Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 33, No. 3, June 2017, pp. 233-240
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.3.233
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

# GOCI 자료를 이용한 서울 지역 고농도 미세먼지와 옅은 황사 시 에어로졸 광학적 특성 분석

# Analysis of Aerosol Optical Properties for High Particulate Matters and Light Asian Dust in Seoul Using GOCI

**김덕래 · 최원준 · 최명제[1] · 김지영 · 조아라 · 김상균 · 김 준[1] · 문경정***
국립환경과학원 기후대기연구부 지구환경연구과, [1]연세대학교 대기과학과

(2017년 2월 24일 접수, 2017년 3월 23일 수정, 2017년 4월 13일 채택)

**Deok-Rae Kim, Won-Jun Choi, Myungje Choi[1], Jiyoung Kim, Ara Cho, Sang-Kyun Kim, Jhoon Kim[1] and Kyung-Jung Moon***
*Global Environment Research Division, Climate and Air Quality Research Department, National Institute of Environmental Research*
*[1]Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

(Received 24 February 2017, revised 23 March 2017, accepted 13 April 2017)

## Abstract

To distinguish between high particulate matter (HPM) and light Asian dust (LAD) events, aerosol optical properties from GOCI were investigated in Seoul from 2014 to 2016. The poor air quality case caused by fine atmospheric particulate matter (i.e., $80 < PM_{10} < 400\ \mu g/m^3$) is clearly separated from the case of heavy Asian dust that generally shows the $PM_{10}$ concentration more than $400\ \mu g/m^3$. In this study, we have found eight cases for the poor air quality and divided them into the two events (i.e., HPM and LAD). In case of aerosol optical depth (AOD), there was no big difference between two events. However, Angstrom exponent (AE) for HPM events was greater than 1, while that for LAD events less than 1. As a result of comparing aerosol type, non-absorbing fine mode aerosols were dominant for HPM events, but coarse and absorbing coarse mode aerosols for LAD events. Therefore, AE and aerosol type from GOCI can be used to distinguish between two events effectively.

**Key words** : GOCI, AOD, Angstrom exponent, Aerosol type

## 1. 서 론

최근 우리나라 환경 현안 중에 하나는 미세먼지에 의한 대기오염이라고 할 수 있다. 미세먼지의 고농도 현상은 크게 인간 활동에 의한 미세먼지 증가와 황사에 의한 자연적 현상으로 구분될 수 있다. 우리나라는 최근 몇 년간 고농도 미세먼지가 빈번하게 발생되고 있으며 해마다 꾸준히 증가하고 있는 추세이다(Kim *et al*., 2016). 미세먼지가 만성폐쇄성 폐질환, 급만성 호흡기 질환, 폐암, 심장질환, 뇌졸중 등의 발병과 악화에

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)32-560-7307, E-mail : kjmoon3@korea.kr

직접적인 영향을 미치기 때문에(Cho and Hong, 2014), 세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(International Agency for Research on Center, IARC)는 2013년 10월 미세먼지를 1급 발암물질로 분류했다. 최근 미세먼지로 인한 대기환경의 악화와 인체 위해성에 대한 연구조사에 따라 미세먼지에 대한 관심이 크게 증가하였으며 국민 건강 보호를 위한 정부의 적극적 대응을 요구하는 목소리가 커지고 있다. 이에 환경부와 국립환경과학원은 2013년 8월 31일 수도권 미세먼지 시범 예보제를 시작하였으며 2013년 12월 31일 예보 지역을 전국으로 확대하였고 2014년 2월 6일 본 예보제를 시행하였다(Chang *et al*., 2016).

