

## DRAGON-KORUS-AQ 기간 중 서해안 지역 에어로졸 광학 두께 고도별 PSCF 분석

### Assessing the Altitudinal Potential Source Contribution Function of Aerosol Optical Depth in the West Coast of Korean Peninsula during the DRAGON-KORUS-AQ Campaign

오세호 · 김 준<sup>1)</sup> · 손장호<sup>2)</sup> · 배민석\*

목포대학교 환경공학과, <sup>1)</sup>연세대학교 대기과학과, <sup>2)</sup>동의대학교 환경공학과  
(2016년 12월 20일 접수, 2017년 1월 7일 수정, 2017년 1월 23일 채택)

Sea-Ho Oh, Jhoon Kim<sup>1)</sup>, Zang-Ho Shon<sup>2)</sup> and Min-Suk Bae\*

*Department of Environmental Engineering, Mokpo National University*

<sup>1)</sup>*Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University*

<sup>2)</sup>*Department of Environmental Engineering, Dong-Eui University*

(Received 20 December 2016, revised 7 January 2017, accepted 23 January 2017)

#### Abstract

The altitudinal potential source contribution function (PSCFa) method was developed by considering topography and height of back trajectories. The PSCFa calculated on the contributions of trans-boundary transport to the hourly mean concentrations of aerosol optical depth (AOD) of the Aerosol Robotic Network (AERONET) in the Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks (DRAGON) KOREa-US Air Quality (KORUS-AQ) campaign from March 31 to July 1 in 2016. Eastern China (33°N~35°N and 119°E~121°E) can be the major source of trans-boundary pollution to the western area in South Korea resulted from PSCFa (0~700 m). In this study, AOD by Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) was compared to verify the source regions. Regionally, the effects of the long-range transport of pollutants from the eastern China on air quality in south Korea have become more significant over this period.

**Key words** : KORUS-AQ, AERONET, AOD, PSCF

#### 1. 배 경

대기 중 에어로졸은 산업 활동에 의한 인위적 원인

과 자연적 원인으로 나뉘며, 대류권 내 연직 및 수평으로 분포되어 있다(Ramachandran and Kedia, 2013). 해양염입자, 황산염이온, 그리고 미량 원소 등의 자연발생 주성분과 함께, 인위적 원인에 의해 발생된 에어로졸의 적지 않은 양이 이와 혼재되어 있다(Habib *et al.*, 2006; Prospero *et al.*, 2002). 이에 인위적 발생에 의해

\*Corresponding author.

Tel : +82-(0)61-450-2485, E-mail : minsbae@hotmail.com

증대된 복사 강제력은 직간접적으로 기후변화와 큰 관련이 있음에도 불구하고 정량적 기여량 산출에 불확실성이 크다(Ramachandran *et al.*, 2013). 이를 극복하기 위해, 오래전부터 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), Multiangle Imaging Spectroradiometer (MISR), Ozone Monitoring Instrument (OMI), Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) 등의 인공위성 원격탐사로부터 광범위한 범위의 에어로졸 광학 두께(Aerosol Optical Depth, AOD) 및 물리화학적 특성을 관측하였다(Kahn *et al.*, 2010). 또한, 지상 AOD 연직분포(More *et al.*, 2013) 관측으로부터 에어로졸의 광학 특성 및 복사 강제력과, 인공위성 관측 결과와 연계하여 대기 중 에어로졸의 종합적인 분포 특성을 분석하였다(Kim *et al.*, 2016a; Bibi *et al.*, 2015).

배출원 및 대기 측정 농도를 고려할 때, 동아시아 지역은 세계적으로 대기오염이 심각한 지역 중 하나이다(Tao *et al.*, 2016). 이는 최근 급격한 산업화로 인한 화석연료 사용의 증가 등 인위적인 대기오염물질의 증가뿐만 아니라, 사막화 지역의 확대로 인한 황사의 강도 및 빈도도 점차 증가하는 추세이다(Tan *et al.*, 2017). 이에 미국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)에서 2011년 Distributed Regional Aerosol Gridded Observation Networks (GRAGON) 캠페인을 기획하여, 전 세계 Aerosol Robotic Network (AERONET) 프로그램에 의해 우리나라에 다수의 Sunphotometer를 설치하여 측정하였다. 이는 위성산물과 화학수송모형 자료의 고공간해상도 검증을 통해 이들 자료의 정확도를 높이고, in-situ 측정을 병행하여 이들 자료 간의 비교검증 및 캠페인을 통해 수집된 다양한 자료를 활용하여 에어로졸의 영향을 입체적으로 분석하였다(Kim *et al.*, 2016b; Lee and Son, 2016). 현재까지 전 세계에 걸쳐 500기 이상 설치된 AERONET의 Sunphotometer는 AOD뿐만 아니라, 단산란 알베도 및 입경분포 등의 자료를 분석할 수 있어, 인공위성 알고리즘을 개발하고 검증하는 데 매우 중요한 역할을 담당해 왔다. 또한, 특정 지점의 AERONET 관측결과물을 특정 영역의 대표값으로 활용해 왔다. 특히 2016년에는 KORea-US Air Quality (KORUS-AQ) 캠페인과 더불어 DRAGON-KORUS-AQ 명칭 하에 한반도내 종합적인 대기질을

측정하였다.

편서풍대에 위치한 우리나라 서쪽에는 중국의 가장 큰 배출원들이 분포하고 있어(Hua *et al.*, 2016), 국지적으로 발생한 오염물질이 우리나라 대기질에 악영향을 미친다(Bae *et al.*, 2014). 특히, 동중국에서 발생한 일차 오염물질이 서해를 거치면서 노화현상(aging)에 의한 이차오염 물질이 생성되며, 이에 따른 질량 농도 증가와 함께 한반도로 유입 가능성을 배제할 수 없다. 일반적으로 오염 물질의 중장거리 이동에 따른 발생 지역을 유추하기 위해서, 가장 간단한 접근 방법으로 역궤적 모델이 오래전부터 이용되었다(Stein *et al.*, 2015). 이후 단일 궤적 추정 모델 결과의 불확실성으로 인해, 역궤적 근집분석(Moody and Samson, 1989) 및 에어로졸 확산 모델(FLEXPART)이 개발되었다(Stohl *et al.*, 1996). 이후 장거리 이동 오염원에 대한 통계적 유의성을 높이기 위해, Potential Source Contribution Function (PSCF) 모델이 사용되었다(Zeng and Hopke, 1989). PSCF 모델은 역궤적 모델 결과와 대기 중 오염물질의 측정값 중 고농도 측정값을 이용하여 오염물질의 발생 지역 확률을 모사한다. 이와 유사한, 측정 농도에 로그를 적용한 Concentration Field Analysis (CPA) 모델(Weiss-Penzias *et al.*, 2011), CPA 모델에 가중치를 적용한 Concentration Weighted Trajectory (CWT) 모델(Kabashnikov *et al.*, 2011), 관측 농도의 역궤적 체류 시간을 계산한 Residence Time Weighted Concentration (RTWC) 모델(Zhou *et al.*, 2004), 관측 지점의 풍향 및 풍속을 고려하여 공간 확률을 계산한 Source Direction Probability (SDP) 모델(Bae *et al.*, 2011) 등이 역궤적 모델과 연계하여 오염물질의 발생 지역을 분석하기 위해 개발되었다. 하지만, 이들 모두 높이를 고려하지 않는 단점으로 공간 내 오염물질을 이해하는 데 한계가 있다.

