

한반도 겨울철 공기이동경로에 따른 에어로졸 농도의 연직분포 특성

고아름^{1)*} · 김진원²⁾ · 장기호³⁾ · 차주완¹⁾ · 이상민⁴⁾ · 하종철¹⁾

¹⁾국립기상과학원 응용기상연구과, ²⁾국립기상과학원 기후연구과,
³⁾기상청 레이더센터, ⁴⁾국립기상과학원 지구시스템연구과

(접수일: 2019년 7월 2일, 수정일: 2019년 8월 30일, 게재확정일: 2019년 9월 19일)

Characteristics of Vertical Profiles of Local Aerosol Mass Concentration According to Air Mass Pathways over the Korean Peninsula During Winter

A-Reum Ko^{1)*}, Jinwon Kim²⁾, Ki-Ho Chang³⁾, Joo-Wan Cha¹⁾, Sang-Min Lee⁴⁾, and Jong-Cheol Ha¹⁾

¹⁾Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Climate Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

³⁾Radar Planning Team, Weather Radar Center, Seoul, Korea

⁴⁾Earth System Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

(Manuscript received 2 July 2019; revised 30 August 2019; accepted 19 September 2019)

Abstract Vertical distributions of aerosol mass concentrations over Seoul and Gangneung from January to February 2015 were investigated using aerosol Mie-scattering lidars. Vertical mass concentration of aerosol was calculated from the lidar data using KALION's algorithm and quantitatively compared with ground PM₁₀ concentration to obtain objectivity of data. The backward trajectories calculated using HYSPLIT (version 4) were clustered into 5 traces for Seoul and 6 traces for Gangneung, and the observed aerosol vertical mass distribution was analyzed for individual trajectories. Result from the analysis shows that, aerosol concentrations with in the planetary boundary layer were highest when airflows into the measurement points originated in the Shandong Peninsula or the Inner Mongolia. In addition, the difference of aerosol mass concentrations in the two regions below 1 km was about twice as large as that in the long range transport from the Shandong Peninsula compared to the local emission. This result shows that the air quality over Korea related to particulate matters are affected more by aerosol emissions in the upstream source regions and the associated transboundary transports than local emissions. This study also suggests that the use of local aerosol observations is critical for accurate simulations of aerosol-cloud interactions.

Key words: Particulate matter, vertical aerosol mass concentration, lidar, air mass trajectory

1. 서 론

최근 한반도 지역 에어로졸에 의한 대기오염현상은 사회·경제 및 보건적으로 심각한 문제로 대두되고 있

다. OECD (Organization for Economic Cooperation and Development)의 '대기오염의 경제적 결과(The economic consequences of outdoor air pollution)' 보고서에 따르면, 2060년 대기오염으로 인한 조기 사망자 수가 가장 크게 증가할 나라로, 1백만명당 1,109명으로 OECD 국가 중 한국이 가장 높을 것으로 전망했다(OECD, 2016). WHO 산하의 국제암연구소(IARC, World Health Organization/International Agency for Research on Cancer)는 대기오염을 일으키는 물질 중

*Corresponding Author: A-Reum Ko, Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Sciences, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6789, Fax: +82-64-738-6515
E-mail: kar511@korea.kr

미세먼지(PM₁₀, Particulate Matter, < 10 μm)는 인간에게 암을 일으키는 것으로 확인된 1군 발암물질로, 농도와 성분이 동일하다면 입자크기가 더 작을수록 건강에 해로운 것으로 발표 한 바 있다(IARC, 2016).

한반도 미세먼지 농도는 계절별로 변동성이 크다 (Ministry of Environment, 2016). 봄철은 중국 북부 및 몽골 사막지대와 황토고원에서 발원한 황사에 의해 평균 미세먼지 농도가 높다. 반면 여름철은 장마와 태풍 등 연 강수량의 약 60% 이상의 강수가 집중되어 대기 중 존재하는 오염물질이 제거되기 때문에 상대적으로 미세먼지 농도가 낮다. 가을철에는 다른 계절에 비해 기압계의 흐름이 빠르고 대기 순환이 원활하여 미세먼지 농도가 낮다. 그러나 겨울철은 강수량이 적고 고기압에 의한 하강기류가 지속되어 지표 부근에 존재하는 미세먼지의 양이 많아진다. 특히 화력발전, 난방 등 화석연료의 사용이 증가하면서 봄철에 비해 입자 크기가 작은 초미세먼지의 비중이 증가한다. 또한 겨울철 주 풍인 북서풍에 의해 중국에서 발생한 미세먼지가 함께 유입되어 다른 계절에 비해 고농도 미세먼지 발생 가능성이 높다.

이렇게 한반도에서 발생하거나 한반도로 유입되는 미세먼지의 발생률 증가에 따른 대기오염이 심각한 사회문제로 대두됨에 따라 국내에서 자체 생산되는 미세먼지뿐만 아니라 국외에서 유입되는 미세먼지에 대한 명확한 분석이 필요하다. 이러한 분석을 위해서 발생기원에 따른 에어로졸의 수평 및 연직 관측이 필수적이며 현재까지는 항공, 위성 및 지상 원격관측에 의해 자료 확보가 가능하다. 항공관측의 경우 직접 관측이 가능하다는 이점이 있지만 상대적으로 비용이 많이 들어 지속성이 떨어진다. 또한, 한반도 상공은 다수의 비행 제한구역으로 지정되어 시·공간적 연직 구조 파악에 어려움이 있다. 한편, 위성관측은 수평적으로 매우 넓은 공간의 에어로졸 특성(예, Aerosol Optical Thickness, AOT)을 관측할 수 있다. 한 예로 미국항공우주국 지구관측프로그램(Earth Observation System, EOS)의 구성체인 Terra/Aqua 위성에 탑재된 MODIS (Moderate-resolution imaging spectroradiometer) 센서는 약 2,330 km의 관측 폭(swath)으로 0.25 km, 0.5 km, 1 km의 공간해상도와 약 100분의 공전주기로 동일한 지역을 약 16일 주기로 관측한다. 이로부터 산출되는 에어로졸 자료는 전 세계 200여 지점의 에어로졸 관측망(Aerosol Robotic Network, AERONET)을 통해 정확도 비교가 이루어짐에 따라 현재 많은 연구자들에 의해 대표적 에어로졸 위성 관측 자료로 활용되고 있다(Holben et al., 1998; Remer et al., 2005; Wang et al., 2017). 하지만 동일한 지역에 16일 주기로 2차원의 평면정보만을 제공하기 때문에 연속적 관측이 어렵고 대기 중에 복잡하게 존재하는 에어로졸

의 연직분포 특성을 알 수 없다. 지상 원격관측장비로 많이 활용되는 썬 포터미터와 스카이라디오미터는 대기를 통과하는 동안 감쇄된 태양복사량을 관측하는 수동센서로 에어로졸 광학두께(AOT)에 대한 정보는 알 수 있으나 에어로졸 연직 분포에 대한 정보는 알 수 없다. 반면에 라이더는 직접 레이저를 쏘아 대기 중의 에어로졸에 의해 감쇄되어 온 신호를 관측하는 능동센서로 높은 연직 관측 해상도로 연속적 관측이 가능하여 다수의 연구에 활용되고 있다(e.g., Shimizu et al., 2004; Sugimoto and Huang, 2014). 또한, 라이더를 통해 산출한 에어로졸의 연직 농도 분포는 항공 및 지상관측 자료와의 비교에서 일치된 분포를 보여 라이더 자료의 유의성이 검증된 바 있다(Sakai et al., 2013; Kim et al., 2015). 국내에서는 2015년에 학·연·관 9개 기관이 개별적으로 운영되는 10대의 라이더를 통합해 고농도 미세먼지 또는 황사의 실시간 모니터링 및 자료공유의 목적으로 ‘한반도 에어로졸 라이더 관측 네트워크(KALION, Korea Aerosol Lidar Observation Network, <http://www.kalion.kr>)’를 구축하여 운영하고 있어 라이더의 활용성은 더 높아졌다(Yeo et al., 2016).