중국 및 몽골에서 발생하는 황사는 기상 조건에 따라 우리나라에 직접적인 영향을 미치게 된다. 황사 예보를 수행하는 기상청에서는 중국 황사 발원지에 15개 관측 시설과 전국 22개 관측소를 설치하여 황사 예보를 하고 있다. 그러나 미세먼지와 황사는 발생원 등에서 차이가 있는데 미세먼지는 화석연료의 연소, 공장 먼지, 자동차 배출가스 등에 의해 발생하고 황사는 주로 중국 북부나 몽골의 사막지대와 황토고원에서 발원하는 미세한 흙먼지가 장거리 이동해 오면서 발생한다. 또한 미세먼지는 농도의 차이는 있으나 일년 내내 발생하며, 황사는 주로 봄철에 많이 발생하여 우리나라에 영향을 준다. 그러나 옅은 황사 시에는 미세먼지와의 구분이 쉽지가 않다. 미세먼지와 황사의 예보 기준은 $PM_{10}$ 농도를 기준으로 미세먼지는 4개 등급(좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨), 황사는 3개 등급(옅은 황사, 짙은 황사, 매우 짙은 황사)으로 분류하고 있다. 미세먼지의 경우 매우 나쁨 수준이 $PM_{10}$ 기준 151 $\mu g/m^3$ 이상이며, 황사의 경우 옅은 황사가 400 $\mu g/m^3$ 이하로 정의되고 있다. 따라서 옅은 황사가 발생할 경우, $PM_{10}$ 농도는 유사하게 나타나기 때문에 이를 구분하기 어려우며, 다른 관측자료와 함께 추가적인 분석이 필요하다. 대기질 예측 모델 또한 미세먼지 농도($PM_{10}$, $PM_{2.5}$)는 모델의 입력자료인 기상 및 배출량 자료의 불확도와 모델 자체의 한계로(Park *et al*., 2015) 고농도 미세먼지 발생 시 측정값과 편차가 커지고 불확도가 증가하는 특성을 보이기 때문에(Chang *et al*., 2016) 고농도 미세먼지와 옅은 황사를 구분하는 데 있어서도 한계를 가진다. 이러한 한계에도 불구하고 선행연구인 Lee *et al*. (2014)와 Park *et al*. (2012)은 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$의 질량농도 비와 성분 조성에 따라 황사와 고농도 미세먼지의 차이를 제시하였다. 그러나 기존 연구들은 주로 지상 관측 자료를 이용하여 분석을 수행하였다.

이에 본 연구에서는 천리안위성(Communication Ocean and Meteorological Satellite, COMS) 해양탑재체(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)에서 산출되는 정보를 이용하여 서울 지역에서의 고농도 미세먼지와 옅은 황사 시 에어로졸 광학적 특성의 차이를 살펴보고자 하였다. 이러한 차이는 고농도 미세먼지와 옅은 황사를 구분하기 위한 추가적인 방법으로 제시할 수 있을 것으로 보이며, 나아가 대기질 예보의 정확도 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 연구 방법 및 자료

### 2.1 사례일 선정

본 연구에서는 고농도 미세먼지와 옅은 황사가 발생한 날을 선정하기 위해 환경부에서 운영 중인 도시 대기 측정망 자료 중 서울(서대문구) 지역의 $PM_{10}$ 농도 자료를 사용하였다. 짙은 황사의 경우 $PM_{10}$ 농도가 400 $\mu g/m^3$ 이상의 값이 관측되기 때문에 고농도 미세먼지와는 확연히 구분되어진다. 2014년 1월부터 2016년 12월까지 고농도 미세먼지와 황사가 발생한 날 중 $PM_{10}$ 농도가 400 $\mu g/m^3$ 이하인 경우에 대하여 분류하였다. 또한 미세먼지의 경우 $PM_{10}$ 농도가 80 $\mu g/m^3$ 이상일 때 나쁨 수준을 보이기 때문에 $PM_{10}$ 농도가 80 $\mu g/m^3$ 이상, 그리고 GOCI 자료가 하루에 8번 관측하기 때문에 많은 자료를 확보하기 위해 12시간 이상 지속된 경우를 본 연구의 사례로 선정하였다. 따라서 위의 조건을 만족하는 사례는 고농도 미세먼지 4사례와 옅은 황사 4사례로 총 8사례가 선정되었으며, 선정된 사례는 표 1에 나타내었다.

### 2.2 사용된 자료

#### 2.2.1 AERONET 자료

에어로졸의 광학적 특성을 분석하고 이해하는 데 있어 에어로졸의 관측은 매우 중요하다. AERONET (Aerosol Robotic Network)은 전 세계에 걸쳐 분포하고 있는 지상원격측정장비(Sunphotometer)를 통해 전

**Table 1. Information of the selected 8 cases during 2014～2016.**

| No. | Period | Air pollutant | Maximum $PM_{10}$ concentration ($\mu g/m^3$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 2014. 02. 21～28 | Particulate matters | 201 |
| 2 | 2015. 10. 19～22 | Particulate matters | 160 |
| 3 | 2016. 03. 19～21 | Particulate matters | 119 |
| 4 | 2016. 04. 08～10 | Particulate matters | 236 |
| 5 | 2014. 05. 26～29 | Asian dust | 210 |
| 6 | 2015. 03. 01～02 | Asian dust | 289 |
| 7 | 2015. 03. 20～22 | Asian dust | 244 |
| 8 | 2016. 03. 06～08 | Asian dust | 207 |

지구 에어로졸의 특성을 이해하는 데 널리 사용되는 네트워크이다. 이 Sunphotometer는 태양으로부터 오는 직달 및 산란 일사를 파장영역(340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020 nm) 내에서 관측하여 에어로졸의 광학적 특성을 산출한다(Holben *et al*., 1998). Sunphotometer는 직달 일사 측정을 통해 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD)와 옹스트롬 지수(Ångström exponent, AE)를 산출하며, Inversion 모델의 입력 자료로 산란 일사량을 이용하여 단일산란 알베도(Single Scattering Albedo, SSA)와 부피 크기 분포(volume size distribution) 등의 자료를 산출하고 있다(Dubovik *et al*., 2006; Dubovik and King, 2000).