이에 본 연구에서는, 한반도 유입 에어로졸의 일차 및 이차오염 관련 에어로졸의 공간 발생 지역을 분석하기 위해서, (1) 우리나라 서해안에 위치한 5곳의 AERONET-AOD를 분석하고, (2) 고도를 고려한 입체 지형 및 입체 역궤적 분석을 통해, (3) 서해상 대류권 내 공간격자 Potential Source Contribution Function-altitudinal (PSCFa)을 분석하였다. (4) 마지막으로 이를 인공위성 MODIS-AOD와 비교 분석하였다.

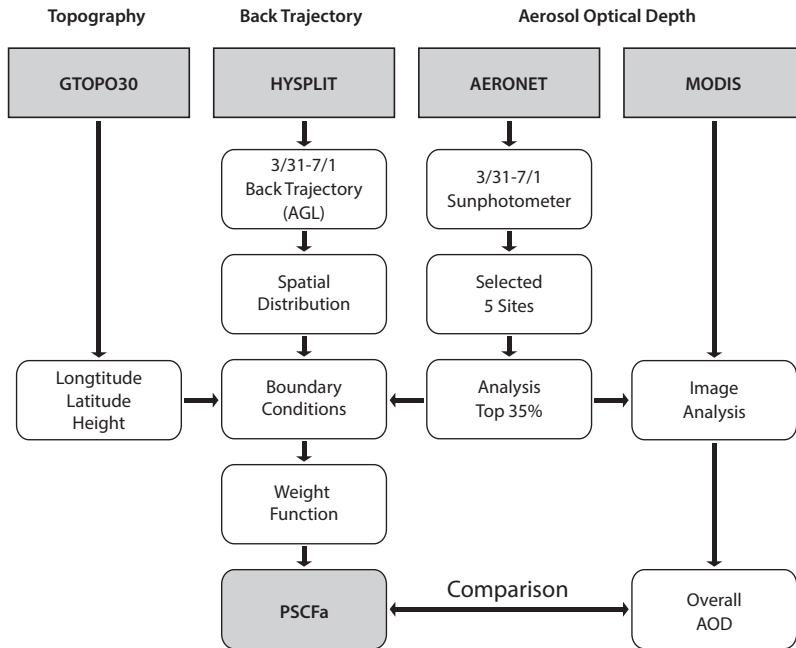


Fig. 1. Schematic Diagram for Potential Source Contribution Function-altitudinal (PSCFa).

## 2. 연구 방법

그림 1에 서해상으로 유입되는 에어로졸의 공간 분포를 연구하기 위해, 공간격자 PSCFa 연구 방법을 나타냈다. 간략히, 4개 파트로 나누어 계산하였다. 첫째, 미국 지질조사국(U.S. Geological Survey, USGS)으로부터 획득한 Global 30 Arc-Second Elevation (GTOPO30) 자료를 이용하여 고도를 고려한 지형데이터를 바탕으로, 둘째, 최대 높이 경계조건을 고려한 역궤적 공간 분석을 하였다. 셋째, 지역별 AERONET AOD 자료 중 서해안에 위치한 5개 측정소에서 관측한 상위 35% AOD를 분석하여, 최종적으로 높이별 PSCFa 결과를 도출하였다. 마지막으로 PSCFa 결과와 MODIS의 AOD 자료를 비교 분석하였다.

### 2.1 AERONET Aerosol Optical Depth (AOD)

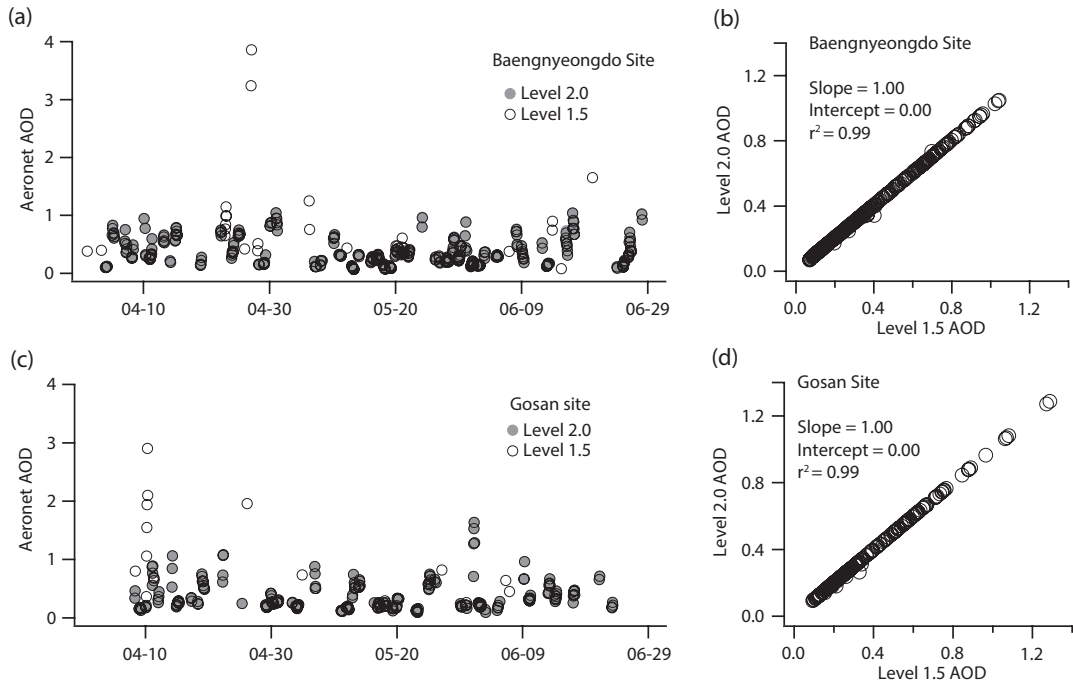
AERONET은 sunphotometer를 이용하여 구름 제거 등 자료의 보정 후, 대기 중 총 연직에 대한 AOD, 강우, 에어로졸 입경, 단산란 알베도 등 다양한 에어로졸의 물리적 특성 산출물을 제공한다(Barreto *et al.*, 2016;

Table 1. Summary of Operation Conditions of Sunphotometer in the Mokpo National University during the DRAGON-KORUS-AQ Campaign.

