값의 변화에 따른 소산계수의 변화이다. 여기서 소산계수의 단위는  $\mu\text{m}^2 \text{cm}^{-3}$ 이고,  $V_{1,2}$ 의 단위는  $\mu\text{m}^3 \text{cm}^{-3}$ 이다.

그림 1에서 보여주는 것처럼 소산계수는 입자의

크기와 관련된 다양한 파라미터에 의하여 값이 변할 수 있으나, 입자의 굴절률과 fine 입자의 크기에 더 민감하게 변한다는 것을 알 수 있다. 즉, 다른 변수가 표 1에서 주어진 범위에서 무작위적으로 변한다고 해도 굴절률과 fine 입자크기의 정보를 통해 주어진 범위에서 나타나는 변화를 통계적으로 인식할 수 있다는 의미이다.

그림 2는 fine 입자의 크기에 따라 산란위상함수 주어진 입자의 bimodal 크기분에서 fine 모드의 총량 ( $V_1$ )이 변할 때 산란위상함수가 0~180도 사이에서 어떻게 변하는지, 그리고 특정 각도에서 산란된 빛이 coarse 입자의 중심 크기 변화에 따라 어떻게 달라지는지를 보여준다. 이때, coarse 입자의 총량과 기타 미세먼지 연관 파라미터는 일정하게 두고 계산했으며, fine 입자의 영향을 중점적으로 살펴보았기 때문에 계산에 사용된 coarse 입자의 양은 상대적으로 작게 입력하였다(0.1배).

그림 2(a)는 fine 모드 입자의 크기( $r_f$ )가 변하면 산란각에 따른 신호도 다르게 나타난다는 것을 보여준다.  $r_f$ 가 0.12  $\mu\text{m}$ 에서 2  $\mu\text{m}$ 로 커질수록 산란 신호가 커지는 경향을 보인다. 그림 2(b)는  $r_f$ 가 두 각도(10도와 160도)에서 얻을 수 있는 산란 양의 비의 함수

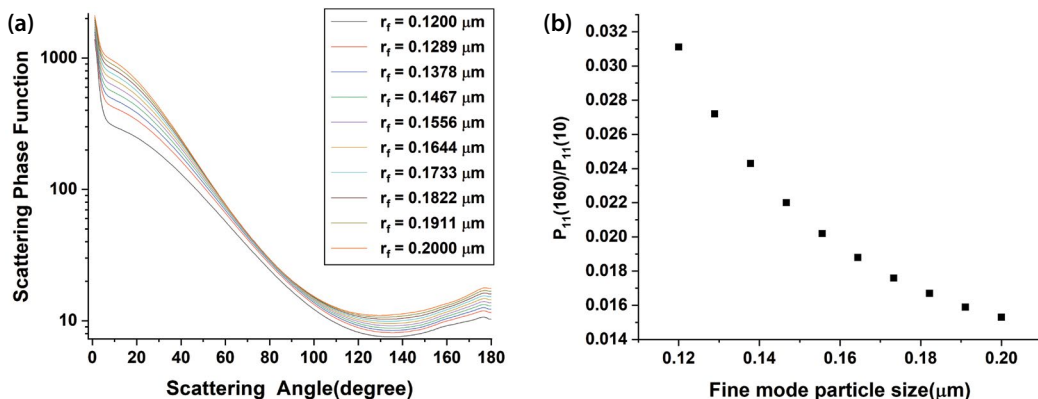
가 될 수 있음을 보여준다. 이러한 함수 관계는 산란비가 차후 입자의 크기를 역산하는 데 중요한 입력값으로 사용될 수 있다는 것을 의미한다. 반면 70도 부근의 산란 신호는 입자의 크기 변화에 민감하지 않으며 총량 변화에만 의존할 것으로 판단할 수 있다. 지금까지의 관련 연구들은 산란과 입자 총량에 대한 관계를 주로 살펴보았다면, 본 연구에서는 입자 총량과 크기가 각도에 따른 산란비와 유의미한 관계가 있음을 확인함으로써, fine 입자의 정보 변화를 모니터링하기 위해서 총량 변화와 더불어 크기 변화에 대한 모니터링도 필요하다는 점에 주목한다. 예를 들어, 70도 부근의 값은 입자의 크기 변화에 민감하지 않기 때문에 총량 변화와 연관된 파라미터로 사용될 수 있으며, 10도와 160도 부근의 값은 입자의 크기 변화를 확인하기 위하여 사용할 수 있다.

**Table 1.** Input variables.

Variables	Minimum	Maximum	
$V_1$	10	10	Constant
$V_2$	1	1	Constant
$R_1$	0.12 $\mu\text{m}$	0.2 $\mu\text{m}$	Random
$R_2$	2 $\mu\text{m}$	5 $\mu\text{m}$	Random
$\log(\sigma_1)$	0.3	0.5	Random
$\log(\sigma_2)$	0.5	0.8	Random
n(real)	1.35	1.95	Random
k(imaginary)	0.001	0.001	Constant

## 2.2 장치의 구성 및 기초 신호의 획득

부유 에어로졸의 산란 특성을 얻기 위하여 그림 3과 같은 장치를 구성하였다. 외부의 공기를 유입하기 위하여 작은 팬이 부착된 약 3 m  $\times$  12 cm 관을 대기 유입장치로 구성하고, 카메라와 2개의 파장(520 nm, 638 nm)으로 구성된 광학계를 카메라에 대하여 후방(backward) 및 전방 산란(forward scattering)에 대하여 산란 신호를 얻을 수 있도록 구성하였다. 그림 3의



**Fig. 2.** Scattering phase function and scattering ratio between two different angles for a given aerosol size distribution ( $V_1=10$ ,  $V_2=1$ ,  $\sigma_1=0.4$ ,  $\sigma_2=0.6$ ,  $R_2=4$ ,  $m=1.78+0.001i$ ). (a) Scattering phase function for given  $R_1$ , (b) Scattering ratio between two different angles.

