DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.2.071

Aerosol-extinction Retrieval Method at Three Effective RGB Wavelengths Using a Commercial Digital Camera

ISSN: 1225-6285(Print)

ISSN: 2287-321X(Online)

Sunho Park^{1,2} and Dukhyeon Kim^{3†}

¹Department of Physics, Kongju National University, 56, Gongjudaehak-ro, Gongju 32588, Korea

²SOLETOP Co., Ltd., 409, Expo-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34051, Korea

³School of Basic Science, Hanbat National University, 125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea

(Received January 23, 2020; Revised February 28, 2020; Accepted March 5, 2020)

In this article, we suggest a new method for measuring an aerosol's extinction coefficient using a commercial camera. For a given image, we choose three pixel-points that are imaged for the same kinds of objects located in similar directions. We suggest and calculate aerosol extinction coefficients from these RGB gray levels and the different distances of the three objects. To compare our measurement results, we also measure extinction coefficients using lidar. Finally, we find that there are meaningful and sensible correlations between these two measurements, with a correlation coefficient of 0.86. We measure the aerosol extinction coefficient at three different RGB wavelengths using the same method. From these aerosol extinction coefficients at three different wavelengths, we find that the Angstrom exponent ranges from 0.7 to 1.6 over a full daytime period. We believe that these Angstrom exponents can give important information about the size of the fine particles.

Keywords: Aerosol, Extinction coefficient, Camera, RGB, Color ratio OCIS codes: (010.1100) Aerosol detection; (010.1310) Atmospheric scattering; (010.3920) Meteorology

상용 디지털 카메라를 이용한 3가지 유효 RGB 파장에서의 미세먼지 소산계수 산출법

박선호^{1,2} · 김덕현^{3†}

¹국립공주대학교 물리학과 ② 32588 충청남도 공주시 공주대학로 56

²(주)솔탑 ② 34051 대전광역시 유성구 엑스포로 409

3국립한밭대학교 기초과학부 ② 34158 대전광역시 유성구 동서대로 125

(2020년 1월 23일 받음, 2020년 2월 28일 수정본 받음, 2020년 3월 5일 게재 확정)

본 논문에서는 상용 카메라를 이용하여 미세먼지의 소산계수를 측정하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 하나의 주어진 영상에서 같은 방향에 놓인 동일한 종류의 물체에 대한 3개 이상의 화소점의 밝기를 이용하여 소산계수를 측정하였다. 계산에 사용하기 위해 선택된 화소에 해당하는 물체는 카메라와의 거리를 알고 있는 것으로 선택하였다. 카메라를 이용하여 측정한 미세먼지의 소산계수와의 비교를 위하여 라이다를 이용하여 소산계수를 측정하였다. 최종적으로 카메라를 이용하여 측정한 미세먼지의 소산계수와 라이다를 이용한 그것에는 신뢰할 수 있는 상관관계를 얻었으며, 약 0.86 정도의 값을 보였다. 같은 방법으로 카메라의 R, G, B 3센서의 유효파장에서 소산계수를 얻을 수 있다는 것을 보였으며, 이러한 3파장에서의 소산계수를 통하여 하루 동안의 옹스트롱 지수(Angstrom exponent) 변화를 얻었는데, 이 값은 0.7~1.6 범위에 존재한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 지수는 입자의 크기와 관련된 중요한 정보로 사용할 수 있다.

Keywords: 미세먼지, 소산계수, 카메라, RGB, 컬러비

OCIS codes: (010.1100) Aerosol detection; (010.1310) Atmospheric scattering; (010.3920) Meteorology

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

[†]E-mail: dhkim7575@hanmail.net, ORCID: 0000-0002-1322-0032

I. 서 론

대기 중 존재하는 미세먼지는 태양복사에너지를 산란 및 흡수하여 대기 복사 특성의 변화를 일으켜 기후변화 및 대기 질, 시정, 보건 등에 영향을 미친다^[1-3]. 그러나 이러한 영향에도 불구하고 대기 미세먼지의 영향에 대한 과학적 이해는 미세먼지의 정확한 물리-화학적 평가가 부재하고 아직도 그정보가 공간적/시간적 불확실성이 커서 부족한 상태이다. 즉미세먼지의 발생은 시공간적으로 매우 불균일하게 나타나기때문에, 정확한 감시를 위해서는 보다 넓은 지역을 모니터링하는 미세먼지의 광학적 특성에 대한 연구가 필요하다.

최근 동아시아 지역은 급격한 산업화로 인하여 화석연료 사용 및 자동차 배기가스의 증가 등으로 인한 인위적인 대기 오염물질이 증가하고 있어서 그에 따라 대기 질에 많은 영향을 주고 있으며, 다양한 광학적 특성을 보여준다. 특히, 중국의 산업화·도시화가 빠르게 진행되면서 중국에서 발생되는 대기오염 물질이 편서풍을 타고 장거리 이동을 함으로 인해 동아시아 지역은 세계에서 가장 많은 인위적인 오염물질이 발생되는 지역이기도 하다^[4]. 최근 대두되고 있는 미세먼지는 관련 전문가뿐만 아니라 일반인에게도 관심사로 떠오르고 있으며, 미세먼지의 심각성에 대해 환경 및 보건학적으로 많은 화제거리가 되고 있다. 2015년 글로벌 질병 연구에 의하면, 전 세계 사망의 약 7.6%가 미세먼지와 관련되어 있으며, PM2.5로 인한 글로벌 장애 지수는 약 4.2%라고 보고되었다^[5].

또한, 미세먼지의 증가는 대기 중으로 입사되는 태양복사에너지를 산란 혹은 흡수하여 시정(visibility)에 영향을 준다. 이는 대기오염물질에 의한 빛의 흡수 및 산란에 의해 미세먼지가 많을 경우에는 가시거리가 짧아지는 등의 시정을 악화시키므로 시정의 변화는 미세먼지 농도를 반영한다고 할 수 있다. 시정은 중요한 대기 질의 척도 중의 하나이며, 소산계수와 관련이 있는 것으로 Koschmieder^[6]에 의해 처음 설명되었다.