한편, 오염원 추적을 위해 보편적으로 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델이 사용된다. 이 모델은 NOAA/ARL (National Oceanic and Atmospheric Administration/Air Resources Laboratory)에서 개발한 라그랑지안 모델로 오염원 소스로부터 공기이동을 추적하는 데 적합하다. 초기버전은 레윈존데 관측 값을 이용해 계산되는 방식(Draxler and Taylor, 1982)에서 수치모델 결과로부터 그리드 된 기상자료(HYSPLIT_3버전에서 대체됨)로 퍼프 또는 입자접근법을 사용해 복잡하게 흩어지거나 침적(deposition)되는 모의결과로부터 간단한 궤적을 계산하는 방식으로 업그레이드 되었다(HYSPLIT_4, Draxler and Hess, 1997).

HYSPLIT_4모델을 이용한 연구로 Park et al. (2012)은 2000~2010년 동안 서울과 인천의 대기오염이 심한 날의 오염원을 외부유입과 국내 자체 생산된 에어로졸로 구분하여 종관기상 변수(850 hPa 와도와 지균풍속, 850 hPa 종관 일기도) 및 대기오염모델(MM5-CMAQ)링을 통해 비교 분석하였다. Jeong et al. (2015)은 공기 이동경로에 따른 서울의 지상 대기오염물질 샘플링(e.g., PM₁₀, PM_{2.5}, BC, EC, OC) 결과를 제시하였고, Shi et al. (2016)은 스카이라디오미터(Sky-radiometer) 및 위성(CALIPSO/CALIOP)을 통해 임의로 구분한 6개의 에어로졸 발생지에 따른 서울지역 연무사례의 평균적인 에어로졸 광학특성(e.g., Aerosol optical thickness, Angstrom exponents, and Vertical profiles of aerosol)을 분석하였다. 그러나, 앞의 선행 연구들은 관측자료를 이용한 모델결과 검증, 지상 샘플

플링만을 이용한 연직 분포 특성 부재, 에어로졸 발생지의 객관적인 분류가 수행되지 않았다. 또한, 서울과 수도권 지역에 국한되어 분석이 수행됨에 따라 자체적으로 생산된 에어로졸인지 외부로부터 발생한 에어로졸이 유입된 것인지 구분하기 어려울 뿐만 아니라, 한반도를 통과하면서 변하는 에어로졸 양을 확인하기 어렵다.

따라서 본 연구는 고농도 미세먼지 발생이 빈번한 겨울철(1~2월) 동안 한반도 서쪽과 동쪽에 위치한 서울과 강릉 지점에 대해 라이다 관측자료와 HYSPLIT 4를 이용한 공기궤적의 기원별 연직 에어로졸 분포의 상세한 분석을 수행하였다. 본 연구의 구성은 제 2장에서 분석지점의 위치 및 지형분포, KALION 알고리즘을 이용한 라이다 연직 에어로졸 질량농도 산출방법, HYSPLIT 4 모델을 이용한 에어로졸 발생기원 분류 방법에 대해 기술하였다. 제 3장에서는 에어로졸 연직 질량농도 산출에 사용된 변수와 최종 산출한 에어로졸 질량농도 검증결과를 제시하고, 공기이동의 기원에 따른 연직 에어로졸 농도 특징을 분석하였다.

2. 자료 및 분석방법

서울과 강릉의 위치와 두 지역간의 연직 지형 단면을 Fig. 1에 나타내었다. 두 지역은 약 37.6°N의 비슷한 위도 대로 편서풍 지대에 위치하고 있어 서울은 중국의 가까운 풍하측, 강릉은 먼 풍하측에 해당된다. 서울에서 강릉까지 직선거리는 약 170 km이고, 두 지역 사이에 위치한 태백산맥(해발고도 약 1 km)에 의해 고도가 증가하였다가 급격히 감소하는 지형적 특징이 있다.

분석기간은 서울과 강릉의 라이다가 동시에 관측되었던 2015년 1~2월이며, 분석기간 중 황사 사례를 제거하기 위해 기상청 황사특보기준을 적용하였다(1시

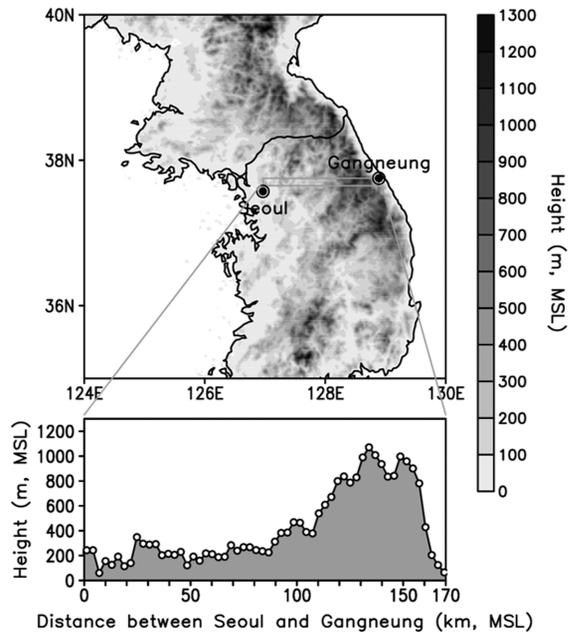


Fig. 1. Locations of two lidars used in this study from January to February 2015. East-west topography is shown as shading in the bottom.

간 평균 미세먼지 농도가 $400 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상이 2시간 이상 지속사례). 또한 농도가 약한 황사를 제거하고자 특보기준의 50% 인 $200 \mu\text{g m}^{-3}$ 이상인 사례도 제거하였다. 본 연구에서는 서울대학교(37.46°N, 126.95°E, 116 m)와 강릉원주대학교(37.77°N, 128.87°E, 50 m)의 동일한 장소에 설치된 라이다와 스카이라디오미터 장비를 활용하였으며, 라이다 장비에 대한 자세한 사양은 Table 1과 같다. 서울과 강릉의 라이다는 에어로졸 미 산란 라이다로 서로 다른 제작사로부터 만들어졌

Table 1. Specifications of two lidars used in this study.

