Korean Journal of Remote Sensing, Vol.32, No.2, 2016, pp.119~131
http://dx.doi.org/10.7780/kjrs.2016.32.2.5

ISSN 1225-6161 (Print)
ISSN 2287-9307 (Online)

Article

한반도 에어로졸 라이다 네트워크(KALION)의 에어로졸 유형 구분 및 질량 농도 산출 알고리즘

여희동* · 김상우*† · 이철규** · 김덕현*** · 김병곤**** · 김세원** · 남형구***** · 노영민****** · 박수진* · 박찬봉******* · 서광석******** · 최진영********* · 이명인********** · 이은혜**

*서울대학교 지구환경과학부, **기상청 기후변화감시과, ***한밭대학교 기초과학부, ****강릉원주대학교 대기환경과학과, *****국립기상과학원 재해기상연구센터, ******광주과학기술원 환경공학부, *******목원대학교 전자공학과, ********서울특별시 보건환경연구원, *********국립환경과학원 기상재해연구센터, **********울산과학기술원 도시환경공학부

The KALION Automated Aerosol Type Classification and Mass Concentration Calculation Algorithm

Huidong Yeo*, Sang-Woo Kim*†, Chulkyu Lee**, Dukhyeon Kim***, Byung-Gon Kim****, Sewon Kim**, Hyoung-Gu Nam*****, Young Min Noh******, Soojin Park*, Chan Bong Park*******, Kwangsuk Seo********, Jin-Young Choi*********, Myong-In Lee********** and Eun hye Lee**

*School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea
**Climate Change Monitoring Division, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea
***School of Basic Sciences, Hanbat National University, Daejeon, Korea
****Department of Atmospheric Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Gangwon, Korea
*****High-impact Weather Research Center, Observational Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Gangneung, Gangwon, Korea
******Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Korea
*******Department of Electronic Engineering, Mokwon University, Daejeon, Korea
********Seoul Metropolitan Government Research Institute of Public Health and Environment, Seoul, Korea
*********National Institute for Environmental Research, Incheon, Korea
**********School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea

Abstract : Descriptions are provided of the automated aerosol-type classification and mass concentration calculation algorithm for real-time data processing and aerosol products in Korea Aerosol Lidar Observation Network (KALION, http://www.kalion.kr). The KALION algorithm provides aerosol-cloud classification and three aerosol types (clean continental, dust, and polluted continental/urban

Received March 27, 2016; Revised April 3, 2016; Accepted April 4, 2016.

† Corresponding Author: Sang-Woo Kim (sangwookim@snu.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.

pollution aerosols). It also generates vertically resolved distributions of aerosol extinction coefficient and mass concentration. An extinction-to-backscatter ratio (lidar ratio) of 63.31 sr and aerosol mass extinction efficiency of 3.36 $m^2 g^{-1}$ (1.39 $m^2 g^{-1}$ for dust), determined from co-located sky radiometer and PM_{10} mass concentration measurements in Seoul from June 2006 to December 2015, are deployed in the algorithm. To assess the robustness of the algorithm, we investigate the pollution and dust events in Seoul on 28-30 March, 2015. The aerosol-type identification, especially for dust particles, is agreed with the official Asian dust report by Korean Meteorological Administration. The lidar-derived mass concentrations also well match with PM_{10} mass concentrations. Mean bias difference between PM_{10} and lidar-derived mass concentrations estimated from June 2006 to December 2015 in Seoul is about 3 μg m^{-3}. Lidar ratio and aerosol mass extinction efficiency for each aerosol types will be developed and implemented into the KALION algorithm. More products, such as ice and water-droplet cloud discrimination, cloud base height, and boundary layer height will be produced by the KALION algorithm.

Key Words : Lidar, aerosol, vertical distribution, aerosol type, dust, extinction, mass concentration, KALION

요약 : 한반도 에어로졸 라이다 관측 네트워크(Korea Aerosol Lidar Observation Network; KALION)의 라이다 관측자료 처리 및 실시간 표출을 위한 표준 알고리즘을 개발하였다. KALION 표준 알고리즘은 라이다 관측으로부터 얻어진 후방산란강도와 편광소멸도 자료를 이용하여 (1) 에어로졸과 구름 구분, (2) 에어로졸 유형 구분, (3) 에어로졸 소산계수 그리고 (4) 에어로졸 질량농도를 산출하는 단계로 구성이 되어 있다. 에어로졸의 유형은 후방산란강도와 편광소멸도 자료에 근거하여, (대륙 기원) 청정기단 에어로졸(clean continental aerosol), 황사(dust aerosol) 그리고 오염 입자(polluted continental/urban pollution aerosol)로 구별된다. 에어로졸 소산계수에 필요한 라이다 상수는 약 9년간의 라이다와 스카이 라디오미터 자료로부터 도출된 63.31 sr을, 에어로졸 질량소산효율은 약 9년간의 라이다와 기상청 Particulate Matter(PM_{10}) 질량농도 자료를 이용하여 도출된 3.36 $m^2 g^{-1}$ (황사는 1.39 $m^2 g^{-1}$)을 적용한다. 2015년 3월 28일부터 30일까지 라이다 관측 사례(서울 관악)에서 KALION 표준 알고리즘을 통해 산출된 에어로졸 유형 구분, 특히 황사 판별 결과는 기상청의 황사 보고와 잘 일치하였으며, 2006년 6월부터 약 9년 동안의 라이다 관측자료로부터 산출된 에어로졸 질량농도 역시 지상 PM_{10} 농도와 약 3 μg m^{-3} 내에서 잘 일치하였다. 향후 에어로졸의 유형에 따른 서로 다른 라이다 상수 및 에어로졸 질량소산효율 적용 알고리즘, 빙정 구름(ice cloud)과 물방울 구름(water droplet cloud) 구분 알고리즘, 그리고 운저 고도와 혼합고 판별 알고리즘을 개발할 계획에 있다.

1. 서 론

매년 봄철 중국 및 몽고 지역의 사막 및 건조지역에서 발생하는 황사와 더불어 중국의 대도시 및 산업지역에서 발생한 인위적 대기오염물질(미세먼지)이 일년 내내 지속적으로 유입되면서 한반도의 대기질뿐만 아니라 국지 및 지역 기후에도 상당히 큰 영향을 끼치고 있다(Kim *et al.*, 2007a; Park and Kim, 2014).

현재 이러한 장거리 유입 황사 및 미세먼지, 그리고 국지 발생 미세먼지의 실시간 감시 및 예 · 경보의 주요 척도로 지표면 Particulate Matter(PM_{10}) 농도를 사용하고 있다. 그러나, 지표면 PM_{10} 질량 농도는 대기경계층 높이(혼합고)의 일변화와 자유대기에서 대기경계층으로의 유입(entrainment) 등에 의해 영향을 받을 수 있기에 황사와 미세먼지 등의 연직 분포 관측 병행이 필요하다. 선행연구들에 의하면, 황사 및 미세먼지는 지표면뿐만 아니라 대기 상층에서도 빈번히 관측되고 있으며(Murayama *et al.*, 2001; Kim *et al.*, 2010a), 대기복사수지에도 큰 영향을 미치고 있다(Won *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2010b). 이러한 대기 기주에 존재하는 미세먼지와 황사의 연직 분포나 광학적 · 물리적 특성을 파악하기 위하여 라이다(Light Detection and Ranging: Lidar)와 스카이

라디오미터(sky radiometer) 같은 지상원격탐사기법을 활용한 관측자료뿐만 아니라 위성 원격탐사 자료들이 광범위하게 사용되고 있다.