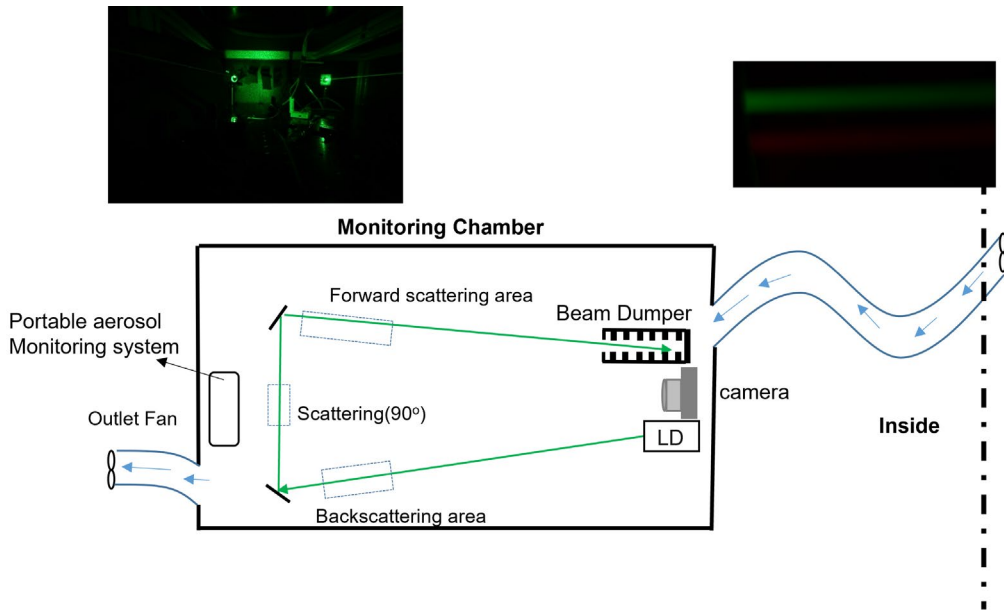


Fig. 3. Schematic diagram of operation chamber for obtaining aerosol scattering image and guiding aerosol from outside.

박스 그림에서 왼쪽은 전형적인 520 nm 파장에서의 전방 산란과 후방 산란 신호의 모양을 보여 주고, 오른쪽은 두 파장에서 전방 산란을 얻은 것이다. 가능한 적은 수의 화소에서 saturation되지 않도록 셔터의 속도와 산란 각도를 조절하였다.

구축된 장비에서 얻은 영상의 각 화소는 다른 각도에서 산란된 것이나, 전체적으로 전방 산란(forward scattering)과 후방 산란(backward scattering)에 대한 정보를 얻고자 하였으며, 두 가지 색의 레이저(Laser diode, LD)를 동시에 구축하여 파장에 따른 산란 신호의 특성을 연구하였다. 습도와 PM 총량을 얻기 위해 챔버 내부에는 온습도계(TR-73U)와 간이 PM 측정기(DSM101)도 설치하여 운영하였다.

포집 없이 직접 부유 입자를 관측하는 산란 신호는 수증기를 포함한 실제 부유 입자의 총량정보를 가지고 있기 때문에 라이다를 포함한 대부분의 비접촉식 원격 측정법에서 얻어지는 값이고, 국가 표준망을 통하여 관측되는 PM값은 수증기를 포함하지 않는 값이기 때문에 같은 공간에서 측정하더라도 실제로는 다

른 에어로졸을 측정한다고 볼 수 있다. 그러므로 그 둘 사이의 관계를 살펴보는 것도 필요하다.

본 연구에서는 실제 부유입자 측정에 해당하는 산란 신호, 간이 PM 측정기, 그리고 수증기를 포함하지 않는 PM 질량농도로 국가대기오염측정망(노은동 도시대기 측정소, 대전 유성구 노은동로 87번길 89(노은1동 주민센터) 노은1동 주민센터 3층 옥상) 값을 활용했다. 그림 4는 전방 산란 신호와 PM<sub>10</sub> 질량 농도의 관계를 보여주는 것이다. 두 그림에서 산란 신호는 상대적인 양을 나타낸 것이며, PM<sub>10</sub>은 챔버 박스 안에 설치한 간이 측정기(DSM101)를 이용해 측정했다. 측정 기간은 2022년 10월 19일부터 2022년 12월 15일의 약 2개월간이다.