Model	CE318
Spectral range (nm)	340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640
Target	Sun
Wavelength scan	10 second (total three times)
Time resolution	3 minute

Holben *et al.*, 1998). 본 연구에서는 일차적으로 우리나라에서 관측된 AERONET AOD를 바탕으로, 이를 NASA Goddard Space Flight Center에서 재검증된 자료를 이용하였다(<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). 참고로, 목포대학교 측정소의 sunphotometer에 대한 정보를 표 1에 나타내었다.

본 연구에서는 DRAGON-KORUS-AQ 캠페인 기간 중 3월 31일부터 7월 1일까지 측정된 AOD 자료를 이용하였다. 자료는 구름이 제거된 Level 1.5를 이용하였으며, AOD의 파장은 500 nm (소청초 측정소의 경우 490 nm)를 이용하였다. 우리나라 20개 측정소(연세대학교, 소청초, 서울대학교, 부산대학교, 울산과학기술원,



**Fig. 2.** Time series of hourly averaged AERONET AOD at the Baengnyeongdo and Gosan Sites (open and solid circles indicate Level 1.5 and Level 2.0, respectively) and scatter plots between Level 2.0 and Level 1.5 for the measurement period.

태화, 송촌, 울림픽공원, 국립환경과학원, 목포대학교, 경북대학교, 익산, 대관령, 백사, 한국외국어대학교, 광주과학기술원, 고산, 강릉원주대학교, 백령도, 안면도)에서 AOD 관측이 이루어졌으며, 이 중 중국으로부터 오염물질이 장거리 이동 시 직접적으로 영향을 받을 가능성이 있는 서해안지역(안면도(36.539°N, 126.330°E), 백령도(37.966°N, 124.630°E), 소청초(37.423°N, 124.738°E), 목포대학교(34.913°N, 126.437°E))과 제주도의 고산 측정소(33.292°N, 126.162°E), 총 5곳을 최종적으로 선택하여 분석하였다.

AERONET AOD의 자료는 크게 (1) 원측정 데이터(Level 1.0), (2) 1차 구름이 제거된 데이터(Level 1.5), (3) 최종 보정에 의한 확정 데이터(Level 2.0)로 분류되어 공시된다. 하지만 Level 2.0의 데이터가 공시되기까지 수개월에서 수년까지 적지 않은 시간이 소요되어, 측정 데이터의 빠른 분석에 제한이 많다. 이에, Omer *et al.* (2005)은 Level 1.0 원측정 데이터를 이용하여 구름 제거 등 자체 개발 알고리즘을 적용한 AOD를 분석

하였다. 2016 12월 현재, 분석 대상 서해안지역 5곳 측정소 중 백령도 및 고산 측정소, 2곳의 Level 2.0 데이터만 공시되었다. 본 연구에서 사용된 백령도 및 고산 측정소의 Level 1.5 데이터를 Level 2.0과 비교하여 그림 2에 나타났다. 결과, Level 2.0 데이터는 Level 1.5 데이터와 비교할 때, 높은 상관관계와 함께 Level 1.5의 이상치가 제거된 값으로 나타났다. Level 1.5 데이터에 포함된 이상치는 백령도 7.9%, 고산 6.9%에 해당한다. 이에 본 연구에서 이용된 Level 1.5 데이터는 일부 이상치가 포함된 불확실성을 내포하고 있음을 밝힌다. 향후 추가 연구를 통해 Level 2.0 데이터를 심도 있게 분석할 예정이다.

## 2.2 Potential Source Contribution Functional-altitudinal (PSCFa)

PSCF 모델에 사용된 기초 자료는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 역궤적 모델 결과를 이용하였다(Stein *et al.*, 2015).

사용된 기상자료는 1°의 위경도 해상도를 가진 Global Data Assimilation System 1(GDAS1) 데이터를 이용하였다. 역궤적 모델 수행은 AERONET 측정위치 20곳에서, 지상으로부터 5곳 수용 높이(200 m, 400 m, 600 m, 800 m, 1000 m (Above Ground Level))로 1시간 간격, 120시간 역궤적으로 3월 31일부터 7월 1일까지 계산하였다. Sunphotometer는 지상 관측에 의한 총 연직 AOD 값을 나타낸다. 이에, 본 연구에서 선행 연구 연직 분포 결과를 바탕으로 최대 3500 m 이하에서 에어로졸 이동이 수용지점에 대부분 영향을 미쳤을 것으로 가정하였다(Lee *et al.*, 2013a, 2013b; Shin *et al.*, 2012; Noh *et al.*, 2011). 본 연구에서 사용한 PSCFa 모델은 기존 PSCF 모델에서 높이를 고려한 3차원 모델이다. 즉, PSCFa 모델은 공기의 이동정보인 역궤적 정보와 수용점의 측정값을 이용하여 주된 오염원의 위치를 높이별 확률로 나타내는 배출원 확률 분포 모델이다. 이는 수용지점에서 측정된 결과값 중 고농도를 나타내는 시점에 대한 역궤적 자료와 고농도를 포함한 모든 측정 시점에 대한 역궤적 자료를 이용하여 공간격자에 누적시켜 계산하였다. PSCFa의 값은 식(1)을 따른다.

$$PSCFa_{xyz} = \frac{\frac{m_{xyz}}{N}}{\frac{n_{xyz}}{N}} = \frac{P_z(B_{xy})}{P_z(A_{xy})} = m_{xyz}/n_{xyz} \quad (1)$$

$$W_{xyz} = \begin{cases} 1.000 & 420(n_{avg} \times 2) \leq n_{xyz} \\ 0.996 & n_{xyz} = 419 \\ 0.992 & n_{xyz} = 418 \\ \vdots & \vdots \\ 0.154 & n_{xyz} = 211 \\ 0.150 & n_{xyz} \leq 210(n_{avg}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서, 역궤적점 전체의 수를 N이라 하고 특정 격자의 공간 위치를 위도(x), 경도(y), 고도(z)라 할 때, 그 위치의 공간격자를 지나는 역궤적점의 개수를  $m_{xyz}$ 와  $n_{xyz}$ 로 나타내어 계산된다.  $n_{xyz}$ 는 측정이 시행된 전체 시점에 대한 역궤적,  $m_{xyz}$ 는 고농의 측정값을 가지는 시점의 역궤적을 나타낸다. 이를 평면 확률로 나타내면  $P(B_{xy})$ ,  $P(A_{xy})$ 로 표현하며 높이별 PSCFa 값은  $P_z(B_{xy})/P_z(A_{xy})$ 로 나타낼 수 있다. 이에 고농도의 역궤적이 많이 지나가는 격자의 경우 1에 가까운 PSCFa