Parameter	Seoul	Gangneung
Equipment type	2-wavelength polarization lidar	1-wavelength polarization lidar
Laser	Nd:YAG	Nd:YAG
Polarization	-	Linear polarized
Wavelength	532 nm, 1064 nm	532 nm
Pulse energy	20 m J @532 nm, 20 m J @1064 nm	30 m J @532 nm
Repetition rate	10 Hz	20 Hz
Telescope	Cassegrain type	Cassegrain type
Beam diameter	200 mm	200 mm
Focus length	2000 mm	2000 mm
Field of view	1 mrad	< 1.5 mrad
Vertical resolution	6 m	> 2.5 m
Temporal resolution	15 min	10 min, 15 min (Adjustable)

다. 본 연구에서는 미세먼지의 연직 특성 분석을 위해 532 nm 파장의 수평과 수직채널 관측결과로부터 산출된 자료를 사용하였다. 두 지역 라이다의 관측 해상도가 달라 연직 60 m 간격의 30분 평균하여 동일한 해상도로 분석하였다. 스카이라디오미터는 서울대학교(POM01; Prede Co. Ltd.)와 강릉원주대학교(JP/POM02; Prede Co. Ltd.)에 설치된 장비를 사용하였고, 관측 원리상 맑은 날 낮에만 관측이 가능하기 때문에 낮 동안 관측된 자료 중 라이다 관측시간과 가장 가까운 시간의 자료를 사용하였다. 또한, 스카이라디오미터로부터 에어로졸 광학두께 산출 시 500, 675 nm 파장을 라이다와 동일한 532 nm 파장으로 변환하여 계산하였다(Correia et al., 2006).

라이다는 연직 에어로졸 질량농도를 산출하기 위해 지상 PM₁₀ 농도와 PBL (Planetary Boundary Layer) 고도를 입력자료로 사용한다. 먼저, PM₁₀ 자료는 서울 신림동(27 m), 강릉 옥천동(20 m) 관측소 자료를 사용하였다(환경부 에어코리아, www.airkorea.or.kr). 또한, 라이다를 통해 산출한 연직 에어로졸 질량농도 검증에 위해 라이다와 멀리 떨어지지 않은 622 m 고도의 서울 관악산(37.45°N, 126.96°E)과 773 m의 강릉 대관령관측소(37.68°N, 128.72°E) 자료를 사용하였다(기상청). 다음으로, PBL 고도는 강릉의 경우, 분석기간 동안 가장 근거리에 위치한 속초 상층대기관측소(38.25°N, 128.57°E, WMO ID: 47090)의 라디오존데 자료(0000, 1200 UTC의 총 116회)를 이용하여 산출하였다(평균 약 1 km). 한편 서울의 PBL 고도는 근거리에 위치한 상층대기관측소가 없어 강릉과 같은 1 km 고도로 계산하였다. Yeo et al. (2016)에 따르면 장기간(2006년 6월~2015년 12월) 지표면으로부터 고도 1 km까지 평균한 에어로졸 질량농도와 지표면으로부터 혼합고(대기경계층 높이)까지 평균한 에어로졸 질량농도를 비교한 결과 두 경우 모두 지상 PM₁₀ 농도와 차이가 약 3 μg m⁻³로 크지 않아 본 연구에서도 평균 값을 적용해 질량농도를 계산하였다.

2.1 에어로졸 질량농도 산출

서울과 강릉의 연직 에어로졸 질량농도 산출을 위해 KALION의 표준 알고리즘(Yeo et al., 2016)을 사용하였다. KALION은 라이다 자료 처리 및 분석을 위해 라이다에서 관측한 원시자료로부터 후방산란강도, 편광소멸도, 에어로졸 소산계수 및 질량농도, 에어로졸 유형의 변수들을 산출한다. 이러한 변수들을 산출해 내기 위해 먼저, 수신부를 통해 관측된 라이다 원시자료를 고도 및 거리에 무관한 기기상수에 대해 표준화하여 후방산란강도와 편광소멸도(입자형태에 따라 후방산란 되는 빛의 편광이 깨지는 정도)를 산출

하고, 이 자료를 활용해 구름, 황사, 비 황사 오염물질을 구분한다. 에어로졸 소산계수를 산출하기 위해서는 라이다 방정식(Klett, 1981; Fernald, 1984)을 풀어야 하지만 라이다 방정식에는 미지수 두 개가 존재하므로 바로 풀어낼 수가 없다. 이에 미지수인 에어로졸의 후방산란계수와 소산계수의 비를 라이다 상수(lidar ratio)로 가정하여 방정식을 풀 수 있다. 라이다 주변에 스카이라디오미터(sun-sky radiometer)가 설치된 경우 에어로졸 광학적 두께(aerosol optical depth)를 이용하여 라이다 상수를 직접 구한 후 에어로졸의 소산계수를 산출한다. 최종적으로 에어로졸의 소산계수를 에어로졸의 단위 질량당 질량소산효율로 나뉘므로써 에어로졸의 질량농도를 산출할 수 있다. KALION의 질량농도 산출 알고리즘에 대한 상세한 내용은 Kim et al. (2015)와 Yeo et al. (2016)를 참고하면 된다.

2.2 후방유적궤도 산출

본 연구에서는 공기의 이동을 추적하기 위해 NOAA/ARL에서 개발된 HYSPLIT_4 모델을 기반으로 서울과 강릉으로 이동해 오는 공기(에어로졸)의 후방이동 궤적(Backward trajectory)을 산출하였다(0000, 0600, 1200, 1800 UTC, 총 236개). 기상청 현업 수치모델인 UM (Unified Model) 전지구 모델의 초기장을 입력장으로 사용하였으며, 후방유적궤도 산출 시 공기궤적의 이동기간은 2일, 도착지점의 고도는 600 m로 설정하였다. 여기서, 600 m 고도로 설정한 이유는 후방유적궤도 산출 시 사용되는 전지구 모델(UM_N512, 17 km 해상도(1024 × 769))의 지형고도를 참고하였을 때, 서울과 강릉 사이에 위치한 태백산맥이 약 600 m로, 지형에 의한 영향이 적은 600 m 이상의 고도로 유입되는 에어로졸의 특성을 분석하였다. 산출한 후방유적궤도와 라이다 자료가 함께 존재하는 기간의 자료만을 분석하였고, 주요 이동경로는 HYSPLIT_4의 군집분석(clustering; Draxler, 1999)을 이용해 서울은 5개, 강릉은 6개의 군집으로 구분하였다.