그림 4에서 산란 신호의 세기는 LD가 진행하면서 발생하는 산란을 영상을 통해 얻고 주어진 각도, 즉 주어진 화소값에서 레이저의 산란체가 없는 주위의 배경 신호를 뺀 다음 적절한 영역의 화소값을 더하여 얻은 것이다. 산란 신호의 절대값은 사용한 화소의 숫자와 위치(산란 방향), 그리고 카메라의 노출 시간



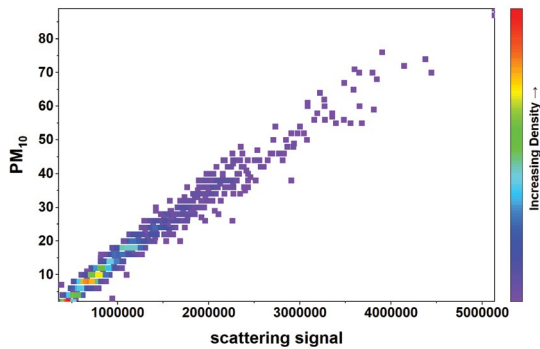


Fig. 4. Comparison between scattering intensity and portable PM measurement system.

등 다양한 값에 의존하므로 본 연구에서는 이에 대한 영향을 배제하기 위하여 노출시간과 각도, 총 화소수를 일정하게 고정하였다. 그러므로 그림에서 산란 신호는 상대적인 값이며, 항상 같은 방향의 전방 혹은 후방의 특정 각도 영역에서 적분한 것을 의미한다.

앞서 기술한 것처럼 건조공기 질량농도와 수증기를 포함한 실제 부유입자 관측치와 상호비교를 위하여 국가대기오염측정망 (Air Pollution Monitoring Network in Korea, APMNK) 자료에서 얻은 PM<sub>10</sub> 질량농도와 본 측정기로 관측한 산란 신호의 관계를 확인했다(그림 5(a)). 산란 신호는 미세먼지가 적은 날에서 산란 정보를 얻기 위하여 비교적 산란 신호가 큰 전방 산란 신호를 나타낸 것이다. 산란 신호와 APMNK 자료는 챔버 내부에 있는 간이측정기와 비교한 자료(그림 4)보다는 비교적 상관관계가 적으나, 안정적인 상관관계를 보이고 있다. 이는 산란 신호만으로도 PM<sub>2.5</sub>를 근사적으로 측정할 수 있음을 보여준다. 내부 장비보다 상관관계가 다소 낮게 측정된 것은 APMNK 자료의 측정위치가 본 장치가 구축된 지점에서 직선 거리로 2.6 km 떨어진 노은동 측정소 지점이며, 상대습도의 영향을 더 많이 받을 수 있는 PM<sub>2.5</sub>와 비교했기 때문으로 볼 수 있다. 간이측정기의 경우보다 안정적인 PM<sub>10</sub> 농도자료와 비교했다.

그림 5(b)는 산란 신호와 질량농도의 비, 즉 질량소

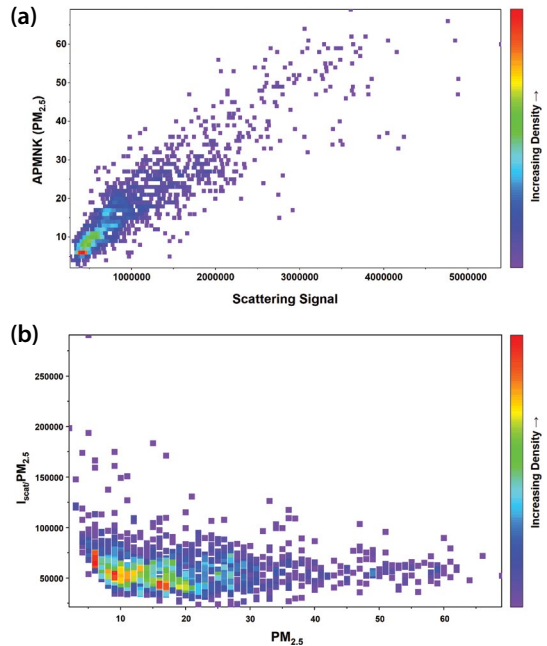
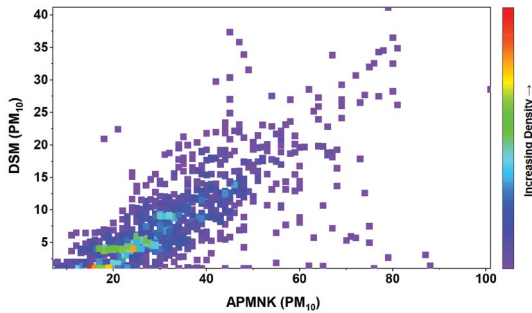


Fig. 5. (a) Comparison between scattering intensity and PM<sub>2.5</sub> measured using APMNK system, (b) Scattering light intensity normalized by PM<sub>2.5</sub>.

산효율 (Mass extinction efficiency, MEE)에 비례한 양을 개념적으로 나타낸 것으로, 질량농도 변화에 대하여 거의 일정한 것처럼 보이지만, 저농도 구간에서 보면 PM<sub>2.5</sub>가 증가할수록 약간 감소하는 경향을 나타낸다. PM<sub>2.5</sub> 질량농도가 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하일 때 질량 대비 산란 비율 ( $I_{\text{scat}}/\text{PM}_{2.5}$ )이 비교적 넓은 영역을 가지는데, 이는 PM<sub>2.5</sub> 입자가 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하에서 산란 신호가 작기 때문에 신호의 신호대잡음비 (Signal-to-noise ratio, SNR)가 낮아서 생기는 효과일 수도 있다. 나머지 영역에서는 산란 비율이 비교적 일정한 값을 보이는데 (약 50,000을 기준으로 넓은 범위에서 일정), 이는 MEE가 농도에 따라 일정한 값을 보인다고 말할 수 있다. 그러나 여전히 그 폭은 넓게 분포하므로 그 원인에 대한 정보 규명이 필요하다.