값을 가지게 되며, 높은 PSCFa값을 가지는 격자는 수용 지점에 큰 영향을 미치는 오염원이 존재한다. 격자 중 고농도를 포함한 역궤적의 공간 분포가 매우 적을 경우 신뢰도가 문제가 될 수 있다. 이는 오염원을 지나는 역궤적에 의해서 풍상, 풍하 지역이 오염원으로 나타나는 끌림 현상(trailing effect)이 나타난다. 이에, 끌림 현상을 최소화하고자, 가중치( $W_{xyz}$ )를 식 2와 같이 구한 후 PSCFa 결과에 적용하였다. 즉, 모든 역궤적으로부터 평균 공간격자 역궤적 개수( $n_{avg}$ , 210개)를 기준에서부터 두 배인 420개를 최댓값으로, 가중치 0.150에서 1.000 값을 동배분하여 적용하였다.

본 연구에서 서해안지역 5개 측정지점에 대한 역궤적 공간 범위를 경도 110°~135°, 위도 30°~45° 및 높이가 3500 m로 하여, 공간격자 1°×1° 내에서 높이가 700 m 간격으로 PSCFa를 계산하였다. 또한, 지형 높이를 고려하여, 공간 역궤적이 지상(높이 0 m)에 도달하는 경우, PSCFa 계산에서 제외하여, 최종적으로 5개 층의 PSCFa 결과를 도출하였다.

### 2.3 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

본 연구에서 공간격자 PSCFa의 결과를 비교 분석하기 위해, NASA 인공위성(Terra / Aqua)에서 제공하는 MODIS를 이용하였다. 간략히, 본 연구에서 사용된 MODIS AOD 자료는 36개의 광학채널로 구성된 MODIS 센서의 L1B 자료로부터 0.66, 0.86, 0.47, 0.55, 1.24, 1.64, 2.12 μm의 총 7개 채널값이 사용되며, 후처리 및 알고리즘 적용을 통하여 산출된 Collection 6, Level 2 자료(코드명: Terra MOD04\_3K, Aqua MYD04\_3K)이다(Kim *et al.*, 2016a).

## 3. 결 과

우리나라에서 관측된 AERONET AOD를 분석하고자, 그림 3(a)에 DRAGON-KORUS-AQ 캠페인 기간 중 평균 농도를 원 면적 비율과 함께 나타냈다. 본 측정소는 모두 전력 및 인터넷 등 지원이 용이하고 접근성이 좋은 환경부 산하 관측지점 및 전국 대학교들이 포함되었다. DRAGON-KORUS-AQ 캠페인 기간 중 관측한 20개 전체 측정소 평균은 0.464±0.373(평균±표



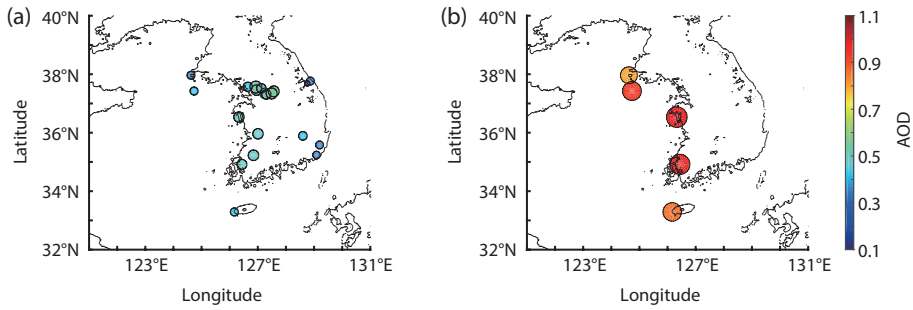


Fig. 3. (a) Averaged AOD by Sunphotometer in Aerosol Robotic Network (AERONET) and (b) top 35% AOD by five selected locations in the western area.

준편차)로 나타났다. 이는 선행 연구결과와 비교해 볼 때, 다소 높은 수준으로 관측되었다(Kim *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2008). 그림에서 보는 바와 같이 수도권을 포함한 서해안 지역에서 전반적으로 AOD가 높게 나타났으며, 특히 장거리 이동 물질의 직접적인 영향을 받는, 서해안지역(안면도, 백령도, 소청초, 목포대학교) 측정소에서 상대적으로 높은 AOD가 나타났다. 연세대학교 측정소에서 측정된 평균 AOD가 0.594로 DRAGON-KORUS-AQ 캠페인 기간 중 관측했던 모든 지역에서의 평균 AOD 중 가장 높은 값을 나타내었으며, 송촌(0.546), 한국외국어대학교(0.543), 백사(0.541), 광주과학기술원(0.524)의 순으로 높게 나타났다. 대체적으로 서울에 인접할수록, 서쪽으로 갈수록 높은 AOD가 나타나, 지역적 일차 오염물질 발생 및 중국으로부터 장거리 이동 에어로졸의 영향이 크다. 이에 본 연구에서는 중국으로부터 장거리 이동 에어로졸의 영향을 자세히 분석하고자, 서해안에 위치한 5곳 측정소(안면도, 백령도, 소청초, 목포대학교, 고산 측정소)를 선정하여 분석하였다. 그림 1(b)는 5곳 측정소의 상위 35% 높은 AOD 값에 대한 평균 농도를 원면적 및 색으로 나타내었다. 5곳 중 안면도 측정소에서의 상위 35% 평균 1.024 AOD로 가장 높은 값을 나타내었으며, 안면도(1.024), 목포대학교(1.002), 소청초(0.936), 고산(0.920), 백령도(0.840)의 순으로 나타났다. 5곳 관측 지점에서의 상위 35% 평균은  $0.957 \pm 0.478$  (평균±표준편차)로 나타났다. 오차범위 0.023에서 전체 평균 0.449에 대해 2.1배 높은 값을 나타냈다(표 2). 이는 5곳 측정소 총 1849 관측시간 중 419 시간으로 측정 시간 중 23%에 해당한다. 본 연구 기간 동

Table 2. Statistical Summary of AOD by five selected locations in the west coast areas.