현재 미세먼지를 측정하는 방법으로서 지상 직접 관측 (in-situ) 기반의 PM10과 PM2.5를 사용하여 미세먼지의 단위 부피당 질량(µg/m³)을 측정하고 있다. 대기 중에 미세먼지의 지수가 같더라도 작은 입자가 더 많이 존재하면 시정이 감소하고, 큰 입자가 더 많이 존재하면 시정이 좋아져서 일반인들은 대기 질이 좋다고 착각하기도 하여 야외 여가 활동을하는 사람들은 심각한 대기오염에 노출될 수 있다. 이처럼 일반인들은 시정을 대기오염의 체감 지표로 인식하고 있지만, 현재 미세먼지의 부피당 질량을 측정하는 방법은 일반인이 인식하는 미세먼지 지수와는 달라서 납득하기 어려운 실정이다. 또한, 시정 감소는 도로, 철도, 해상 및 항공 사고로이어질 수 있기 때문에 안전에도 관계되어 있다.

대기 중에 부유하는 미세먼지가 폐로 깊숙이 유입되어 폐에 흡착하여 물리화학적으로 영향을 미치는 변수는 면적에 해당하는 물리량이다. 즉 미세먼지의 화학반응 속도나, 전체 폐의 능력에서 기능을 상실하는 부분은 미세먼지의 물리적

면적에 비례한다. 소산계수는 공기 중에 존재하는 입자의 면적(cross-section)에 해당하는 값에 소산효율을 곱한 값으로정의되며, 소산효율은 산란(회절)에 의한 산란효율과 흡수(absorption)에 의한 흡수효율을 합한 것을 말한다^[7]. 다른 의미로는 비어-램버트 법칙(Beer-Lambert law)에 의하여 소산의 정도는 빛의 경로에 지수적으로 감소하며, 그 정도를 의미하는 계수(소산계수)와 경로의 곱의 단위는 m⁻¹이 되며, 이는 단위 부피에 있는 산란물질의 총면적과 같은 단위이다.

반면에 현재 국내외적으로 사용되는 미세먼지의 양은 단위 부피에 존재하는 질량을 나타내기 때문에($\mu g/m^3$) 시정이나, 건강에 미치는 지수(표면적) 등과는 차이가 있다. 안전/보건적인 측면에서 실제 측정하여야 하는 물리량은 단위 부피당면적(m^2/m^3)이 되어야 한다. 이는 언급한 것과 같이 소산계수(extinction coefficient)에 해당한다.

또한 측정되는 소산계수는 대기 중의 미세먼지를 직접 측정하기 때문에 수증기에 의한 효과도 작용하여 일반적으로 상대 습도가 60% 이상이면, 입자의 소산계수가 상당량 변하는 것으로 알려져 있으며^[8,9], 이를 고려하여 PM10과 소산계수의 관계를 보정하는 연구도 진행되었다^[10]. 이러한 보정을 통하여 소산계수와 PM10의 상관관계를 밝히는 연구도 진행되었다^[11]. 특히 시정의 장기 변화와 습도와의 관계를 적절히보여준 논문도 있는데^[12], 하루를 주기로 변화는 습도와 시정거리가 매우 상관관계가 있음을 보여주고 있다. 소산계수와PM10이나 PM2.5와의 상관관계는 대부분 유효할 수 있으나, 극단적인 경우 서로 다른 물리량을 측정하기 때문에 때론 소산계수가 PM10이나 PM2.5와는 큰 상관관계가 없는 것으로보일 수도 있어 각기 독립적으로 측정하고 다른 응용분야에적용해야 할 것이다.

소산계수는 광학적인 방법으로 측정하는 것이 가장 용이하며, 그 측정방법으로는 선포토미터 및 스카이라디오미터, 라이다 등이 있다. 선포토미터, 스카이라디오미터는 태양광의 산란신호를 얻는 것으로 구름이 있거나 구름이 많은 날에는 사용하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 라이다는 구름과는 무관하게 측정이 가능하나 비교적 고가여서 실제로 다양한곳에 설치하여 운영하기에는 한계가 있어서 저렴한 비용으로 측정할 수 있는 방법이 필요하다.

최근 들어 카메라 측정법이 활발하게 연구되고 있으며, 카메라를 이용하여 어두운 물체와 배경 사이의 대비(contrast)를 얻는 것을 기초로 하여 시정을 측정하지만[13-17] 미세먼지나기타 스모그 등에 의해 흐릿해진 영상을 복원하는데 초점[18]을 두어 대기 중에 존재하는 미세먼지의 농도추출에 대한 연구는 국내는 물론이고 국외의 경우도 이루어진 실례를 찾아보기 힘들다. 몇몇 연구에서는 알려진 정보(반사도)를 이용하여 미세먼지의 농도를 직접 산출한 예는 있으나, 이는 소산계수에서 단위가 다른 미세먼지의 농도를 직접 측정했다는[19,20] 측면에서 아직 논쟁의 여지가 많으며, 카메라의 픽셀정보를 이용하여 각 RGB 유효 파장에서 미세먼지의 소산계수를 얻고 이로부터 미세먼지의 중요 정보인 칼라 비(colorratio)를 얻은 연구에 대한 적용사례는 찾아보기 힘들다.

본 연구에서는 카메라의 R, G, B 3채널에서 얻은 각각의 다른 거리의 타깃(산, 건물 등) 이미지로부터 카메라와 타깃(산, 건물 등) 사이에 존재하는 미세먼지의 소산계수를 측정하였다. 연구결과의 타당성을 얻기 위하여 532 nm 라이다를 제작하여 소산계수를 측정하고 라이다로 측정된 소산계수와 카메라의 R, G, B 3채널 중 Green에 해당하는 유효파장의소산계수를 비교하였다. 이를 통하여 카메라 측정만으로 소산계수 및 입자들의 크기 정보를 측정하는 것이 가능함을 보였다.

Ⅱ. 측정 이론

2.1. 라이다를 이용한 소산계수 추출

대기 미세먼지의 고도 별 분포와 광학적 특성을 실시간으로 관측할 수 있는 라이다(light detection and ranging, LIDAR)는 미세먼지의 이동 특성 관측에 있어 매우 유용한 장비이다. 일반적인 라이다 방정식은 식 (1)과 같다^[21].

$$P(\lambda, r) = K \frac{\beta(\lambda, r)}{r^2} e^{-2 \int_0^r \alpha(\lambda, r) dr}$$
 (1)

 $P(\lambda,r)$ 는 고도 r에서 Δr 동안 후방 산란되어 들어오는 신호, λ,r 은 각각 파장과 고도를 나타내고, K는 H/W 특성과 관련된 시스템 상수, β 는 대기의 후방산란계수, α 는 소산계수이다. 식 (1)에서 수평방향의 라이다 신호는 거리에 관계없이 β , α 값이 일정하고 같은 종류의 미세먼지가 존재한다면 그 비(ratio)가 일정하다. 라이다 신호 P의 규격화 값 ($\ln(r^2P)$)은,

$$S = \ln(r^2 P) = K - 2\alpha r \tag{2}$$

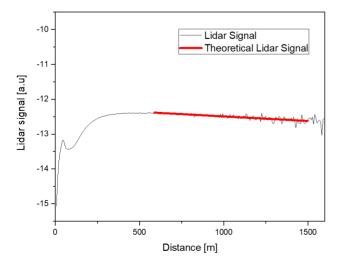


Fig. 1. Characteristics of the lidar signal measured in the horizontal direction.