현재 라이다는 대기 중 에어로졸의 연직 분포를 실시간으로 파악할 수 있는 장점이 있어 폭 넓게 사용되고 있으며, 에어로졸 연직 분포의 시공간 변화를 입체적으로 이해하기 위해서 국외의 경우 Micro-Pulse Lidar Network(MPL-NET), Asian dust and aerosol lidar observation network(AD-NET), European Aerosol Lidar Network (EARNET) 등 다수의 라이다 네트워크가 구축, 운영되고 있다(Murayama *et al*., 2001; Campbell *et al*., 2002). 국내의 경우 지난 1990년 후반부터 대학이나 연구기관에서 개별적으로 라이다를 운영, 황사 및 미세먼지 관련 연구를 진행해 오고 있었으나, 최근에는 빈번히 발생하는 고농도 미세먼지와 황사의 실시간 감시 및 자료 공유를 목적으로 한 국내 라이다 네트워크 구축 필요성이 꾸준히 제기되어 왔다. 이에 2015년 3월 국내 9개 기관에서 개별 운영하는 10개 라이다 관측지점을 통합하는 '한반도 에어로졸 라이다 관측 네트워크(Korea Aerosol Lidar Observation Network; KALION)'가 구축되었다.

본 논문에서는 KALION의 라이다 관측 자료 해석 및 처리를 위해 개발된 표준 알고리즘을 소개하고자 한다. KALION 표준 알고리즘은 구름과 에어로졸 구분, 에어로졸 유형 구분, 그리고 에어로졸 소산계수 및 질량농도 산출 과정으로 구성되어 있으며, 상세한 방법론은 4장에 기술되어 있다. 5장과 6장에는 KALION 표준 알고리즘을 통해 산출된 결과 및 향후 계획이 제시되어 있다.

2. 에어로졸 라이다 관측 자료 해석

에어로졸 미산란 라이다(Aerosol Mie-scattering Lidar)는 대기 중으로 레이저를 발사하여 구름이나 에어로졸에 의해 후방 산란된 빛의 강도를 측정함으로써 이들의 고도에 따른 분포 및 광학 특성을 도출할 수 있는 원격탐사 기기이다. 라이다 수신부로 후방 산란되어 들어오는 빛의 강도는 다음 식 (1)로 표현된다(Klett, 1981; Fernald, 1984).

$$\begin{aligned} P(z) &= \frac{EC}{z^2}\beta(z)\,T^2(z) \\ &= \frac{EC}{z^2}\left(\beta_{mol}(z)+\beta_{aer}(z)\right)e^{-2\int_0^z(\sigma_{mol}(z')+\sigma_{aer}(z'))\,dz'} \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, $P(z)$는 고도 z에서 에어로졸 및 구름에 의해 후방 산란되어 라이다 수신부에 감지된 에너지로 레이저 에너지(pulse energy, E)와 기기 상수(calibration constant, C), 후방산란계수(backscattering coefficient, β), 대기의 투과도(atmospheric transmittance, T)로 표현할 수 있다. 대기 투과도는 공기 분자와 에어로졸에 의한 소산계수(extinction coefficient, σ)로 구분하여 나타내었다. 식 (1)에서 거리와 기기 상수 등을 통해 보정한 값, 즉 후방산란강도(total attenuated backscatter 혹은 range-corrected signal intensity)는 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{nor}(z) &= P(z)\,\frac{z^2}{EC} \\ &= \left(\beta_{mol}(z)+\beta_{aer}(z)\right)e^{-2\int_0^z(\sigma_{mol}(z')+\sigma_{aer}(z'))\,dz'} \end{aligned} \tag{2}$$

Fig. 1a는 2006년 5월 16일부터 19일까지 서울(관악)에서 관측된 에어로졸의 후방산란강도를 나타낸 것이다. 지표에서부터 지상 1 km 내외까지 다소 높은 값의 후방산란강도를 보이는 에어로졸 층이 존재하며, 대기경계층(또는 혼합고)의 일변화에 따라 대기경계층 아래 고도에서 에어로졸이 비교적 균일하게 분포함을 확인할 수 있다. 그리고, 5월 17일부터 고도 약 8 ~ 10 km 부근에 높은 후방산란강도를 보이는 층이 존재하는데 이는 대부분이 빙정으로 이루어진 구름이다(Fig. 1b 설명 참조).

한편, 대부분의 에어로졸 미산란 라이다는 한 방향으로 편광된 빛을 발사하는데 대기 중 에어로졸과 충돌하여 산란될 때 빛의 일부는 편광성을 잃게 된다. 관측된 빛 중에서 발사한 빛과 평행한 성분(parallel component)과 수직인 성분(perpendicular component)의 비는 편광소멸도(DePolarization Ratio; DPR)로 정의된다. 이론적으로 편광된 빛과 충돌한 물체가 구형의 입자(대부분의 입자상 대기오염물질)일 경우 편광은 그대로 유지되어 편광소멸도가 0에 가까우나, 황사나 구름의 빙정 입자와 같이 불규칙 모양일수록 편광소멸도가 커지게 된다(Chen *et al*., 2002; Kim *et al*., 2010a).

Fig. 1b는 Fig. 1a와 같은 기간 동안 관측된 편광소멸도를 그린 것이다. 대기 경계층 내에 존재하는 에어로졸은 약 0.05 정도의 낮은 편광소멸도를 보이고 있는데,

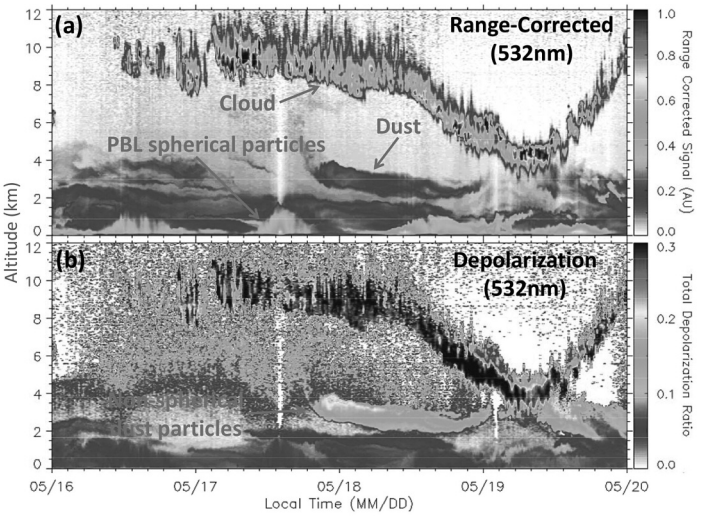

Fig. 1. An example of Mie-scattering lidar observation in Seoul (Seoul National University) from 16 May to 19 May 2006: Time-height image of (a) total attenuated backscatter (arbitrary unit) and (b) total depolarization ratio at 532 nm wavelength.

