

## 서울지역 연무와 관련된 에어로졸의 광학 특성: 스카이래디오미터 및 위성관측연구

시호연<sup>1)</sup> · 이상삼<sup>2)</sup> · 전형욱<sup>3)</sup> · 송환진<sup>4)\*</sup> · 노영찬<sup>4)</sup> · 손병주<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>KAIST 물리학과, <sup>2)</sup>국립기상과학원 환경기상연구과, <sup>3)</sup>한국형수치예보모델개발 사업단,  
<sup>4)</sup>서울대학교 지구환경과학부

(접수일: 2016년 3월 6일, 수정일: 2016년 5월 11일, 게재확정일: 2016년 6월 3일)

### Optical Properties of Aerosols Related to Haze Events over Seoul Inferred from Skyradiometer and Satellite-Borne Measurements

Hoyeon Shi<sup>1)</sup>, Sang-Sam Lee<sup>2)</sup>, Hyuong-Wook Chun<sup>3)</sup>, Hwan-Jin Song<sup>4)\*</sup>,  
Young-Chan Noh<sup>4)</sup>, and Byung-Ju Sohn<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Physics, KAIST, Daejeon, Korea

<sup>2)</sup>National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

<sup>3)</sup>Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea

<sup>4)</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Korea

(Manuscript received 6 March 2016; revised 11 May 2016; accepted 3 June 2016)

**Abstract** Optical properties of aerosols associated with haze events over Seoul were examined using ground-based skyradiometer and satellite-borne CALIOP and MODIS measurements over the 2009~2010 period. It is shown that aerosol optical thickness (AOT), Ångström exponents ( $\alpha$ ), and fine-mode particles increase during the haze events. The CALIOP-measured vertical profiles of aerosol during the haze events revealed that most of aerosols are loaded within layers below 4 km altitude. A large portion of these events appear to be related to the long-range transport of aerosols from China; about 35% and 18% of the haze events observed over Seoul were traced back to northern China and southern China, respectively. Compared with optical properties for locally-induced haze events (25%), these long-range transported aerosols are found to have relatively higher AOTs.

**Key words:** Haze, Seoul, HYSPLIT, MODIS, aerosol optical thickness

## 1. 서 론

공기의 질은 건강과 직결된다. 대기 오염 정도를 낮추게 되면 뇌졸중, 심장마비, 폐암, 천식을 포함한 만성 혹은 급성 호흡기 질병을 줄일 수 있는 것으로 보고되고 있으며, 고농도 미세먼지에 노출되는 정도는

사망률과 밀접한 양적 관계를 가진다(WHO, 2014). 이렇게 건강에 위협적인 공기 중 부유하는 미세먼지로 인해 발생하는 기상현상이 연무(Haze)이다. 연무는 습도가 비교적 낮을 때 미세한 먼지 입자가 공기 중에 부유하여 공기의 색이 우유 빛으로 부영게 보이는 현상을 말한다. 즉, 연무가 발생했다는 것은 그 지역에 고농도의 미세먼지가 존재한다는 의미이다. 2008년부터 2015년까지 서울의 연무발생 일수를 살펴보면 한 해 최소 110일, 최대 157일, 평균 131일 정도로 100일 이상 연무가 꾸준히 발생하고 있다(http://www.kma.go.kr/weather/climate/past\_cal.jsp). 이러한 사

\*Corresponding Author: Hwan-Jin Song, 501-502A, School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea.  
Phone: +82-2-880-8166, Fax: +82-2-875-8166  
E-mail: hwanjinsong@gmail.com

실은 서울시민들이 한 해의 36% 정도로 연무에 빈번하게 노출되고 있음을 시사한다.

한반도 연무의 특성에 관한 선행연구들은 다수 있다. Chun and Lim (2004)은 서울에서 연무가 발생할 때 미세입자들의 수밀도가 증가한다는 사실을 보고했다. Song et al. (2015)은 안정한 대기 조건에서 오염물질이 쌓여 발생하는 정체성 연무와 외부에서 에어로졸이 유입되어 발생하는 장거리 수송 연무 사례들의 에어로졸 광학두께와 오스트롬 지수가 각각 0.38/1.38, 1.08/1.01로, 서울의 정체성 연무는 미세입자가 더욱 우세하고 장거리 수송 연무는 광학두께가 크게 나타나는 결과를 보여주었다. 이러한 연무는 황사와 비교하여 미세먼지 질량농도가 다소 낮은 것으로 알려져 있지만(Kim et al., 2014), 발생빈도는 10배 이상 빈번하며([http://www.kma.go.kr/weather/climate/past\\_cal.jsp](http://www.kma.go.kr/weather/climate/past_cal.jsp)), 인위적으로 발생하는 입자상, 기체상 오염물질 모두 매우 높게 나타나는 특징이 있기 때문에(Joo and Kim, 2011), 인체에 대한 위험성은 연무가 황사보다 높다고 할 수 있다.

Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT; Draxler and Rholph, 2003) 모델은 에어로졸의 유입경로를 역추적하여, 발생 기원별 에어로졸의 특성을 분석하기 위해서 널리 활용되고 있다. Park et al. (2004)은 역궤적 분석을 통하여 1992~2002년 동안 제주 고산지역을 통과한 공기궤적 중에서 51%는 중국 북부, 26%는 중국 남부로부터 발원하였고, 이렇게 중국으로부터 수송된 사례들이 인위적으로 생성된 에어로졸 성분들을 많이 포함하고 있음을 발견했다. Park et al. (2004)와 유사하게 발원지를 구분하고 서울지역 연무의 화학조성을 분석한 연구도 있었다(Kim et al., 2007a). 한편, Hyeon et al. (2014)은 사례분석을 통하여 중국으로부터 제주 고산지역에 에어로졸이 유입되었을 때 non-sea-salt-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 NO<sub>3</sub> 농도가 높게 측정되고, 특히 중국 남부를 통과하였을 경우 NO<sub>3</sub> 농도가 크게 상승하는 경향을 보였다. HYSPLIT 모델의 역궤적 분석에 더하여 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 위성에서 관측한 일 간격의 에어로졸 광학두께 자료를 이용하여 연무의 장거리 수송 패턴을 확인하려는 노력들도 있었다(Lee et al., 2006; Noh et al., 2009; Jung et al., 2010). 하지만 선행 연구들은 대체로 사례분석에 한정되어 한반도 주변에서 나타나는 연무 현상에 대한 일반적인 결론을 도출하지 못하고 있다.

이와 같이 수송된 에어로졸 특성은 공기궤적이 통과하는 지역과 관련이 있기 때문에 한반도의 연무는 중국으로부터의 수송되는 오염물질에 의해서 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있지만, 대도시의 경우 국지적인 오염원에 의한 영향도 무시할 수 없을 것을

판단된다. Jo and Kim (2011)은 한반도 상공 850 hPa 와도, 와도의 이동속도, 하층 대기안정도를 이용하여 장거리 수송 및 정체성 연무 사례를 구분하고, 서울과 부산 지역에 대하여 10 μm 이하 직경을 가지는 미세먼지의 농도(PM10)와 화학적인 성분 분석을 시도했다. 두 사례 모두 고농도의 PM10이 유지되는 가운데 장거리 수송 연무 사례는 중국 산업 활동의 영향으로 SO<sub>2</sub> 농도가 높았으며, 정체성 연무 사례는 국지적인 광화학 반응의 영향으로 O<sub>3</sub> 농도가 높았다. 후속 연구로 Jo and Kim (2013)에서는 연무 발생일을 기준으로 ±3일 동안의 HYSPLIT 모델 궤적을 이용하여 장거리 수송 및 정체성 연무를 구분했다. 두 연구에서는 서울에서 발생하는 연무 중 장거리 수송의 경우가 각각 35.5%, 23.1%를 차지한다고 분류했지만, 이러한 비율은 국지 영역의 크기 설정에 따라 가변적이다. 뿐만 아니라, 배출원(중국)과 수용지(한국)간의 정량 분석이 아니기 때문에 연무를 유발하는 미세먼지들이 어떤 지역으로부터 유입되었는지 확실하지 않은 부분이 있다.