와 같이 표현된다. 식 (2)에서 라이다 신호를 규격화한 신호 (5)는 거리에 따라 일정한 기울기로 작아지는 것을 볼 수 있는데, 그 기울기의 1/2을 취하면 소산계수가 된다.

그림 1은 이러한 규격화된 라이다 신호를 거리에 따라 나타낸 것으로 그 기울기의 1/2이 소산계수이다. 그림에서 500 m 이하인 거리에서는 라이다 신호가 왜곡되어 있는데, 이는 망원경의 좁은 시야(field of view, FOV) 때문에 근거리에서 레이저와 망원경의 신호가 완전히 겹쳐지지 않아서 생긴 왜곡 때문이다. 신호를 분석하기 위하여 500 m 이하의 근거리 신호는 제외하고 분석하였다.

2.2. 디지털 카메라 센서의 유효파장 정의

디지털 카메라를 통하여 얻게 되는 선택된 픽셀의 RGB 채널 값은 RGB 각 채널이 넓은 영역에서 감도가 있기 때문에 RGB의 최대 감도 값을 나타내는 파장을 그대로 RGB의 파장이라고 사용할 수 없다. 또한 실제로 각 카메라의 센서마다 RGB 센서의 감도가 다르고 어떤 파장이 RGB 센서의 값을 대표하는지 알 수 없기 때문에 재정의하여 사용할 필요가 있다. 또한 태양이나 인공조명에서 특정 파장의 조명이 강하게 이루어지고 있다면 이를 고려하여야 하기 때문에 이러한모든 점을 고려하여 센서의 유효파장(effective wavelength)을 선정할 필요가 있다.

RGB 센서의 유효 파장은 태양광 빛의 세기($I_{sun}(\lambda)$), 센서의 감도($S_{R,G,B}(\lambda)$)가 강한 파장에서는 가중치를 크게 주고 작은 값에서는 작게 준다면, 다음과 같이 그 최종 유효 파장을 정의할 수 있다.

$$\lambda_{R,G,B}^{eff} = \frac{\int_{0}^{\infty} \lambda I_{sun}(\lambda) S_{R,G,B}(\lambda) d\lambda}{\int_{0}^{\infty} I_{sun}(\lambda) S_{R,G,B}(\lambda) d\lambda}$$
(3)

본 연구에서는 니콘 D7500 카메라 센서의 감도를 측정하기 위해 분광기를 이용하여 선택적으로 물체에 조명을 하고이를 카메라로 받아서 감도를 측정하였으며, 풍경 영상의 조명이 대부분 태양광의 직접 조명에 의하여 결정되기 때문에 태양광을 역시 분광기로 측정하여 얻은 스펙트럼을 식 (3)에 사용하였다. 그 결과 R, G, B에서 유효 파장은 각각 597 nm, 534 nm, 459 nm인 것으로 나타났다.

2.3. 영상을 이용한 소산계수 추출 이론 및 알고리즘

디지털 카메라의 픽셀 값은 태양의 조사 각도에 따른 해당 물체의 산란 특성과 대기 중의 미세먼지 및 공기 분자의 양에 의하여 정해진다. 다시 말하면, 카메라로 입사되는 광량은 태양광의 위치와 물체의 특성, 그리고 부유 미세입자의 농도와 크기 등에 의하여 주로 결정된다. 이러한 점을 고려하여 공기 분자나 미세먼지에 의하여 산란되는 빛의 양을 고려한다면, 그림 2와 같이 카메라에서 한 개의 픽셀에 들어올 수 있는 광량(E)은 그 픽셀이 바라보는 시각($FOV: d\omega$)

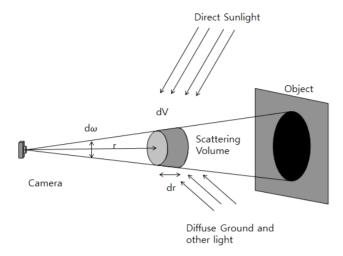


Fig. 2. Light intensity at an arbitrary pixel imaged by a camera that is scattered by the atmospheric aerosol and molecules.

안에 있는 공간의 크기(dV), 각 공간에서의 총 산란계수(α), 그리고 태양의 위치나 구름의 존재 여부 등 조명과 관계된 상수(k_1)에 의한 물체의 광원(I)에 의해 결정된다.

산란이 일어난 후 빛이 거리 r만큼 진행하여 카메라의 센서로 입사되는 경우, 대기 중으로 진행되면서 소산($e^{-\alpha r}$)과 함께 사방으로 퍼지기 때문에 거리에 따라 그 양이 줄어든다 $(1/r^2)$. 따라서 센서로 입사되는 세기는 카메라 렌즈의 투과도, 렌즈의 크기, 센서의 감도 등 거리에 무관한 상수(k_2)를 비례상수로 하여 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{split} dE &= k_1 k_2 dI(r,\lambda) e^{-\alpha r} \frac{1}{r^2}, \\ dI(r,\lambda) &= dV k_1(\lambda), \ dV = d\omega r^2 dr \end{split} \tag{4}$$

식 (4)를 모든 거리에 대하여 적분하면, 단위 각도로 입사되는 광량에 의하여 결정되는 픽셀의 값은 다음과 같이 얻어진다. 여기서 거리에 무관한 상수는 모두 하나의 상수(C_2)로 표시하였다.