본 연구에서는 서울 지역에 위치한 연세대학교 사이트 자료를 이용하였는데, 사용된 자료는 AERONET level 2.0 (2014년 1월부터 2015년 12월) 자료와 level 1.5 자료(2016년)이다. 또한 GOCI와 AERONET 자료와의 비교를 위해 AERONET 관측 지점을 기준으로 0.1°×0.1° 범위 내에 존재하는 가장 가까운 GOCI 자료를 이용하여 비교하였으며, AERONET 자료의 경우 1시간 평균하여 사용하였다. 그리고 GOCI의 AOD 산출물은 550 nm이므로, AERONET 산출물에서 가장 가까운 500 nm 자료와 비교하였으며, AE의 경우 GOCI와 AERONET 모두 440～870 nm 자료를 사용하였다.

### 2.2.2 GOCI

GOCI는 2010년 발사된 정지궤도 위성인 천리안위성(COMS)에 탑재된 해색센서이다. GOCI는 가시 및 근적외 영역의 8개 채널(412, 443, 490, 555, 660, 680, 745, 865 nm)을 가지고 있으며, 500 m×500 m 해상도로 한반도를 중심으로 00:30 UTC부터 07:30 UTC까지 한 시간 간격으로 일 8회 관측하고 있다. GOCI의 산출물은 해수 광특성 계수, 엽록소 농도, 총 부유물질, 적조 등 해수의 변화 관측을 통해 해양환경 자료를 생산하고 있으며, 그 이외에 에어로졸의 광학적 특성 자료 또한 산출하고 있다.

MODIS 대기 상한 반사도 자료를 이용하여 해양에서의 GOCI 연세 에어로졸 산출 알고리즘 원형이 개발되었으며(Lee *et al*., 2010), 비구형성이 고려된 개선된 에어로졸 광학 특성 모형(Lee *et al*., 2012)을 통해 알고리즘의 정확도가 개선되었다. 그리고, 실제 GOCI에서 관측된 대기 상한 반사도로부터 해양/육지 에어로졸 광학 특성을 산출하는 알고리즘이 개발되었다(Choi *et al*., 2016). 매시간 관측된 여덟 채널에서의 대기 상한 반사도로부터 구름/얼음/눈 등 에어로졸 산출에 부적절한 픽셀을 제거하고 난 뒤, 지표면 특성에 따라 해양과 육지, 탁수로 나누어서 산출을 수행한다. 육지와 탁수 픽셀에서는 최소 반사도법으로부터 산정된 월별/시간별 육상 지면 반사도를, 해양 픽셀에서는 태양각과 위성각, 지면 풍속에 따라 계산되는 해수면 반사도를 사용한다. 관측된 대기 상한 반사도와 복사 전달 모델로부터 미리 계산된 대기 상한 반사도를 비교하여 미세모드율(Fine-mode fraction, FMF), 440 nm에서의 SSA에 따라 구성된 26개의 에어로졸 모델별 550 nm에서의 에어로졸 광학 깊이(AOD)를 계산한다. 그중 파장별 대기 상한 반사도의 관측값과 계산값의 차이가 가장 작은 모델들로부터 6 km×6 km 공간 해상도로 AOD와 FMF (550 nm), SSA (440 nm), AE (440 nm와 870 nm 사이)를 최종적으로 산출한다. 그리고 산출된 FMF와 SSA에 따라 에어로졸 유형(Aerosol type)을 산정한다.