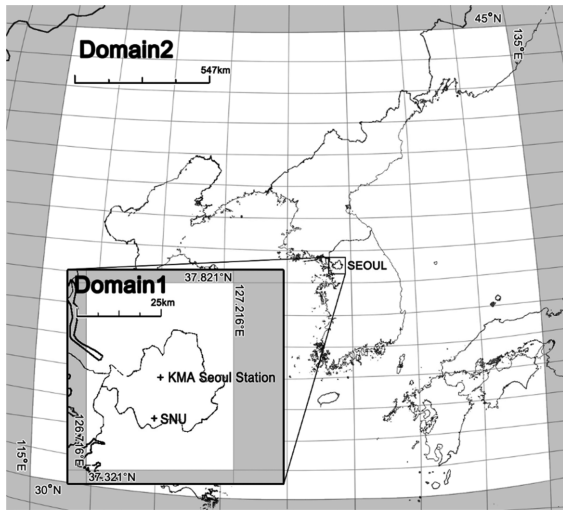
본 연구에서는 서울대학교에서 장기간 관측한 지상 관측자료와 한반도 주변 위성관측자료를 활용하여 서울지역 연무 발생시 서울 및 한반도 주변의 평균적인 에어로졸 광학 특성을 분석하고자 한다. 이때, 역궤적 분석을 통하여 장거리 수송 및 국지적 원인에 의한 연무 사례를 구분하고, 특히 장기간 위성관측의 합성자료로부터 장거리 수송 사례에 대하여 에어로졸의 시공간적인 이동 양상을 살펴볼 것이다. 이러한 시도는 과거에 부분적으로 수행되어온 선행연구들의 장점을 취하면서, 서울지역 연무의 발생 기원 및 수송 양상에 대한 일반적인 결론 도출을 목적으로 한다. 도출된 결론은 서울시민의 건강문제와 관련된 미세먼지 예보에 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

본 연구는 기상청 서울 표준기상관측소(Fig. 1. Korea Meteorological Administration Seoul Station)에서 발표하는 한 시간 간격의 날씨 발표자료를 기준으로 연무를 정의하였다. 기상청에서 발표하는 연무는 상대습도가 낮으면서 시정이 악화된 사례 중에서 시간적인 연속성을 고려하여 정의된다. 이때, 국립기상과학원 환경기상연구과의 내부기준에 근거하여 기상청 연무 발표의 기준이 2008년부터 변경되었기 때문에, 연구기간을 2008~2009년으로 정하였다.

### 2.1 Skyradiometer

서울에 발생하는 연무의 광학 특성 분석을 위하여 서울대학교(Fig. 1. Seoul National University)에서



**Fig. 1.** Ground observation sites and satellite observation domains: Seoul National University (SNU; 37.46°N, 126.949°E), Korean Meteorological Administration (KMA) Seoul station (37.571°N, 126.966°E), CALIPSO/CALIOP (Domain 1), and MODIS/Aqua (Domain 2).

2008년에서 2009년까지 관측한 skyradiometer(스카이라디오미터) 자료를 분석했다. 스카이라디오미터 POM01 장비는 태양을 추미하며 7개 파장(315, 400, 500, 675, 870, 940, 1020 nm)에서 직달 일사를 최소 30초, 산란 일사를 최소 3분 간격으로 관측을 수행한다. 본 연구에서는 Nakajima et al. (1996)에 의해 개발된 SKYRAD.pack (version 4.2)를 이용하여 직달 및 산란 태양복사 관측 값을 5개 파장(400, 500, 675, 870, 1020 nm)에서의 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Thickness, AOT)와 5개 파장에서의 로그-선형 근사를 통한 웅스트롬 지수(Ångström exponents,  $\alpha$ ), 에어로졸 부피크기분포(volume size distribution,  $dV/d\ln r$ ) 자료로 복원했으며, 사용된 자료의 간격은 최소 3분이다. 이후 Song et al. (2014)에서 개발된 방법을 이용하여 구름에 의해 영향을 받는 에어로졸 자료를 추가적으로 제거했다. 해당 방법은 서울에서 Khatri and Takamura (2009) 방법보다 우수한 성능을 보이는 것으로 알려져 있다.

기상청에서 발표한 1시간 간격의 연무자료를 토대로  $\pm 30$ 분 이내에 존재하는 스카이라디오미터 자료를 일치하여 연무의 광학 특성을 분석했다. 이때, 연무와의 대조를 위하여 기상청에서 1시간 간격으로 발표한 시정 및 전운량 자료를 이용하여 맑은 날을 정의하고(시정  $\geq 20$  km 및 전운량 = 0), 맑은 날의 광학 특성을 추가적으로 살펴보았다.

서울지역 연무의 광학 특성을 살펴보기 위하여 에

어로졸의 광학성질 중에 대표적으로 사용되는 500 nm 파장의 AOT,  $\alpha$ , 부피크기분포를 조사했다. 또한 SKYRAD.pack (version 4.2)은 식 (1)과 같이 log-scale의 20개 입자 반경에 대하여 에어로졸 부피비가 정규분포를 따르는 로그정규분포를 가정하여 부피크기분포를 산출하고 있다(Nakajima et al., 1996).

$$\frac{dV}{d\ln r} = \sum_{i=1}^{20} C_i \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln r - \ln r_i}{s_i}\right)^2\right] \quad (1)$$

$dV/d\ln r$ 은 에어로졸 반경에 대한 단위면적 공기기둥 안의 에어로졸 부피크기분포(단위:  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$ )를 나타내고 아래첨자는 각 모드의 번호를 나타내며,  $C_i$ 는 각 모드의 최대값을 나타내고,  $r_i$ 는 각 모드에서의 에어로졸의 평균 반경,  $r$ 은 에어로졸 입자의 반지름을 나타낸다. 그리고  $s_i$ 는 log-scale의 입자의 반지름에 대한 표준편차를 나타내며 각 모드의 폭과 관련된다. 동아시아에서 나타나는 에어로졸은 대체로 0.2  $\mu\text{m}$  주변의 미세모드(fine mode)와 2~5  $\mu\text{m}$  주변의 조대모드(coarse mode)로 구분되는 두 개의 주 봉우리를 가진다고 알려져 있다(Kim et al., 2004). 그래서 본 연구에서는 SKYRAD.pack에서 산출된 20개 입자 반경별 크기분포를 식 (2)에 적용하여 미세모드와 조대모드를 대표하는  $C_i$ ,  $r_i$ ,  $s_i$ 를 산출한 후, 80개 입자 반경별 크기분포로 재변환하여 분석에 사용했다.

$$\frac{dV}{d\ln r} = \sum_{i=1}^2 C_i \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln r - \ln r_i}{s_i}\right)^2\right] \quad (2)$$

## 2.2 CALIPSO/CALIOP

지상관측장비인 스카이라디오미터는 대기를 통과하는 동안 감쇄된 태양 복사량을 관측하는 수동 센서로 에어로졸의 연직구조에 대한 정보를 관측하지 못한다. 하지만 Light Detection and Ranging (LIDAR)와 같은 능동 센서는 에어로졸로부터 되돌아오는 레이저 신호를 이용하여 대기의 에어로졸 연직구조를 알 수 있으므로, 본 연구에서는 Cloud-Aerosol Lidar Path-finder Satellite Observations (CALIPSO) 위성에 탑재된 Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization (CALIOP) 관측자료에서 산출된 에어로졸 연직자료를 이용하여 서울지역 연무의 에어로졸 연직구조를 분석했다. CALIOP 센서 관측으로부터 복원한 에어로졸 광학두께는 지상관측대비 -0.029의 편차와 0.014의 오차(Schuster et al., 2012), MODIS 자료 대비 -0.044의 편차와 0.080의 오차(Kim et al., 2013)로 다소 큰 산출 불확실성을 보이는 것으로 알려져 있다. 하지만 정량적인 에어로졸 광학두께가 아니라 상대적인 연직분포에 대한 분석은 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

서울 상공을 지나는 CALIOP의 연직분포 자료를 본

석하기 위하여 기상청 서울 표준기상관측소(37.571°N, 126.966°E)를 중심으로  $\pm 0.25^\circ$ 인 정사각형 영역을 설정하고(Fig. 1. Domain 1), 기상청 연무 발표 시각을 기준으로  $\pm 90$ 분 범위 안에 CALIOP 관측자료가 존재하는 경우에 한하여 공간평균을 수행했다. 본 연구에서는 낮과 밤 자료를 모두 포함하여 분석을 실시했다.