$$I_{pixel} = C_2(1 - e^{-\alpha r}) (5)$$

같은 방법으로 물체에서 난반사된 후 주어진 픽셀의 크기에서 주어진 카메라의 FOV에서 카메라로 들어오는 빛의 양은 공기 중에서 소산되는($e^{-\alpha r}$) 값과 물체의 반사도와 기타렌즈의 투과도, 공기 센서의 감도 등과 관계된 상수(C_1)로 결정된다. 식 (4)와 다르게 물체에서 반사되어 카메라로 입사되는 빛은 거리가 멀어지면 픽셀 하나로 입사되는 면적도넓어지기 때문에 거리에 의존하여 퍼지는 양 $(1/r^2)$ 은 거리에따라 볼 수 있는 면적(r^2)과 서로 상쇄되어 없어지고 전체적으로 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$I_{mixel}(\lambda) = C_1(\lambda) \exp(-\alpha r) + C_2(\lambda) \{1 - \exp(-\alpha r)\}$$
 (6)

위 식에서 앞의 항은 물체에서 소산되어 카메라로 입사되는 빛의 양이고, 둘째 항은 대기 입자에 의하여 산란되는 양이다. C_1 은 태양의 조사 각도에 따른 물체에서의 방사 휘도, C_2 는 태양의 조사 각도에 의한 미세먼지 산란(반사)계수, α 는 미세먼지의 소산계수, r은 카메라와 물체까지의 거리이다. 식 (6)은 하나의 픽셀에서 얻을 수 있는 값이고, 이 값은 3개의 다른 파장으로 구별된다. 식에서 알 수 있듯이 거리를 알 수 있는 물체에 해당하는 픽셀의 값을 이용한다면, C_1 은 같은 값이라고 생각할 수 있으며, 그 물체들이 태양이나 조명 장치에 대하여 같은 방향으로 나열된 것을 선택한다면, 식에서 C_2 도 거리와는 상관없이 같은 값으로 가정할 수 있다. 그러므로 식 (6)은 미지수가 3개인(C_1 , C_2 , α) 방정식이고 다른 거리의 비슷한 각도에서의 같은 물체를 여럿 택한다면 아래와 같은 여러 개의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{split} I_{pixel}^{1}(\lambda) &= C_{1}(\lambda) \exp\left(-\alpha r_{1}\right) + C_{2}(\lambda) \left\{1 - \exp\left(-\alpha r_{1}\right)\right\} \\ I_{pixel}^{2}(\lambda) &= C_{1}(\lambda) \exp\left(-\alpha r_{2}\right) + C_{2}(\lambda) \left\{1 - \exp\left(-\alpha r_{2}\right)\right\} \\ &\vdots \\ I_{pixel}^{m}(\lambda) &= C_{1}(\lambda) \exp\left(-\alpha r_{m}\right) + C_{2}(\lambda) \left\{1 - \exp\left(-\alpha r_{m}\right)\right\} \end{split}$$

그러므로 위의 식 (7)은 비선형 연립 방정식을 푸는 문제로, 특정된 거리가 3군데 이상이면 잘 정의된 문제(well-posed problem)로 귀결되며 어떤 경우에서든 해가 존재한다. 특히 같은 방향으로 두 개 이상의 검은 물체가 있는 경우, 일반적으로 건물의 창이나, 산 속의 나무 그림자 등은 상대적으로 적은 양의 태양광이 도달하거나 직접 도달하지 않으므로 검은 물체라고 생각해도 무방하다. 그러므로 식 (6)에서 상수 C_1 값이 0이 되어 미지수가 두 개로 축소된다. 또한 그 검은 물체가 무한히 먼 거리에 존재한다면, 식 (6)에서 배경 값 $(I(r=\infty)=C_2(1-\exp(-\alpha\infty)=C_2))$ 을 얻을 수 있어서, 미지수가 하나만 남게 된다. 즉 하나의 다른 거리(r)에 있는 임의의 검은 물체의 화소값 $I_{pixel}(\lambda)$ 을 이용하여 소산계수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{r} \log \left(\frac{1 - I_{pixel}(\lambda)}{(C_2(\lambda))} \right)$$
 (8)

즉, 식 (8)을 통하여 소산계수 α 를 얻을 수 있다. 물론 이 러한 과정은 R, G, B 3개의 유효 파장에서 동시에 수행되어 하나의 사진에서 3파장에서의 소산계수가 얻어지고, 이러한 계산을 다른 방향에 대하여 수행한다면, 카메라를 중심으로 다른 방향에서의 소산계수를 구할 수 있어 카메라를 중심으로 공간적인 분포 특성도 알 수 있다.

만약 다수의 검은 물체를 원하는 방향으로 설치할 수 있다면, 예를 들어 공항의 활주로 근방이나, 안개가 자주 발생하는 도로의 특정 구간에 설치한 경우 실시간으로 안개에 의한 빛의 소산 정보를 얻을 수 있고, Koschmieder^[6]의 시정거리에 대한 관계식을 통하여 바로 시정 거리를 얻을 수 있다.

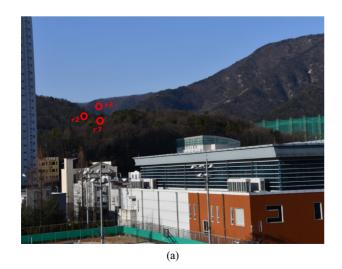
Ⅲ. 실험 결과

본 연구에서 제안된 방법으로 위치가 고정된 디지털 카메라를 이용하여 특정 방향으로 거리가 다르지만, 물체의 산란특성이 유사한 물체를 선택하고 그 물체들의 화소값을 이용하여 소산계수를 추출하였다. 산을 배경으로 선택된 영상에서 가능한 어두운 검은 물체(혹은 그림자)를 선택하여 계산에 사용하였다. 이는 앞 절에서 언급한 것과 같이 계산이 간단하고 비선형 방정식을 풀어야 하는 애로사항을 줄이기 위함이다. 이 경우 물체에 해당하는 화소값(R, G, B)은 대기중의 미세먼지와 태양의 방향에 따라 그 값이 결정되는데, 주어진 거리의 모든 물체는 가능한 한 같은 방향을 향하도록함으로써 태양광의 위상산란함수(scattering phase function)가 방향에 따라 변하는 효과가 가능한 한 없도록 하였다. 또한, 풍경을 촬영함에 있어서 하늘을 배경으로 촬영함으로써같은 각도에서 건물이나 물체가 무한대에 있을 경우 얻어지는 효과를 얻도록 하였다.