3. 에어로졸 질량농도 산출 결과

3.1 라이다 상수와 질량소산효율

에어로졸 질량농도(이하 농도) 산출 시 사용되는 라이다 상수와 질량소산효율의 빈도분포를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저, 라이다 상수의 분포를 보면(Fig. 2a), 서울은 30 sr과 90 sr에서 최대 값을 갖는 쌍봉형(bimodal)의 분포를 가지는 반면, 강릉은 50 sr에서 최대값을 보이는 단봉형(mono-modal)의 분포로 나타났다. 나타낸 라이다 상수 자료 수는 라이다와 스카이라디오미터 관측자료가 함께 있는 서울은 193개(65%),

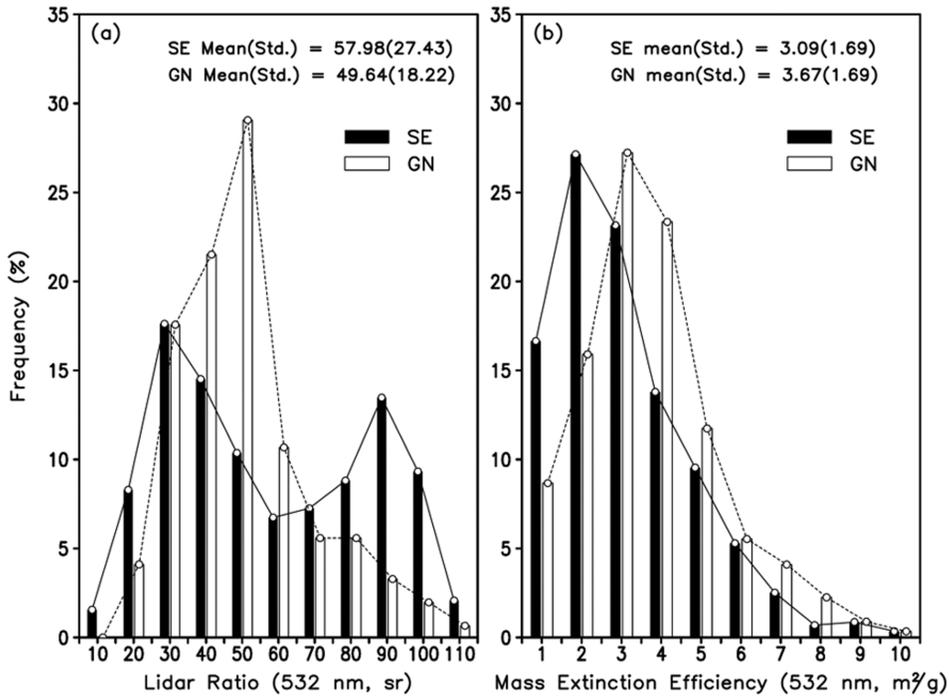


Fig. 2. Frequency distributions of the lidar ratio (a) and the mass extinction efficiency (b) in Seoul (SE, black bar) and Gangneung (GN, white bar) from Jan. to Feb. 2015.

강릉은 609개(88%)이다. 스카이라디오미터의 관측 원리 상 맑은 날 주간에만(9시~16시) 관측하기 때문에 라이다 상수 값이 없는 야간의 연직 에어로졸 농도를 산출할 수 없다. 따라서 라이다 관측자료가 있는 기간을 최대한 포함하기 위해 에어로졸 연직 농도분포 산출 시에 2개월 동안의 평균 라이다 상수인 서울은 57.98 (± 27.43) sr, 강릉은 49.64 (± 18.22) sr 을 사용하였다. 이때, 서울의 경우 라이다 상수의 분포가 쌍봉형의 형태가 나타남에도 불구하고 평균 값을 사용하므로 대표성이 낮다고 생각될 수 있다. 하지만, Kim et al. (2011)의 서울에서 장기간(2006년~2010년, 5년간) 라이다 관측 결과로부터 계산한 겨울철 평균 라이다 상수 값은 57.2 (± 17.9) sr으로 본 연구결과와 거의 일치하며, Yeo et al. (2016)의 장기간(2006년 6월~2015년 12월) 평균 라이다 상수를 사용해 질량농도를 산출하였음에도 지상 PM₁₀ 관측소의 질량농도의 차이가 크지 않다(약 3 $\mu\text{g m}^{-3}$)는 연구결과를 바탕으로 서울의 연직 에어로졸 농도 분석 시 라이다 상수에 의한 오차는 적을 것으로 생각된다.

질량소산효율은 단위질량당 에어로졸에 의한 소산으로 정의하며, 라이다 관측으로 산출된 PBL 내의 평균 에어로졸 소산계수를 지상 PM₁₀ 농도로 나누어

구할 수 있다(Kim et al., 2015). 분석기간의 서울과 강릉의 평균 질량소산효율은 각각 3.09 (± 1.69) $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ 와 3.67 (± 1.69) $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ 이며, 50% 이상이 서울은 2~3 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ 에서, 강릉은 3~4 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$ 에서 최대값을 보였다(Fig. 2b). 라이다 상수와 비교해 질량소산효율에 의한 차이가 에어로졸 질량농도 산정에 더 큰 영향을 주기 때문에(Yeo et al., 2016), 이러한 오차를 줄이기 위해 평균 질량소산효율 값이 아닌 라이다와 동일한 시간의 지상 PM₁₀ 관측 값을 사용해 질량농도를 산출하였다.

3.2 산출된 에어로졸 농도 검증

산출한 연직 에어로졸 농도를 검증하기 위해 서울과 강릉 각각 관악산(622 m)과 대관령(772 m) 관측소 PM₁₀ 농도($< 400 \mu\text{g m}^{-3}$)와 같은 고도의 라이다로 산출한 에어로졸 농도를 비교하였다(Fig. 3). 자료의 총 개수는 서울은 624개, 강릉은 771개이며, 서울의 경우(Fig. 3a) BIAS와 RMSE가 각각 $-10.21 \mu\text{g m}^{-3}$, $20.88 \mu\text{g m}^{-3}$ 이고, 강릉은 $-4.02 \mu\text{g m}^{-3}$, $20.23 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다(Fig. 3b). 두 지역 모두 라이다로 산출한 에어로졸 농도가 관측소 PM₁₀ 농도보다 과소추정 하지만 결정계수(R^2) 값이 두 지역 모두 약 0.8로 나타나 서로 잘 일치함을 확인하였다.

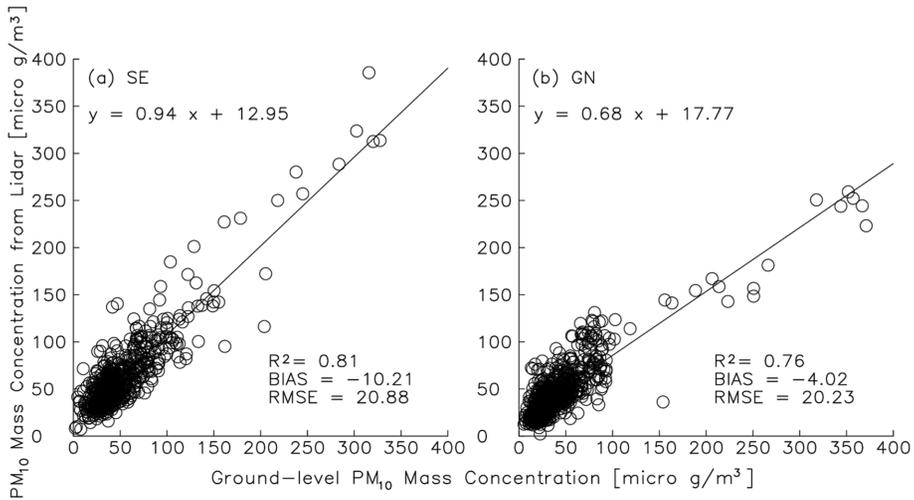


Fig. 3. Scatter diagram of lidar-derived and ground-based PM₁₀ mass concentrations at the same altitude in (a) Seoul (SE, 622 m) and (b) Gangneung (GN, 772 m).