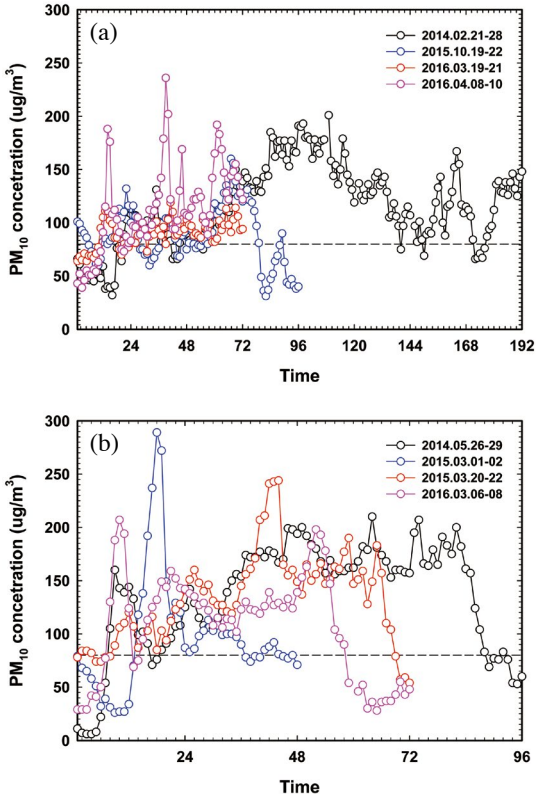


**Fig. 1. Time series plot of $PM_{10}$ concentrations for high particulate matters (a) and light Asian dust (b) during 2014 ~ 2016.**

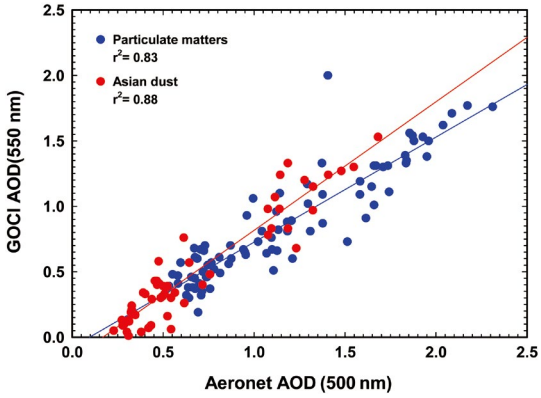


**Fig. 2. Comparison of AOD between GOCI and AERONET for high particulate matters (blue) and light Asian dust (red) cases.**

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 선정된 사례의 $PM_{10}$ 농도 분포

그림 1은 2014년부터 2016년까지 서울 지역에서 선정된 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례의 $PM_{10}$ 농도의 시계열 자료를 보여준다. 고농도 미세먼지로 선정된 날은 2014년 2월 21~28일, 2015년 10월 19~22일, 2016년 3월 19~21일, 2016년 4월 8일~10일이다(그림 1a). 각각의 사례 기간 중 일 최고 농도는 201 μg/m$^3$ (25일 13시), 160 μg/m$^3$ (21일 19시), 119 μg/m$^3$ (20일 16시), 202 μg/m$^3$ (9일 15시)로 관측되었으며, 주로 오후에 발생하였다. 그리고 2014년 2월 21~28일 사례의 경우 $PM_{10}$ 농도가 80 μg/m$^3$ 이상으로 관측된 날이 7일 동안 유지되어 장기간의 고농도 미세먼지가 발생했던 날 중 하나인데, 서해안에 정체성 고기압이 형성되면서 월경성 고농도가 발생한 것으로 분석되었다(Kim *et al.*, 2016). 그리고 선정된 사례 모두 중국 북부와 중부 지역에서의 고기압의 발달과 연관성을 가진다. 한편, 옅은 황사로 선정된 날은 2014년 5월 26~29일, 2015년 3월 1~2일, 2015년 3월 20~22일, 2016년 3월 6~8일이다(그림 1b). 각각의 사례 기간 중 일 최고 농도는 210 μg/m$^3$ (28일 16시), 289 μg/m$^3$ (1일 18시), 244 μg/m$^3$ (21일 20시), 207 μg/m$^3$ (6일 9시)로 관측되었으며, 2016년 사례를 제외한 나머지 사례에서도 오후에 최고 농도가 발생하였다. 또한 선정된 사례 모두 중국 북동부에 중심을 둔 저기압의 후면과 몽골북서부 지역의 고기압 전면에서 발원한 황사였으며, 저기압의 뒤를 따른 고기압의 위치, 발달 정도, 그리고 이동속도에 따른 기류의 방향과 풍속에 따라 다른 형태가 나타난 것으로 분석되었다(Ko *et al.*, 2016).

### 3.2 GOCI 에어로졸의 광학적 특성

#### 3.2.1 에어로졸 광학두께(AOD)

그림 2는 서울 지역에서의 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대한 위성(GOCI)으로부터 관측된 AOD와 AERONET AOD 자료와의 비교 결과이다. 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대한 결정계수($r^2$)는 각각 0.83, 0.88의 유의한 수준을 보였으며, 전체 사례 기간에 대한 결정계수는 0.86의 수준을 보였다. 이는 선행연구인 Choi *et al.* (2016)에서 DARGON-NE Asia

2012 캠페인 기간 동안 GOCI와 AERONET AOD의 상관계수가 0.88을 보인 것과 유사한 수준을 보였다. 따라서 GOCI로부터 산출되는 AOD 경우 신뢰도 높은 자료가 생산되고 있음을 알 수 있다.

