

논문

# AERONET 선포토미터 데이터를 이용한 한반도 에어로졸 유형에 따른 라이다 비 변화 연구

## A Study on the Variation of Aerosol Lidar Ratio according to Aerosol Types on Korea Based on AERONET Sun/Sky Radiometer Data

노영민\*

국립부경대학교 환경공학과

Youngmin Noh\*

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2020년 1월 9일

수정일 2020년 1월 28일

채택일 2020년 1월 29일

Received 9 January 2020

Revised 28 January 2020

Accepted 29 January 2020

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)51-629-6526

E-mail : nym@pknu.ac.kr

**Abstract** This study has analyzed the variation of lidar ratio according to the aerosol types using AERONET sun/sky radiometer data observed in Korea sites (Seoul (37.46°N, 126.95°E), Yonsei (37.56°N, 126.93°E), Anmyeon (36.54°N, 126.33°E), Gwangju (35.23°N, 126.84°E), and Gosan (33.29°N, 126.16°E)). Aerosol type is classified as pure dust (PD), dust dominant Mixture (DDM), pollution dominant mixture (PDM), non-absorbing (NA), weakly absorbing (WA), moderately absorbing (MA) and strongly absorbing (SA) by depolarization ratio and single-scattering albedo at 1020 nm. The average values of lidar ratio for PD, DDM, PDM, NA, WA, MA and SA at 440 nm are  $59 \pm 4$ ,  $68 \pm 3$ ,  $79 \pm 3$ ,  $76 \pm 4$ ,  $72 \pm 3$ ,  $74 \pm 5$  and  $76 \pm 8$  sr, respectively. The more Asian dust contained, the lower the value of lidar ratio was. In Korea, the lidar ratios of the observed areas showed similar values depending on the type, but in the MA and SA, which have high light absorption characteristics, the lidar ratios of Gosan and Anmyeon showed distinct values from other sites.

**Key words:** Lidar ratio, AERONET, Aerosol type, Dust, Pollution

### 1. 서 론

미세먼지로 표현되는 대기 중의 에어로졸은 국내에서 발생되기도 하지만 황사와 장거리 수송되는 미세먼지 등과 같이 중국 등 국내가 아닌 타 지역에서 이동되어 국내 대기에 영향을 주기도 한다. 대기 에어로졸은 장거리 이동 시 이동거리가 수천 km 이상으로 넓고, 이동 시의 분포 고도가 대기경계층 이내뿐만 아니라 수 km에서 10 km까지 다양하다(Shin *et al.*, 2014; Shimizu *et al.*, 2004). 이와 같이 다양한 고도와 넓은 영역을 이동하는 대기 에어로졸을 감시하기 위하여 위성, 라이다(LIDAR: Light Detection And

Range), 선포토미터 등 다양한 원격탐사 기술을 활용한다. 장거리 이동하는 대기 에어로졸은 한 종류의 에어로졸만이 분포하기보다는 황사와 오염입자 등 다양한 종류의 에어로졸이 혼합되어 이동하는 경우가 대부분이다(Shin *et al.*, 2014). 따라서, 원격탐사 방식으로 대기 에어로졸을 분석함에 있어 중요한 것은 다양한 에어로졸이 혼합되어 이동하는 에어로졸 층에서 주요한 대기 에어로졸의 종류를 구분하는 것이다. 특히, 위성과 라이다의 데이터 분석 방법은 관측된 데이터에서 주요한 에어로졸을 선정하고, 주요한 에어로졸의 종류에 따라 구분되는 요소값을 분석에 적용한다(Kumar *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2010).

대기 에어로졸의 고도 분포와 농도에 대한 정보를 산출할 수 있는 라이다는 대기 에어로졸을 연구하는데 중요한 원격탐사 기술의 하나이다. 대기 에어로졸 관측용 라이다는 대부분 레이저 광의 탄성 산란을 이용하여 고도 분포와 농도에 대한 정보를 산출한다. 이때 분석 정확도에 가장 중요한 역할을 하는 것이 라이다 비(Lidar ratio)이다. 라이다 비는 대기 에어로졸에 의한 소산계수(Extinction coefficient)를 후방산란계수(Backscatter coefficient)로 나누어 준 값으로 대기 에어로졸의 크기, 광흡수 특성, 굴절률 등 물리적, 광학적 특성에 따라 다른 값을 가진다. 이러한 라이다 비를 산출할 수 있는 방법은 라만(Raman) 라이다를 이용하여 직접 산출하는 방법이 있다(Noh *et al.*, 2007a). 하지만, 전 세계적으로 라만 라이다 관측은 유럽 국가 중심으로 몇 개의 관측소에서만 수행되고 있고, 국내의 경우 광주과학기술원의 다파장 라만 라이다로만 라이다 비를 관측한 예가 있다(Noh *et al.*, 2008, 2007, 2006).