앞서 논의한 것처럼 측정 챔버 내부의 간이측정기 (DSM101)로 관측한 에어로졸의 특성과 2.6 km 떨어진 곳에 위치한 APMNK 표준 측정망에서 얻은 값의

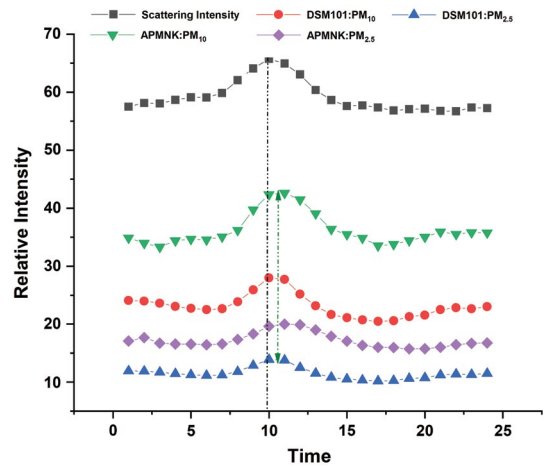


**Fig. 6.** Correlation between standard PM measurement system (APMNK) and portable system (DSM101) installed in the measurement chamber.

상호관계를 알아보기 위하여 미세먼지의 총량(질량 단위로서  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 비교하였다(2022년 10월부터 2022년 12월 초까지, 그림 6). 표준 측정망을 통하여 얻은 값은 간이 측정기에 비하여 항상 높은 값을 나타내고 있다. 이는 간이 측정기를 통하여 측정되는 챔버의 미세먼지 총량은 길이 3 m, 폭 10 cm의 긴 관을 통하여 강제 유입되도록 구성하였기 때문으로 볼 수 있다.

그림 7은 APMNK와 DSM101 장비를 통해 얻은 측정 값과 산란 신호의 시간에 따른 특성을 보여준다. 이러한 24시간 측정 값은 미세먼지의 양과 상관없이 수증기의 효과와 측정 장치의 방법론에 따른 효과만 포함한다. 두 측정 값에는 시간 지연이 발생하는데, 그 이유는 APMNK 장비는 미세먼지에 포함된 수증기를 제거하고 측정하여 수증기의 정보를 포함하지 않는 반면 DSM101 장치는 수증기가 흡착되는 효과와 미세먼지가 최대량 발생하는 효과 모두를 고려한 값을 나타내기 때문이다. APMNK값이 최고치에 도달하는 시간은 DSM101보다 약 1시간 정도의 지연이 발생하는데 일반적으로 일출이 일어나는 바로 직전에 상대습도가 최대 값이 되고, 미세먼지의 양은 보통 수증기와 관계없이 출근이 시작된 이후 최대값이 되기 때문이다.

본 연구에서 사용된 장비들이 측정 방법(수증기 포함 여부) 및 설치 위치에 차이가 있어 서로 다른 물리량으로 에어로졸을 측정하고 있으나, 두 가지 방법



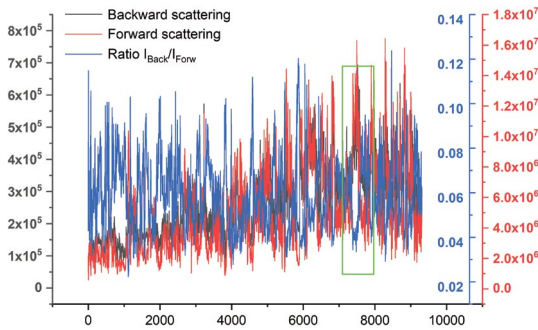
**Fig. 7.** The average characteristics of the amount and scattering of aerosol for 24-hours.

으로 측정된 값들은 논리적으로 상호 좋은 상관관계를 가지고 있다. 본 절의 실험 결과는 다양한 산란 신호에서 얻은 정보를 미세먼지의 물리적 특성을 추출하는 데 사용함에 있어 큰 문제가 없음을 보여준다.

### 3. 각도와 파장에 따른 신호 특성과 미세먼지 총량 관계

산란 각도 및 파장에 따른 산란 신호 세기 변화 그리고 미세먼지의 총량과의 관계를 도출하여 미세먼지를 규정하는 파라미터의 변화를 추정하는 연구를 수행하였다. 이를 위하여 산란 신호의 절대량과 신호의 비, 신호의 비와 PM 질량농도의 상관관계를 확인했다. 먼저 전방 산란과 후방 산란 방향의 신호비에 대한 특성을 분석하였다. 그림 8은 2021년 12월 ~2022년 3월까지 매시간 측정된 후방 및 전방 산란 신호를 시계열로 보여준다. 일반적으로 두 각도에서 산란된 신호는 매우 큰 상관관계를 가지고 있으므로 마치 하나의 독립변수만 있는 것처럼 보인다. 구체적으로는 그림 8의 내부 박스 그림에서 두 신호(붉은색과 검은색) 간 상관관계가 크므로 하나의 신호에 의해 다른 신호를 유추할 수 있음을 보여준다. 그러나





Time series scattering signal and its ratio(from Dec. 2021 to March 2022)

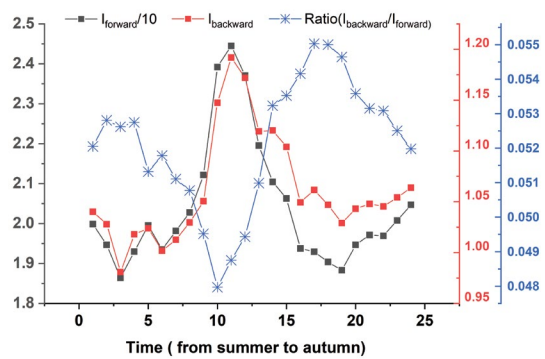
**Fig. 8.** Time series signal intensity of forward and backscatter and their ratio.