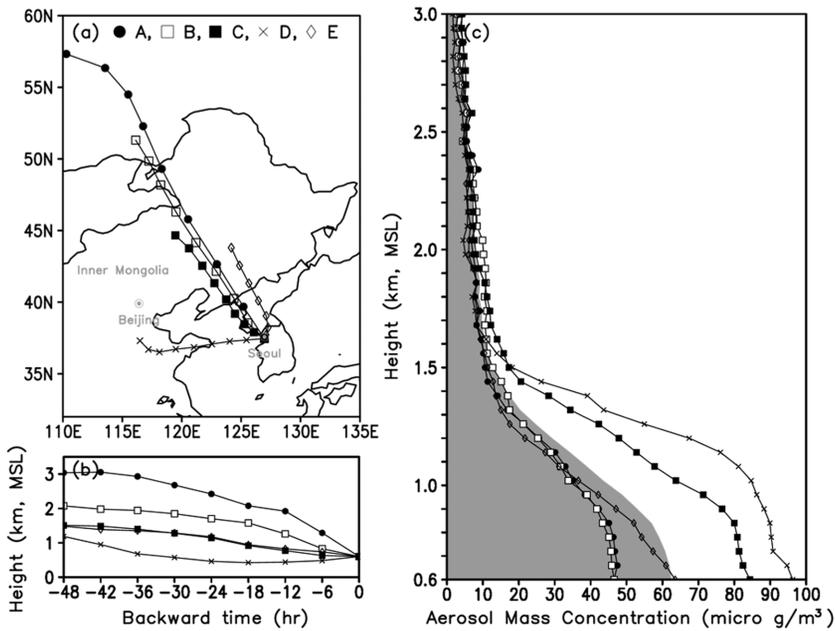


Fig. 4. Locations of the 2-day backward trajectories (a), altitudes arriving at 600 m for individual trajectories obtained from the HYSPLIT_4 simulation (b) and vertical profiles of aerosol mass concentrations from the lidar at Seoul site (c). The Gray shading in Fig. 4c is the average aerosol mass concentration for the total route.

4. 공기이동궤적의 차이에 따른 에어로졸 연직 질량농도

4.1 서울지역 공기이동경로의 군집별 에어로졸 농도

Figure 4는 서울지역으로 유입되는 48시간 동안의

에어로졸 이동경로(a), 고도(b), 라이다로 산출한 에어로졸 연직 농도분포(c)를 나타낸 것이다. 서울로 유입되는 공기궤적은 군집분석을 통해 5개 방향으로 구분하였다. 각각의 경로는 6시간 간격의 실선으로 나타내었다(5개 군집: A(●), B(□), C(■), D(×), E(◇)).

Table 2. Average aerosol mass concentrations of each air-mass pathway at Seoul site.

Categories		A	B	C	D	E	Total
Seoul (SE)	AWS, Wind speed at surface (622 m) [m s ⁻¹]	5.3 (1.7)	4.4 (1.6)	3.2 (1.6)	2.8 (0.9)	2.3 (1.2)	-
	No.(/236)	8	38	29	11	29	115
	Trajectory						
	Distance [km] (Velocity [km hr ⁻¹])	1846 (62)	1168 (39)	571 (19)	667 (22)	318 (11)	-
	Altitude [km]	2268 (736)	1549 (465)	1084 (328)	615 (227)	1093 (284)	-
	Mass concentrations at 0.6~1.5 km from lidar						
Mean (Std.) [μg m ⁻³]	31.93 (13.65)	31.89 (12.39)	57.61 (23.48)	70.49 (25.81)	35.27 (18.81)	39.93 (18.23)	
Max./Min. [μg m ⁻³]	47.45 /10.61	46.52 /12.71	84.35 /17.26	96.26 /18.15	63.51 /11.28	62.48 /12.69	

각 경로의 48시간 전 위치는 A와 B는 러시아 바이칼 호 주변, C는 중국 내몽골, D는 중국 산둥성, E는 중국 지인성에 위치하고 있다(Fig. 4a). 정량적 비교를 위해 Table 2에 서울지역의 각 경로 별 관악산 AWS (622 m) 풍속, 후방유적궤도의 이동거리 및 고도, 에어로졸 농도의 평균(표준편차) 값을 산출하였다. 평균 에어로졸 농도는 산출한 후방유적궤도 시간(0000, 0600, 1200, 1800 UTC)을 기준으로 ±1시간을 평균하였으며, 평균한 고도구간은 600 m 고도부터 총 경로(A-E)의 평균 에어로졸 농도(Fig. 4c, 회색음영)가 약 10 μg m⁻³ 가 되는 1500 m 고도(Slope = (dM/dH)² < 1, 여기서 M 은 에어로졸 질량농도, H는 고도; 이하 PBL 고도)로 계산하였다. 후방유적궤도의 평균 이동고도를 참고하여 PBL 내의 에어로졸 농도 증가에 상대적으로 큰 영향을 미치는 C, D, E 경로(60%)와 그렇지 않은 A, B 경로(약 40%)로 나누어 분석하였다. 먼저, A와 B 경로의 이동속도는 48시간 동안 각각 시속 62 km, 39 km이며, 평균 이동고도는 1.5 km로 나타났다. A와 B의 PBL 내 연직 에어로졸 농도분포는 매우 유사하며 (Fig. 4c), 평균 에어로졸 농도는 약 32 μg m⁻³으로 두 경로가 같았고 나머지 경로들 중 가장 낮았다. 반면, C, D, E 경로의 이동속도는 48시간 동안 각각 시속 19 km, 22 km, 11 km로 A, B 경로에 비해 느리게 이동하며, 평균 이동고도는 C와 E는 약 1 km, D는 600 m로 PBL 내에서 이동하였다. 평균 에어로졸 농도는 산둥성으로부터 유입될 때(D 경로)가 70.49 μg m⁻³로 가장 높고, 다음으로 중국 내몽골(C 경로, 57.61 μg m⁻³), 그리고 지인성(E 경로, 35.27 μg m⁻³)의 순이었다.