라이다 비는 라만 라이다를 이용하여 관측하는 방법 외에 NASA의 AERONET (Aerosol Robotic Network) 선포토미터 관측 자료로부터도 산출할 수 있다(Noh *et al.*, 2017). 선포토미터로 산출된 라이다 비는 라이다와는 달리 고도에 대한 정보는 제공하지 못하나, 에어로졸 종류에 따라 다른 값을 확인할 수 있다.

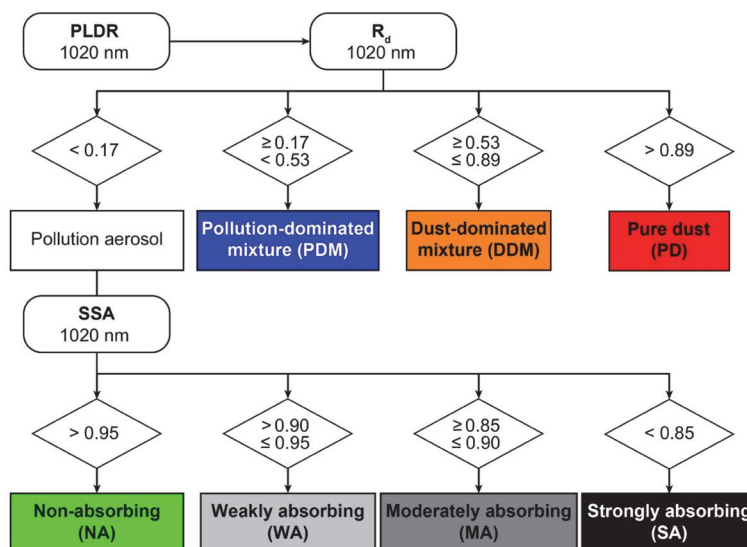
동북아시아 지역에서의 대기 에어로졸은 인간의 산업활동에 의해 발생하는 각종 오염입자뿐만 아니라 황사 등 다양한 종류가 발생된다. 특히, 황사의 경우 입자의 크기, 광학적, 물리적 특성이 다른 종류의 에어로졸과는 명확히 구분된다. 황사는 봄철에 높은 비율로 발생되지만, 낮은 비율일지라도 한반도 대기 중에서 여름을 제외한 모든 계절에서 관측되며 주로 오염입자와 혼합된 형태로 관측된다. 황사가 오염입자와 혼합될 경우, 혼합된 에어로졸의 입자 크기, 광산란 특성 등이 확연히 달라지게 된다. 따라서, 위성이나 라이다를 이용한 대기 관측 시 주요한 에어로졸이 황사인지는 분석 결과에 중요한 영향을 미

친다. 대기 에어로졸의 주요 유형을 구분하는 방법은 입자 크기에 대한 정보를 이용하여 황사 여부를 확인하였으나, Shin *et al.* (2019)은 편광소멸도를 이용하여 대기 에어로졸의 주요 유형을 구분하는 방법을 개발하였으며, 이 방법이 기존의 방법에 비하여 정확도가 높음을 확인하였다.

국내 대기환경은 동북아시아 지역에서 발생된 다양한 종류의 에어로졸의 영향을 받으므로 에어로졸 유형 구분의 정확성을 높이기 위하여 라이다 비가 효과적으로 사용될 수 있다. 이에 본 연구에서는 Shin *et al.* (2019)이 개발한 대기 에어로졸 유형 구분 방법을 국내에서 측정된 AERONET 선포토미터 데이터에 적용하여 유형을 구분하고, 유형에 따른 라이다 비의 특징에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 연구 방법

본 연구에는 국내에서 관측이 수행된 AERONET 선포토미터 사이트 중에서 5년 이상 장기 관측이 수행된 서울(Seoul\_SNU: 37.46°N, 126.95°E), 연세(Yonsei\_University: 37.56°N, 126.94°E), 안면(Anmyeon: 36.54°N, 126.33°E), 광주(Gwangju\_GIST: 35.23°N, 126.84°E), 고산(Gosan\_SNU: 33.29°N, 126.16°E)에서 측정된 자료를 분석하였다. 관측된 자료를 이용하여 Shin *et al.* (2019)이 제안한 편광소멸도와 단산란 알베도(Single-Scattering Albedo: SSA)를 이용하여 주요 에어로졸의 유형을 순수 황사(Pure Dust: PD), 황사가 주요한 혼합 에어로졸(Dust Dominant Mixture: DDM), 오염입자가 주요한 혼합 에어로졸(Pollution Dominant Mixture: PDM), 황사 입자가 없는 오염입자는 광흡수 특성에 따라 광산란이 주요한 에어로졸(Non-absorbing: NA), 약한 광흡수 에어로졸(Weakly absorbing: WA), 광흡수 에어로졸(Moderately absorbing: MA), 강한 광흡수 에어로졸(Strongly absorbing: SA)의 총 7가지 유형으로 구분하였다.