두 신호의 비에 해당하는 값은 전체적으로 신호의 크기 변화와 다른 경향을 보이고 있다.

미세먼지의 각 모드의 총량, 크기분포, 그리고 굴절률 등의 기초 물리량은 발생기원(미세먼지의 성장 또는 발생)에 의존하는 양이기 때문에 특성을 결정짓는 다양한 매개변수가 존재하며, 총량과 크기는 무관하고 독립적이라 할 수 있다. 즉, 짧은 기간 동안 특정 날짜의 미세먼지는 이 전의 미세먼지와 물리-화학적으로 다를 수 있으므로 크기, 총량, 굴절률 등은 완전히 독립적인 물리량이다. 그러나 장기간의 미세먼지는 이러한 요인들에 의한 효과를 둔감하게 한다. 그러므로 본 연구에서는 장기간의 관측 결과에 대하여 시간 변화를 분석하고자 하였다. 그림 9는 2021년 4월부터 2021년 11월까지 전방 및 후방 방향으로 산란된 빛의 세기와 그 비의 시간 변화를 보여 준다. 신호의 크기는 적분되는 각도의 총 화소 수, 빛의 세기, 기타 측정기의 효율 등과 관련되므로 절대 값은 중요하지 않으나, 후방 산란과 전방 산란의 시간 특성의 변화와 그 비의 변화는 미세먼지의 특성 변화에 대한 중요한 정보를 제공한다.

산란 신호는 약 10시경에 최댓값을 보이고 있으며 입자에 의한 산란 신호가 커지는 시점에서 두 값의 비는 최소가 된다는 것을 알 수 있다. 이는 그림 2(b)의 이론적 계산과도 일치한다.

각도에 따른 산란 신호의 변화가 입자의 크기 변화



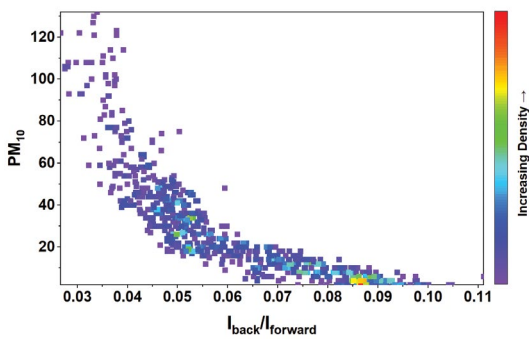
**Fig. 9.** Change of forward and backscatter signals and their ratio for 24 hours measured from April 2021 to November 25, 2021.

와 관련이 있는지에 대한 연구는 이론적으로 잘 되어 있으며(Guo *et al.*, 2022; Um *et al.*, 2020; Nemuc *et al.*, 2013) 입자의 총량 변화가 입자의 크기 변화를 의미하지는 않는다. 즉, 입자의 총량과 입자의 크기는 독립적인 물리량으로 서로 상관관계를 예측하는 것은 무의미하다. 그러나 본 연구에서는 둘의 관계가 완전히 독립적인 물리량이 아님을 보이기 위하여  $PM_{10}$ 의 값과 두 산란 신호의 비에 대한 상관관계를 알아보았다. 즉, 그림 2와 그림 8에서 언급한 것과 같이 두 각도에서 산란된 신호의 비는 산란 신호 크기와 반비례 관계에 있으므로, 그림 10처럼 총 에어로졸 총량( $PM_{10}$ )과 전방 및 후방 산란비의 관계도 마찬가지로 될 것임을 예측할 수 있다. 그림 10은 입자의 총량( $PM_{10}$ )과 두 산란 신호의 비를 보여준다.

그림 10에서 알 수 있듯이 입자의 양이 적을수록 후방 산란되는 빛이 전방 산란보다 상대적으로 많다. 이는 입자의 크기가 클수록 전방 산란이 상대적으로 많아진다는 사실과 부합한다. 또한 입자의 총량이 많을수록 큰 입자가 많아진다는 것을 의미하며, 가시광 영역에서는 큰 입자가 많아지거나, 같은 수 농도에서 fine 모드의 평균 크기가 커지거나, 입자의 밀도가 증가하는 등의 변화가 생긴다는 의미이다. 가시광을 이용한 관측에서 산란 신호는 fine 모드 입자의 성장이 산란에 기여도가 가장 크기 때문에 fine 모드 입자

의 크기 변화가 산란 신호의 특성 변화에 상당히 기여할 수도 있다고 할 수 있다. 여기서는 수개월의 입자 특성 변화를 의미하므로, 에어로졸 발생 메커니즘과 발생원의 변화에 의한 자료에서 얻어지는 fine 입자의 상대적인 비율이나 크기 변화를 의미하지 않으며, 입자의 성장(coagulation)과 같은 fine 모드의 입자의 크기 변화에 대한 것을 의미한다. 단일 파장을 이용한 라이다 원격 측정에서 후방산란계수와 총 산란계수의 비로 정의되는 라이다 비는 상수로 두고 방정식을 풀게 되는데, 그림 10의 결과로 볼 때, 라이다 비를 PM의 양에 따라 다른 값을 두어야 한다는 것을 의미할 수도 있다.