그림 3은 이러한 사항을 고려하고, 실험의 편의성도 고려하여 대전에 위치한 국립한밭대학교(위도 36.35°, 경도 127.30°)에서 남쪽 방향에 자리 잡은 계룡산을 배경으로 영상을 얻었다. 그림 3은 설치된 디지털 카메라(NIKON, D7500)로 얻은 사진을 보여주고 있다. 사진의 해상도는 5568×3712 픽셀이고, 카메라의 R, G, B 채널에 8비트 JPEG형식으로 자동 저장된다. 따라서 각 채널의 화소값은 [0, 255] 범위이다. 그림에서 (r_1, r_2, r_3, \cdots) 값은 다른 거리에서 같은 방향으로 존재하는산의 그림자 부분을 예로 들어 나타낸 것으로 동시에 같은

방향에 하늘도 영상에 포함되어 있어 계산에 매우 유리한 조건이다. 그림에서 카메라 시야에 고정되어 계산에 사용된 위치의 거리는 각각 $r_1=500$ m, $r_2=1,500$ m, $r_3=2,400$ m로, 인터넷에서 공개되어 있는 GIS정보를 이용하였다. 그림 3(b)는 미세먼지의 농도가 높은 날 얻은 것으로 그림에서 알 수있듯이 r_3 에 해당하는 산의 경우 무한대에 존재하는 것으로 판단하여도 무방하다. 즉 소산계수의 값이 커서 식 (6)에서 $e^{-\alpha\times2400}$ 값이 0에 가깝게 수렴한다는 뜻이다. 그러므로 미세먼지의 농도가 높은 날은 신뢰할 수 있는 정보를 얻기 위하여 가능한 가까운 거리의 화소나 물체를 정해야 하며, 반대로 맑은 날의 경우 먼 거리의 물체를 계산에 이용하여야한다.

그림 4(a)는 카메라를 이용하여 얻은 소산계수와 라이다를 이용하여 얻은 소산계수를 비교한 것이고, 그림 4(b)는 측정 된 지점과 약 5 km 떨어진 국가 환경 관측망을 통하여 얻은 PM10과 카메라를 이용하여 얻은 데이터를 비교한 것, 그리 고 그림 4(c)는 PM2.5와 카메라를 이용하여 얻은 것을 보여 주는 것으로 각각 2019년 3월 1일에서 3월 5일 사이에 임의 로 얻은 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 라이다와 카메라의 소산계수는 상관관계를 뚜렷이 볼 수 있으나, PM10이나 PM2.5와는 그렇지 않음을 알 수 있다. 카메라와 라이다는 같은 위치에서 같은 방향을 향하여 측정하기 때문에 유사한 상관관계를 보이는 면도 있지만, 일반적으로 서론에서 언급 되었듯이 PM10과 PM2.5와는 서로 다른 물리량을 나타내고 (소산계수는 공기 속에 존재하는 총 입자의 면적이고, PM10 과 PM2.5는 공기 속에 존재하는 입자의 부피를 나타낸다.), 또한 PM10이나 PM2.5는 미세먼지에 포함된 수증기를 모두 제거한 상태에서 얻은 것이다. 그러므로 두 물리량을 같이 비교하는 것은 무리가 있으며, 또 다른 이유는 미세먼지가 위치와 시간에 따라 다르기 때문에 약 5 km 이상 떨어진 두 지점 간의 측정값을 비교하는 것은 문제가 있다. PM2.5의



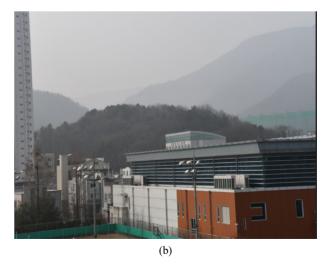


Fig. 3. Two representative images used for extracting aerosol extinction coefficients at RGB effective wavelengths. (a) Low aerosol concentration. (b) High aerosol particle concentration.

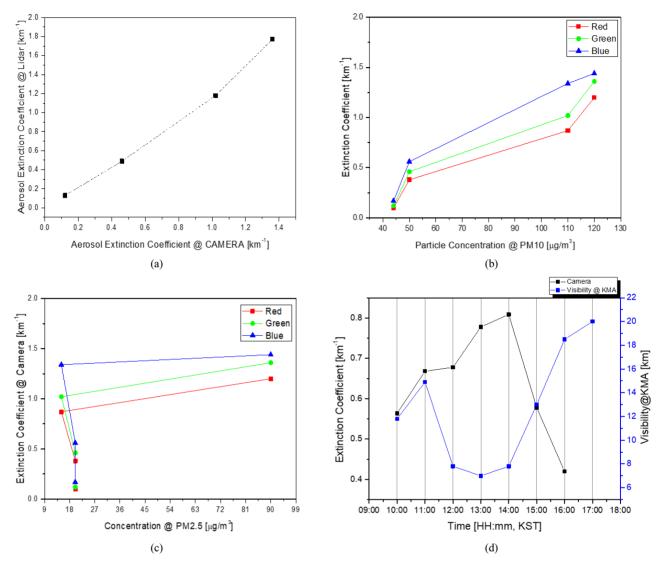


Fig. 4. Correlation between the extinction coefficients measured by a camera and a lidar, and difference between the camera-based extinction and PM10 or PM2.5. (a) Correlation of the extinction coefficients measured using a lidar and a camera. (b) Correlation between the extinction and PM10 (measured at 5 km distance). (c) Correlation between the extinction and PM2.5 (measured at 5 km distance). (d) Correlation between the extinction (green) and the visibility distance.

경우는 입자의 크기가 2.5 μm 이하의 질량을 나타내는 것으로 그보다 큰 크기의 입자는 고려하지 않는다. 그림 4(c)에서 알 수 있듯이 PM2.5는 소산계수와 상관관계가 더 낮은 것으로 판단된다. 이처럼 일반인이 느끼는 소산계수와 국가 환경측정망을 통하여 측정하는 PM10과 PM2.5를 직접 비교하는 것은 문제가 있는 것으로 판단된다. 그림 4(d)는 카메라로 얻은 소산계수의 신뢰도를 검토하기 위하여 기상청에서 발표한 시정 거리와 비교 분석한 결과이다. 그림 4(d)는 기상청의 대전지역 시정거리(ν=3.9/α)와 카메라의 Green 채널에서 얻은 소산계수를 나타낸 것으로 PM10, PM2.5와 비교한 결과인 그림 4(b), 4(c)보다는 소산계수 상관관계가 더 좋은 것으로 판단된다. 이러한 요인은 시정 거리도 PM10이나 PM2.5와 달리 소산계수와 같이 대기 상태에서 직접 측정하는 것이기 때문이다.