이는 대부분 구형의 오염 에어로졸임을 의미한다. 앞서 설명한 5월 17일 고도 약 10 km 부근에 약 0.25 이상의 높은 편광소멸도로부터 빙정운이 존재함을 유추할 수 있다. 이는 고도가 높은 구름의 경우 대기 온도가 낮아 입자가 비구형의 빙정 형태로 존재하기 때문이다. 한편, 5월 18일의 경우 고도 3 km 부근에서 강한 후방산란강도와 상대적으로 높은 편광소멸도(약 0.15)를 보이며, 대기경계층과는 분리되어 있는 2 km 내외의 두터운 층을 볼 수 있다. 이 층은 중국 건조지역에서 발원하여 장거리 이동된 황사가 존재하는 황사층으로 볼 수 있다. 토양 기원 입자의 경우 불규칙 형태이기에 구형의 오염 입자에 비해서는 높은 편광도를 보이나, 빙정운에 비해서는 낮은 편광도 값을 보인다. 선행 연구에 의하면 동아시아 지역 황사는 대략 0.1 ~ 0.2 범위의 편광도를 가진다(Kim *et al.*, 2010a). 이와 같이 에어로졸 미산란 라이다의 후방산란강도와 편광소멸도 관측 자료를 통해 대기 중 에어로졸의 연직 분포와 구형/비구형 입자를 구별할 수 있다.

3. 한반도 지상 라이다 관측망(KALION)

KALION은 한반도로 유입되는 에어로졸을 실시간으로 감시하고 에어로졸에 의한 기후효과 공동연구 수행을 목적으로 2015년 구축되었으며, 라이다 관측자료 통합관리시스템 구축 및 표준 알고리즘의 적용을 통해 라이다 관측자료 분석 및 결과를 홈페이지(http://www.kalion.kr)에 표출하고 있다.

KALION은 총 9개 기관(10개의 관측지점, Supplement Table 1)에서 참여하고 있으며, 각 관측소의 지점 및 운영 기관은 Fig. 2에 나타나 있다. KALION의 상시 관측소(blue closed circle)의 관측 자료는 매 시간 수집되어 KALION 홈페이지에 자동으로 표출되고 있으며, 집중 관측소(black open circle)의 경우는 황사 및 미세먼지의 유입이 예상되는 시기에 관측을 제한적으로 수행, 그 결과를 KALION에 제공하고 있다. 현재 KALION의 관측소들은 서해안 축(백령도, 안면도, 제주 고산), 내륙(서울, 대전, 광주), 동해안 축(강릉, 울산)으로 이루어져 있어 한반도로 유입 및 유출되는 황사나 미세먼지의 분포를 입체적으로 감시할 수 있는 큰 장점을 지니고 있다.

4. 에어로졸 유형 구분 및 질량 농도 산출 알고리즘

Fig. 3은 현재 KALION에서 각 산출물들을 구하는 과정을 나타낸 모식도이다. KALION 표준 알고리즘은 구름과 에어로졸 구분, 에어로졸 유형 구분, 에어로졸 소

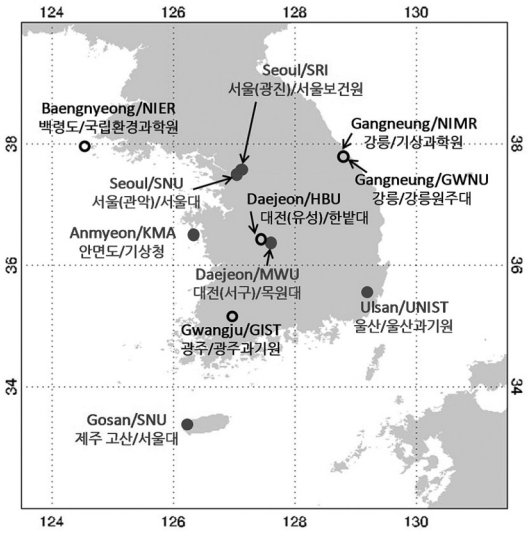

Fig. 2. Location of ground-based lidar observation sites.

산계수 산출, 에어로졸 질량농도 산출 등 총 4가지 단계로 구분된다.

1) 에어로졸 및 구름 구분

에어로졸 소산계수 및 질량농도 산출을 위해 라이다로부터 관측된 후방산란강도 자료를 이용하여 에어로졸과 구름을 구분한다. 구름의 경우, 구름 층 내 높은 구름 입자 밀도로 인해 에어로졸 층에 비해 훨씬 큰 후방산란강도(즉, 높은 구름 광학적 두께)가 나타나며, 구름 층 상부 대기의 경우 라이다에서 관측된 후방산란강도가 급격히 감소하여 0(zero)에 가까워지는 특성을 보인다. 빙정운(ice cloud)의 경우 수적운(water droplet cloud)에 비해 구름 입자 밀도가 낮아(즉, 구름 광학적 두께가 상대적으로 낮음) 앞서 언급한 편광소멸도 정보도 구름 층 판별에 사용하고 있다.

2) 에어로졸 유형 구분

KALION 표준 알고리즘에서는 에어로졸 유형을 후방산란강도와 편광소멸도에 근거하여, (대륙 기원) 청정기단 에어로졸(clean continental aerosol), 황사(dust aerosol) 그리고 오염 입자(polluted continental/urban pollution