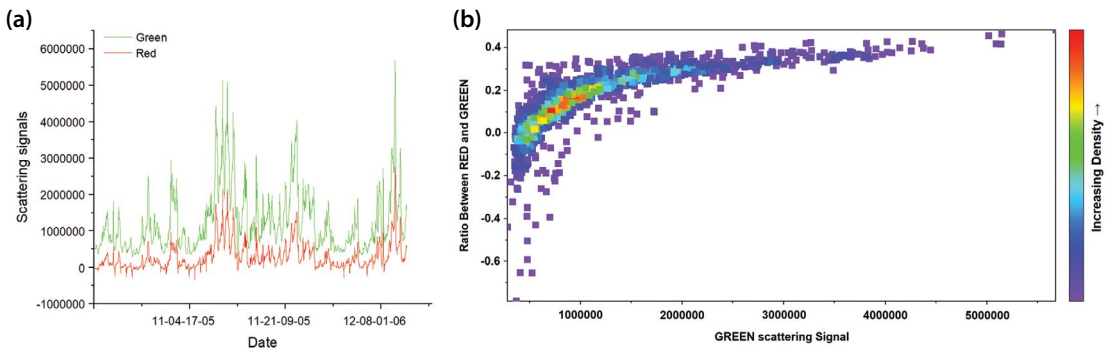
본 연구에서는 입자의 총량 변화가 파장에 따라 어



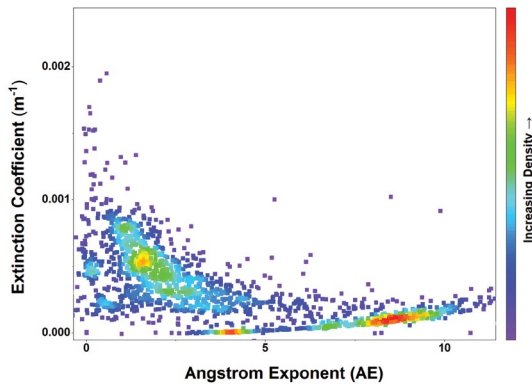
**Fig. 10.** The relationship between the ratio of forward and backward ratio and total aerosol PM<sub>10</sub> (DSM101) from April 2022 to July 2022.

떤 변화를 주는지 알아보았다. Mie 산란이론에서 입자의 크기 변화에 의한 산란 특성의 변화는 파장의 변화와 같은 의미를 지니므로 파장에 따른 변화도 확인했다. 그림 11은 red 신호와 green 신호의 시계열 변화와 green 파장에서 얻은 신호의 크기와 두 색의 비의 상관관계를 보여준다. 그림 10에서 두 각도에서 산란된 신호는 입자의 총량 변화에서 매우 상관관계가 좋은 것과 마찬가지로 두 파장에서 얻은 산란 신호의 크기도 입자의 총량 변화에 대하여 매우 좋은 상관관계를 보여준다. 그림 11(a)는 두 파장에서 산란된 빛의 세기를 시계열로 나타낸 것으로 두 파장에서 좋은 상관관계가 나타났다. 그림 11(b)는 green 파장에서 얻은 산란 광의 세기와 두 파장의 신호 세기의 비를 나타낸 것으로 신호의 세기가 높으면 미세먼지의 총량이 많으므로, x-축은 미세먼지의 총량이라고 볼 수 있다. 그러므로 미세먼지의 농도가 높으면 큰 파장의 신호가 증가한다고 생각할 수 있다. 그림에서 y-축에서 마이너스 값은 미세먼지의 총량이 적은 경우 붉은색에서 산란 신호가 거의 발생하지 않고 배경 신호를 빼면 음수로 나타내기 때문이다.

두 파장에서의 각도에 따른 산란 신호의 세기가 bimodal 에어로졸의 최소 8개 파라미터에 따라 어떻게 변하는지에 대한 이론적 연구는 그림 11(b)를 잘 설명할 수 있다. 직감적으로, 총량이 클 때 green 파장에 비하여 red 파장의 빛에서 더 강한 산란이 발생한



**Fig. 11.** Characteristics of the time series of scattered signals obtained at two wavelengths and the correlation between the two colors scattering ratio and green light intensity. (a) Characteristics of the time series of scattered signals obtained at two wavelengths, (b) the correlation between the ratio of the two signal intensities and green light intensity.



**Fig. 12.** Change of forward and backscatter signals and their ratio for 24 hours measured from April 2021 to November 25, 2021.

다는 것은 입자 크기 때문인 것으로 추정된다.