**Fig. 1.** Flow chart of the aerosol classification based on the dust ratio ( $R_d$ ) derived using depolarization ratio (PLDR) at 1020 nm and the 1020 nm SSAs that are inferred from the inversion of AERONET observations (Shin *et al.*, 2019).

**Table 1.** The number and percentage of each type classified on the site, and the total number of observations.

| Site    | PD       | DDM        | PDM        | NA         | WA         | MA        | HA       | Total |
|---------|----------|------------|------------|------------|------------|-----------|----------|-------|
| Seoul   | 9 (1.1)  | 54 (6.6)   | 186 (22.7) | 223 (27.2) | 266 (32.4) | 57 (7.0)  | 25 (3.0) | 820   |
| Yonsei  | 9 (0.6)  | 104 (7.5)  | 414 (29.7) | 331 (23.8) | 413 (29.6) | 114 (8.2) | 8 (0.6)  | 1393  |
| Anmyeon | 5 (0.6)  | 108 (12.2) | 255 (28.9) | 269 (30.5) | 182 (20.6) | 60 (6.8)  | 4 (0.5)  | 883   |
| Gwangju | 11 (1.1) | 115 (11.0) | 298 (28.5) | 228 (21.8) | 296 (28.3) | 88 (8.4)  | 10 (1.0) | 1046  |
| Gosan   | 11 (2.0) | 97 (17.7)  | 179 (32.7) | 116 (21.2) | 106 (19.4) | 21 (3.8)  | 17 (3.1) | 547   |

그림 1에서 보여주는 Shin *et al.* (2019)의 편광소멸도와 단산란 알베도를 이용한 에어로졸 유형 구분 방법을 각 사이트에서 관측된 데이터에 적용하였다. 우선 편광소멸도를 이용하여 전체 에어로졸에서 황사 입자의 비율을 나타내는 황사비(Dust ratio:  $R_d$ )를 산출하였다. 산출된  $R_d$ 가 0.89를 초과하면 PD, 0.89 이하에서 0.53 이상은 DDM, 0.53 미만에서 0.17 이상은 PDM, 0.17 미만은 오염입자로 구분하였다. 구분된 오염입자는 1020 nm에서의 단산란 알베도 값이 0.95를 초과하면 NA, 0.95 이하에서 0.90 초과는 WA, 0.90 미만에서 0.85 이상은 MA, 0.85 미만은 HA로 분류하였다.

이상의 방법으로 각 관측 사이트별로 7가지로 주

요 에어로졸 유형을 구분하고 유형별 라이다 비, 굴절율(Refractive index in real part), SSA 값을 확인하였다.

### 3. 유형별 라이다 비

표 1은 5개의 사이트에서 분류된 각 유형별 횡수와 비율, 그리고 총 관측 횡수를 나타낸다. 사이트별 관측 횡수는 Yonsei 사이트가 1393회로 가장 많고 Gosan 사이트가 547회로 가장 적다. 사이트별로 관측 횡수의 차이는 있으나 각 사이트의 유형별 비율은 PDM, NA, WA의 비율이 20~30%로 높고 PD, HA가

3% 이내의 비율로 낮은 유사한 형태를 보였다.

그림 2는 5곳의 사이트에서 관측된 데이터를 통합하여 산출한 440, 675, 870 그리고 1020 nm의 네 파장에서 유형별 라이다 비를 보여준다. 유형을 구분하지 않고 국내 사이트에서 측정된 데이터 전체의 대기 에어로졸의 파장에 따른 평균 라이다 비는 440, 675, 870, 1020 nm에서 각각  $72 \pm 7$ ,  $52 \pm 8$ ,  $47 \pm 5$ ,  $45 \pm 4$  sr으로 파장이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 유형을 구분할 경우, 파장에 따른 라이다 비의 변화는 PDM, NA, WA, MA, HA에서는 440 nm에서 가장 높은 값을 보이고, 파장이 증가함에 따라 감소하는 특징을 보인다. 다만, 황사가 주요한 에어로졸인 PD와 DDM은 440 nm에서의 라이다 비는 나머지 세 파장에 비하여 높은 값을 보이고, 675, 870, 1020 nm에서는 파장에 상관없이 유사한 값을 보이고 있다. PD와 DDM이 유사한 파장별 라이다 비 분포를 보이지만 두 유형의 차이는 1020 nm에서 확인할 수 있다. 순수 dust 입자의 경우 440 nm에서 가장 높고 파장이 증가함에 따라 감소하지만 1020 nm에서는 870 nm보다 높은 값을 보인다. Shin *et al.* (2018)은 전 세계의 mineral dust의 주요 발생원에서 측정된 AERONET 데이터를 분석하여 이와 같은 경향이 순수 dust 입자일 경우에 동일하게 관측됨을 확인하였다. 본 연구에서도 순수 황사로 구분한 PD는 이러한 경향을 보이지만 DDM은 1020 nm에서 라이다 비가 가장 낮은 값을 보였다. 이는 DDM에도 오염입자가 혼합되어 특성이 변화된 것으로 판단된다.