### 2.3 HYSPLIT

에어로졸이 어떠한 경로로 한반도에 유입되었는지를 확인하기 위하여 기상청에서 발표한 1시간 간격 연무 사례들에 대하여 HYSPLIT 역궤적 분석을 수행했다. 기상청 지역모델인 3시간 간격 Regional Data Assimilation and Prediction System (RDAPS) 자료를 HYSPLIT 모델에 입력 자료로 넣고 역궤적 분석을 수행하였으며, 이때 대기 경계층을 고려하여 역궤적 시작고도는 500 m로 설정했다. Cheong and Lee (2006)도 500 m를 역궤적 분석에 대해서 가장 적절한 시간 고도 조건으로 조사한 바 있다. 본 연구는 서울지역 연무 발표 시각에 대해서 총 48시간의 역궤적 결과를 분석했다. 제주도 고산 지역에 대해서 5개로 영역을 나눈 Kim et al. (1998) 및 Park et al. (2004)와 서울에 대해서 4개로 영역을 나눈 Kim et al. (2007a)의 연구결과를 참조하고, 이전에는 고려하지 않았던 국지적 오염 기원(서울 부근)을 추가함으로써 영역을 1에서 6으로 구분했다. Region 1 (R1)은 만주 및 시베리아, Region 2 (R2)는 중국 북부, Region 3 (R3)는 중국 남부, Region 4 (R4)는 남해 및 동중국해, Region 5 (R5)는 동해로부터의 기원을 나타내고, Region 6 (R6)는 국지적인 발생을 나타낸다(Fig. 4). R6는 서울을 중심으로 한 반경 150 km의 원형 영역으로 설정했다. 48시간 동안의 궤적 중에서 가장 오랫동안 체류한 영역을 선택하는 방식으로 에어로졸의 기원을 분류하고 기원별 연무의 발생빈도를 조사했다. 예를 들어 2일 중에 1일 미만의 시간을 R1~R5 지역에서 체류했고 이후 1일 이상의 시간을 R6 지역에서 체류한 경우, R6 지역 기원으로 분류했다. HYSPLIT 모델을 이용한 역궤적 수행 과정 중에서 정해진 연직 영역 외의 고도로 공기 궤적이 위치할 때 계산을 멈추는 알고리즘으로 특성으로 인해서 전체 연무 사례 중에서 일부 사례에서는 역궤적이 계산되지 않았으나 그 비중은 그리 크지 않았다.

### 2.4 Aqua/MODIS

역궤적 분석으로부터 6가지의 연무 기원을 정하긴 했지만, 공기 덩어리가 닫혀있지 않기 때문에, 그 지역에서 기원한 에어로졸 성질이 언제나 그대로 보존되면서 서울에 도달하지는 않을 것이다. 예를 들어 에어로졸 농도가 낮은 지역을 통과한 공기 덩어리가 서

울에 도착하더라도 그 날의 서울에서 생성된 지역적인 에어로졸 양이 많아 연무가 발생할 수 있다. 그러므로 역궤적 분석과 함께 에어로졸 농도의 시공간적 발달 양상을 조사하기 위해서 2008년에서 2009년 동안 Aqua 위성의 MODIS 센서에서 관측한 550 nm AOT 자료(Level 2)를 분석했다. MODIS AOT 산출 알고리즘은 육지에서  $\pm(0.05 + 0.15 \times \text{AOT})$  해양에서  $\pm(0.03 + 0.05 \times \text{AOT})$ 의 오차를 가지는 것으로 알려져 있다(Remer et al., 2005). 수동 센서인 MODIS는 능동 센서인 CALIOP에 비하여 수평적으로 매우 넓은 AOT 공간분포를 관측할 수 있다는 큰 장점을 가진다. 하지만 MODIS 에어로졸 자료는 가시영역 파장을 이용하여 산출되기 때문에 태양이 없는 밤에는 산출되지 않으며, 연직 정보를 제공하지 않는다.

본 연구에서는 MODIS AOT 평균장 생성을 위하여 한반도 주변 영역(위도 30~45°N, 경도 115~135°E)을 설정했다(Fig. 1. Domain 2). 기상청에서 발표한 서울 지역 연무 발생시각을 전후로 90분 안에, Domain 2 영역을 지나가는 MODIS AOT 자료가 존재하는 경우, 평균장 생성에 사용했다. 그 후 10 km 해상도로 산출된 MODIS AOT 자료를  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$  해상도로 재격자화하여 평균장을 생성했다. 이렇게 생산한 AOT 평균장을 활용하여 우선 서울에 연무가 발생한 당일의 평균장을 연무가 발생하지 않은 맑은 날과 대조하여 AOT 공간분포를 분석했다. 뿐만 아니라, 48시간 역궤적 분석 결과를 활용하여 유입경로별 연무와 관련된 AOT 공간분포 특성을 분석함으로써 장거리 수송과 국지적 오염 기원간의 시공간적 발달 특성을 살펴보고자 했다.

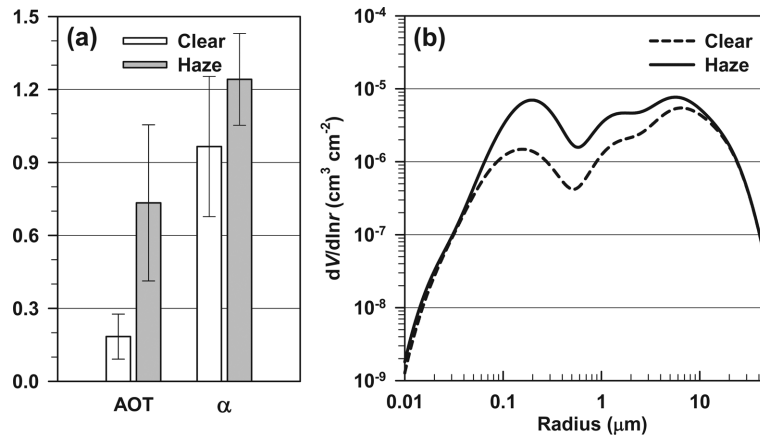
### 2.5 ERA-Interim

위성자료를 통해 생산된 AOT 평균장 분석을 보조하기 위하여 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)에서 제공하는 ERA-Interim 재분석자료(Dee et al., 2011)의 850 hPa 지오폠펜셜 고도와 바람장을 사용했다. 2008~2009년 기간 동안 서울 지역 연무 발표시각과 24시간 및 48시간 이전의 850 hPa 지오폐텐셜 고도와 바람장을  $1^\circ \times 1^\circ$  간격으로 평균하여, 기원별 연무의 시공간적 발달 양상을 이해하기 위한 보조자료로 활용했다.