입자의 총량 변화가 입자의 크기에 어떤 영향을 미치는가에 대한 또 다른 실례를 들자면 그림 12와 같다. 그림 12는 카메라를 이용하여 (Kim and Noh, 2021) 풍경을 촬영하여 얻은 이미지에서 3개의 RGB 파장으로 얻은 소산계수와 농도에 따른 AE를 보여주는 것이다. 2020년 12월부터 2021년 4월 사이 한밭대학교 주위의 풍경을 통하여 얻은 소산계수와 AE를 나타냈다. 여기에서도 소산계수가 클수록 입자의 총량이 크다는 것을 의미하고, 입자의 총량이 많을수록 AE 값이 작아진다는 것을 보여준다. 그림 12만의 결과로 판단한다면 일반적으로 입자의 크기가 커질수록 AE가 작아지므로 소산계수가 클수록(입자의 총량이 많을수록) 입자의 크기가 커진다고 할 수 있다. 이는 입자의 크기와 총량은 서로 인과 관계가 없다는 기존의 가정과 상반되는 결과이다. 이에 대한 연구는 앞으로 다양한 방법을 통하여 점진적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 비교적 쉽게 구축이 가능하고, 부유 에어로졸의 총량과 그 세부적인 정보 변화, 예를 들

어 fine 모드의 입자크기 변화와 같은 기초 물리량의 변화를 동시에 얻을 수 있는 장치를 구축하여 입자의 총량뿐만 아니라 크기나 기타 요인(굴절률) 변화에 따른 효과를 측정할 수 있음을 확인했다.

일반적으로 에어로졸의 총량 변화는 그 구성입자의 매개변수 변화와 독립적으로 발생하므로 그 상관관계가 없어야 하나, 본 연구를 통하여 상당한 관계가 있음을 확인했다. 즉, 총량이 변하면 fine 모드의 입자의 크기가 커지는 효과를 동반한다. 이러한 현상은 여러 요인으로 설명할 수 있다. 첫째로, 에어로졸의 총량 변화가 fine 모드의 입자 평균 크기 변화에 의해 발생할 수 있다. 물론 이 과정에서 줄어든 입자의 수 농도만큼 다시 가스 상태의 오염원에서 2차 에어로졸에 지속적인 공급이 있다고 가정한다. 둘째로, 입자의 총량을 산란 신호로 측정하였을 경우, 굴절률 변화의 영향을 받기 때문이다. 하지만 일반적으로 가시광 영역에서 입자의 굴절률이 커져야 산란 신호가 커지는데, 일반적인 상황에서 수증기의 흡습에 의한 성장은 굴절률의 감소를 가져와 신호의 크기가 줄어들기 때문에 이 경우는 가능성이 희박하다. 그러나 총량 변화가 크기나 기타 요인의 변화를 동반한다는 것은 분명한 것처럼 보이며, 그 원인을 파악하는 것은 미세먼지의 물리-화학적 성질 변화에 대한 많은 진전을 가져올 것으로 생각한다.

에어로졸의 특성을 파악하기 위한 연구 측면에서 볼 때, 산란 신호는 입자의 총 면적에 비례하는 물리량이고 국가대기오염측정망에서 얻은 질량은 입자의 부피와 밀도에 해당하는 것으로 서로 다른 물리량을 측정한다는 한계점이 있다. 미세먼지의 상세한 물리-화학적 성질을 밝히는 것은 다양한 독립된 측정 값을 이용하여 역산하는 과정이기 때문에 본 측정 방법과 같이 쉽게 얻을 수 있는 장치와 함께 표준 측정법으로 24시간 356일 동안 장기적이고 연속적으로 측정하는 것은 차후 연구를 위해서 매우 중요한 일이다.

광학적 측정치로 베타레이 방식 등 기존 표준측정법을 통해 얻을 수 있는 값을 유도하는 것 또한 두 장치의 장단점을 보완하기 위하여 필요한 일이다. 예를

들어 라이다를 통하여 넓은 지역의 소산계수를 얻고  
이로부터 넓은 지역의 PM 값을 얻는 과정에서는  
MEE 개념이 필요한데, 이는 상수가 아니고 에어로졸  
의 크기, 굴절률 등과 같은 값의 함수이므로 이에 대  
한 종합적인 고려가 필요하다. 본 연구에서 제시하는  
다양한 산란 신호를 장기 관측을 통하여 얻을 수 있  
다면, 두 측정법의 가교 역할을 하는 MEE를 포함하  
여 AE 또한 유도할 수 있다. 장기적인 측면에서 본 방  
법을 표준 측정망의 모든 지점에 동시 구축하는 것이  
앞으로 미세먼지의 기초 물리량을 도출하는 연구에  
반드시 필요하다고 본다.

### 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한  
국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연  
구임(NO. 2020R1F1A1048293).