GOCI 자료를 이용하여 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례 기간 동안 AOD 분포를 보면 각각 0.19~2.0, 0.01~1.53 수준의 값이 나타나고 있으며, 그림 2에서 알 수 있듯이 고농도 미세먼지와 옅은 황사의 AOD 값이 2.0 이내에서 고르게 분포하고 있어 큰 차이를 보이지 않는다. 이는 평상시보다 미세입자와 조대입자 영역의 에어로졸이 증가(Koo *et al*., 2007)하면서 AOD가 높아져 뚜렷한 차이가 발생하지 않는 것으로 추정된다. 또한 Lee *et al*.(2006)에 의하면, 위성자료를 이용한 오염입자(미세먼지)와 먼지입자(황사) 분석의 경우 AOD가 둘 다 높은 값을 보일 때 AOD만으로는 구별하기가 어려움을 제시하였다.

### 3.2.2 옹스트롬 지수(AE)

그림 3은 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대해 AOD에 따른 AE의 크기 분포를 나타낸다. GOCI에서 산출된 AOD와 AE의 분포 결과, AOD의 크기에 관계없이 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대해 AE의 값이 일정한 값으로 나타났다. 그리고 고농도 미세먼지의 경우 AE의 값이 대부분 1 이상의 값을 가지며 옅은 황사의 경우 고농도 미세먼지보다 상대적으로 낮은 값을 보였는데, 이것은 AE의 감소가 작은 입자상 물질보다 상대적으로 큰 입자상 물질의 수가 증가하였다는 것을 의미한다. 즉, 고농도 미세먼지는 생체소각(bio-mass burning), 도심 에어로졸과 같은 인위적인 에어로졸에 의해 발생되기 때문에 AE가 1보다 큰 값으로 나타난 반면, 옅은 황사는 중국이나 몽골의 사막지역에서 발생한 먼지가 장거리 이동함에 따라 조대입자가 증가하기 때문에 1보다 작은 값으로 나타났다. 한편, 옅은 황사의 경우, 일부 AE가 1보다 높은 값을 보였는데, 이는 대부분의 사례에서 농도가 감소하면서 조대입자 영역의 에어로졸이 감소하고 있어서 1보다 높은 값으로 나타난 것으로 추정된다.

그림 4는 GOCI AE 분석 결과를 검증하기 위하여 AERONET에서 관측된 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대한 부피 크기 분포(volume size distribution)를 나타낸다. 전체적으로 미세입자와 조대입자 영역에

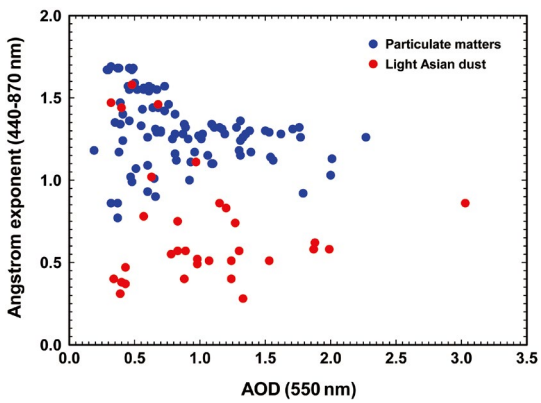


**Fig. 3. Distribution of Ångström exponent and AOD retrieved from GOCI for high particulate matters (blue) and light Asian dust (red) cases.**