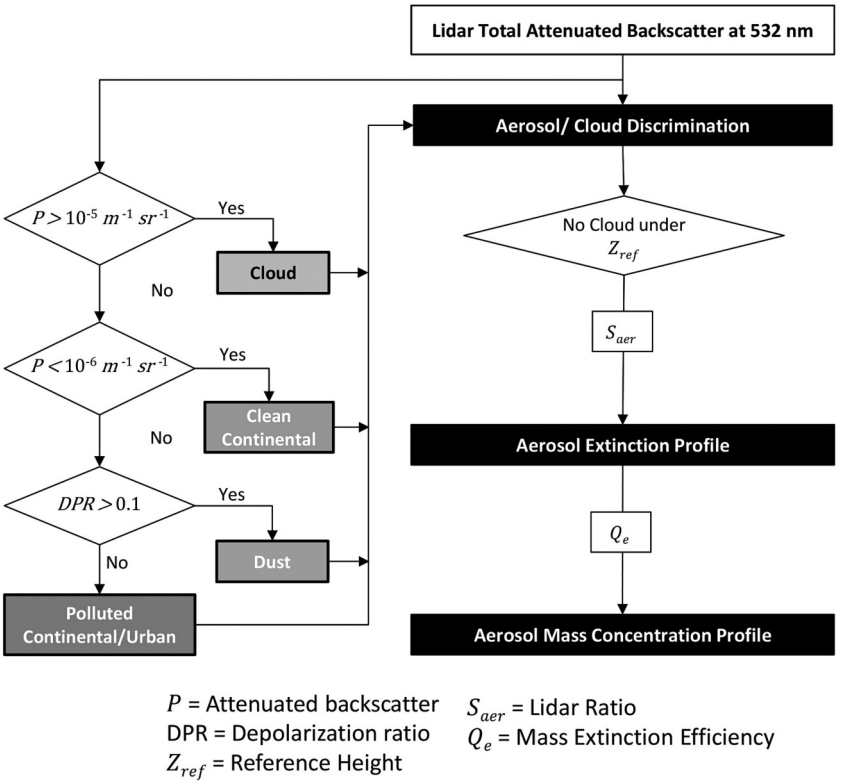

Fig. 3. Flowchart of aerosol type classification and the retrieval process of aerosol extinction coefficient and mass concentration in KALION.

aerosol)로 구별하고 있다. 에어로졸 중에 후방산란강도와 편광소멸도가 매우 낮은 경우는 (대륙 기원) 청정기단 에어로졸(clean continental aerosol), 청정기단 에어로졸 보다 높은 후방산란강도를 보이는 에어로졸 중에 편광소멸도가 0.1 이상의 값을 보이는 에어로졸은 비구형성 입자가 많은 것으로 간주하여 황사(dust aerosol)로 구분하였다. 마지막으로 후방산란강도가 청정기단 에어로졸보다 크며, 편광소멸도가 0.1 이하(즉, 구형의 입자가 우세하게 존재)의 에어로졸은 오염 입자(polluted continental/urban pollution aerosol)로 판별하였다. 라이다 관측자료로부터 장거리 이동 되어온 오염물질(continental pollution)과 국지 발생 오염물질(local urban pollution)을 실시간으로 구별할 수 없기에, 이를 오염 입자(polluted continental/urban pollution aerosol)로 통칭하였다.

3) 에어로졸 소산계수 산출

구름이 존재하면 발사한 빛이 소산되어 구름 층 위로는 신호 대 잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)가 작아지게 되어 정확한 계산을 수행할 수 없기 때문에 고도에 따른 구름과 에어로졸의 구별 결과를 활용하여 에어로졸 소산계수를 산출한다. 에어로졸이 거의 없다고 가정하고 에어로졸 소산계수 산출을 시작하는 기준고도(reference altitude, z_{ref})에 구름이 존재하는 경우 에어로졸 소산계수를 산출할 수 없다(Klett, 1981; Fernald, 1984). KALION 표준 알고리즘에서는 가능한 많은 사례에 대한 결과를 제시하고자 고도 2 km 이하에 구름이 존재하는 경우에 한해 에어로졸 소산계수를 산출하지 않는다. 한편, 라이다 방정식 (식 1)을 보면, 하나의 방정식에 두 개의 미지수(후방산란계수와 소산계수)가 포함되어 있다. 이러한 불량조건문제(ill-posed problem) 해결을 통한 에어로졸 소산계수 산출을 위해서, 에어로졸 미산란 라이다의 경우 소산계수와 후방산란강도의 비(extinction-to-backscattering ratio), 즉 라이다 상수(lidar ratio, S)를 정의하여 사용하고 있다(Klett, 1981; Fernald, 1984; Omar *et al.*, 2009).

일반적으로 에어로졸 미산란 라이다 관측과 동일 지점에서 스카이 라디오미터(sky radiometer)를 통해 관측된 에어로졸 광학적 두께 자료가 존재하는 경우 임의의 라이다 상수를 가정, 반복(iteration) 계산 과정을 통해 라이다 상수를 결정한다(김만해 등, 2015). 즉, 소산계수의 적분을 통해 산출된 라이다 에어로졸 광학적 두께가 스카이 라디오미터 에어로졸 광학적 두께와 비교하여 그 차이가 일정 수준 이하가 될 때까지 라이다 상수를 변경, 반복 계산하며, 결정된 라이다 상수를 이용하여 에어로졸 소산계수 연직 프로파일을 산출한다. 그러나, 스카이 라디오미터의 에어로졸 광학적 두께 자료는 주간에만 이용가능하며, 대부분의 라이다 관측지점에서 스카이 라디오미터 관측이 동시에 이루어 지고 있지 않고 있다. 또한, 스카이 라디오미터의 에어로졸 광학적 두께 자료의 실시간 수집이 어려워 KALION 표준 알고리즘에서는 라이다와 스카이 라디오미터의 장기 동시 관측 자료에 근거하여 산출된 라이다 상수를 대부분의 관측 지점에 적용하고 있다 (Fig. 4).

Fig. 4는 2006년 6월부터 2015년 12월까지 서울(관악, 도심대기)에서 관측된 라이다와 스카이 라디오미터를 이용해 산출한 라이다 상수의 분포를 그린 것으로, 라이다 상수의 평균값은 63.31(±21.32) sr이다. 이는 기존 선행 연구들(Cattrall *et al.*, 2005, 58 sr; Noh *et al.*, 2009, 58.2 sr)에 발표된 라이다 상수와 유사한 값이다. 한편, 제주 고산 (배경대기)에서 2011년 1월부터 2015년 12월까지의 자료를 이용하여 계산한 라이다 상수가 62.43 (±29.18) sr로, 서울(관악, 도심대기)과 차이가 존재하지 않아, KALION에는 라이다 상수 63 sr을 에어로졸 소산계수 산출에 적용하고 있다.

4) 에어로졸 질량농도 산출

에어로졸 질량농도는 에어로졸 소산계수와 에어로졸 단위 질량당 소산 면적을 의미하는 질량소산효율(Mass Extinction Efficiency, MEE)로부터 계산할 수 있다 (김만해 등, 2015). 에어로졸 질량소산효율은 앞서 설명한 라이다 상수 산출 과정과 유사하게, 2006년 6월부터 2015년 12월까지 산출된 라이다 소산계수 자료(서울 관악)와 기상청 PM_{10} 자료(관악산)를 이용하여 산출하였으며, 그 결과는 Fig. 5와 같다. 라이다 기기 구조적 특성으로 인해 지표 부근의 일정 고도까지는 신호 감쇄가 발생하고, 기상청 PM_{10} 관악산 지점의 경우 해발 622 m에 위치하고 있어 본 연구에서는 라이다 소산계수를 지표면부터 고도 1 km까지 평균하여 사용하였다. 본 연구에서 산출된 질량소산효율은 약 3.36(±2.42) $m^2\ g^{-1}$이

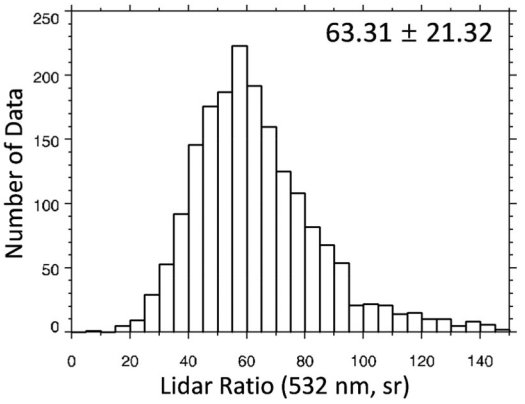

Fig. 4. Frequency distribution of lidar ratio (sr) at 532 nm wavelength estimated from Mie-scattering lidar and SKYNET sun/sky radiometer measurements in Seoul (Seoul National University) from June 2006 to December 2015.