AOD	Overall average	Top 35% average
Mean	0.449	0.957
Standard error	0.009	0.023
Median	0.338	0.793
Standard deviation	0.374	0.478
Count (hr)	1849	419

안 상위 35%는 관측값의 0.596 이상인 경우 해당한다. 공기 역학적 분석은 대기 중 화학 관측 물질의 농도 상승과 관측 물질의 주요 배출원을 이해하는 데 접근성이 용이한 모델로, 대기 경계층의 난류를 표현함에 있어 오차를 유발할 수 있는 단점에도 불구하고, 운영이 비교적 쉽다는 장점으로 많은 연구자들에 의해 이용된다. PSCFa를 분석하기 위해 그림 4는 연구 기간 중 역궤적 공간 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 지표에 투영된 녹색원은 연구 기간 전체 역궤적 공간 분포를 나타낸 것이고, 적색 원은 상위 35% (0.596 AOD) 이상에 해당하는 역궤적 공간 분포를 나타낸 것이다. 본 역궤적 분포는 (1) 지상(0m, 역궤적 지상 도달치 제외), (2) GTOPO30 지형을 고려한 최대 고도(3500 m), (3) 위도(30°N~45°N) 및 (4) 경도(110°E~135°E)를 경계 조건으로, (5) 해발 높이로 재 산정하여 최종 분석하였다. 상위 35%, 즉 적색 원의 공간 분포를 살펴보면, 위도(33°N~37°N) 및 경도(120°E~127°E), 고도 1400 m 이하에서, 분석된 전체 상위 35% 중 36.5%가 분포되었다. 이는 본 공간에서 고농도 에어로졸이 발생하여 수용 측정소로 유입되었을 가능성이 높다. 반면, 경계 조

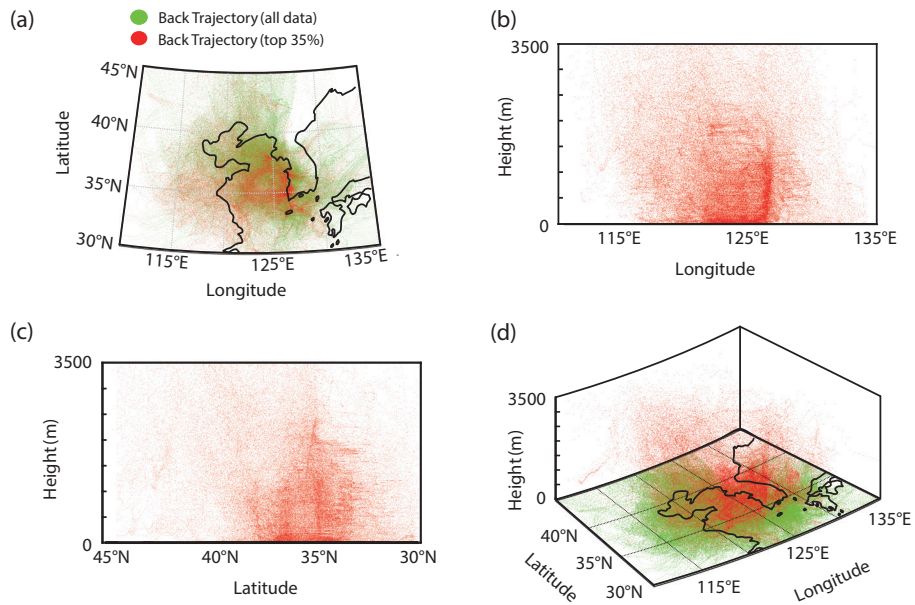


Fig. 4. (a) Top view (Latitude vs. Longitude) for all back trajectories (green dots) and top 35% back trajectories (red dots) by five AERONET sites, (b) longitude side elevation (Height vs. Longitude) for top 35% back trajectories, (c) latitude side elevation (Height vs. Latitude) top 35% back trajectories, and (d) three dimensional view for all back trajectories (green dots) and top 35% back trajectories (red dots).

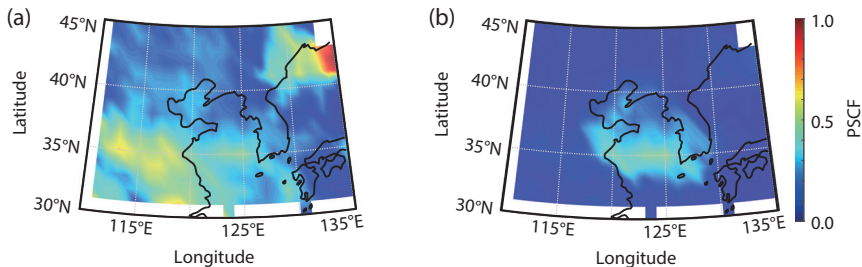


Fig. 5. Results of PSCF (Potential Source Contribution Function) without (a) weight function and (b) with weight function.

건의 0~3500 m 고도, 위도(30°N~45°N) 및 경도(110°E~115°E) 사이에서 분석된 전체 상위 35% 중 2.4%가 분포되었고, 동일 고도, 위도에서 경도(130°E~135°E) 사이에서 분석된 전체 상위 35% 중 2.3%가 분포되어, 분석 기간 중 위 두 공간에서 발생된 고농도 에어로졸이 측정소에 영향을 미쳤을 가능성은 상대적으로 적다. 이에, 공간 역궤적 분석 결과를 바탕으로 측정 기간 중 수용 측정소에 유입된 전체 공기 궤적 중 고농도에 대해 발생지역을 분석하였다.