유형별 라이다 비는 440 nm에서 PD가  $59 \pm 4$  sr으로 가장 낮고 DDM, PDM, NA, WA, MA, HA의 라이다 비는 각각  $68 \pm 3$ ,  $79 \pm 3$ ,  $76 \pm 4$ ,  $72 \pm 3$ ,  $74 \pm 5$ ,  $76 \pm 8$  sr의 값을 보여준다. 이는 황사의 비율이 높을수록 라이다 비가 낮은 값을 보임을 확인시켜주었다. 나머지 유형은 HA와 NA가 네 파장에서 높은 경향을 보였다. 라이다 비는 입자의 크기, 형태, 광흡수 특성 및 굴절률의 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다 (Mueller *et al.*, 2010). 대부분 큰 입자로 구성된 황사는 입자 크기, 형태 및 굴절률이 다른 에어로졸과 명

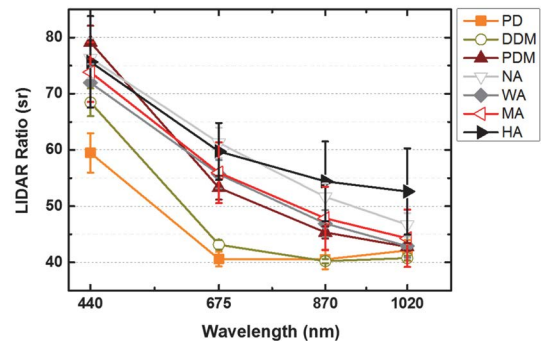


Fig. 2. The mean spectra of lidar ratio for different type of aerosol.

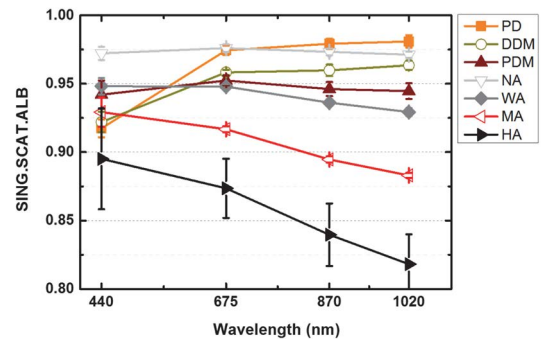


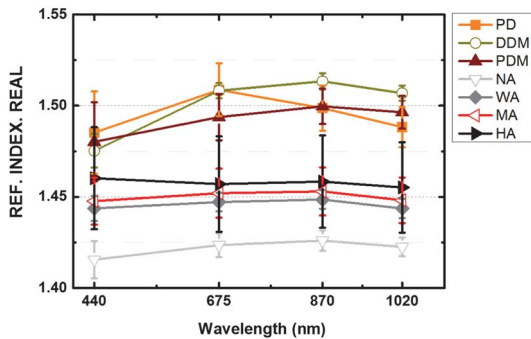
Fig. 3. The mean spectra of single-scattering albedo for different type of aerosol.

확히 구분되어, 황사 입자가 많이 포함될수록 라이다 비가 낮아지는 경향을 보이는 이유가 될 수 있다. PDM의 경우 황사의 영향과 광흡수 특성이 높은 영향으로 440 nm에서는 라이다 비가  $79 \pm 3$  sr으로 유형 중 가장 높은 값을 보이나, 1020 nm에서는  $42 \pm 1$  sr으로 HA의  $52 \pm 8$  sr에 비하여 10 sr 낮은 값을 보였다.

그림 3은 유형별 단산란 알베도 (Single-scattering albedo)로서 유형에 따라 구분되는 파장별 변화와 값을 보여준다. PD와 DDM은 440 nm에서 낮은 값을 보이고 파장이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. 이는 황사의 주요 성분 중 하나인 석영 ( $\text{SiO}_2$ )가 자외선 및 짧은 파장대의 가시광선 영역대에서 빛을 흡수하는 특징이 있어 440 nm에서의 단산란 알베도가 다른 파장대(675, 870, 1020 nm)에 비하여 낮은 값

을 보이는 것이다(Noh *et al.*, 2012).