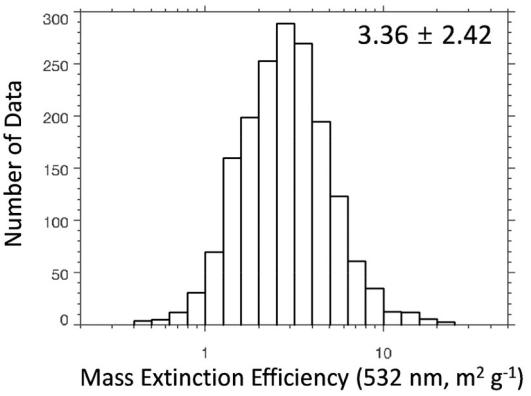

Fig. 5. Frequency distribution of aerosol mass extinction efficiency (m^2 g^{-1}) at 532 nm estimated from Mie-scattering lidar and ground-level PM_{10} mass concentration measurements in Seoul (Seoul National University) from June 2006 to December 2015.

며, 이는 Nemuc *et al.*(2013)의 질량소산효율(3.14 m^2 g^{-1})과 유사하다. 한편 제주 고산지역에서의 최근 5년(2011년 – 2015년)간 관측 자료를 이용하여 계산한 결과 3.19 (±3.05) m^2 g^{-1}로 서울과 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 KALION 표준 알고리즘에서는 서울에서 산출된 질량소산효율(3.36 m^2 g^{-1})을 모든 관측소에서 적용하고 있다. 단, Fig. 7에서 언급하고 있듯이 KALION 표준 알고리즘에서는 2006년 6월부터 2015년 12월 기간의 자료 중 스카이 라디오미터에서 관측된 옹스트롬 지수(Ångström Exponent)가 0.5보다 작은 경우에 한하여 구한 에어로졸 질량소산효율(1.39 m^2 g^{-1})을 황사 기간의 질량농도 산출에 적용하고 있다.

5. 사례 분석 결과 및 토의

Fig. 6은 2015년 3월 28일부터 31일까지 서울(관악)지점 라이다로 관측된 자료를 KALION 표준 알고리즘을 통해 계산한 결과이다. 라이다 관측 자료 (후방산란강도와 편광소멸도)를 이용하여 에어로졸 유형을 구분한 결과, 상대적으로 후방산란강도가 작게 나오는 3월 28일에는 (대륙 기원) 청정기단 에어로졸(clean continental aerosol)로 구분되었고, 3월 29일 새벽부터 후방산란강도가 급격하게 증가한 고도 1 km 이하에 구름이 존재하는 것으로 판별되었다. 앞서 언급하였듯이 구름이 기준 고도 이하에 존재하는 경우 라이다 방정식을 통한 에어로졸 소산계수 산출이 불가능하기 때문에, KALION 표준 알고리즘에서는 고도 2 km 이내에 구름이 존재하는 3월 29일 오전 동안 에어로졸 소산계수 및 질량농도를 산출하지 않았다. 3월 29일 오후부터 후방산란강도가 다소 증가하지만 낮은 편광소멸도(<0.08)가 지속적으로 관측되었으며, 이는 구형의 오염 에어로졸이 우세하게 존재하는 경우이기에 오염 입자(polluted continental/urban pollution aerosol)로 구분되었다. 마지막으로, 3월 30일 오후부터는 높은 편광소멸도(>0.15)를 보이는 에어로졸 층이 지표면부터 고도 약 1.5 km까지 관측되었으며, KALION 표준 알고리즘을 통해 황사(dust aerosol)로 구분되었다. 황사(dust aerosol)로 구분된 3월 30일 12시부터 약 150 ~ 250 μg m^{-3} 수준의 황사가 서울지역에서 기상청에 의해 보고 되었다(Fig. 7 참고).

Fig. 7은 에어로졸 유형구분 결과와 함께 에어로졸의 지상 질량농도를 검증하기 위해 2015년 3월 28일부터 30일까지 KALION 표준 알고리즘을 통해 산출된 에어로졸 질량농도와 기상청(관악) PM_{10} 농도를 비교하여 그린 것이다. Fig. 7에 표시된 오염 및 황사 기간의 구분은 KALION 표준 알고리즘에 의한 에어로졸 유형 판별(Fig. 6)에 근거한 것이며, 황사기간 동안 산출된 에어로졸 질량농도는 앞서 4장에서 언급하였듯이 에어로졸 질량소산효율을 1.39 m^2 g^{-1}로 적용하여 산출한 것이다. 3월 28일에는 라이다 산출 에어로졸 질량농도와 PM_{10} 농도가 약 50 μg m^{-3} 이하에서 잘 일치하여 나타났다. 앞에서 언급하였듯이 3월 29일 00시부터 약 15시까지는