4.2 강릉지역 공기이동경로의 군집별 에어로졸 농도

Figure 5는 군집분석을 통해 6개로 구분된 강릉지역의 후방유적궤도에 따른 연직 에어로졸 농도분포를

나타낸 것이다(6개 군집: A(●), B(□), C(■), D(×), E(◇), F(△)). 강릉으로 유입되는 공기의 48시간 전 위치는 다음과 같다(Fig. 5a). A와 B는 러시아, C는 중국 내몽골, D는 베이징, E는 중국 지인성, F는 중국 헤이룽장성으로부터 유입된다. 각각의 경로에 대한 정량적 값을 Table 3에 산출하였다. 강릉지역의 PBL은 1.8 km로, 앞 절에서 설명한 서울 PBL 산출방법과 동일한 방법으로 계산하였다. 후방유적궤도의 평균 이동고도를 기준으로 PBL 내의 에어로졸 농도에 상대적으로 큰 영향을 미치는 C, D, E, F 경로(70%)와 적은 영향을 미치는 A, B 경로(30%)로 나누어 분석하였다. A와 B 경로의 이동속도는 48시간 동안 각각 시속 57 km, 41 km이며, 평균 약 1.8 km 이상의 고도로 유입되었다. PBL 내의 평균 에어로졸 농도는 A, B 경로 각각 22.9 μg m⁻³, 29.3 μg m⁻³으로 총 경로(A-F)의 평균 농도(30.66 μg m⁻³) 보다 낮았다. 반면, C, D, E, F 경로의 이동속도는 각각 시속 24 km, 29 km, 12 km, 28 km로, A, B 경로에 비해 느리게 이동하며 평균 이동고도는 약 1 km 이었다. 평균 에어로졸 농도는 중국 내몽골로부터 유입될 때(C 경로)가 47.16 μg m⁻³로 가장 높고, 다음으로 중국 베이징(D 경로, 40.75 μg m⁻³), 헤이룽장성(F 경로, 30.28 μg m⁻³), 지인성(E 경로, 26.22 μg m⁻³)의 순이었다. 한편, 강릉 지역에서 추가된 F 경로는 약 1.4 km 고도 미만의 평균 에어로졸 농도보다 낮거나 비슷하고, 그 이상의 고도에서는 평균 에어로졸 농도보다 높았다(Fig. 5c). 이는 강릉지역 겨울철 북고남저형 기압배치 시 하층은 동풍, 상층은 서풍(Nam et al., 2014; Ko et al., 2016)에 의해 하층의 에어로졸이 동쪽으로부터 유입되는 상대적으로 깨끗한 공기에 희석되어 F 경로의 농도가 평균 이하로 낮은 것으로 생각된다.

PBL 내의 평균 에어로졸 농도는 두 지역 모두 상

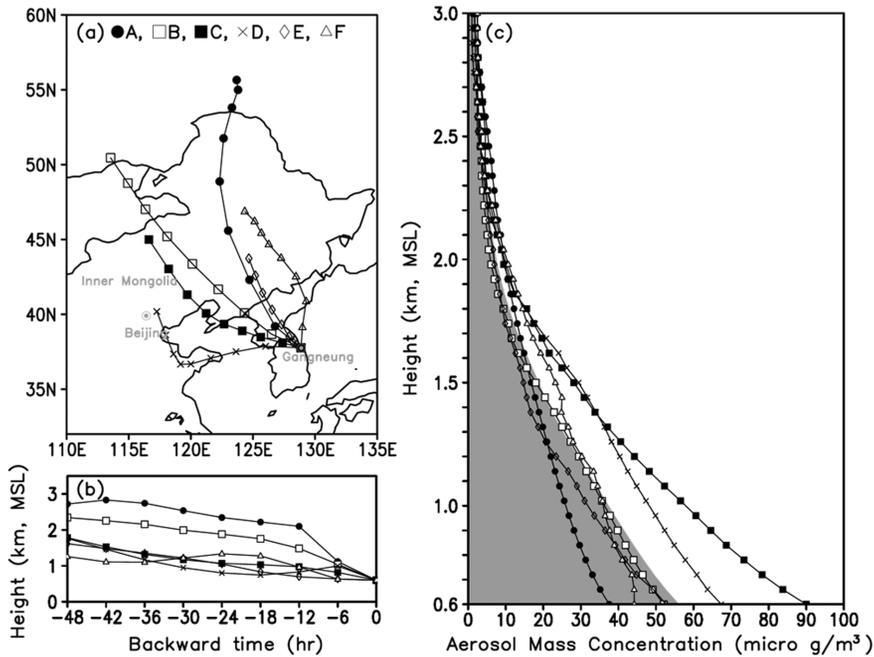


Fig. 5. Same as Fig. 4, except for the lidar at Gangneung site.

Table 3. Average aerosol mass concentrations of each air-mass pathway at Gangneung site.

Categories		A	B	C	D	E	F	Total	
Gangneung (GN)	AWS, Wind speed at surface (772 m) [$m s^{-1}$]	5.4 (1.8)	6.7 (2.4)	5.9 (2.2)	6.8 (2.0)	1.6 (1.2)	3.2 (2.4)	-	
	No./236)	14	27	22	14	50	10	137	
	Trajectory	Distance [km] (Velocity [$km hr^{-1}$])	1712 (57)	1240 (41)	715 (24)	878 (29)	352 (12)	845 (28)	-
		Altitude [km]	2200 (659)	1754 (491)	1139 (298)	1029 (301)	1044 (342)	1064 (255)	-
	Mass concentrations at 0.6~1.8 km from lidar	Mean (Std.) [$\mu g m^{-3}$]	22.90 (7.54)	29.30 (13.41)	47.16 (23.07)	40.75 (15.41)	26.22 (13.68)	30.28 (9.64)	30.66 (14.09)
		Max./Min. [$\mu g m^{-3}$]	37.54 /12.18	52.05 /9.36	90.00 /15.59	67.38 /15.34	52.69 /9.15	44.23 /14.49	56.16 /10.96

대적으로 약한 서풍류(북서풍 또는 서풍, $\leq 30 km hr^{-1}$)에 의해 중국 산둥성(D 경로) 또는 내몽골(C 경로)로부터 공기가 유입될 때 가장 높았고, 강한 북풍류(북서풍 또는 북풍, $> 30 km hr^{-1}$)에 의해 러시아로부터 공기가 유입될 때(A, B 경로) 에어로졸 농도가 가장 낮았다. 한반도 겨울철 기압패턴은 서고동저형으로 차고 건조한 북서풍이 강하게 분다. 이후 시베리아고기압 세력이 약해지면서 한반도 동쪽에는 이동성 고기압, 서쪽에는 저기압이 위치하게 된다. 이러한 기압배치에서 중국 동쪽 해안지역에 위치한 석탄화력발전소

및 대규모 공장 등에서 발생한 대기오염물질은 한반도로 유입되는 호조건이 된다(Lee et al., 2018). 또한 겨울철 지표 복사냉각에 의해 대기 하층에 역전층이 형성되고 이로 인해 오염물질의 연직확산이 저지되면서 고농도 에어로졸 분포가 나타난 것으로 추측된다.