그림 4는 네 파장에서 유형별 굴절률 변화를 보여준다. 유형별 굴절률은 황사가 혼합된 경우(PD, DDM, PDM)와 황사가 포함되지 않은 경우(NA, WA, MA, HA)로 구분되어 황사 입자가 포함된 경우는 네 파장에서 모두 1.47 이상의 값을 보이고, 포함되지 않은 경우는 1.46 이하의 값을 보인다. 황사가 포함되지



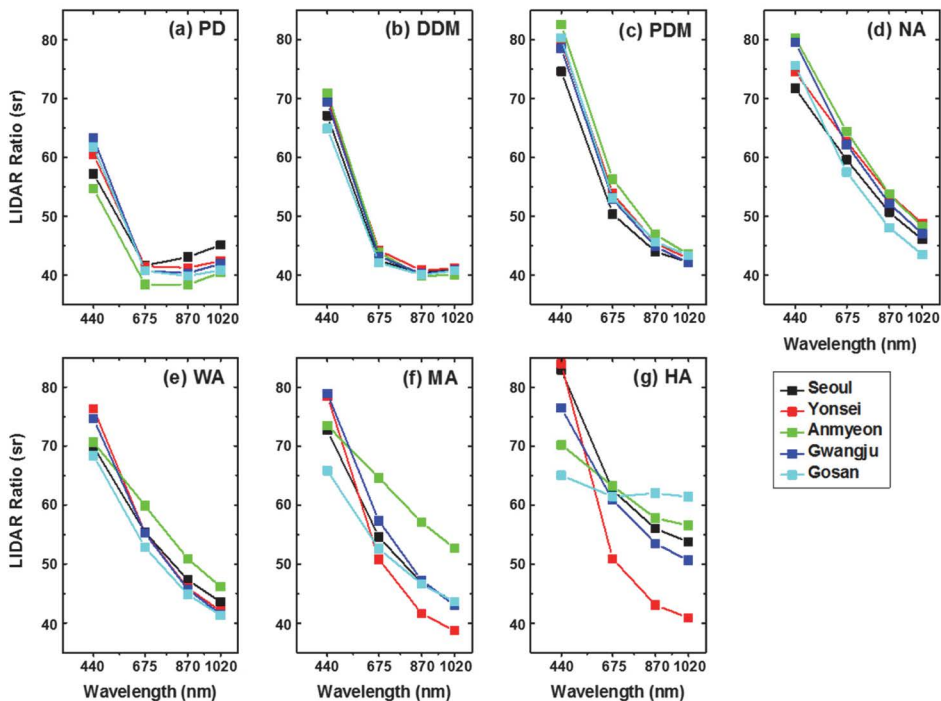
**Fig. 4.** The mean spectra of refractive index for real part for different type of aerosol.

않은 경우는 광흡수 특성이 낮을수록(단산란 알베도가 높은 값을 보일수록) 낮은 굴절률 값을 보이고 있다.

Mueller *et al.* (2010)이 AERONET 선포토미터로 측정된 Saharan dust의 라이다 비는 본 연구의 PD에 비하여 네 파장 모두에서 5~10 sr 정도 높은 값을 보이고 있다. 이러한 차이는 본 연구에서 PD는 순수 dust 입자만이 포함된 것으로 판단할 수 있으나, Mueller *et al.* (2010)의 연구에서의 Saharan dust는 아프리카 지역에서 발생하는 Biomass burning 에어로졸이 포함된 경우가 많아 PDM, NA, WA, MA, HA와 유사한 값을 보인 것으로 판단된다.