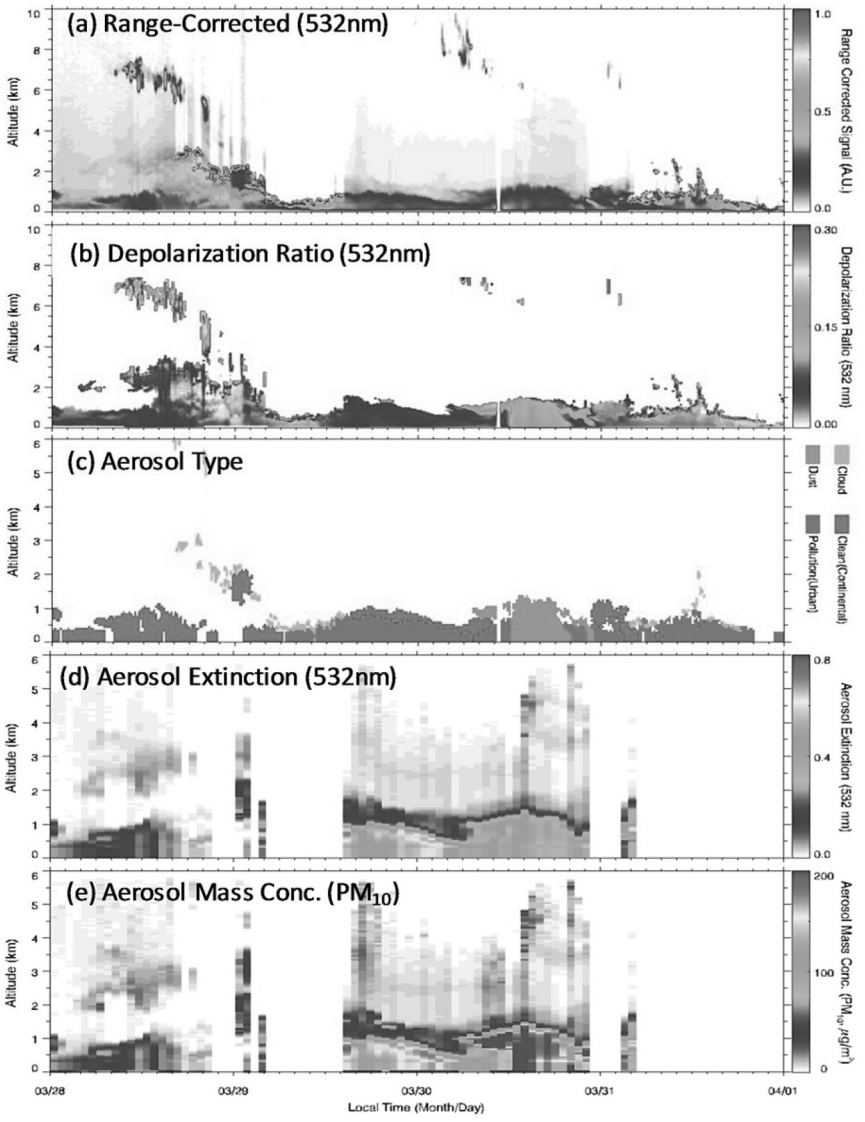

Fig. 6. Time-height image of (a) total attenuated backscatter (arbitrary unit, 532 nm) and (b) total depolarization ratio (532 nm), (c) aerosol type classification, (d) aerosol extinction coefficient (km^{-1}), and (e) aerosol mass concentration ($\mu g\ m^{-3}$) from 28 March 28 to 31 March 2015.

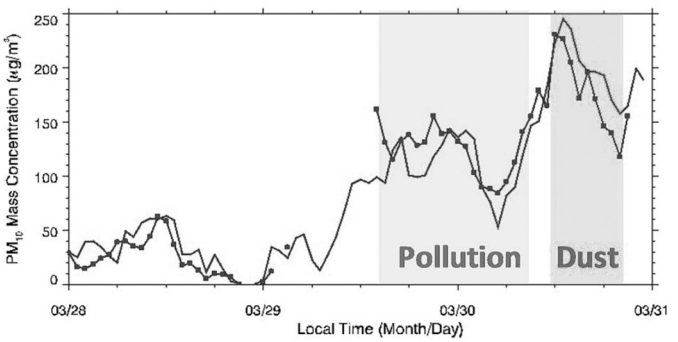

Fig. 7. Comparison of lidar-derived aerosol mass concentration and ground-level PM_{10} mass concentration from 28 March 28 to 30 March 2015.

Table 1. Rudimentary sensitivity test results for lidar-derived aerosol mass concentration (μg m^{-3}) by 10% and 20% changes of lidar ratio and aerosol mass extinction efficiency

	Ground-level PM_{10} Mass Concentration	Lidar-derived Aerosol Mass Concentration	-20%	-10%	+10%	+20%
Lidar Ratio	93.2	91.7	81.8 (-10.9%)	87.0 (-5.2%)	96.0 (4.6%)	99.9 (8.9%)
Aerosol Mass Extinction Efficiency			114.6 (25.0%)	101.9 (11.1%)	83.4 (-9.1%)	76.4 (-16.7%)

고도 2 km 이하에 구름이 존재하여 에어로졸 질량농도가 산출되지 않았다. 3월 29일 15시 이후 오염 물질 및 황사가 유입되면서(Fig. 6) 지상 PM_{10} 농도가 높아진 시기에 KALION 표준 알고리즘으로 산출된 에어로졸 질량농도가 농도의 값뿐만 아니라 변화 경향까지 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

한편, 에어로졸 질량농도 계산 시 에어로졸 소산계수에 장기간 평균 질량소산효율(3.36 m^2 g^{-1})으로 나눠주기 때문에 일반적으로 에어로졸 소산계수와 에어로졸 질량농도는 매우 유사한 연직 분포 경향을 가진다. 하지만 Fig. 6d에서 3월 29일과 3월 30일에는 소산계수가 큰 변화가 없는 모습인 반면에 Fig. 6e에서 에어로졸 질량농도는 3월 30일에 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 에어로졸 유형에 따른 라이다 상수의 차이가 에어로졸 소산계수 산출에 미치는 영향보다 에어로졸 유형에 따른 질량소산효율의 차이가 궁극적으로 에어로졸 질량농도 산정에 더 크게 영향을 끼치고 있음을 의미한다.

Table 1은 라이다 상수와 질량소산효율의 오차가 질량농도 산출에 미치는 영향을 파악하고자 Fig. 7의 기간에 대해 라이다 상수와 질량소산효율을 각각 10%와 20% 임의로 변화시켜 산출된 평균 에어로졸 질량농도와 변화율(%)을 정리하여 나타낸 것이다. 라이다 상수가 20% 줄어들 때 질량농도가 약 11% 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 라이다 상수와 에어로졸 소산계수는 비례 관계에 있어, 라이다 상수가 작을수록 에어로졸 소산계수가 낮게 나오며, 결과적으로 동일한 질량소산효율을 적용하는 경우 에어로졸 질량농도가 낮게 산출된 것이다. 반면, 질량소산효율이 20% 줄어들 때 에어로졸 질량농도는 25% 증가하여 나타났다. 이는 에어로졸 질량소산효율은 동일한 소산계수 조건하에서 에어로졸 질량농도와 반비례 관계에 있어 질량소산효율이 작을수록 산출된 에어로졸 질량농도가 크게 나타나기 때문이다. 라이다 상수와 비교하여, 질량소산효율의 오차가 에어로졸 질량농도에 미치는 영향이 더 크기 때문에, 에