## 3. 결 과

### 3.1 AOT, $\alpha$ , 부피크기분포

스카이라디오미터를 사용하여 2년 동안 관측한 서울지역 연무와 맑은 날에 대한 평균 AOT,  $\alpha$  값을 Fig. 2a에 나타내었다. 500 nm 파장에서의 AOT 값은 연무가 0.73, 맑은 날이 0.18로 연무 발생시의 AOT가 더



**Fig. 2.** Mean (a) Aerosol Optical Thickness (AOT) at 500 nm and Ångström exponents ( $\alpha$ ), and (b) bi-lognormal columnar volume size distribution ( $dV/d\ln r$ ) from skyradiometer measurements at the SNU site for the period of 2008–2009 under the clear (814 cases, 37 days) and haze (3739 cases, 149 days) conditions. Error bars in Fig. 2a denote standard deviations. The skyradiometer measurements were collocated with the clear and haze reports at the KMA Seoul station in the range of  $\pm 30$  minutes.

크고, 이것은 평상시보다 연무 발생시에 에어로졸의 양이 증가한 것으로 해석할 수 있다.  $\alpha$ 는 파장별 AOT 민감도를 의미하며 주로 에어로졸 평균 크기 정보를 제공하는 지수로 사용된다. Muhammad (1983)에 따르면 일반적으로 입자가 작은 경우 파장에 따라 에어로졸 광학두께가 민감하게 변하므로  $\alpha$  값이 증가하는 것으로 알려져 있다. Fig. 2a에서 연무일 때  $\alpha$ 가 1.24로 맑은 날(0.97)에 비하여 크게 관측되므로 연무는 평상시보다 미세모드의 비율이 높다는 것을 알 수 있다. 연무가 발생했을 때 AOT의 표준편차는 맑은 날에 비하여 크지만,  $\alpha$ 의 경우 연무의 표준편차가 더 작은 특징을 보인다. 즉, 연무가 발생하게 되면 에어로졸 농도는 사례별로 변동하지만 에어로졸 부피농도 내 미세모드가 차지하는 비율은 비교적 일정하게 높게 유지되는 특징을 보인다.

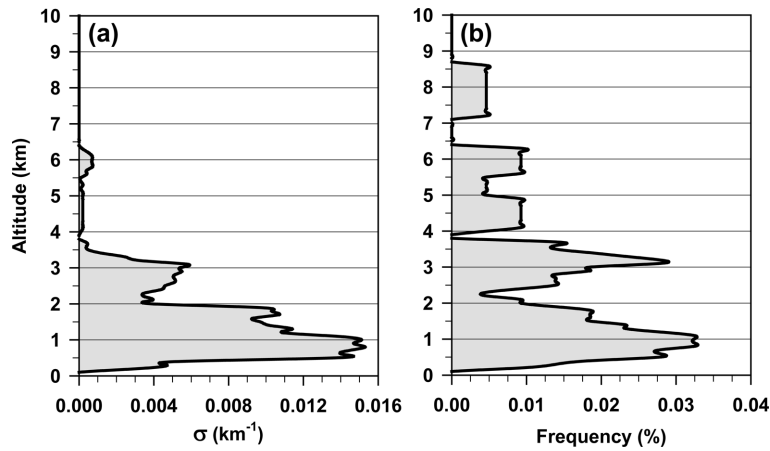
스카이라디오미터에서 생산되는 부피크기분포를 bi-lognormal 크기 분포로 분석한 결과를 Fig. 2b에 나타내었다. 연무의 경우 미세모드의 평균 최댓값( $C_1$ )이  $6.99 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ 으로 맑은 날의 미세모드 평균 최댓값  $1.48 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ 보다 약 5배 정도 높았다. 또한 Fig. 2b의 밑 넓이는 에어로졸의 총 양을 나타내는데, 연무가 맑은 날에 비하여 2배 정도 큰 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 2a에서 연무의 AOT는 맑은 날에 비하여 4배 정도 컸는데, 부피크기분포와 AOT의 이러한 차이는 Nakajima et al. (1996)에 의해 주어진 식 (3)에 의해서 설명될 수 있다. 식 (3)에서  $Q_{ext}(x)$ 는 미(Mie) 산란이론에서의 소산계수이고,  $x$ 는 크기 변수(size parameter)로  $2\pi r/\lambda$ ( $\lambda$ : 파장)이다.

$$AOT = \int \frac{3Q_{ext}(x, m)}{4r} \frac{dV}{d\ln r} d\ln r \quad (3)$$

반지름에 대한 소산계수는 파장과 에어로졸 굴절지수(refractive index,  $m$ )에 의존하므로 정해진 파장과 굴절지수에 대해서 같은 형태를 유지한다. 그러므로  $dV/d\ln r$  그래프의 형태가 같다면 AOT가 그래프 밑의 넓이, 다시 말해 에어로졸의 총 양에 비례한다는 것을 알 수 있다. 하지만 미 산란이론이 적용되는 영역에서는 대체로 에어로졸의 반지름이 작을수록 소산계수가 증가하는 경향이 있으므로 AOT는 미세모드의 비율이 높을수록 크게 측정된다는 것을 알 수 있다. 즉, 직경이 작은 에어로졸들이 시정을 더 쉽게 약화시킨다는 의미이다. 실제로 Fig. 2a의  $\alpha$ 와 Fig. 2b의  $dV/d\ln r$ 에서 연무가 맑은 날에 비하여 미세모드의 비율이 높은 것을 확인할 수 있으며, 이로 인하여 연무의  $dV/d\ln r$ 은 맑은 날에 비하여 2배 정도 컸지만, AOT는 약 4배가 된 것으로 판단된다.

### 3.2 에어로졸 연직 구조

CALIPSO/CALIOP 자료를 이용하여 얻은 연직에 따른 감쇄계수(attenuation coefficient,  $\sigma$ ) 분포를 Fig. 3a에 나타내었다. 감쇄계수는 빛이 통과할 때 세기가 감소하는 정도를 나타내는 지표로 연직방향 높이에 대해서 적분하게 되면 AOT가 된다. 감쇄계수가 높은 곳에서는 에어로졸의 양이 많다고 판단할 수 있다. Figure 3a에서 회색으로 표현된 영역의 넓이는 AOT를 나타낸다. 감쇄계수의 그래프에서 지표면에서 2.2

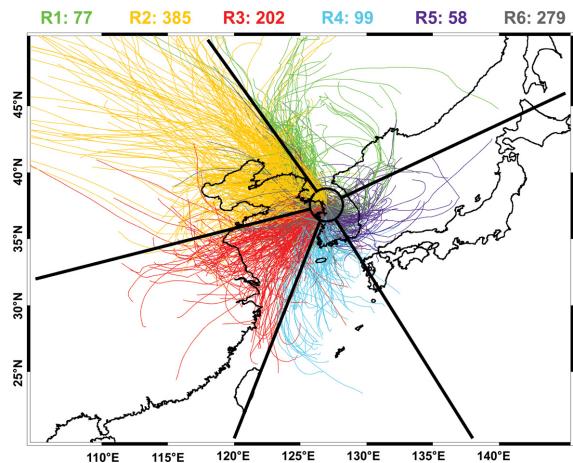


**Fig. 3.** Mean profile of (a) attenuation coefficient at 532 nm ( $\sigma$ ) and (b) occurrence frequency from CALIPSO/CALIOP measurements for haze events in Seoul (Domain 1). Total 112 profiles (10 days) were collected for the period of 2008~2009. The CALIOP measurements were collocated with the haze reports in the range of  $\pm 90$  minutes.