그림 5는 2019년 3월 1일부터 약 한 달간 비주기적으로 고 농도 미세먼지가 집중 발생한 기간에 측정한 소산계수를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 라이다와 카메라의 두 방법으로 얻은 값은 서로 0.86 정도의 높은 상관 관계를 보이고 있고, 간간히 오차를 보여주고 있음을 볼 수 있다. 그림에서라이다의 경우는 532 nm를 사용하였기 때문에 소산계수 0.2 km-1에서는 시정거리가 15 km이고, 1.5 km-1인 경우는 시정거리가 2 km인 경우이다. (그림 3(b)의 경우가 후자에 해당한다.)

카메라를 이용하는 방법에서 오차의 원인으로서 첫째로, 산을 배경으로 얻은 영상에서 산 그림자나 나무의 그림자를 검은 물체로 가정하고 $C_1 = 0$ 로 두고 계산하였다. 둘째로, 선 택되는 물체가 인위적으로 선택되며, 각 경우에 선택되는 다 른 거리의 같은 물체(그림자)가 반사 특성을 다르게 나타낼

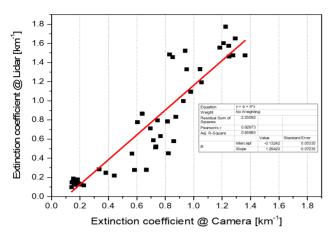


Fig. 5. Correlation between the aerosol extinction coefficients measured by using a lidar and the proposed camera-based method.

수 있다. 셋째로, 카메라에서 물체까지의 거리 중간에 구름 에 의한 그림자가 있을 경우 먼지의 산란 신호가 적어져서, 소산계수가 낮게 나올 가능성이 있다. 넷째로, 태양과 물체 그리고 카메라가 만드는 각도는 모든 물체에서 같을 수 없으 며 이는 근사치에 해당하며, 특히 태양의 위치에 따라 각도 가 달라져서 다른 결과를 도출할 수 있다. 다섯째로, 하늘 영 상은 물체가 없는 것으로 간주하고 그 하늘 화소값으로 물체 에 해당하는 C_2 값을 예측하기 때문에 실제 C_2 값을 제대로 얻을 수 없다. 마지막으로 하늘의 화소값으로 가능한 한 물 체와 가까운 지점을 택하고 있으나, 거리에 따라 소산계수의 값이 달라질 수 밖에 없음에도 불구하고, 본 연구에서는 카 메라에서 물체까지의 거리에는 평균과 같은 농도의 미세먼 지가 있는 것으로 가정하였다. 이러한 다양한 가정과 한계에 도 불구하고, 만약 인위적으로 검은 물체나 기타 보조 타깃 을 일정 위치에 일정 간격으로 배치하면, 시정거리나, 소산 계수를 3개의 유효 파장에서 얻을 수 있다.

그림 6은 카메라를 이용하는 경우 연속 측정이 가능함을 보여 주고 있다. 예를 들어 라이다의 경우 최소 수백-수천 개 의 레이저 펄스가 필요한 반면 카메라의 경우 카메라 셔터가 열린 시간과 4개의 방정식을 푸는 시간만으로도 충분히 신 뢰성이 있는 값을 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 두 값의 차이는 다음의 이유에 기인한다. 1)물 체의 동종 여부, 2)물체의 방향의 일치, 3)하늘 데이터의 값 의 유효성, 4)그리고 유효 파장의 차이 등이 오차의 요인으 로 작용한다. 이 중에서 앞의 3요소는 측정환경이나, 측정방 법을 세밀히 조정하여 개선할 수 있으나, 마지막 요인은 보 정이 불가능하다. 즉, 라이다의 경우 정확히 532 nm 파장으 로 계산된 것이나, 카메라의 RGB에서 유효 파장(534 nm)은 식 (3)을 통하여 태양의 스펙트럼과 카메라의 감도를 고려하 여 계산한 것이고 그 둘은 같은 의미의 파장이 아니기 때문 이다. 즉, 카메라 센서의 Green 채널은 넓은 파장 영역에서 감도가 우수하며, 각 파장에서 얻은 소산계수의 합의 평균값 과 일치하지 않는다. 이는 파장에 따라 소산계수가 선형적으

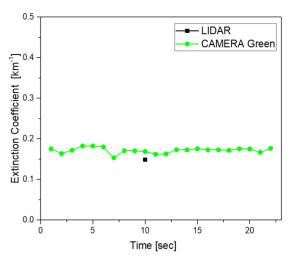


Fig. 6. Measurement variation of the aerosol extinction coefficients measured by a camera.

로 변하지 않기 때문이다. 그러므로 532 nm와 정확하게 같은 값으로 카메라로 얻고자 한다면, 카메라의 렌즈 앞 부분에 같은 파장만 통과하는 필터를 두고 측정하면 된다.

소산계수는 입자의 면적과 산란 효율을 곱한 양으로 결정되는데, 효율은 입자의 크기 둘레와 파장의 비의 값에만 의존한다. 입자가 파장보다 매우 작으면, 파장의 4승에 반비례하고(Rayleigh scattering), 입자가 파장보다 크면 효율은 2값으로 수렴한다. 입자의 크기와 파장이 유사한 경우에 최대값을 지니게 된다. 대기 중의 미세먼지 중에서 초미세먼지의크기는 약 0.12~0.28 μm 정도 범위에서 가우시안 분포를 갖고 특정 크기에서 갑자기 효율이 증가하게 된다. 즉 대기 중의 초미세먼지의 크기 분포 영역과 산란 효율을 고려하면, 파장이 길수록 입자의 부피 산란 효율은 줄어들게 되는데^[22], 그 줄어드는 정도가 입자의 크기에 따라 달라진다.

구체적으로 입자의 크기에 따른 소산계수가 달라지는 현상 은 그림 7(a)의 부피소산 효율로 설명이 가능하다. 그림은 초 미세입자와 조대입자의 분포 곡선 그리고 부피소산 효율을 동시에 그린 것이다. 소산계수는 효율곡선과 크기분포 곡선 의 곱을 모두 합한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 자연상태 에서는 총 부피(질량)는 조대입자와 초미세입자의 총량이 같 은 정도로 존재하나, 그 효율은 상당히 다르며, 조대입자는 그 효율이 작아서 소산계수에 큰 영향을 미치지 않으며, 주 로 초미세입자에 의하여 소산계수가 결정된다. 즉 초미세입 자의 중심 크기가 오른쪽으로 이동하면, 소산계수는 커지고, 작아지면 작아진다는 것을 보여준다. 그림 7(b)는 파장에 따 른 부피소산효율을 보여준다. 즉 입자의 크기가 주어진다면, 파장에 따라 부피소산 효율이 다르기 때문에 주어진 입자의 크기에서 파장에 따라 소산계수가 달라짐을 보인다. 즉 파장 에 따라 소산계수가 달라지는 정도는 입자의 중심크기가 어 디에 있는가에 의하여 결정된다는 것을 보여 준다.