#### 4. 지역별 라이다 비

그림 5는 관측 지점의 위치에 따른 라이다 비의 차이를 확인하기 위하여 각 유형에서 사이트에 따른 라



**Fig. 5.** The mean spectra for lidar ratio for different type and observation sites.

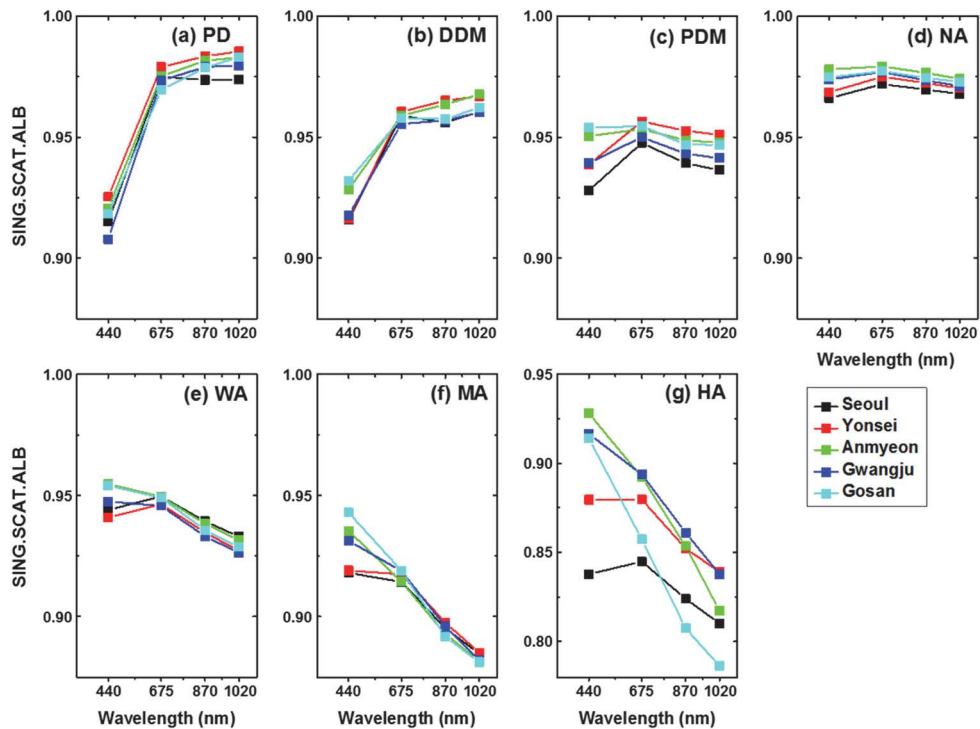


Fig. 6. The mean spectra for single-scattering albedo for different type and observation sites.

이다 비의 변화를 확인한 것을 보여준다. MA와 HA를 제외한 5개 유형에서는 모든 파장대에서 관측 사이트에 따른 라이다 비의 차이가  $\pm 3$  sr 이하로 유사한 값을 보임을 확인할 수 있다. 하지만, MA와 HA는 관측 사이트에 따라 라이다 비가 많은 차이를 보인다. MA의 경우 각 파장대에서 사이트별로  $\pm 7$  sr 이상의 차이가 발생된다. HA의 경우에는 사이트별 차이가  $\pm 8$  sr 이상으로 더욱 커진다. 또한, HA는 파장에 따른 라이다 비의 변화가 사이트에 따라 확연한 차이를 보인다. 모든 사이트에서 파장이 증가함에 따라 라이다 비가 감소하는 경향은 관측되나 파장에 따른 감소 정도는 연세>서울>광주>안면>고산 순으로 감소한다.

그림 6은 유형에 따른 각 사이트에서의 단산란 알베도의 차이를 보여준다. HA의 값이 사이트에 따라 높은 차이를 보일 뿐, 다른 유형에서는 사이트에 따른 명확한 차이는 보이지 않았다. 다만, 440 nm의 값

은 다른 세 파장대보다 사이트에 따른 차이가 높은 경향을 보였다. 그림 7에서 보여주는 유형별 사이트에 따른 굴절률의 차이도 라이다 비와 단산란 알베도와 마찬가지로 MA와 HA에서 많은 차이를 보였다. 5개 사이트에서 전체적으로 다른 사이트와 구별되는 사이트는 고산과 안면도이다. 고산의 경우는 제주도 서쪽 끝에 위치하여 지역적으로 발생하는 에어로졸의 영향보다는 대부분 장거리 수송되는 에어로졸의 영향을 많이 받는 지역이다. 또한, 해안가에 위치한 특성상 해염입자의 영향이 다른 지역보다 높다고 볼 수 있다. 안면도도 장거리 수송 에어로졸의 영향이 서울, 연세, 광주 사이트에 비하여 상대적으로 높고, 해안에 위치하여 해염입자의 영향이 상대적으로 높은 지역이다. 이러한 지역적 특성이 반영되어 두 사이트의 단산란 알베도와 굴절률이 다른 지역과는 구별되는 특성이 관측된 것으로 보인다. 하지만, 본 연구의 주요 분석 대상인 라이다 비는 MA와 HA에서