km까지(A층)와 2.2~3.8 km까지(B층)의 두 구간이 전체 AOT에 지배적인 기여를 하는 것으로 보인다. 고도에 따른 에어로졸의 빈도분포에서도 유사한 결과를 확인할 수 있다(Fig. 3b). 이로부터 대부분의 연무는 4 km 이하의 낮은 고도에서 발생한다는 것을 알 수 있다. 한편, Fig. 3b에서 발생빈도는 A층이 B층의 약 2배인 반면 Fig. 3a에서 A층의 AOT는 B층에 비하여 약 4배이다. 즉, 연무는 4 km 이하의 고도에서 주로 발생하지만, AOT에 영향을 주는 대부분의 에어로졸들은 약 2 km 이하에 집중되어 있다는 것을 알 수 있다. 서울 및 제주 고산 지역에서 지상 라디오미터 이용한 평균적인 에어로졸 연직분포 연구에서도 유사한 결과가 발견된다(Kim et al., 2007b). 이외에도 6 km 고도 부근에서 에어로졸 층이 일부 형성 되어있음을 확인할 수 있다(Fig. 3a). 정체성 연무가 고기압 영향 하에서 대기가 안정할 때 주로 발생한다는 사실로부터 미루어 볼 때, 6 km 부근의 에어로졸 층은 지표면 근처에서 상승된 것이 아니라 다른 지역에서 수송되어 형성된 것이라고 추론할 수 있다. 하지만 도심이나 산악지역에서 국지적인 상승기류에 의한 원인도 가능할 수 있다.

### 3.3 연무의 유입경로

서울에서 연무가 발생했을 때, 이틀간의 역궤적 분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. R1 지역은 중국대륙에서 인구밀도가 비교적 낮은 청정 영역, R2와 R3 지역은 인구가 밀집된 중국대륙의 오염 영역, R4와 R5 지역은 청정 해양 영역, R6 지역은 한반도 오염 영역을 대표한다. Ramana et al. (2010)은 R2 지역의 대표 도시인 북경은 Sulphate 농도 대비 Black carbon의 비



**Fig. 4.** Spatial distribution of 2-d backward trajectories based on haze reports in the KMA Seoul station. The HYSPLIT modeling using 3 hourly RDAPS meteorological fields was used to compute the backward trajectories. Starting altitude was set to 500 m. Each colored line/number indicates dominant source region and occurrence for haze events in Seoul, respectively (e.g., Region 6 (R6) expressed by the circle with radius of 150 km represent haze events originating from local source in Seoul). Total 1100 trajectories were analyzed for the period of 2008~2009.

율이 비교적 높으며, R3 지역의 대표도시인 상해는 Sulphate 농도가 매우 우세한 에어로졸 특성 차이를 보고했다. 뿐만 아니라 R2 지역은 비교적 건조한 영역으로 황사 발원지까지 포함하고 있지만 R3은 습윤한 환경을 나타내므로, 예상되는 에어로졸 특성 차이

**Table 1.** The number of haze source regions divided by seasons. The top 3 regions having the highest portion are highlighted.

	MAM	JJA	SON	DJF	%
<b>R1</b>	36	3	12	26	7.00
<b>R2</b>	145	37	71	132	35.00
<b>R3</b>	76	43	34	49	18.36
<b>R4</b>	42	32	17	8	9.00
<b>R5</b>	11	18	26	3	5.27
<b>R6</b>	62	90	102	25	25.36
<b>%</b>	33.82	20.27	23.82	22.09	

를 고려하여 중국 동부를 R2와 R3 지역으로 구분했다. 서울에 연무가 발생했을 때 유입된 공기는 중국 북부(R2, 35%)로부터 가장 빈번했으며, 국지적인 오염(R6, 25.36%)과 중국 남부(R3, 18.36%)로부터 기원한 경우가 그 다음으로 많았다. 다수의 공기체적들이 서쪽에서 동쪽방향으로 이동하고 있는데 이는 한반도가 편서풍 지역에 위치하고 있기 때문이다.

Table 1에 의하면 연무의 발생빈도는 계절적으로 큰 차이가 없지만 봄철에 가장 빈번하고(33.82%) 여름철에 가장 드물게 발생했는데(20.27%), Chun and Lim (2004)도 서울지역 연무의 발생 빈도에 대하여 비슷한 결과를 보고한 적 있다. 한편, Kim et al. (2007b)은 지상/위성 광학관측자료 분석을 통하여 봄철에 동아시아 전반적으로 에어로졸 광학두께가 최대가 됨을 보였다. 하지만 봄철의 경우 황사와 연무의 영향이 혼합되어 나타날 수 있다. R2와 R3 지역 기원의 연무들은 서풍계열이 강한 봄과 겨울철에 빈도수가 상승하는 경향이 있다. 흥미로운 점은 타 지역으로부터 수송된 연무들의 계절별 발생빈도와는 달리 국지적인 연무 사례(R6)가 가을 및 여름철에 주로 발생했다는 사실이다(Table 1). Kim et al. (2007b)은 제주 고산이나 광주 지역의 AOT가 장마철 직전인 6월에 최대가 되지만, 이후 7월과 8월에는 강수에 의한 세정효과로 에어로졸 양이 크게 감소하며, 가을까지 낮은 에어로졸 농도가 유지됨을 보였다. 그러므로 Table 1에 나타난 R6 지역 기원의 연무 발생빈도는 한반도의 평균적인 AOT 계절변화와 대조적이다. 가을철에 빈번하게 발생하는 국지적인 이동성 고기압과 장마철 직전에 나타나는 대기 정체 현상이 가을과 여름철에 R6 지역 기원의 연무 발생빈도를 증가시킬 수 있지만, 이후의 ERA-Interim 기상장 분석에서 자세한 논의를 하기로 한다.

서울지역에서 스카이라디오미터로 측정된 연무의 광학특성을 발생 기원별로 구분하여 Table 2에 나타내었다. 맑은 날에 비하여(참조: Fig. 2a) 연무의 AOT

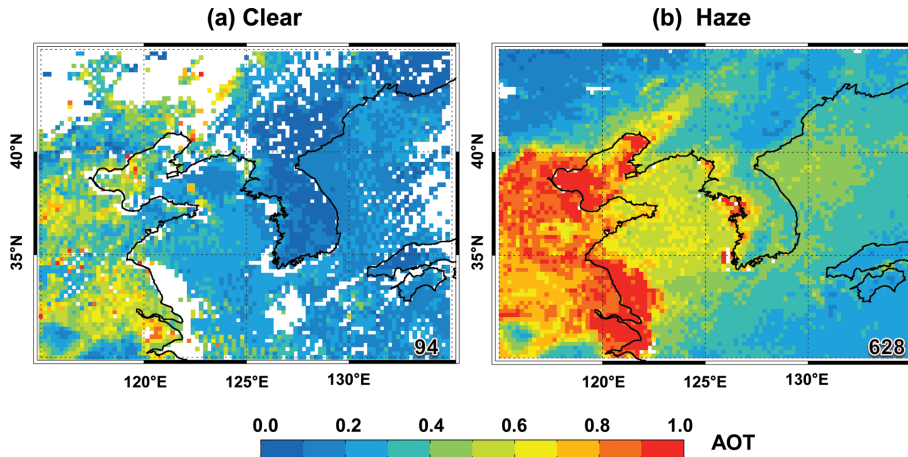
**Table 2.** Mean (a) Aerosol Optical Thickness (AOT) at 500 nm, Ångström exponents ( $\alpha$ ), and the volume size distribution ( $dV/d\ln r$ ) of fine mode divided by source regions.