이러한 파장에 따른 소산계수의 변화는 입자의 크기 정보를 포함한다는 의미이다. 일반적으로 입자가 작아지면 그 지수는

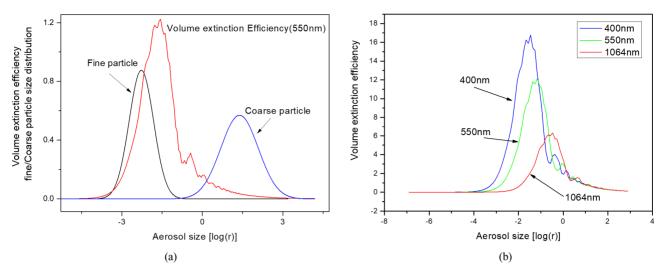


Fig. 7. (a) Theoretical aerosol extinction calculation model for fine and coarse particles. (b) Changes of volume extinction efficiencies at three different wavelengths.

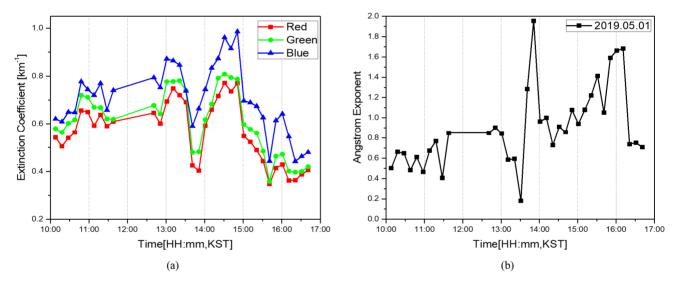


Fig. 8. (a) Daily variation of the aerosol extinction coefficient at three effective wavelengths (R, G, and B) measured on 01 May 2019. (b) Daily variation of the Angstrom exponents at three effective wavelengths (R, G, and B) measured on 01 May 2019.

커지고, 커지면 점점 작아져서 특정 크기 이상에선 - 값을 지니기도 한다. 그러나 - 값은 일반 대기 상태에서는 거의 나타나지 않는 크기이며, 대부분의 대기 상태에서는 1 근처의 값을 지니고 지수 값이 작을수록 초미세먼지의 입자 크기가 커진다고 볼 수 있다.

그림 8(a)는 2019년 5월 1일 하루 동안 R, G, B 채널에서 의 소산계수를 측정한 것이고 그림 8(b)는 그림 8(a)에 경험적으로 얻은 아래 식 (9)를 적용하여 구한 AE (Angstrom exponent) 값을 나타낸 것이다.

$$\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{AE} \tag{9}$$

그림 7(a)에서는 미세먼지의 농도에 관련된 정보만 얻을수 있으나, 그림 7(b)에서는 입자의 크기에 대한 정보가 있다고 할수 있다. 그림에서 알수 있듯이 13:00에서 14:00 사이에 미세먼지의 농도가 급격히 낮아졌다가, 다시 상승하는 것을 볼수 있고, 그림 7(b)에서도 입자의 크기 변화가 발생하는 것을 볼수 있다. 이는 다른 종류의 미세먼지가 유입되거나, 미세먼지의 물리적 특성이 변하거나, 습도가 변하는 등여러 현상이 동시에 기여하여 일어나는 것으로 판단되며, 본연구의 범위를 벗어난 현상으로 다양한 데이터가 축적되면 분석이 가능할 것으로 판단된다.

카메라의 렌즈 앞에 특정 파장의 필터를 삽입하여 촬영하면 더 정확한 파장에서의 다양한 소산계수를 얻을 수 있고 이로부터 보다 정확한 AE뿐만 아니라 미세먼지의 전체 분포특성도 얻을 수 있다^[23].

IV. 결 론

카메라와 라이다를 이용하여 각각 추출한 소산계수를 비교한 결과 0.86 정도의 좋은 상관관계를 얻을 수 있었으며, 카메라를 이용하여 소산계수를 3개의 유효 파장에서 얻어 분석한 결과 단순히 미세먼지의 증가/감소뿐 아니라, 미세먼지 입자의 크기 증가나 감소에 대한 정보도 얻을 수 있었다. 반면에 카메라를 이용하여 얻은 소산계수는 PM10이나 PM2.5 와는 그보다 낮은 상관관계를 보이고 있는데, 이는 서로 다른 물리량을 (PM10, PM2.5는 부피와 관련된 물리량, 소산계수는 입자의 면적과 관련된 물리량) 측정한다는 것과 측정지점이 서로 다르다는 것, 그리고 국가 환경 측정망에서 관측된 자료는 수증기를 제외하여 질량을 측정한 것이기 때문에 직접 비교하는 것은 문제가 있는 것으로 판단된다.

미세먼지를 구성하는 입자의 성분에 따라 다르나, 습도 60% 이상에서 일반적으로 입자의 크기가 커진다는 기존의 연구 결과를 반영하면 소산계수와 PM10, PM2.5의 상관관계가 낮아진다는 것은 당연한 결과이다. 이러한 측면에서 국가환경 측정망과 소산계수의 측정은 독립적인 측정이라 할 수 있기 때문에, 국가적으로도 동시에(시정거리는 소산계수를 의미함) 측정되고 있다.

카메라 영상에 대한 연구는 주로 카메라의 영상을 복구하거나, 영상 복구과정에서 얻어지는 다양한 정보들을 시정거리 환산에 사용된 경우는 많이 있으나, 본 연구에서는 소산계수 측정을 위해 영상의 변화를 활용하였다. 특히 카메라영상에서 같은 방향으로 배치된 같은 종류의 물체가 비슷한방향으로 배치된 경우 본 연구에서 정의한 R, G, B 각각의유효과장에서의 소산계수를 얻을 수 있다는 것을 보여준다.일반적으로 도시에서는 불이 켜지지 않은 건물의 창(태양과반사에 의하여 빛이 카메라 방향으로 입사되는 것을 제외함), 산이나일반 풍경의 경우 그림자 부분, 그리고 동종의수목이 있는 경우 수목 자체의 평균 반사도와 태양과 물체그리고 카메라가 만드는 각도는 같은 것으로 판단할 수 있다.이렇게 결정된 물체의 거리를 알고 있다면, 물체와 카메라가만드는 공간에 존재하는 미세먼지의 소산계수를 얻을수 있다는 것을 보여 주었다.