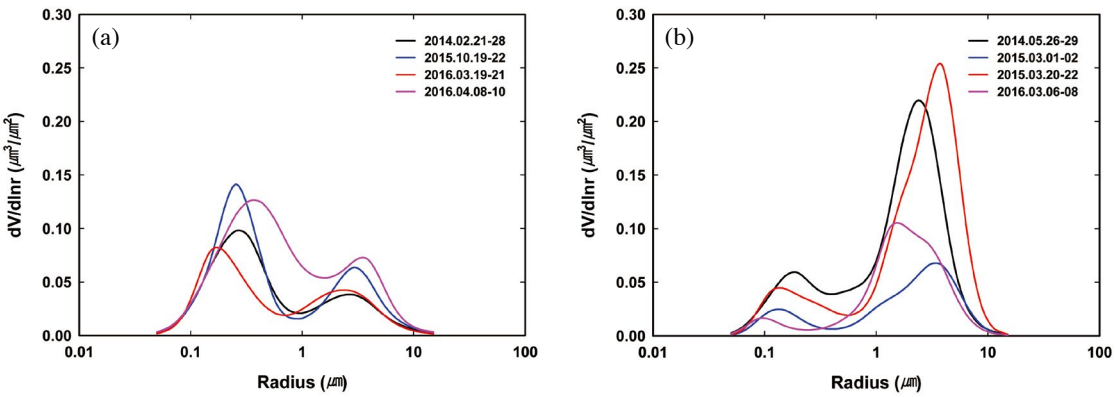


**Fig. 4. Comparison of volume size distributions for (a) high particulate matters and (b) light Asian dust.**

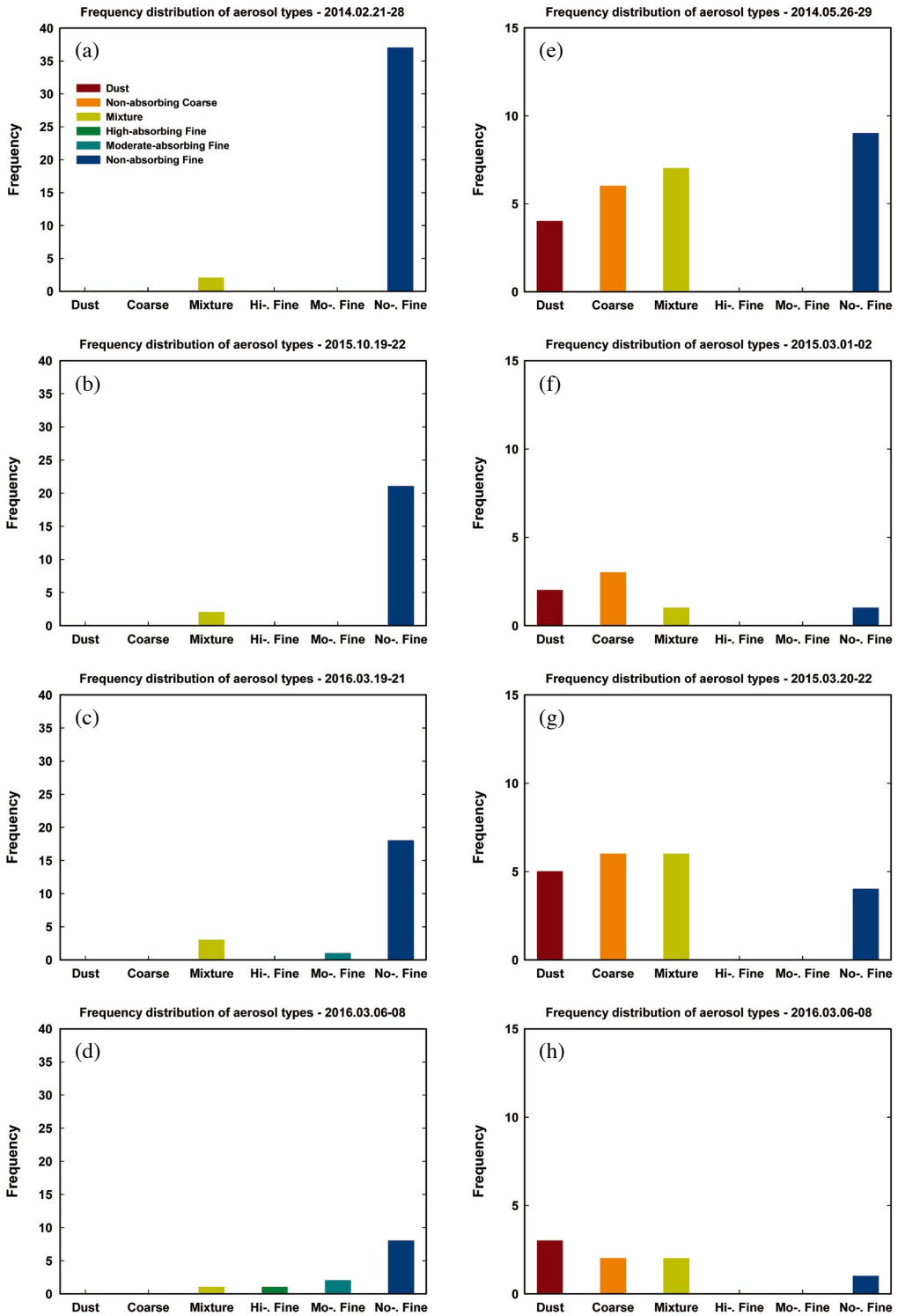


**Fig. 5. Frequency of aerosol type for high particulate matters (a), (b), (c), (d) and light Asian dust (e), (f), (g), (h) cases.**

서 각각 한 개의 봉우리가 나타나는 쌍봉분포를 보인다. 고농도 미세먼지의 경우, 0.1~1 μm의 미세입자 영역에서 최대값을 보이며, 조대입자 영역보다 더 큰 값을 보인다. 반면 옅은 황사의 경우, 2~10 μm의 조대입자 영역에서 최대값을 보이며, 미세입자 영역보다 더 큰 값을 보인다. 이는 앞선 AE가 고농도 미세먼지의 경우 미세입자에 민감하며 옅은 황사의 경우 조대입자에 민감하다는 결과를 잘 뒷받침해준다.