	AOT	$\alpha$	$dV/d\ln r$ [ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$ ]
<b>R1</b> (217 cases)	0.72	1.16	$7.70 \times 10^{-6}$
<b>R2</b> (1178 cases)	0.63	1.31	$6.87 \times 10^{-6}$
<b>R3</b> (587 cases)	0.85	1.24	$8.78 \times 10^{-6}$
<b>R4</b> (96 cases)	0.90	1.09	$8.87 \times 10^{-6}$
<b>R5</b> (116 cases)	1.02	1.11	$11.60 \times 10^{-6}$
<b>R6</b> (1394 cases)	0.77	1.29	$8.38 \times 10^{-6}$

는 발생 기원에 따라 3~5배 정도 크며, 이때  $\alpha$ 가 크고 미세모드의  $dV/d\ln r$  농도가 높은 특징을 보였다. 흥미로운 점은 동해나 남쪽 해상에서 유입된 연무 사례들(R4, R5)이 중국 대륙으로부터 유입된 사례들(R1, R2, R3)에 비하여 드물게 발생하긴 하지만, AOT와 미세모드의  $dV/d\ln r$  농도가 평균적으로 높다는 사실이다. Figure 4에 표시된 궤적들의 평균 이동속도를 계산해보면 R4와 R5 지역 기원이  $9.2$ 와  $5.6 \text{ m s}^{-1}$ 로 R1, R2, R3 지역 기원의  $11.7$ ,  $10.1$ ,  $9.9 \text{ m s}^{-1}$ 보다 현저하게 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이러한 상황에서는 억제된 환기효과로 에어로졸이 축적되면서 고농도의 연무 현상이 나타날 수 있다. 특히 한반도 주변 편서풍에 역행하는 동풍을 동반한 R5 지역 기원 연무의 경우 가장 높은 에어로졸 농도를 보였다. 또 하나의 특징적인 부분은 R4와 R5 지역 기원 연무는 타 연무 사례들보다  $\alpha$ 가 비교적 작아 조대입자가 많다는 사실이다. 해양성 에어로졸의 주성분이 조대모드의 비율이 높은 해염입자임을 고려할 때, R4와 R5 지역 기원 사례들은 미세모드로 구성된 연무와 조대모드로 구성된 해염입자가 동시에 공존하는 특징을 보이는 것으로 판단된다. 해양성 기류가 대륙 기원보다 습하고, 수증기가 많은 환경에서 에어로졸 성장이 촉진된다는 Svenningsson et al. (1992)의 연구결과가 R4와 R5 지역 기원 연무들의 광학 특성과 연관될 가능성은 있다. 하지만 해양성 기류 유입에 의한 고농도 연무 사례들에 대해서는 향후에 더욱 세밀한 연구가 필요할 것이다.

### 3.4 맑은 날과 연무의 AOT 공간분포

Figure 5는 서울을 기준으로 맑은 날과 연무 발생일에 대하여 한반도 주변의 평균적인 AOT 분포를 보여준다. 맑은 날은 연무보다 상대적으로 발생 일수가 적기 때문에 흰색으로 표시된 것처럼 자료가 생성되지 못한 지역이 다수 존재한다(Fig. 5a). 서울이 맑았을 때 한반도는 대체로 0.1에서 0.2 정도의 AOT 값을 보인다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 중국 대



**Fig. 5.** Spatial distributions of mean AOT at 550 nm from Aqua/MODIS measurements for (a) clear and (b) haze cases in Seoul. The MODIS measurements were collocated with the clear and haze reports at the KMA Seoul station in the range of  $\pm 90$  minutes for the period of 2008–2009. The numbers of collected MODIS data are given on the right-lower corner of each figure.

륙에서는 대부분의 AOT가 0.6 이상의 값을 보이고 있으며, 0.8 이상인 곳도 적지 않게 있다. 반면, 서울에 연무가 발생했을 때, 서울 및 경기도 지역에서 큰 AOT가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있으며, 중국부터 서해와 동해까지 큰 AOT 영역이 연속적으로 넓게 분포하고 있다(Fig. 5b). 해안선을 따라 보이는 불연속적인 AOT 값들은 육지와 해양에 대하여 서로 다른 방법을 사용하는 MODIS 에어로졸 산출 알고리즘과 관련되는 것으로 판단된다(Remer et al., 2005). 하지만 맑은 날과 비교할 때 서울지역 연무 발생시 한반도 주변의 AOT가 전반적으로 커진다는 사실은 분명하며, 이것은 서울의 연무가 국지적으로 발생하는 현상이 아니라 중국 대륙으로부터 연결되어 광범위하게 나타나는 현상이라는 것을 의미한다. 특히 주목할 점은 중국 동부지역에서 발견되는 큰 AOT 영역이다. 중국 동부지역은 서울에 연무가 발생하지 않은 기간에도 큰 AOT 값을 가지고 있었지만, 서울에 연무가 발생한 기간에는 더욱 큰 AOT를 보이고 있다. 동아시아 지역이 편서풍대에 위치하고 있다는 점을 고려해볼 때, 중국 동부지역의 고농도 에어로졸은 풍하측에 위치한 한반도의 연무 발생에 지대한 영향을 미칠 수 있을 것이다.

### 3.5 기원별 연무 AOT 공간분포의 발달특성

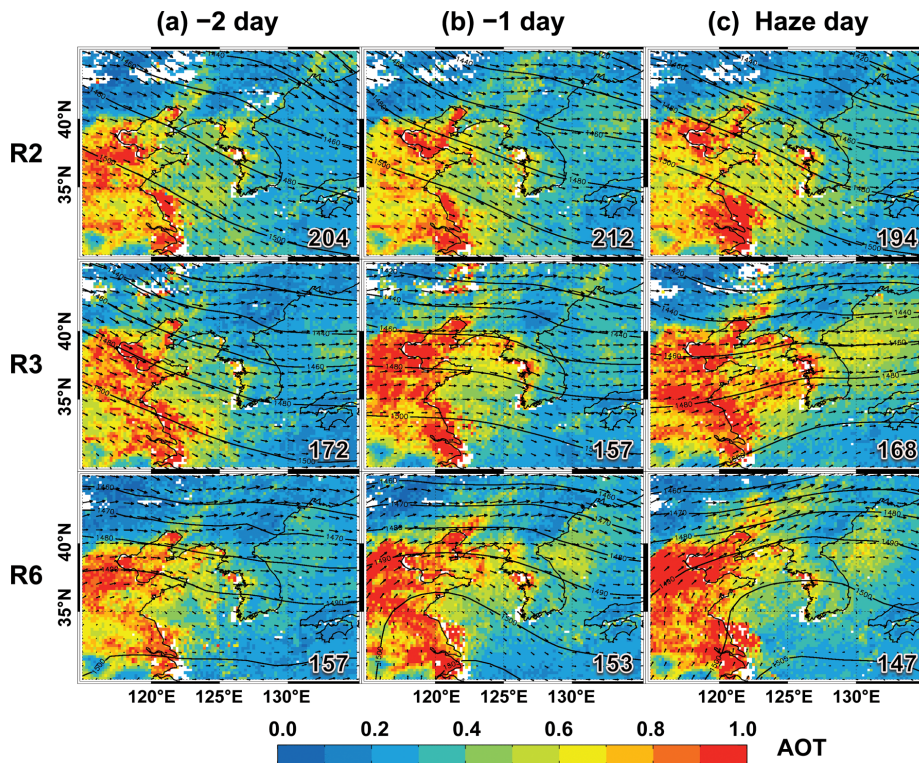
한반도 연무 발생은 중국 대륙으로부터의 장거리 수송에 의해 많은 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있지만, 서울은 세계적인 대도시이기 때문에 국지적인 오염 원인으로 인한 연무 발생도 적지 않을 것으로 짐작된다. 그러므로 MODIS AOT 공간분포 분석

을 발생 기원별로 세분화하여 살펴볼 필요가 있다. 서울에서 발생한 전체 연무의 78.7%를 차지하는 중국 북부(R2), 중국 남부(R3), 서울 부근(R6) 기원의 사례들에 대한 AOT 합성장 분석을 Fig. 6에 나타내었다. R2와 R3는 많은 오염물질을 배출하는 중국 동부지역을 포함하고 있어 중국으로부터 장거리 수송된 연무 사례를 의미하며, R6는 국지적인 오염원에 의한 연무 사례들이다. 에어로졸의 시공간적 발달 양상을 살펴보기 위하여 서울지역 연무발생일을 기준으로 -2일과 -1일에 대한 AOT 합성장 분석도 병행하였다(Figs. 6a-b). ERA-Interim의 850 hpa 지오폠펌셜 고도와 바람장 결과도 AOT 합 성장과 함께 나타냈다.