고도별 PSCFa의 결과와 비교하기 위해 가중치, 지형, 한계고도 등을 전혀 고려하지 않은 PSCF(그림 5(a)) 및 가중치 적용, 지형 및 한계고도는 적용하지 않은 PSCF(그림 5(b))결과를 그림 5에 나타냈다. 결과, 가중치 미적용시 앞서 설명한 역궤적의 공간 분포 내 끌림 현상 등이 나타났다. 가중치를 적용한 결과 중국 동쪽 지역에서 시작되는 고농도 확률 분포가 분명하게 나타났다. 이는 PSCF 계산시 가중치 적용의 중요성을 의미한다. 하지만, 그림 5(b)에 나타난 PSCF는 연직 높

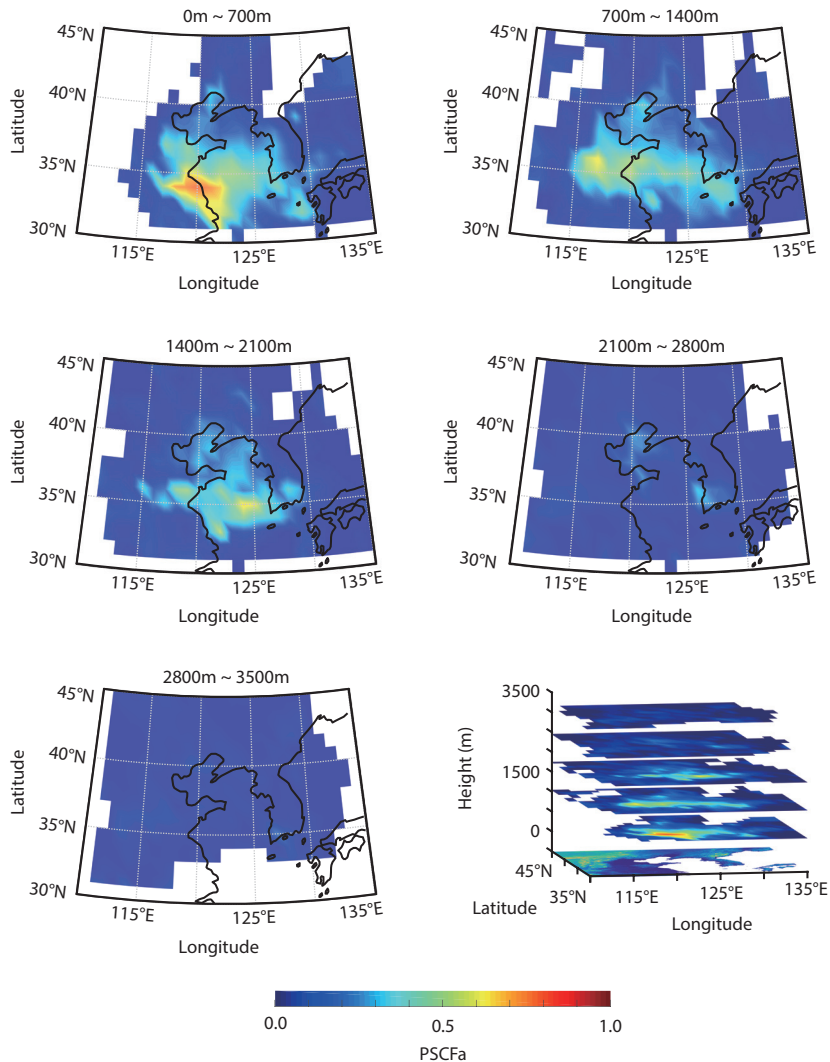


Fig. 6. Results of PSCFa (Potential Source Contribution Function-altitudinal) by five difference height ranges (0 ~ 700 m, 700 ~ 1400 m, 1400 ~ 2100 m, 2100 ~ 2800 m, and 2800 ~ 3500 m).

이를 고려하지 않는 단점으로 연직 공간 내 오염물질을 이해하는 데 한계가 있다.

그림 6은 고도별 5개 영역(0~700 m, 700~1400 m, 1400~2100 m, 2100~2800 m, 그리고 2800~3500 m)으로 계산된 PSCFa 공간 분포이다. PSCFa 결과는 공간을 지나는 모든 역궤적에 대한 고농도 확률 분포로 층간 PSCFa 값에 대한 상대 비교는 불가능 하지만, 공간 자체 내 고농도 오염 지역을 이해하는 데 매우 유용하다. 본 결과는 모델 적용 시 적은 수의 궤적점을 갖

는 격자의 불확실도를 제거하기 위하여 평균 궤적점수를 이용하여 식(2)와 같이 가중치를 적용하였다. 고도별 PSCFa 결과를 보면, PSCFa(0~700 m)의 경우 중국 렌윈강시 주변에서, 최대 0.793(120°E, 34°N)로, 위도(33°N~35°N), 및 경도(119°E~121°E) 범위에서 평균 0.634으로 분석되어 본 고도영역(0~700 m)에서 PSCFa 최고값을 나타냈다. 즉, 중국 렌윈강시 주변에서 발생한 에어로졸과, 중국 동쪽 해안을 거치면서 생성된 이차 에어로졸이 혼재할 것으로 사료된다. 또한,



Jeong *et al.* (2017)에 의하면, 부산 수송 측정소에서 관측된 황산염 이온과 더불어 V, Ni 지표물질에 의한 선박 배출 에어로졸의 PSCF 결과와 PSCFa (0~700 m) 결과가 매우 유사한 영역을 오염물질 발생 지역으로 나타냈다. 이에 본 고도영역에서 해안지역 중국 선박 배출 관련 일차 오염물질이 높은 영향을 미쳤을 가능성이 있다. PSCFa (700~1400 m)의 경우, 중국 내륙 내위도 (33°N~37°N) 및 경도 (115°E~120°E)의 광범위한 영역에서 상대적으로 높은 PSCFa 값을 나타냈다. 이는 중국 등에서 발생된 에어로졸이 고도 700~1400 m에서 체류할 가능성 및 중국 내 발생 에어로졸 및 산림 등에 의한 생물성 기원 전구 성분에 의한 이차 에어로졸의 고도 체류 가능성이다. AERONET AOD가 에어로졸 내 원인 관련 지표 성분 화학성분의 특성을 이해하는 데 한계가 있으므로, 위 두 가지 가능성의 우선 순위를 본 연구에서 구별할 수 없다. 이에 위 가능성을 바탕으로 다양한 분석 화학 성분과 함께 향후 연구를 진행할 예정이다. PSCFa (1400~2100 m)의 경우, 위도 (35°N) 및 경도 (125°E)를 중심으로 한 서해안 대부분 영역에서 상대적으로 높은 PSCFa 값을 나타냈다. 선박 배출 물질을 포함하여, 앞선 두 PSCFa 영역에 영향을 미친, 중국 내륙 및 동중국에서 발생한 에어로졸이 서해를 거치면서 생성된 에어로졸로 사료되며, 지표성분 수송모델과 연계하여, 본 영역에서 수송 측정소의 유입량이 계산 가능할 것으로 판단한다. PSCFa (2100~2800 m)의 경우, 위도 (37°N~40°N) 및 경도 (120°E) 주위 및 한반도 남부에서, 타 지역에 비해 상대적으로 높은 PSCFa 값을 나타냈다. PSCFa (1400~2100 m)와 동일 지역인 것을 볼 때, 유사한 원인으로 판단한다. 마지막으로 PSCFa (2800~3500 m)는 위도 (35°N) 및 경도 (127°E)를 중심으로 매우 미약한 값을 나타냈다. 이에 본 연구 기간 동안 위 상층 영역에서 유입된 에어로졸에 의한 AOD 영향은 매우 미비하다.