인공적으로 동종(검은 것이 유리함)의 물체를 임의의 측정하고자 하는 원하는 공간에 배치하는 경우 그 공간과 카메라사이의 공간에서 발생하는 미세먼지의 소산계수 변화는 실시간으로 보다 정확히 측정할 수 있음을 알 수 있었다. 이경우 공항이나, 상습적으로 안개가 발생하는 지점에 설치되면 시정 거리와 동시에 정보를 제공할 수 있으므로 응용분야가 매우 많을 것으로 생각된다.

특정 도시 공간 전체를 공간 분해능을 가지고 측정하고자 한다면, 여러 방향에서 그 평균값으로 소산계수를 산출하고 그 정보를 연립하여, 원하는 전체 공간에서 특정 지역의 미 세먼지 변화도 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

일반적으로 카메라의 R, G, B 센서는 넓은 영역의 파장에서 동작하고, 또 700 nm 이상에서는 투과가 이루어지지 못

하도록 필터를 장착하고 있다. 적외선 필터를 제거하고, 렌즈 앞부분에 특정 파장을 투과하는 필터를 설치하면 다양한 파장에서 소산계수를 얻을 수 있고 이로부터 입자의 크기 분포도 연산할 수 있어서 앞으로 이에 대한 연구가 더 진행될수 있을 것으로 판단된다.

References

- 1. V. Ramanathan and Y. Feng, "Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives," Atmos. Environ. **43**, 37-50 (2009).
- V. Ramanathan and A. M. Vogelmann, "Greenhouse effect, atmospheric solar absorption, and the Earth's radiation budget: From the Arrhenius-Langley era to the 1990's," Ambio 26, 38-46 (1997).
- R. J. Charlson, S. E. Schwartz, J. M. Hales, R. D. Cess, J. A. Coakley JR., J. E. Hansen, and D. J. Hofmann, "Climate forcing by anthropogenic aerosols," Science 255, 423-430 (1992).
- Z. Li, F. Niu, K.-H. Lee, J. Xin, W.-M. Hao, B. Nordgren, Y. Wang, and P. Wang, "Validation and understanding of moderate resolution imaging spectroradiometer aerosol products (C5) using ground-based measurements from the handheld Sun photometer network in China," J. Geophys. Res.: Atmos. 112, D22S07 (2007).
- A. J. Cohen, M. Brauer, R. Burnett, R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, K. Balakrishnan, B. Brunekreef, L. Dandona, R. Dandona, V. Feigin, G. Freedman, B. Hubbell, A. Jobling, H. Kan, L. Knibbs, Y. Liu, R. Martin, and M. H. Forouzanfar, "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 (2017).
- H. Koschmieder, "Theorie der horizontalen Sichtweite," Beitr. Phys. Freien Atmos. 12, 33-53 (1924).
- H. C. van de Hulst, Light Scattering by Small Particles (Dover Publication, NY, USA, 1981).
- 8. Z. J. Lin, J. Tao, F. H. Chai, S. J. Fan, J. H. Yue, L. H. Zhu, K. F. Ho, and R. J. Zhang, "Impact of relative humidity and particles number size distribution on aerosol light extinction in the urban area of Guangzhou," Atmos. Chem. Phys. 13, 1115-1128 (2013).
- P. Zieger, R. Fierz-Schmidhauser, E. Weingartner, and U. Baltensperger, "Effects of relative humidity on aerosol light scattering: results from different European sites," Atmos. Chem. Phys. 13, 10609-10631 (2013).
- J.-S. Park, S.-M. Park, I.-H. Song, H.-J. Shin, and Y.-D. Hong, "Characteristics of visibility impairment by semi-continuous optical and chemical property monitoring of aerosols in Seoul," J. Korean Soc. Atmos. Environ. 31, 319-329 (2015).
- H. Che, X. Zhang, Y. Li, Z. Zhou, and Z. Chen, "Relationship between horizontal extinction coefficient and PM₁₀ concentration in Xi'an, China, during 1980-2002," China Particuol. 4, 327-329 (2006).

- K. W. Kim, "Physico-chemical characteristics of visibility impairment in a national park area," J. Korean Soc. Atmos. Environ. 25, 325-338 (2009).
- F. M. Janeiro, F. Wagner, and A. M. Silva, "Visibility measurements using a commercial digital camera," in *Proc. Visibility, Aerosols, and Atmospheric Optics* (Vienna, Austria, Sep. 2006).
- H. Horvath, "Spectral extinction coefficients of rural aerosol in southern Italy - A case study of cause and effect of variability of atmospheric aerosol," J. Aerosol Sci. 27, 437-453 (1996).
- K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 33, 2341-2353 (2011).
- R. T. Tan, "Visibility in bad weather from a single image," in *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (AK, USA, Jun. 2008).
- 17. F. M. Janeiro, F. Wagner, P. Ramos, and A. Silva, "Automated atmospheric visibility measurements using a digital camera and image registration," in *Proc. First Symposium on Environmental Instrumentation and Measurements* (Iasi, Romania, 2007).

- R. Luzón-González, J. L. Nieves, and J. Romero, "Recovering of weather degraded images based on RGB response ratio constancy," Appl. Opt. 54, B222-B231 (2015).
- S. Alsultan, C. J. Wong, H. S. Lim, M. Z. MatJafri, K. Abdullah, S. A. Hashim, and N. M. Salleh, "Remote sensing of PM10 concentration measurement by internet protocol camera," in *Proc. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (Enschede, The Netherlands, May 2006), Vol. XXXVI Part 7.
- C. J. Wong, H. S. Lim, M. Z. MatJafri, K. Abdullah, and T. S. Chin, "Temporal and spatial air quality monitoring using internet protocol camera and LANSAT5 satellite image," Proc. SPIE 7336, 73361P (2010).
- 21. J. D. Klett, "Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios," Appl. Opt. **24**, 1638-1643 (1985).
- 22. H. Di, Z. Wang, and D. Hua, "Precise size distribution measurement of aerosol particles and fog droplets in the open atmosphere," Opt. Express 27, A890-A908 (2019).
- 23. D. Kim, "Study of retrieving the aerosol size distribution from aerosol optical depths," Korean J. Opt. Photon. 29, 139-148 (2018).