따라서 GOCI에서 산출되는 AE의 경우 AOD와는 다르게 고농도 미세먼지와 옅은 황사를 구분하는 데 있어 광학적 특성이 잘 나타나며, 일반적으로 AE가 약 1을 기준으로 1보다 크면 미세먼지, 1보다 작으면 옅은 황사로 구분하는 데 있어 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2.3 에어로졸 유형(Aerosol type)

GOCI로부터 산출되는 에어로졸 자료는 AOD와 AE 뿐만 아니라 에어로졸 유형(Aerosol type)이 있는데 크게 6가지 항목(Dust, Non-absorbing Coarse, Mixture, High-absorbing Fine, Moderate-absorbing Fine, Non-absorbing Fine)으로 구분하고 있다(Lee *et al*., 2010; Kim *et al*., 2007). 그림 5는 구름에 의한 영향으로 산출되지 않는 자료를 제외한 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대한 에어로졸 유형을 보여준다. 고농도 미세먼지 사례의 경우(그림 5a~5d), 에어로졸 유형 중 대부분이 Non-absorbing Fine type으로 나타났다. 이는 AE와 마찬가지로 고농도 미세먼지 사례는 미세입자 영역에 민감함을 나타내며, 고농도 미세먼지 발생 시 미세입자가 뚜렷하게 증가하는 현상을 보인다(Seo *et al*., 2015). 반면 옅은 황사의 경우(그림 5e~5h), Dust, Non-absorbing Coarse, Mixture type의 세 가지 형태로 나타났으며, 주로 조대영역의 큰 입자에 민감함을 보여준다. 이는 황사 시 입자상 성분 조성을 보면 지각 기원 성분의 농도가 평상시보다 10배 이상 증가하며(Park *et al*., 2012), 황사 시에는 조대입자의 농도는 증가하지만 미세입자는 조대입자에 비해 크게 증가하지 않기 때문으로 추정된다(Seo *et al*., 2015). 한편 옅은 황사의 경우 앞선 설명에서와 같이 일부 미세입자가 혼재해 있는 것으로 추정되어 Mixture type이 나타나는 것으로 판단되며, 대부분의 사례에서 농도가 감소하는 경우 Non-absorbing Fine이 관측되기도 하였다. 특히, 그림 5e에서 Non-absorbing Fine이 높게 나타났는데, 이는 그림 1에서 보인 바와 같이 5월 29일에 농도가 감소하면서 Non-absorbing Fine이 다른 사례보다 높게 나타났다. 따라서 GOCI의 에어로졸 유형 정보를 잘 이용하면 AE와 마찬가지로 고농도 미세먼지와 옅은 황사를 구분하는 데 있어 쉽게 접근할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 2014년부터 2016년까지 서울 지역에서 발생하는 고농도 미세먼지와 옅은 황사 사례에 대하여 GOCI 자료를 이용하여 에어로졸의 광학적 특성을 살펴보았다. AOD의 경우 두 사례 모두에서 2.0 이내의 값이 고르게 분포되어 있어 큰 차이를 보이지 않았다. AE의 경우 고농도 미세먼지 사례에서는 1보다 큰 값을 보였고, 옅은 황사 시에는 1보다 작은 값을 보였다. 이러한 차이는 AERONET의 부피 크기 분포를 통해 확인할 수 있었는데, 고농도 미세먼지는 미세입자에 민감하게 나타나며 옅은 황사는 조대입자에서 민감하게 나타남을 알 수 있었다. 또한 에어로졸 유형의 경우, 고농도 미세먼지 사례에서는 주로 Non-absorbing Fine의 유형이 나타났으며, 옅은 황사 시에는 Dust, Non-absorbing Coarse의 유형이 나타나 각각 미세입자와 조대입자에 민감함을 보였다.

따라서 GOCI에서 생산되는 에어로졸 정보로부터 고농도 미세먼지와 옅은 황사의 특징을 분석한 결과, 농도 및 양에 있어서는 둘 사이에 차이가 나타나지 않았지만, 그 외에 AE와 에어로졸 유형에서는 뚜렷한 차이가 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 현재 미세먼지 예보에 있어 지상관측 및 모델 자료뿐만 아니라 위성 자료를 활용함으로써 고농도 미세먼지 및 황사를 구분하는 데 있어 보다 더 정확성을 높일 수 있을 것이다.

## References

Chang, L.S., A. Cho, H. Park, K. Nam, D. Kim, J.H. Hong, and C.K. Song (2016) Human-model hybrid Korean air quality forecasting system, Journal of the Air &

Waste Management Association, 66(9), 896-911.