R2 지역에서 기원한 연무 사례들의 경우, 서해상에서 이들 동안 꾸준히 북서풍이 불고 있는 것을 확인할 수 있다. -2일에서 연무 발생일로 시간이 지남에 따라 서해상에서 0.5 이상의 큰 AOT를 가지는 영역이 남서쪽으로 확장하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 바람의 방향과 일치한다. 이러한 관측결과로부터 중국 북부로부터 북서풍을 타고 한반도로 에어로졸이 유입되고 있음을 확인할 수 있다. R2에서 기원한 연무들은 역궤적 분석에서 상대적으로 긴 거리를 빠르게 이동하는 특성을 보였는데(Fig. 4), 이러한 경우 비록 중국으로부터 발원한 고농도의 에어로졸이 한반도로 수송되더라도 그 과정에서 주변공기와 섞인다거나 하여 에어로졸 농도가 희석될 가능성이 있다.

R3 지역에서 발원한 연무 사례들의 경우 -2일의 바람장은 R2에서와 전반적으로 비슷하지만 시간이 경과할수록 남서풍 계열의 바람이 강해지는 특징을 보인다. 이로 인해 -1일부터 연무 발생일까지 중국 대





**Fig. 6.** 3-d composites of mean AOT at 550 nm fields from Aqua/MODIS measurements for haze cases in Seoul originating from Region 2 (R2), Region 3 (R3), and Region 6 (R6). The geopotential height (contours, with the unit of m) and horizontal winds (arrows) at the 850-hPa level from the ERA-Interim data are also presented as arrows. The length of 1° grid denotes the wind speed of 10 m s<sup>-1</sup>. The numbers of MODIS data collocated with haze reports at the KMA Seoul station are given on the right-lower corner of each figure.

륙의 급격한 AOT의 증가와 함께 남서풍을 타고 중국 남동부에서 한반도로 에어로졸이 수송되는 것을 확인할 수 있다. R3 지역 기원의 연무도 R2와 마찬가지로 시간이 경과함에 따른 서해상의 AOT 증가가 나타나는데, R2와는 대조적으로 0.9 이상의 AOT가 매우 넓은 영역에 걸쳐서 분포하고 있다. R3에서 기원한 연무들은 역궤적 분석에서 R2보다 상대적으로 짧은 거리를 느리게 이동하는 특성을 보였는데(Fig. 4), 이러한 특성으로 인하여 수송되는 과정에서 에어로졸의 농도가 비교적 온전하게 보존될 수 있다. 결과적으로 R3 지역에서 발원한 연무는 한반도 주변에 가장 큰 AOT 분포를 나타내어, 미세먼지 농도 관점에서 가장 위험한 사례이다.

R6의 경우에도 중국에서의 고농도 에어로졸이 서해상과 같이 고기압의 주변부로 장거리 수송되는 양상이 보이지만, AOT의 공간적 불연속이나 수평 바람 특징으로부터 판단할 때 서울 지역과는 큰 관련이 없는 것으로 판단된다. 즉, R6 사례는 중국으로부터의

장거리 수송보다는 국지적인 오염원에 의해서 생성된 연무로 판단된다. R6 지역에서 국지적으로 생성된 연무 사례들은 연무 발생일에 서울 부근의 수평 바람 세기가 R2와 R3에 비하여 매우 작다는 특징이 있다. 뿐만 아니라 R6 지역의 경우 시간이 경과함에 따라 남서쪽에서 한반도 쪽으로 고기압이 이동하는 모습을 확인할 수 있다. 고기압이 다가옴에 따라 한반도에 전체적으로 AOT가 커지는 특징을 보인다. 따라서 이동성 고기압의 영향으로 대기가 안정한 상황에서 배출된 오염물질이 낮은 환기효과로 국지적으로 쌓이게 되면서 고농도의 연무 현상이 나타나게 된 것으로 판단된다. Jo and Kim (2010)도 850 hPa 지오폠펜설 고도 분석을 통해 정체성 연무에 대한 정체성 고기압의 영향을 확인한 바 있다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기상청 서울 표준기상관측소 연무

발표자료를 기준으로 한반도 주변에서 빈번하게 발생하는 연무의 평균적인 광학특성을 지상 및 위성 관측 자료를 활용하여 분석했다. 스카이라디오미터 관측 결과, 서울에 연무가 발생하였을 때 AOT와  $\alpha$ 의 평균 값은 각각 0.73, 1.24로 맑은 경우와 비교하여 큰 에어로졸 광학두께와 작은 입경을 갖는 것으로 판단된다. 부피크기분포에서도 연무 발생일에 미세모드 에어로졸의 농도가 높게 관측되는 특징을 보였다. CALIOP 관측자료를 이용하여 얻은 감쇄계수와 빈도 연직분포 분석에서 연무 발생시 에어로졸은 주로 약 4 km 이하의 낮은 고도에 주로 집중되어 있음을 확인했다.

연무관련 에어로졸의 유입경로를 파악하기 위해서 HYSPLIT 모델을 이용한 역궤적 분석을 수행했으며, 서울에서 연무가 발생했을 때 유입된 공기체적은 중국 북부(R2, 35%), 국지적인 오염(R6, 25.36%), 중국 남부(R3, 18.36%) 순으로 빈번했다. 계절별로 보면 연무는 봄, 가을, 겨울, 여름 순으로 빈번하게 발생했다. R2와 R3는 봄과 겨울철에 빈도수가 높은 반면, R6는 가을과 여름철에 가장 빈번하게 발생했다.

MODIS 자료를 활용하여 서울에 연무가 발생하였을 때 평균적인 AOT 공간분포를 분석한 결과, 맑은 날보다 전반적으로 AOT가 크게 측정되어 연무는 광범위하게 발생하는 현상임을 확인할 수 있었다. 특히 중국 대륙의 AOT는 서울에 연무가 발생한 기간에 더 큰 값을 보이고 있어 풍하측에 존재하는 한반도에 많은 영향을 미친 것으로 판단된다. 하지만 중국으로부터 장거리 수송 뿐만 아니라 서울 부근의 국지적인 오염원에 의해서 생성된 연무 사례들도 있기 때문에 HYSPLIT 모델 역궤적 분석 결과를 이용하여 서울지역 연무 사례의 기원을 중국 북부(R2), 중국 남부(R3), 서울 부근(R6)으로 구분하고 이들 동안의 합성장 분석을 통하여 AOT와 850 hPa 기상장의 공간분포를 조사했다. 중국대륙으로부터 장거리 수송된 연무 사례(R2와 R3)는 국지적으로 발달한 연무 사례(R6)에 비하여 한반도 부근 AOT가 평균적으로 컸으며, 이것은 중국으로부터 수송된 오염물질의 위험성을 시사했다. R2 지역에서 기원한 연무의 경우 중국 북부로부터 북서풍을 타고 에어로졸이 수송되는 특징을 보였다. R3 지역에서 발원한 연무 사례들은 R2와는 달리 하루 전에 중국 대륙의 급격한 AOT 증가와 더불어 서해상의 AOT도 급격하게 증가하는 특징을 보이는데, 이후에 고농도의 에어로졸이 남서풍을 타고 수송되는 과정에서 서울 지역에 연무가 발생했다. 특히, R3 지역에서 기원한 연무는 한반도 주변에서 가장 큰 AOT를 보였는데, R2보다 느린 R3의 공기체적 이동이 에어로졸 성장에 유리하게 작용하였기 때문이라 판단되었다. R6 지역에서 생성된 연무는 이동성 고기압의 영향으로 대기가 안정한 상황에서 에어로졸이 국지적

으로 쌓이게 되면서 발생하는 것으로 판단되었다.