PSCFa의 결과를 비교 분석하기 위해, 인공위성 (Terra/Aqua) 관측에 대한 MODIS AOD를 그림 7에 나타냈다. MODIS는 서해안지역 5개의 AERONET 측정소 중 2개 이상 상위 35%를 나타내는 시점에 대해서, 공기 궤적의 이동시간을 고려한 46시간에서 50시간 이전의 한반도 주변지역 측정 자료를 이용하였다. 1시간 AERONET의 측정값에 대해 MODIS 관측값과 대응하여, 상위 35%에 대해서 총 128개 (격자 평균 15

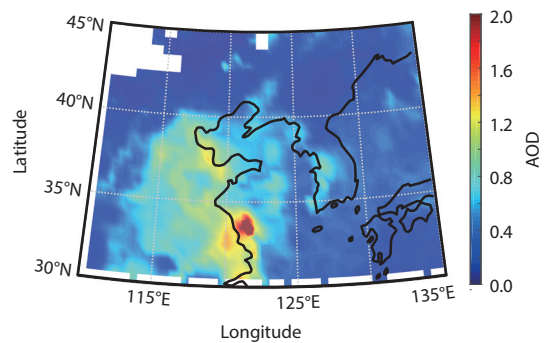


Fig. 7. Averaged AOD (color bar: AOD level) by MODIS related to top 35% AERONET.

개 파일)의 파일을 평균하여 0.5°×0.5° 해상도로 그림 5에 나타냈다. 지역별 인공위성 관측결과를 살펴보면, 최대 4.011 (121.5°E, 33.5°N)로, 위도 (33°N~34°N) 및 경도 (121°E~122°E) 범위에서 평균 1.711로 분석되었다. 이는 PSCFa (0~700 m)의 위도 (33°N~35°N) 및 경도 (120°E~124°E)의 범위와 일치한다. 또한, 중국 동쪽 지역으로 넓게 형성된 높은 값을 볼 수 있다. 이는 많은 선행연구에서 나타낸 배출원 지역과 일치한다 (Hua *et al.*, 2016). 본 연구는 기존의 수송 측정지점과 연계한 PSCF 모델에 고도를 고려하여 분석한 공간 PSCFa 모델로, 고도별 원인 발생 지역 분석에 의해 향후 한반도 유입 장거리 오염물질에 의한 대책수립의 기초자료로 활용할 수 있고, 장거리 유입 대기환경 평가 및 예측에 있어서 활용 가능하다.

#### 4. 결 론

본 연구는 한반도 유입 에어로졸 공간 발생 지역을 분석하기 위해서, 2016년 DRAGON-KORUS-AQ 캠페인 기간 동안 중 3월 31일부터 7월 1일까지 측정된 AOD 자료를 이용하였다. 우리나라 서해안에 위치한 5곳의 AERONET AOD와 지형 및 역궤적 분석을 통해, 서해상 대류권 내 공간격자 Potential Source Contribution Function-altitudinal (PSCFa)을 분석하였다. PSCFa (0~700 m)의 경우, 중국 렌윈강시 주변에서 높은 값을 나타냈고, PSCFa (700~1400 m)의 경우, 중국 내륙 내위도 (33°N~37°N) 및 경도 (115°E~120°E)의 광범위

한 영역에서 상대적으로 높은 PSCFa 값을 나타냈으며, PSCFa(1400~2100 m)의 경우, 위도(35°N) 및 경도(125°E)를 중심으로 한 서해안 대부분 영역에서 상대적으로 높은 PSCFa 값을 나타냈다. 인공위성 MODIS AOD와 비교한 결과, 고농도 AOD가 PSCFa(0~700 m)의 위도(33°N~35°N) 및 경도(120°E~124°E)의 범위와 일치하였다. 이는 발생한 일차 에어로졸과 중국 동쪽 해안을 거치면서 생성된 이차 에어로졸 및 중국 선박 배출에 의한 일차 오염물질이 혼재할 것으로 사료되며, 이에 따른 추가 연구를 진행할 예정이다. 본 연구는 기존의 수용 측정지점과 연계한 PSCF 모델에 고도를 고려하여 분석한 공간 PSCFa 모델로, 향후 장거리 유입 원인에 따른 국내 대기환경 평가 및 예측에 있어서 활용 가능할 것으로 본다.

## 감사의 글

본 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단(NRF-2015R1A2A1A10053971) 지원 및 목포대학교 공학교육혁신센터 공학교육혁신지원사업 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다. 본 연구를 위해 국내 AERONET 측정소에 기기 설치 및 관리 등 수고하신 연세대 대기과학과 연구원님들께 깊은 감사드립니다.