### References

- Cheng, Z., Ma, X., He, Y., Jiang, J., Wang, X., Wang, Y., Sheng, L., Hu, J., Yan, N. (2017) Mass extinction efficiency and extinction hygroscopicity of ambient PM<sub>2.5</sub> in urban China, *Environmental Research*, 156, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.03.022>
- Duan, J., Chen, Y., Fang, W., Su, Z. (2015) Characteristics and relationship of PM, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> concentration in a polluted city in Northern China, *Procedia Engineering*, 102, 1150-1155. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.239>
- Guo, W., Zeng, N., Liao, R., Xu, Q., Guo, J., He, Y., Di, H., Hua, D., Ma, H. (2022) Simultaneous retrieval of aerosol size and composition by multi-angle polarization scattering measurements, *Optics and Lasers in Engineering*, 149, 106799. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2021.106799>
- Gupta, A., Moniruzzaman, M., Hande, A., Rousta, I., Olafsson, H., Mondal, K.K. (2020) Estimation of particulate matter (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) concentration and its variation over urban sites in Bangladesh, *SN Applied Sciences*, 2, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03829-1>
- Höpner, F., Bender, F.M., Ekman, A.M., Andersson, A., Gustafsson, Ö., Leck, C. (2019) Investigation of two optical methods for aerosol-type classification extended to a Northern Indian Ocean site, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 8743-8763. <https://doi.org/10.1029/2018JD029685>
- Hussein, T., Juwhari, H., Al Kuisi, M., Alkattan, H., Lahlouh, B., Al-Hunaiti, A. (2018) Accumulation and coarse mode aerosol concentrations and carbonaceous contents in the urban background atmosphere in Amman, Jordan, *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3970-z>
- Jose, S., Mishra, A.K., Lodhi, N.K., Sharma, S.K., Singh, S. (2021) Characteristics of aerosol size distributions and new particle formation events at Delhi: an urban location in the Indo-Gangetic Plains, *Frontiers in Earth Science*, 1146. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.750111>
- Jung, C.H., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2012) Changes in the Ångström exponent during aerosol coagulation and condensation, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 6, 304-313. <https://doi.org/10.5572/ajae.2012.6.4.304>
- Jung, C.H., Um, J., Bae, S.Y., Yoon, Y.J., Lee, S.S., Lee, J.Y., Kim, Y.P. (2018) Analytic expression for the aerosol mass efficiencies for polydispersed accumulation mode, *Aerosol and Air Quality Research*, 18, 1503-1514. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.02.0067>
- Kim, D., Noh, Y. (2021) An Aerosol Extinction Coefficient Retrieval Method and Characteristics Analysis of Landscape Images, *Sensors*, 21, 7282. <https://doi.org/10.3390/s21217282>
- Li, J., Carlson, B.E., Yung, Y.L., Lv, D., Hansen, J., Penner, J.E., Liao, H., Ramaswamy, V., Kahn, R.A., Zhang, P. (2022) Scattering and absorbing aerosols in the climate system, *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 363-379. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00296-7>
- Liu, Y., Daum, P.H. (2008) Relationship of refractive index to mass density and self-consistency of mixing rules for multicomponent mixtures like ambient aerosols, *Journal of Aerosol Science*, 39, 974-986. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.06.006>
- Nemuc, A., Vasilescu, J., Talianu, C., Belegante, L., Nicolae, D. (2013) Assessment of aerosol's mass concentrations from measured linear particle depolarization ratio (vertically resolved) and simulations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 3243-3255. <https://doi.org/10.5194/amt-6-3243-2013>

- Schuster, G.L., Dubovik, O., Holben, B.N. (2006) Angstrom exponent and bimodal aerosol size distributions, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111. <https://doi.org/10.1029/2005JD006328>
- Shang, X., Xia, H., Dou, X., Shangguan, M., Li, M., Wang, C. (2018) Adaptive inversion algorithm for 1.5  $\mu\text{m}$  visibility lidar incorporating in situ Angstrom wavelength exponent, *Optics Communications*, 418, 129-134. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.03.009>
- Shi, Z.-b., He, K.-b., Yu, X.-c., Yao, Z.-l., Yang, F.-m., Rui, M., Jia, Y.-t., Zhang, J. (2007) Diurnal variation of number concentration and size distribution of ultrafine particles in the urban atmosphere of Beijing in winter, *Journal of Environmental Sciences*, 19, 933-938. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(07\)60154-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(07)60154-5)
- Shin, J., Kim, D., Noh, Y. (2022a) Estimation of Aerosol Extinction Coefficient Using Camera Images and Application in Mass Extinction Efficiency Retrieval, *Remote Sensing*, 14, 1224. <https://doi.org/10.3390/rs14051224>
- Shin, J., Sim, J., Dehkhoda, N., Joo, S., Kim, T., Kim, G., Müller, D., Tesche, M., Shin, S.-K., Shin, D. (2022b) Long-term variation study of fine-mode particle size and regional characteristics using AERONET data, *Remote Sensing*, 14, 4429. <https://doi.org/10.3390/rs14184429>
- Um, J., Jang, S., Yoon, Y.J., Lee, S.S., Lee, J.Y., Han, K.M., Choi, W.J., Kim, Y.P., Kim, C.-H., Jung, C.H. (2020) Mass Extinction Efficiency Approximation for Polydispersed Aerosol Using Harmonic Mean-Type Approximation, *Applied Sciences*, 10, 8637. <https://doi.org/10.3390/app10238637>
- Virkkula, A., Koponen, I.K., Teinilä, K., Hillamo, R., Kerminen, V. M., Kulmala, M. (2006) Effective real refractive index of dry aerosols in the Antarctic boundary layer, *Geophysical Research Letters*, 33. <https://doi.org/10.1029/2005GL024602>
- Xing, Q., Sun, M. (2022) Characteristics of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> Spatio-Temporal Distribution and Influencing Meteorological Conditions in Beijing, *Atmosphere*, 13, 1120. <https://doi.org/10.3390/atmos13071120>
- Zhao, G., Tan, T., Zhao, W., Guo, S., Tian, P., Zhao, C. (2019) A new parameterization scheme for the real part of the ambient urban aerosol refractive index, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 12875-12885. <https://doi.org/10.5194/acp-19-12875-2019>
- Zhou, C., Shen, X., Liu, Z., Zhang, Y., Xin, J. (2018) Simulating aerosol size distribution and mass concentration with simultaneous nucleation, condensation/coagulation, and deposition with the GRAPES-CUACE, *Journal of Meteorological Research*, 32, 265-278. <https://doi.org/10.1007/s13351-018-7116-8>

## Authors Information

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

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

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