5. 자체발생/외부유입 에어로졸에 따른 연직 분포

자체발생과 외부유입에 따른 서울과 강릉의 연직

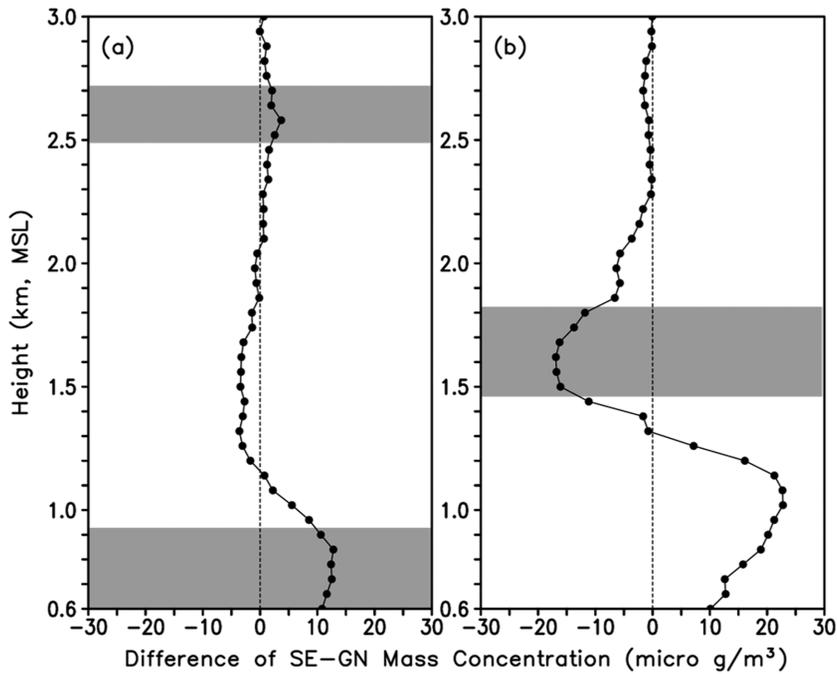


Fig. 6. The difference of vertical aerosol mass concentrations for Seoul and Gangneung according to the local emission (a) and the long range transport from the Shandong province (b). The shaded areas represent significance level of 0.05 according to a Student's t-test.

에어로졸 농도분포 차이를 분석하기 위해, 48시간 동안 이동속도가 11~12 km hr⁻¹으로 가장 느린(외부의 영향이 가장 적은) E 경로를 자체 발생형으로 정의하고, 외부 유입형은 중국 산둥반도로부터 유입되어 서울과 강릉을 모두 지나오는 D 경로(서울 22 km hr⁻¹, 강릉 29 km hr⁻¹)로 정의하였다. 이와 같은 분류는 한미공동 한반도 대기질 관측 캠페인(KORUS-AQ, Korea-United States Air Quality) 동안의 서풍에 따른 공기 덩이가 250~750 km day⁻¹ (10~31 km hr⁻¹) 이면 중국에서 오는 대기오염물질의 영향이 크고, 250 km day⁻¹ (10 km hr⁻¹) 미만이면 국내 오염물질의 영향이 크다는 선행연구와 유사하다(Lee et al., 2019).

Figure 6은 자체 발생형과 외부 유입형에 대한 서울과 강릉의 600 m~3 km 고도의 연직 농도 차이를 나타낸 것이다. 회색 음영으로 표시된 영역은 두 지역의 고도 별 에어로졸 농도차이에 대해 Student's t-test를 이용하여 95% 신뢰구간에서 유의한 영역을 나타내었다. 자체 발생형의 경우(Fig. 6a), 약 1.1 km 고도 이하에서 서울과 강릉의 농도 차이는 평균 8.79 µg m⁻³(최대 12.80 µg m⁻³, 836 m)로 서울이 강릉보다 더 높고, 그 이상의 고도에서는 큰 차이가 없었다(평균 -0.38 µg m⁻³). 유의성 검증 결과 600~900 m 고도에서 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 한반도에 정체

성 고기압이 위치할 때 한반도는 동일한 종관 기상조건하에 놓이게 되어 국지 수송 및 확산의 영향이 상대적으로 작아 우리나라 대부분의 지역은 비슷한 농도 분포를 보이는 경향이 있다(Kim et al., 2004). 실제 관측결과에서도 1 km 이상에서는 서울과 강릉이 비슷한 반면, 1 km 이내에서만 두 지역의 농도 차이가 나타나며, 인구밀집 및 에어로졸 발생소스가 더 많은 서울이 강릉보다 더 높음을 확인하였다.

한편, 외부 유입형의 경우(Fig. 6b), 1.3 km 고도 미만에서 서울과 강릉의 에어로졸 농도차이는 통계적으로 유의하지는 않으나 평균 16.80 µg m⁻³(최대 22.8 µg m⁻³, 1016 m)으로 서울이 강릉보다 높고, 자체 발생형보다 2배 더 큰 농도를 보였다. 반면, 1.3~2.3 km 고도에서는 오히려 강릉의 에어로졸 농도가 평균 8.57 µg m⁻³(최대 16.90 µg m⁻³, 1616 m)으로 더 높게 나타났으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다. 서울과 강릉의 후방유적궤도의 평균 이동고도는 각각 0.6 km, 1 km으로 강릉이 더 높고, 관악산(관측소 고도: 622 m)과 대관령(관측소 고도: 772 m) AWS로 관측된 풍속이 각각 2.8 m s⁻¹와 6.8 m s⁻¹로 대관령의 풍속이 더 강하게 나타났다. 이는 서풍에 의해 서울에서 강릉으로 공기가 이동하는 동안 서울과 강릉 사이의 태백산맥(해발고도 1 km)에 의한 산악효과로 공기가 상승하면

서 풍속이 증가하고, 이에 따라 에어로졸도 함께 상승하여 1.3~2.3 km 고도의 에어로졸 농도가 서울보다 높은 것으로 추측된다.

6. 요약 및 결론

본 연구는 2015년 1~2월 기간 동안 동 위도대에 위치하지만 서로 다른 지형적 특징을 가지는 서울과 강릉을 대상으로 각 지역에 설치되어 있는 라이다를 이용하여 공기이동경로에 따른 에어로졸 농도의 연직 분포를 분석하였다. 분석을 위해 라이다에서 산출된 에어로졸 연직 질량농도의 정확도 검증을 수행하였으며 지상 PM₁₀ 관측소의 에어로졸 농도와 정량적으로 비교한 결과(R²), 서울과 강릉 모두 약 0.8의 상관성을 보였다.

HYSPLIT 4를 이용해 산출한 후방유적궤도(2일, 600 m)를 서울 5개, 강릉 6개의 경로로 군집하여 공기이동경로의 차이에 따른 에어로졸 연직 질량농도를 분석한 결과, PBL 내의 평균 에어로졸 농도는 두 지역 모두 약한 서풍류($\leq 30 \text{ km hr}^{-1}$)에 의해 중국 산둥성(D 경로) 또는 중국 내몽골(C 경로)로부터 공기가 유입될 때 가장 높았고(서울 $70.49 \pm 25.81 \mu\text{g m}^{-3}$, 강릉 $47.16 \pm 23.07 \mu\text{g m}^{-3}$), 강한 북풍류($> 30 \text{ km hr}^{-1}$)에 의해 러시아로부터 공기가 유입될 때(A, B 경로) 서울과 강릉 모두 에어로졸 농도가 가장 낮았다.

자체생산과 외부유입에 따른 서울과 강릉의 연직 에어로졸 분포 차이를 분석한 결과, 약 1 km 고도 이하의 서울과 강릉의 에어로졸 농도차이는 자체 생산형(평균 $8.79 \mu\text{g m}^{-3}$, 600 m~1.1 km) 보다 외부 유입형(평균 $16.80 \mu\text{g m}^{-3}$, 600 m~1.3 km)일 때 2배 더 컸다. 한편 1 km 이상의 고도에서는(특히, 1.3~2.3 km) 자체 생산형의 경우 서울과 강릉의 에어로졸 농도가 비슷한 반면, 외부 유입형의 경우 서울보다 강릉의 에어로졸 농도가 오히려 더 높았다(평균 $8.57 \mu\text{g m}^{-3}$, 최대 $16.90 \mu\text{g m}^{-3}$, 1616 m). 이 결과는 겨울철 정체대에 의한 자체생산 에어로졸 보다 외부유입(산둥반도)에 의한 에어로졸이 한반도 대기질에 미치는 영향이 더 크며, 지역별 지형특징에 따라 연직 분포가 다를 수 있음을 보여준다.