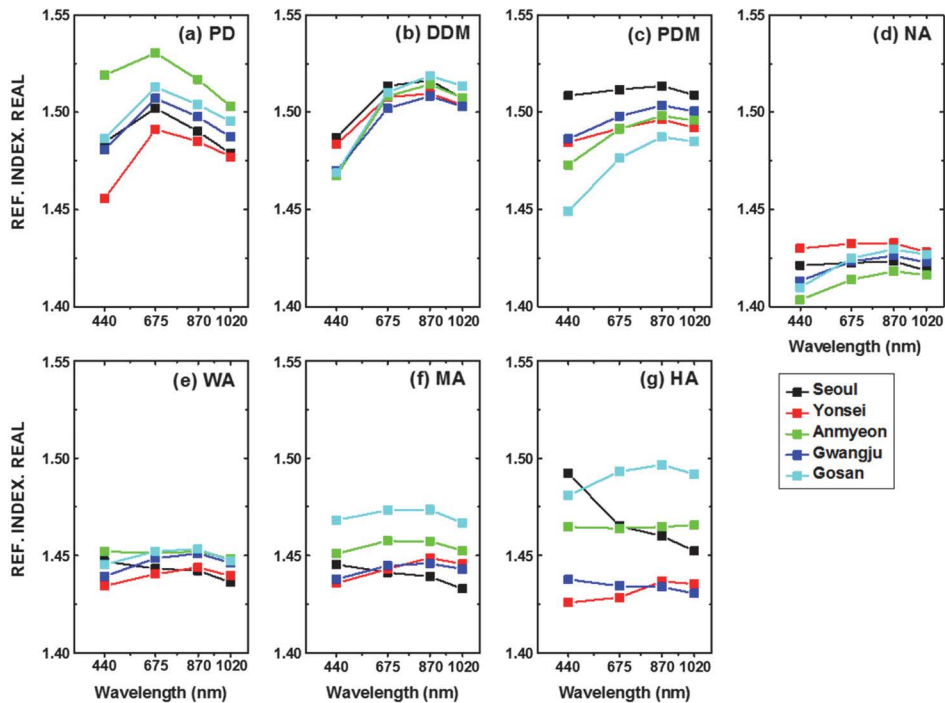


Fig. 7. The mean spectra for refractive index for real part for different type and observation sites.

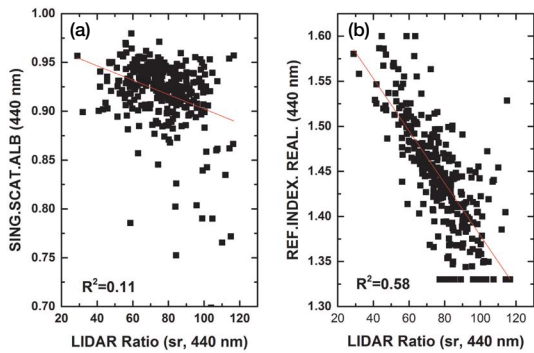


Fig. 8. Correlations between lidar ratio and single-scattering albedo (a) and refractive index for real part (b).

만 다른 지역과 구별되는 특성을 보일 뿐이었다.

본 연구에서는 라이다 비와 단산란 알베도 및 굴절률과의 상관관계( $R^2$ )를 분석하였다. 그림 8은 사이트에 따라 라이다 비가 큰 차이를 보이는 MA와 HA만을 대상으로 분석한 결과를 보여준다. 단산란 알베도가 0.80 이하의 낮은 값을 보일 때, 라이다 비가 높은

값이 관측되기도 하나 전체 상관관계는 상관성이 거의 없는 것으로 판단된다. 굴절률과 라이다 비의 상관관계( $R^2$ )는 0.58로 상관성이 있는 것으로 판단된다. Franke *et al.* (2003)은 광흡수 특성이 높을수록 라이다 비가 높은 값을 보임을 라만 라이다 관측을 통한 라이다 비를 산출결과로부터 확인하였다. MA와 HA의 단산란 알베도와 굴절률이 관측 사이트에 따른 차이가 있었고, 이 두 값의 차이로 인하여 라이다 비가 지역에 따라 큰 차이를 보인 것으로 판단된다. 즉, 고산과 안면도는 중국으로부터 장거리 수송된 오염입자의 영향을 많이 받는 곳으로 라이다 비의 변화가 다른 세 사이트와 다른 특징을 보이는 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 새롭게 개발된 대기 에어로졸 유형 구분

방법을 국내에서 장기 측정된 AERONET 선포토티터 자료에 적용하여 유형을 PD, DDM, PDM, NA, WA, MA, HA의 7가지로 구분하고 각 종류별 라이다 비, 단산란 알베도와 굴절률의 차이를 살펴보았다. 국내에서 관측되는 전체 에어로졸의 라이다 비는 440, 675, 870, 1020 nm에서 각각  $72 \pm 7$ ,  $52 \pm 8$ ,  $47 \pm 5$ ,  $45 \pm 4$  sr으로 440 nm에서 높고 파장이 증가함에 따라 감소하는 값을 보였다. 유형을 구분할 경우, PD의 라이다 비가 440 nm에서  $57 \pm 4$ 로 가장 낮고, DDM 또한  $67 \pm 6$  sr으로 다른 유형에 비하여 낮은 값을 보였다. 다른 유형별 라이다 비는 PDM ( $75 \pm 5$  sr), NA ( $72 \pm 4$  sr), WA ( $70 \pm 7$  sr), MA ( $73 \pm 6$  sr), HA ( $83 \pm 9$  sr)으로 상대적으로 높은 값을 보였다. 지역에 따른 라이다 비는 유형에 따라 큰 차이를 보이지 않았으나, 광흡수 특성이 높은 MA와 HA는 고산이 다른 유형과 명확하게 차이나는 값의 분포를 보였고, 안면도에서도 다른 세 사이트와는 구별되는 값을 보였다. 고산을 제외한 다른 사이트들은 장거리 수송 에어로졸과 함께 국내에서 발생한 오염물질의 영향을 받으나, 고산 사이트는 지역적인 오염원의 발생이 거의 없고 주로 중국 등지로부터의 장거리 수송된 에어로졸의 영향을 받는 곳이다. MA와 HA의 값이 고산과 다른 사이트가 구분되는 것은 이러한 지리적 특성이 반영된 에어로졸의 광학적 특성이 구분되어 발생된 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 산출된 전체 및 각 유형별 라이다 비는 향후 라이다 관측 데이터 분석을 위한 기본 입력 자료로 활용되어 정확성 향상에 도움이 될 것으로 기대된다. 특히, 황사가 주요한 에어로졸인 경우와 높은 광흡수 특성을 지닌 에어로졸이 관측될 경우 지역별 라이다 비의 적용에 주의해야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2018년)에 의하여 연구되었음.