결론적으로 본 연구는 장기간의 역궤적 분석을 통한 발생기원 구분 및 일간격의 AOT 공간분포 합성을 통하여 중국으로부터 장거리 수송 및 서울 부근에서 국지적으로 발원한 연무사례들의 평균적인 특성을 조사했다. 도출된 결론은 최근 관심이 증폭되고 있는 한반도 미세먼지 예보에 중요한 기초자료가 될 것으로 판단된다. 하지만 본 연구는 임의로 구분한 발생기원(R1~R6)으로 파생된 소결론이며, 향후에는 보다 객관적인 영역 구분 방법이 필요하다. 뿐만 아니라 연속적인 관측이 가능한 정지궤도 위성을 통한 에어로졸 감시 능력 확대(예: 야간 AOT, 에어로졸의 크기 및 성질 산출) 및 이를 이용한 활용연구가 선행된다면 미세먼지 예보 향상에 보다 직접적으로 기여할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 국립기상과학원 주요사업 ‘기상업무지원 기술개발연구(NIMS-2016-3100)’와 한국연구재단 ‘일반연구자지원사업(NRF-2013R1A1A2011747)’의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Cheong, J.-P., and S.-J. Lee, 2006, Spatial distribution characterization of the potential sources at background area. *Korean Society of Environmental Engineers Fall Meeting*, Gangneung, 2~3 Nov. 2006, 508-513.
- Chun, Y., and J.-Y. Lim, 2004: The recent characteristics of Asian dust and haze events in Seoul, Korea. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **87**, 143-152.
- Dee, D. P., and Coauthors, 2011: The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **137**, 553-597.
- Draxler, R. R., and G. D. Rolph, 2003: *HYSPLIT-Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory Model*. [Available online at <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>].
- Hyeon, D.-R., J.-M. Song, K.-J. Kim, W.-H. Kim, C.-H. Kang, and H.-J. Ko, 2014: Compositions of haze aerosols and their variation by inflow pathway of air mass at Gosan site in Jeju Island during 2012~2013. *Anal. Sci. Technol.*, **27**, 213-222.
- Jo, H.-Y., and C.-H. Kim, 2010: Characteristics of East Asia synoptic meteorological conditions in association with haze phenomena. *Atmosphere*, **20**, 161-172.

- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2011: Characteristics of air quality over Korean urban area due to the long-range transport haze events. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **27**, 73-86.
- \_\_\_\_\_, and \_\_\_\_\_, 2013: Identification of long-range transported haze phenomena and their meteorological features over northeast Asia. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **52**, 1318-1328.
- Jung, J., Y. J. Kim, K. Y. Lee, M. G. Cayetano, T. Batmunkh, J.-H. Koo, and J. Kim, 2010: Spectral optical properties of long-range transport Asian dust and pollution aerosols over Northeast Asia in 1997 and 2008. *Atmos. Chem. Phys.*, **10**, 5391-5408.
- Khatri, P., and T. Takamura, 2009: An algorithm to screen cloud-affected data for sky radiometer data analysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **87**, 189-204.
- Kim, D.-H., B. J. Sohn, T. Nakajima, T. Takamura, T. Takemura, B.-C. Choi, and S.-C. Yoon, 2004: Aerosol optical properties over East Asia determined from ground-based sky radiation measurements. *J. Geophys. Res.*, **109**, D02209, doi:10.1029/2003JD003387.
- Kim, H.-S., J.-B. Huh, P. K. Hopke, T. M. Holsen, and S.-M. Yi, 2007a: Characteristics of the major chemical constituents of PM<sub>2.5</sub> and smog events in Seoul, Korea in 2003 and 2004. *Atmos. Environ.*, **41**, 6762-6770.
- Kim, K.-J., S.-H. Lee, D.-R. Hyeon, H.-J. Ko, W.-H. Kim, and C.-H. Kang, 2014: Composition comparison of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> fine particulate matter for Asian dust and haze events of 2010-2011 at Gosan site in Jeju Island. *Anal. Sci. Technol.*, **27**, 1-10.
- Kim, M.-H., S.-W. Kim, S.-C. Yoon, and A. H. Omar, 2013: Comparison of aerosol optical depth between CALIOP and MODIS-Aqua for CALIOP aerosol subtypes over the ocean. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 13241-13252.
- Kim, S.-W., S.-C. Yoon, J. Kim, and S.-Y. Kim, 2007b: Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET sun/sky radiometer measurements. *Atmos. Environ.*, **41**, 1634-1651.
- Kim, Y. P., S.-G. Shim, and K. C. Moon, 1998: Monitoring of air pollutants at Kosan, Cheju Island, Korea, during March-April 1994. *J. Appl. Meteor.*, **37**, 1117-1126.
- Lee, K. H., Y. J. Kim, and M. J. Kim, 2006: Characteristics of aerosol observed during two severe haze events over Korea in June and October 2004. *Atmos. Environ.*, **40**, 5146-5155.
- Muhammad, I., 1983: An introduction to solar radiation. *Academic Press*, 390 pp.
- Nakajima, T., G. Tonna, R. Rao, P. Boi, Y. Kaufman, and B. Holben, 1996: Use of sky brightness measurements from ground for remote sensing of particulate polydispersions. *Appl. Optics*, **35**, 2672-2686.
- Noh, Y. M., D. Müller, 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. *Atmos. Environ.*, **43**, 879-888.
- Park, M. H., Y. P. Kim, C.-H. Kang, and S.-G. Shim, 2004: Aerosol composition change between 1992 and 2002 at Gosan, Korea. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S13, doi:10.1029/2003JD004110.
- Ramana, M. V., V. Ramanathan, Y. Feng, S. C. Yoon, S. W. Kim, G. R. Carmichael, and J. J. Schauer, 2010: Warming influenced by the ratio of black carbon to sulphate and the black-carbon source. *Nat. Geosci.*, **3**, 542-545.
- Remer, L. A., and Coauthors, 2005: The MODIS algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 947-973.
- Schuster, G. L., M. Vaughan, D. MacDonnell, W. Su, D. Winker, O. Dubovik, T. Lapyonok, and C. Trepte, 2012: Comparison of CALIPSO aerosol optical depth retrievals to AERONET measurements, and a climatology for the LIDAR ratio of dust. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 7431-7452.
- Song, H.-J., B. J. Sohn, H.-W. Chun, Y. Chun, and S.-S. Lee, 2014: Improved cloud screening method for the analysis of sky radiometer measurements and application to Asian dust Detection. *J. Meteor. Soc. Japan*, **92**, 167-183.
- Song, S., J. E. Kim, E. Lim, J.-W. Cha, and J. Kim, 2015: Physical, chemical, and optical properties of an Asian dust and haze episodes observed at Seoul in 2010. *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, **31**, 131-142.
- Svenningsson, I. B., H.-C. Hansson, A. Wiedensohler, J. A. Ogren, K. J. Noone, and A. Hallberg, 1992: Hygroscopic growth of aerosol particles in the Po Valley. *Tellus B*, **44**, 556-569.
- World Health Organization (WHO), 2014: Ambient (outdoor) air quality and health. *Fact Sheet No. 313*. [Available online at <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>].