Cho, Y.M. and Y.-C. Hong (2014) The health effects of particulate matter and the role of the Korean Medical Association, Research Institute for Healthcare Policy Korean Medical Association, Healthcare Policy Forum, 12(2), 32-36.

Choi, M., J. Kim, J. Lee, M. Kim, Y.-J. Park, U. Jeong, W. Kim, H. Hong, B. Holben, T.F. Eck, C.H. Song, J.-H. Lim, and C.-K. Song (2016) GOCI Yonsei Aerosol Retrieval (YAER) algorithm and validation during the DRAGON-NE Asia 2012 campaign, Atmospheric Measurement Techniques, 9, 1377-1398.

Dubovik, O. and M.D. King (2000) A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 105(D16), 20673-20696.

Dubovik, O., A. Sinyuk, T. Lapyonok, B.N. Holben, M. Mishchenko, P. Yang, T.F. Eck, H. Volten, O. Munoz, and B. Veihelmann (2006) Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust, Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984-2012), 111.

Holben, B.N., T.F. Eck, I. Sluster, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankoviak, and A. Smirnov (1998) AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, Remote Sensing of Environment, 66, 1-16.

Kim, J.-H., D.-R. Choi, Y.-S. Koo, J.-B. Lee, and H.-J. Park (2016) Analysis of Domestic and Foreign Contributions using DDM in CMAQ during Particulate Matter Episode Period of February 2014 in Seoul, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(1), 82-99. (in Korean with English abstract)

Kim, J., J. Lee, H.C. Lee, A. Higurashi, T. Takemura, and C.H. Song (2007) Consistency of the aerosol type classification from satellite remote sensing during the Atmospheric Brown Cloud-East Asia Regional Experiment campaign, Journal of Geophysical Research, 112, D22S33.

Ko, H.J., J.-M. Song, J.W. Cha, J. Kim, S.-B. Ryoo, and C.-H. Kang (2016) Chemical Composition Characteristics of Atmospheric Aerosols in Relation to Haze, Asian Dust and Mixed Haze-Asian Dust Episodes at Gosan Site in 2013, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(3), 289-304. (in Korean with English abstract)

Koo, J.-H., J. Kim, M.-J. Kim, H.K. Cho, K. Aoki, and M. Yamano (2007) Analysis of Aerosol Optical Properties in Seoul Using Skyradiometer Observation, Atmosphere, 17(4), 407-420. (in Korean with English abstract)

Lee, D.H., K.H. Lee, and Y.J. Kim (2006) Application of MODIS Aerosol Data for Aerosol Type Classification, Korean Journal of Remote Sensing, 22(6), 495-505.

Lee, J., J. Kim, C.H. Song, J.-H. Ryu, Y.-H. Ahn, and C.K. Song (2010) Algorithm for retrieval of aerosol optical properties over the ocean from the Geostationary Ocean Color Imager, Remote Sensing of Environment, 114, 1077-1088.

Lee, J., J. Kim, P. Yang, and N.C. Hsu (2012) Improvement of aerosol optical depth retrieval from MODIS spectral reflectance over the global ocean using new aerosol models archived from AERONET inversion data and tri-axial ellipsoidal dust database, Atmospheric Chemistry Physics, 12, 7087-7102.

Lee, Y.-J., S.-A. Jung, M.-R. Jo, S.-J. Kim, M.-K. Park, J.-Y. Ahn, Y.-S. Lyu, W.-J. Choi, Y.-D. Hong, J.-S. Han, and J.-H. Lim (2014) Characteristics of PM Chemical Component during Haze Episode and Asian Dust at Gwang-ju, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(5), 434-448. (in Korean with English abstract)

Park, S.M., K.J. Moon, J.S. Park, H.J. Kim, J.Y. Ahn, and J.S. Kim (2012) Chemical Characteristics of Ambient Aerosol during Asian Dusts and High PM Episodes at Seoul Intensive Monitoring Site in 2009, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 28(3), 282-293. (in Korean with English abstract)

Park, Y.-S., I.-S. Jang, and S.-Y. Cho (2015) An Analysis on Effects of the Initial Condition and Emission on $PM_{10}$ Forecasting with Data Assimilation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(5), 430-436. (in Korean with English abstract)

Seo, S.-J., Y.-J. Lim, Y.-K. Seo, D.-H. Jung, H.-J. Jung, M.-D. Lee, J.-S. Park, and Y.-D. Hong (2015) Characteristics of Particle Size Distribution during High PM and Asian dust Episode of February, 2015 in Baengnyeong Island, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 15(3), 241-250. (in Korean with English abstract)