## References

- Franke, K., Ansmann, A., Müller, D., Althausen, D., Venkataraman, C., Reddy, M.S., Wagner, F., Scheele, R. (2003) Optical properties of the Indo - Asian haze layer over the tropical Indian Ocean, *Journal of Geophysical Research*, 108(D2), 4059, <https://doi.org/10.1029/2002JD002473>.
- Kumar, K.R., Kang, N., Yin, Y. (2018) Classification of key aerosol types and their frequency distributions based on satellite remote sensing data at an industrially polluted city in the Yangtze River Delta, China, *International Journal of Climatology*, 38(17), 320-336, <https://doi.org/10.1002/joc.5178>.
- Lee, J., Kim, J., Song, C.-H., Kim, S.-B., Chun, Y., Sohn, B.-J., Holben, B.N. (2010) Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements, *Atmospheric Environment*, 44(26), 3110-3117, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.035>.
- Mueller, D., Ansmann, A., Freudenthaler, V., Kandler, K., Toledano, C., Hiebsch, A., Gasteriger, J., Esselbom, M., Tesche, M., Heese, B., Althausen, D., Weinzierl, B., Petzold, A., von Hoyningen-Huene, W. (2010) Mineral dust observed with AERONET Sun photometer, Raman lidar, and in situ instruments during SAMUM 2006: Shape-dependent particle properties, *Journal of Geophysical Research*, 115, D11207, <https://doi.org/10.1029/2009JD012523>.
- Noh, Y.-M., Kim, Y.-M., Kim, Y.-J., Choi, B.-C. (2006) Determination of the Lidar Ratio Using the GIST / ADEMRC Multi - wavelength Raman Lidar System at Anmyeon Island, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(1), 1-14 (in Korean with English abstract).
- Noh, Y.-M., Kim, Y.-J., Choi, B.-C., Murayama, T. (2007) Aerosol lidar ratio characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon Island, *Atmospheric Environment*, 41(1), 76-87, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.03.006>.
- Noh, Y.-M., Kim, Y.-J., Müller, D. (2008) Seasonal characteristics of lidar ratios measured with a Raman lidar at Gwangju, Korea in spring and autumn, *Atmospheric Environment*, 42(9), 2208-2224, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.11.045>.
- Noh, Y.-M., Mueller, D., Lee, H.-L. (2012) Retrieval of Dust Backscatter Coefficient using Quartz Raman Channel in Lidar Measurements, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(1), 86-93, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/>

- KOSAE.2012.28.1.086.
- Noh, Y., Müller, D., Lee, K., Kim, K., Lee, K., Shimizu, A., Sano, I., Park, C.B. (2017) Depolarization ratios retrieved by AERONET sun-sky radiometer data and comparison to depolarization ratios measured with lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 6271-6290, <https://doi.org/10.5194/acp-17-6271-2017>.
- Shimizu, A., Sugimoto, N., Matsui, I., Arao, K., Uno, I., Murayama, T., Kagawa, N., Aoki, K., Uchiyama, A., Yamazaki, A. (2004) Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 109(D19), <https://doi.org/10.1029/2002JD003253>.
- Shin, S.-K., Park, Y.-S., Choi, B.-H., Lee, K.-H., Shin, D.-H., Kim, Y.-J., Noh, Y.-M. (2014) Retrieval of the Variation of Optical Characteristics of Asian Dust Plume according to their Vertical Distributions using Multi-wavelength Raman LIDAR System, *Korean Journal of Remote Sensing*, 30(5), 597-605, (in Korean), <https://doi.org/10.7780/kjrs.2014.30.5.5>.
- Shin, S.-K., Tesche, M., Kim, K.-C., Kezoudi, M., Tatarov, B., Mueller, D., Noh, Y.-M. (2018) On the spectral depolarization and lidar ratio of mineral dust provided in the AERONET version 3 inversion product, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 12735-12746, <https://doi.org/10.5194/acp-18-12735-2018>.
- Shin, S.-K., Tesche, M., Noh, Y.-M., Mueller, D. (2019) Aerosol type classification based on AERONET version 3 inversion products, *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 3789-3803, <https://doi.org/10.5194/amt-12-3789-2019>.

### Authors Information

노영민 (국립부경대학교 환경공학과 교수)