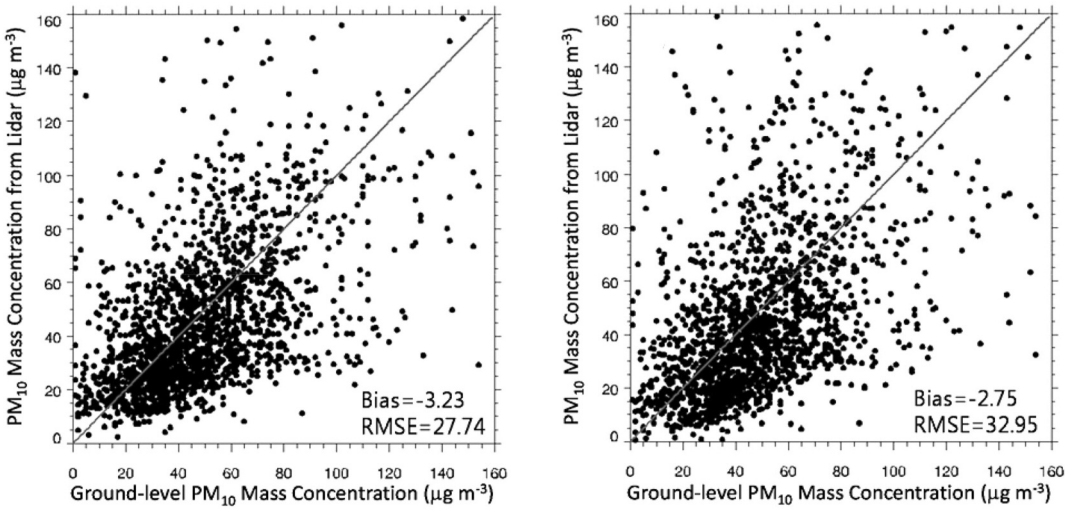

Fig. 8. Comparison between lidar-derived aerosol mass concentration and ground-level PM_{10} mass concentration. Aerosol mass concentrations from lidar measurements are obtained by averaging (a) from ground to 1 km altitude and (b) from ground to the mixing height. The mixing height is estimated by the method given in Kim *et al.* (2007).

어로졸 유형별 질량소산효율을 화학 조성 및 광학 관측 자료에 근거하여 산정하여 적용하는 것이 필요하다.

Fig. 8은 서울 관악에서 관측된 라이다 자료(2006년 6월 – 2015년 12월)를 이용하여 산출한 에어로졸 질량농도와 PM_{10} 농도를 비교하여 그린 것이다. 여기서 관악산 지상 PM_{10} 농도(관측 지점 해발 고도: 622 m)를 사용하였기에, 라이다 산출 에어로졸 질량농도를 각각 지표면부터 고도 1 km까지 평균한 에어로졸 질량농도(Fig. 8a)와 지표면부터 혼합고(대기경계층 높이)까지 평균된 에어로졸 질량농도(Fig. 8b)를 각각 비교하였다. Fig. 8b에서의 라이다 측정 자료로부터 혼합고 산출은 Kim *et al.*(2007b)이 제시한 방법으로 산출하였다. 비록 두 경우 모두 음의 편차 값을 보여 라이다 산출 에어로졸 질량농도가 지상 PM_{10} 관측 자료에 비해 낮게 나타났지만, 라이다 상수와 질량소산효율을 장기간 평균값을 적용하여 계산하였음에도 편차 값이 크지 않았다(약 3 $\mu g\ m^{-3}$). 이에 KALION 표준 알고리즘에서는 이 상수 값들을 이용하여 에어로졸 소산계수 및 질량농도를 산출한다.

6. 요약 및 향후 계획

2015년 3월 구축된 한반도 에어로졸 라이다 네트워크(Korea Aerosol Lidar Observation Network; KALION)의 라이다 관측자료 처리 및 실시간 표출을 위한 표준 알고리즘을 개발하였다. KALION 표준 알고리즘은 라이다 관측으로부터 얻어진 후방산란강도와 편광소멸도 자료를 이용하여 에어로졸과 구름을 우선 구별하고, 다음으로 에어로졸의 유형을 (대륙 기원) 청정기단 에어로졸 (clean continental aerosol), 황사(dust aerosol) 그리고 오염 입자(polluted continental/urban pollution aerosol)로 구별한다. 라이다 상수 63.31 sr과 에어로졸 질량소산효율 3.36 $m^2\ g^{-1}$ (황사는 1.39 $m^2\ g^{-1}$)을 각각 적용하여 에어로졸 소산계수와 질량농도를 산출한다.

2015년 3월 28일부터 30일 사례에 대해 KALION 표준 알고리즘에 의한 에어로졸 유형 구분, 특히 황사 판별 결과는 기상청의 황사 보고와 잘 일치하였으며, 라이다 산출 질량농도와 기상청(관악) PM_{10} 농도는 값뿐만 아니라 시간에 따른 변화 경향도 잘 일치하였다. 또한, 2006년 6월부터 2015년 12월까지 약 9.5년동안의 라이다 관측자료(서울 관악)로부터 산출된 에어로졸 질량농도 역시 기상청(관악) PM_{10} 농도와 약 3 $\mu g\ m^{-3}$ 내에서 잘 일치하였다.

현재 KALION에서 운영 중인 에어로졸 미산란 라이다는 서로 다른 제작사에서 제작된 라이다 시스템으로 구성되어 있어 각 라이다마다 레이저 출력과 수신부의 민감도 차이가 존재하고 있다(상세 내용은 Supplement Table 1). 지표면 부근의 신호 감쇄를 보정하는 중첩보정계수(overlap correction factor) 또한 각 라이다 특성에 맞게 달리 적용할 필요가 있어 KALION 표준 알고리즘을 각 지역 라이다 관측 자료에 적합하도록 개선하였다.

에어로졸 소산계수 및 질량농도를 산출하기 위해서 사용하는 라이다 상수와 질량소산효율이 에어로졸의 크기, 유형, 화학적 조성 등에 따라 달라지지만, 현재 KALION 표준 알고리즘은 상수 값을 적용하고 있다. 따라서 추후 에어로졸 화학 측정 자료와 in-situ 소산계수 자료를 이용하여 에어로졸의 유형에 따른 이들 값을 결정하고, KALION 표준 알고리즘에 적용할 예정이다. 또한, 현재 표출하고 있는 다섯 가지의 정보(후방산란강도, 편광소멸도, 에어로졸 유형, 에어로졸 소산계수, 에어로졸 질량농도) 이외에 알고리즘을 추가로 개발할 계획이다. 우선 구름을 빙정 구름(ice cloud)과 물방울 구름(water droplet cloud)으로 구분하고, 운저 고도(cloud base height)를 판별하는 알고리즘을 개발하여 실시간으로 표출할 계획에 있다. 또한 에어로졸의 유형을 세분화하여 황사가 국내로 유입될 때 대기오염물질과 황사 입자가 혼합된 경우 오염 황사(polluted dust)로 정의, 구분할 예정이다. 마지막으로 대기의 안정도 및 지상 에어로졸 질량농도에 큰 영향을 미치는 대기경계층 높이(혼합고)를 판별하는 알고리즘을 추가해 실시간으로 대기경계층 높이를 표출할 예정이다.

현재 운영 중인 KALION 자료들은 황사나 대기질 예보(대기화학수송) 모델의 입력 및 검증 자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 전국에 분포하는 선포토미터(sun photometer), 운고계(ceilometer) 등을 모두 취합하면 한반도 상의 구름 및 에어로졸의 광학 · 물리적 특성 및 이동 특성을 입체적으로 파악할 수 있고 이를 통해 대기질 감시 및 에어로졸 기후효과 연구 활용에 기여할 수 있을 것이다.