본 연구는 겨울철 2 개월(1~2월)에 한정된 분석이지만 동일한 위도에 위치하는 서울과 강릉의 공기이동경로에 따른 에어로졸 연직분포 차이를 확인하였고, 특히 대기정체와 이동에 의한 서울과 강릉의 연직 에어로졸 농도 차이를 정량적으로 규명하였다. 대부분의 수치모델은 일정한 초기 배경 에어로졸 분포를 사용하는데, 에어로졸-구름 상호작용의 정확도 향상을 위해 관측으로부터의 시공간적 에어로졸 연직분포를 초기 배경 농도로 사용해야 한다는 것을 시사한다.

감사의 글

본 연구를 위해 라이다 관측자료를 제공해 주시고 자료처리에 많은 도움을 주신 서울대학교 김상우 교수님, 여희동 연구원님, 강릉원주대학교 김병곤 교수님께 감사드립니다. 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상항공기 활용기술개발연구」(NTIS: 1365003069)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Correia, A., and C. Pires, 2006: Validation of aerosol optical depth retrievals by remote sensing over Brazil and South America using MODIS. *XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 6 pp.
- Draxler, R. R., 1999: HYSPLIT_4 USER'S GUIDE. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, 46 pp.
- _____, and A. D. Taylor, 1982: Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **21**, 367-372.
- _____, and G. D. Hess, 1997: Description of the HYSPLIT_4 modeling system. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-224, 24 pp.
- Fernald, F. G., 1984: Analysis of atmospheric lidar observations: some comments. *Appl. Opt.*, **23**, 652-653.
- Holben, B. N., and Coauthors, 1998: AERONET-a federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sens. Environ.*, **66**, 1-16.
- IARC, 2016: *Outdoor air pollution. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Vol. 109*. International Agency for Research on Cancer, 448 pp. [Available online at <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol109/index.php>].
- Jeong, U., J. Kim, Y. J. Kim, and J. Jung, 2015: Dependence of total and carbonaceous aerosol concentrations on transport pathways in Seoul, Korea. *Atmosphere*, **25**, 141-148, doi:10.14191/Atmos.2015.25.1.141.
- Kim, C.-H., I.-S. Park, S.-J. Lee, J.-S. Kim, H.-A. Jin, and H.-G. Sung, 2004: On the recent air pollution levels observed in the regional air monitoring network-High air pollution concentration episodes and their meteorological characteristics in 2002. *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **20**, 215-224 (in Korean with English abstract).
- Kim, M.-H., S.-W. Kim, S.-C. Yoon, N. Sugimoto, and B.-J. Sohn, 2011: Characteristics of the lidar and sky radiometer measurements in Seoul. *Atmosphere*, **21**, 57-67 (in Korean with English abstract).
- _____, and Coauthors, 2015: Estimation of particle mass concentration from lidar measurement. *Atmosphere*,

- 25, 169-177 (in Korean with English abstract).
- Klett, J. D., 1981: Stable analytical inversion solution for processing lidar returns. *Appl. Opt.*, **20**, 211-220.
- Ko, A.-R., B.-G. Kim, S.-H. Eun, Y.-S. Park, and B.-C. Choi, 2016: Analysis of the relationship of water vapor with precipitation for the winter ESSAY (Experiment on Snow Storms At Yeongdong) period. *Atmosphere*, **26**, 19-33 (in Korean with English abstract).
- Lee, H.-J., Y. M. Jeong, S.-T. Kim, and W.-S. Lee, 2018: Atmospheric circulation patterns associated with particulate matter over South Korea and their future projection. *J. Clim. Change Res.*, **9**, 423-433 (in Korean with English abstract).
- Lee, S., and Coauthors, 2019: Analysis of long-range transboundary transport (LRTT) effect on Korean aerosol pollution during the KORUS-AQ campaign. *Atmos. Environ.*, **204**, 53-67, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.02.020.
- ME, 2016: *If you know it, you can see it. The particulate matter; what's this?* Ministry of Environment, 72 pp (in Korean) [Available online at https://www.airkorea.or.kr/web/board/3/428/?pMENU_NO=143].
- Nam, H.-G., B.-G. Kim, S.-O. Han, C. Lee, and S.-S. Lee, 2014: Characteristics of easterly-induced snowfall in Yeongdong and its relationship to air-sea temperature difference. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **50**, 541-552, doi:10.1007/s13143-014-0044-3.
- OECD, 2016: *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*. Organization for Economic Cooperation and Development, 116 pp [Available online at <http://dx.doi.org/10.1787/9789264257474-en>].
- Park, S.-Y., Y.-J. Kim, and C.-H. Kim, 2012: Characteristics of long-range transport of air pollutants due to different transport patterns over Northeast Asia. *J. Kor. Soc. Atmos. Environ.*, **28**, 142-158 (in Korean with English abstract).
- Remer, L. A., and Coauthors, 2005: The MODIS aerosol algorithm, products, and validation. *J. Atmos. Sci.*, **62**, 947-973.
- Sakai, T., T. Nagai, N. Orikasa, Y. Zaizen, K. Yamashita, Y. Mano, and M. Murakami, 2013: Aerosol characterization by dual-wavelength polarization lidar measurements over Kochi, Japan during the warm seasons of 2008 to 2010. *J. Meteor. Soc. Japan*, **91**, 789-800, doi:10.2151/jmsj.2013-605.
- Shi, H., S.-S. Lee, H.-W. Chun, H.-J. Song, Y.-C. Noh, and B.-J. Sohn, 2016: Optical properties of aerosols related to haze events over Seoul inferred from skyradiometer and satellite-borne measurements. *Atmosphere*, **26**, 289-299, doi:10.14191/Atmos.2016.26.2.289 (in Korean with English abstract).
- Shimizu, A., and Coauthors, 2004: Continuous observations of Asian dust and other aerosols by polarization lidars in China and Japan during ACE-Asia. *J. Geophys. Res.*, **109**, D19S17.
- Sugimoto, N., and Z. Huang, 2014: Lidar methods for observing mineral dust. *J. Meteorol. Res.*, **28**, 173-184, doi:10.1007/s13351-014-3068-9.
- Wang, Q., L. Sun, J. Wei, Y. Yang, R. Li, Q. Liu, and L. Chen, 2017: Validation and Accuracy Analysis of Global MODIS Aerosol Products over Land. *Atmosphere*, **8**, 155, doi:10.3390/atmos8080155.
- Yeo, H. D., and Coauthors, 2016: The KALION automated aerosol type classification and mass concentration calculation algorithm. *Kor. J. Remote Sens.*, **32**, 119-131 (in Korean with English abstract).