## References

- Bae, M.S., J.J. Schwab, W.N. Chen, C.Y. Lin, O.V. Rattigan, and K.L. Demerjian (2011) Identifying pollutant source directions using multiple analysis methods at a rural location in New York, *Atmospheric Environment*, 45(15), 2531-2540.
- Bae, M.S., J.S. Shin, K.Y. Lee, K.H. Lee, and Y.J. Kim (2014) Long-range transport of biomass burning emissions based on organic molecular markers and carbonaceous thermal distribution, *Science of the Total Environment*, 466, 56-66.
- Barreto, A., E. Cuevas, M.J. Granados-Munoz, L. Alados-Arboledas, P.M. Romero, J. Grobner, N. Kouremeti, A.F. Almansa, T. Stone, C. Toledano, R. Roman, M. Sorokin, B. Holben, M. Canini, and M. Yela (2016) The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer-a comprehensive performance evaluation, *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(2), 631-654.
- Bibi, H., K. Alam, F. Chishtie, S. Bibi, I. Shahid, and T. Blaschke (2015) Intercomparison of MODIS, MISR, OMI, and CALIPSO aerosol optical depth retrievals for four locations on the Indo-Gangetic plains and validation against AERONET data, *Atmospheric Environment*, 111, 113-126.
- Habib, G., C. Venkataraman, I. Chiapello, S. Ramachandran, O. Boucher, and M.S. Reddy (2006) Seasonal and interannual variability in absorbing aerosols over India derived from TOMS: relationship to regional meteorology and emissions, *Atmospheric Environment*, 40(11), 1909-1921.
- Holben, B.N., T. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J.P. Buis, A. Setzer, E. Vermote, J.A. Reagan, Y.J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenu, I. Jankowiak, and A. Smirnov (1998) AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16.
- Hua, S., H. Tian, K. Wang, C. Zhu, J. Gao, Y. Ma, Y. Xue, Y. Wang, S. Duan, and J. Zhou (2016) Atmospheric emission inventory of hazardous air pollutants from China's cement plants: Temporal trends, spatial variation characteristics and scenario projections, *Atmospheric Environment*, 128, 1-9.
- Jeong, J.H., Z.H. Shon, M.S. Kang, S.K. Song, Y.K. Kim, J.S. Park, and H.J. Kim (2017) Comparison of source apportionment of PM<sub>2.5</sub> using receptor models in the main hub port city of East Asia: Busan, *Atmospheric Environment*, 148, 115-127.
- Kabashnikov, V.P., A.P. Chaikovskiy, T.L. Kucsera, and N.S. Metelskaya (2011) Estimated accuracy of three common trajectory statistical methods, *Atmospheric Environment*, 45(31), 5425-5430.
- Kahn, R.A., B.J. Gaitley, M.J. Garay, D.J. Diner, T.F. Eck, A. Smirnov, and B.N. Holben (2010) Multiangle Imaging Spectroradiometer global aerosol product assessment by comparison with the Aerosol Robotic Network, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D23).
- Kim, B.G., Y.J. Kim, and S.H. Eun (2008) An analysis of aerosol optical properties around Korea using AERONET, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(6), 629-640. (in Korean with English abstract)
- Kim, K.C., D.S. Lee, K.Y. Lee, K.H. Lee, and Y.M. Noh

- (2016a) Estimation of Surface-Level PM<sub>2.5</sub> Concentration based on MODIS Aerosol Optical Depth Over Jeju, Korea, *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(5), 413-421. (in Korean with English abstract)
- Kim, M., J. Kim, U. Jeong, W. Kim, H. Hong, B. Holben, T.F. Eck, J.H. Lim, C.K. Song, S. Lee, and C.Y. Chung (2016b) Aerosol optical properties derived from the DRAGON-NE Asia campaign, and implications for a single-channel algorithm to retrieve aerosol optical depth in spring from Meteorological Imager (MI) on-board the Communication, Ocean, and Meteorological Satellite (COMS), *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(3), 1789-1808.
- Kim, S.W., I.J. Choi, S.C. Yoon, and Y.M. Kim (2013) Sensitivity of Aerosol Optical Parameters on the Atmospheric Radiative Heating Rate, *Atmosphere*, 23(1), 85-92. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.J. and Y.S. Son (2016) Spatial Variability of AERONET Aerosol Optical Properties and Satellite Data in South Korea during NASA DRAGON-Asia Campaign, *Environmental Science and Technology*, 50(7), 3954-3964.
- Lee, H.J., J.E. Kim, and Y.S. Chun (2013a) Aerosol Vertical Distribution Measured by LIDARs in Baengnyeongdo, Munsan, and Gusan during 10~11 May 2010, *Atmosphere*, 23(4), 519-526. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.H. (2013b) Three Dimensional Monitoring of the Asian Dust by the COMS/GOCI and CALIPSO Satellites Observation Data, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(2), 199-210. (in Korean with English abstract)
- Moody, J.L. and P.J. Samson (1989) The influence of atmospheric transport on precipitation chemistry at two sites in the midwestern United States, *Atmospheric Environment*, 23(10), 2117-2132.
- More, S., P.P. Kumar, P. Gupta, P.C.S. Devara, and G.R. Aher (2013) Comparison of aerosol products retrieved from AERONET, MICROTOPS and MODIS over a tropical urban city, Pune, India, *Aerosol and Air Quality Research*, 13(1), 107-121.
- Noh, Y.M., K.H. Lee, and H.L. Lee (2011) A retrieval of vertically-resolved Asian dust concentration from quartz channel measurements of Raman lidar, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(3), 326-336. (in Korean with English abstract)
- Omar, A.H., J.-G. Won, D.M. Winker, S.-C. Yoon, O. Dubovick, and M.P. McCormick (2005) Development of global aerosol models using cluster analysis of Aeronet Robotic Network (AERONET) measurements, *Journal of Geophysical Research: atmospheres*, 110, D10S14.
- Prospero, J.M., P. Ginoux, O. Torres, S.E. Nicholson, and T.E. Gill (2002) Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product, *Reviews of Geophysics*, 40(1), 2-1-2-31.
- Ramachandran, S. and S. Kedia (2013) Aerosol optical properties over South Asia from ground-based observations and remote sensing: a review, *Climate*, 1(3), 84-119.
- Ramachandran, S., S. Ghosh, A. Verma, and P.K. Panigrahi (2013) Multiscale periodicities in aerosol optical depth over India, *Environmental Research Letters*, 8(1), 014034.
- Shin, S.K., D.H. Shin, K.H. Lee, and Y.M. Noh (2012) Classification of dust/non-dust particle from the Asian dust plumes and retrieval of microphysical properties using Raman Lidar System, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 688-696. (in Korean with English abstract)
- Stein, A.F., R.R. Draxler, G.D. Rolph, B.J.B. Stunder, M.D. Cohen, and F. Ngan (2015) NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(12), 2059-2077.
- Stohl, A. (1996) Trajectory statistics-a new method to establish source-receptor relationships of air pollutants and its application to the transport of particulate sulfate in Europe, *Atmospheric Environment*, 30(4), 579-587.
- Tan, S.C., J. Li, H. Che, B. Chen, and H. Wang (2017) Transport of East Asian dust storms to the marginal seas of China and the southern North Pacific in spring 2010, *Atmospheric Environment*, 148, 316-328.
- Tao, M., L. Chen, R. Li, L. Wang, J. Wang, Z. Wang, G. Tang, and J. Tao (2016) Spatial oscillation of the particle pollution in eastern China during winter: Implications for regional air quality and climate, *Atmospheric Environment*, 144, 100-110.
- Weiss-Penzias, P.S., M.S. Gustin, and S.N. Lyman (2011) Sources of gaseous oxidized mercury and mercury dry deposition at two southeastern U.S. sites, *Atmospheric Environment*, 45(27), 4569-4579.

Zeng, Y. and P.K. Hopke (1989) A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada, *Atmospheric Environment*, 23(7), 1499-1509.

Zhou, L., P.K. Hopke, and W. Liu (2004) Comparison of two

trajectory based models for locating particle sources for two rural New York sites, *Atmospheric Environment*, 38(13), 1955-1963.