사 사

이 연구는 기상청 “기후변화 감시예측 및 국가정책 지원강화사업(KMIPA 2015-2011)”의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

Cattrall, C., J. Reagan, K. Thome, and O. Dubovik, 2005. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations, *Journal of Geophysical Research*, 110(D10S11), doi:10.1029/2004JD005124.

Campbell, J.R., D.L. Hlavka, E.J. Welton, C.J. Flynn, D.D. Turner, J.D. Spinhirne, V.S. Scott, and I. H. Hwang, 2002. Full-time, Eye-Safe Cloud and Aerosol Lidar Observation at Atmospheric Radiation Measurement Program Sites: Instrument and Data Processing, *Journal of Atmospheric Oceanic Technology*, 19: 431-442.

Chen, W.-N., C.-W. Chiang, and J.-B. Nee, 2002. Lidar ratio and depolarization ratio for cirrus clouds, *Applied Optics*, 41(30): 6470-6476.

Fernald, F.K., 1984. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments, *Applied Optics*, 23(5): 652-653.

Kim, J.Y., Y.S. Ghim, C.H. Song, S.-C. Yoon, and J.S. Han, 2007a. Seasonal characteristics of air masses arriving at Gosan, Korea, using fine particle measurements between November 2001 and August 2003, *Journal of Geophysical Research*, 112(D07202), doi:10.1029/2005JD006946.

Kim, M.-H., H. 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)

Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J.-G. Won, and S.-C. Choi, 2007b. Ground-based remote sensing measurements of aerosol and ozone in an urban area: A case study of mixing height evolution and its effect on ground-level ozone concentrations, *Atmospheric Environment*, 41: 7069-7081.

Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, J.-Y. Kang, and N. Sugimoto, 2010a. Asian dust event observed in Seoul, Korea, during 29-31 May 2008: Analysis of transport and vertical distribution of dust particles from lidar and surface measurements, *Science of the Total Environment*, 408: 1707-1718.

Kim, S.-W., I.-J. Choi, and S.-C. Yoon, 2010b. A multi-year analysis of clear-sky aerosol optical properties and direct radiative forcing at Gosan, Korea (2001-2008), *Atmospheric Research*, 95: 279-287.

Klett, J.D., 1981. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied Optics*, 20(2): 211-220.

Murayama, T., N. Sugimoto, I. Uno, K. Kinoshita, K. Aoki, N. Hagiwara, Z. Liu, I. Matsui, T. Sakai, T. Shibata, K. Arao, B.-J. Sohn, J.-G. Won, S.-C. Yoon, T. Li, J. Zhou, H. Hu, M. Abo, K. Iokibe, R. Koga, Y. Iwasaka, 2001. Ground-based network observation of Asian dust events of April 1998 in East Asia, *Journal of Geophysical Research*, 106: 18345-18359.

Nemuc, A., J. Vasilescu, C. Talianu, L. Belegante, and D. Nicolae, 2013. Assessment of aerosol’s mass concentrations from measured linear particle depolarization ratio (vertically resolved) and simulations, *Atmospheric Measurement Techniques*, 6: 3243-3255.

Noh, Y.M., D. Müllera, D.H. Shin, H, Lee, J.S. Jung, K.H. Lee, M. Cribb, Z. Li, and Y.J. Kim, 2009. Optical and microphysical properties of severe haze and smoke aerosol measured by integrated remote sensing techniques in Gwangju, Korea,

Atmospheric Environment, 43: 879-888.

Omar, A.H., D.M. Winker, C. Kittaka, M.A. Vaughan, Z. Liu, Y. Hu, C.R. Trepte, R.R. Rogers, R.A. Ferrare, K.-P. Lee, R.E. Kuehn, and C.A. Hostetler, 2009. The CALIPSO automated aerosol classification and lidar ratio selection algorithm, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 26: 1994-2014.

Park, R.J. and S.-W. Kim, 2014. Air quality modeling in East Asia: Present issues and future directions, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1): 105-120.

Won, J.-G., S.-C. Yoon, and S.-W. Kim, 2004. Estimation of direct radiative forcing of Asian dust aerosols with sun/sky radiometer and lidar measurements at Gosan, Korea, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82(1): 115-130.

Supplement Table 1. 한반도 에어로졸 라이다 네트워크(KALION) 라이다의 주요 특성 비교

관측소	라이다 종류	송신부(레이저)				수신부						
		레이저 유형	파장(nm) 및 출력 (mJ/pulse)	반복율 (Hz)	빔퍼짐 (mrad)	망원경 종류	초점거리 (mm)	시야각 (mrad)	검출기**	수신기%%	계수율 (MHz)	측정고도 (km)
서울 (관악)	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (20 mJ) 1064 nm (20 mJ)	10	1	Schmidt-Cassegrain (20 cm)	2000	1	PMT(532 nm) APD(1064 nm)	ADC/PC	25	0~18
충남 (안면)	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (200 mJ) 1064 nm (200 mJ)	20	0.5	Cassegrain	2000	〈 1	PMT APD	PC	60	0~12
대전 (서구)	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (80 mJ) 1064 nm (200 mJ)	10	0.5	Newtonian(30 cm)	1000	0.3-0.6	PMT(532 nm) APD(1064 nm)	ADC/PC	30(ADC) 300(PC)	0~15
울산 (울주)	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (20 mJ) 1064 nm (20 mJ)	10	1	Schmidt-Cassegrain (20 cm)	2000	1	PMT(532 nm) APD(1064 nm)	ADC/PC	25	0~18
제주 (고산)	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (20 mJ) 1064 nm (20 mJ)	10	1	Schmidt-Cassegrain (20 cm)	2000	1	PMT(532 nm) APD(1064 nm)	ADC/PC	25	0~18
서울 (광진)	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (200 mJ) 1064 nm (200 mJ)	20	0.5	Cassegrain	2000	〈 1	PMT APD	PC	60	0~12
인천 (백령)	다파장 라만	Nd:YAG	355 nm (60 mJ) 532 nm (110 mJ) 1064 nm (180 mJ)	20	0.2	Newtonian	900	1	PMT	PC	20	0~15
대전 (유성)	라만	Nd:YAG	355 (150 mJ)	30	0.2	Cassegrain	2000	0.4	PMT	ADC	〈 20	0~10
광주 (북구)	다파장 라만	Nd:YAG	355 nm (140 mJ) 532 nm (154 mJ) 1064 nm (640 mJ)	10	0.2	Schmidt-Cassegrain	3910	0.5-4.0	PMT	MCS PCI	150	1.5~30
강원 (강릉)#	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (50 mJ) 1064 nm (50 mJ)	20	1.5	Cassegrain	2000	〈 1	APD PMT	PC	60	0~12
강원 (강릉)&	2파장 편광	Nd:YAG	532 nm (130 mJ) 1064 nm (180 mJ)	30	〈 0.5	Cassegrain	2000	1.5	PMT(532 nm) APD(1064 nm)	PC	60	0~20

강릉원주대학교; & 국립기상과학원
** PMT(Photomultiplier), APD(Avalanche photodiode); %% ADC(A/D convertor), PC(Photon Counter)