Check for updates

Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 36, No. 1, February 2020, pp. 128-138
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.128
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

기술자료

# 인공위성, 지상관측, 궤적 모델을 이용한 2019년 12월 고농도 연무 현상의 특성 분석

# Characteristics of Haze Episode in 2019 December by Using Satellite and Ground Measurements with Trajectory Model

**이권호*, 박승식**[1)]
강릉원주대학교 대기환경과학과, [1)]전남대학교 환경에너지공학과

**Kwon-Ho Lee*, Seung-Shik Park**[1)]
*Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea*
[1)]*Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea*

**접수일** 2019년 12월 23일
**수정일** 2020년 1월 12일
**채택일** 2020년 1월 15일

**Received** 23 December 2019
**Revised** 12 January 2020
**Accepted** 15 January 2020

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)33-640-2319
E-mail : kwonho.lee@gmail.com

**Abstract** For the haze event occurred in December 2019, satellite observations, ground-based particulate matter (PM) measurements, and meteorology data were analyzed to estimate the spatio-temporal characteristics of air pollutants. Daily maximum $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ mass concentrations for December 10~11 over Korea were 71.12±16.47 and 48.00±13.33 μg/m$^3$, respectively, which are 2.6 and 3 times higher than their levels in clear sky conditions. Daily changes of PM concentration measured in China are also similar to Korea but the maximum concentrations occurred 1~2 days earlier than in Korea. In order to overcome the spatial limitations of ground observations, the aerosol optical thickness (AOT) distribution and the fire occurrences using satellite observation data show that the spatial distribution of AOT is concentrated over the fire positions in China, resulting in haze phenomena. During this period, the air mass moving to the Korean peninsula was also confirmed from the meteorology and forward trajectory results. Daily pattern of the frequency of fires in eastern China detected by satellite coincided with the change of domestic and overseas PM concentrations and AOT change, so it could be judged that the cause of high haze was mainly caused by fire. More comprehensive research, however, is required to understand the influence of small anthropogenic emission sources in rural areas on the local scale under stable atmospheric conditions.

**Key words:** Aerosol, PM, Biomass burning, Long-range transport, Fire

## 1. 서 론

최근 고농도 대기오염 사례에 대한 사회적 관심이 증가하면서 대기질에 관한 정보 및 대기오염 저감 방안이 크게 중요해지고 있다. 특히, 대한민국 정부는 미세먼지 관리 종합대책 수립(2017년 9월 26일)을 시작으로 최근에 '미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법(2019년 2월 15일)'을 시행하여 국내 미세먼지 농도를 줄이기 위한 정책을 실시하고 있다. 2019년 11월 1일에 발표한 '미세먼지 고농도 시기('19.12~'20.3) 대응 특별대책'에 의하면, 미세먼지 고농도 시기인 12월~3월까지 강화된 미세먼지 저감과 국민보호 조치를 하는 '미세먼지 계절관리제'를 시행하는 것으로 발표하였다(http://www.korea.kr/common/download.do?fileId=188794519&tblKey=GMN). 이를 통하여 수도권 5등급 차량 운행제한, 공공부문 차량 2부제 실시, 미세먼지 배출 사업장 민간감시, 주요 미세먼지 배출 사업장 특별점검 등이 실시되고 있다.

따라서 이러한 노력에 의하여 미세먼지 고농도 사례 저감 효과를 기대하고 있는 상황이다.

그러나 1998년~2018년 기간 동안 전국 대기오염 집중측정소에서 측정한 $PM_{10}$ 전국평균 농도 관측결과는 1998년 55 μg/m$^3$에서 2018년 41 μg/m$^3$까지 감소하였으며, 2012년에 처음으로 연평균 대기환경기준인 50 μg/m$^3$ 이하로 내려갔다(그림 1 참조) (NIER, 2019). $PM_{2.5}$ 관측 자료는 2015년 최초 26 μg/m$^3$에서 약간 감소하여 2018년에 23 μg/m$^3$였으나, 연평균 15 μg/m$^3$ 이상의 강화된 대기환경기준치를 초과하고 있다. 그리고 전국 $PM_{10}$ 농도가 80 μg/m$^3$ 이상인 일 수는 2015년 26일, 2016년 15일, 2017년 16일로 점차 감소하였으나, 2018년에는 21일로 늘어났다. $PM_{2.5}$ 농도가 36 μg/m$^3$ 이상인 일 수는 2015년 62일, 2016년 62일, 2017년 60일, 2018년 59일로 점차 감소하였다. 결국, 미세먼지 농도는 점차 줄어들고 있는 추세이지만, 고농도 사례 일 수는 크게 줄어들지 않은 것으로 나타났다. 이러한 고농도 미세먼지 사례는 중국에서 발생된 오염물질의 장거리 이동 및 기상학적 조건에 따른 연무 현상에 의하여 흔히 발생하는 것으로 알려져 있다(Park *et al.*, 2013).

일반적으로, 에어로솔의 주요 성분은 주로 공업 지역이나 대도시 지역에서 발생하는 오염성 입자가 전체 농도에서 큰 부분을 차지하고 있으며, 때때로 황사나 산불과 같은 자연적인 배출원에 의한 영향을 받기도 한다(Lee, 2012). 그리고 해안 지역에서는 외부의 오염원에 의한 입자의 유입이 없는 경우 주로 해염 입자들의 발생으로 인하여 입자 농도가 증가한다(Sayer *et al.*, 2012). 최근까지 동북아시아의 급속한 산업화와 도시화로 인하여 대규모 오염물질이 다량으로 배출되고 있으며, 대기 중으로 배출된 오염물질이 국가 간의 이동으로 인하여 지역 대기 환경에 미치는 영향이 복잡하게 나타난다(Park *et al.*, 2013). 특히 중국의 산업 지역과 인구밀집 지역이 우리나라와 인접한 동부 지역에 주로 위치하고 있으므로(Rohde and Muller, 2015), 여기에서 배출된 대기 오염물질들이 풍하 지역에 위치한 국내 대기질에 영향을 미치게

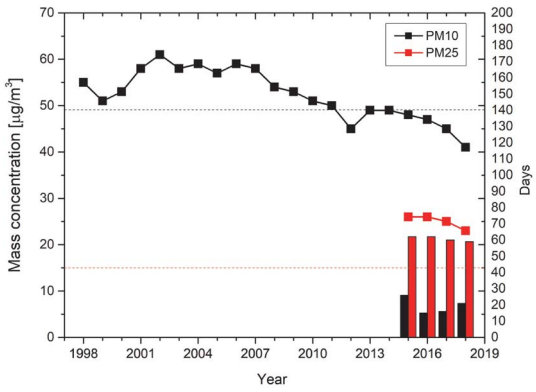


**Fig. 1.** Annual $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ concentrations measured in Korea during 1998~2018. Numbers of day exceeding the criteria standards ($PM_{10}$ > 80 μg/m$^3$ and $PM_{2.5}$ > 36 μg/m$^3$) are shown as bar plot. National air quality standards of $PM_{10}$ (black dotted line) and $PM_{2.5}$ (red dotted line) are also added. All data collected from the air quality annual report by the ministry of environment.

된다(Lim *et al.*, 2013). 특히, 한반도의 서해안 인접 지역은 중국에서 발생하는 다양한 오염물질이 이동하는 주요 경로이므로 대륙 기원의 오염물질의 장거리 이동이 지역 대기질에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 그러나, 해안 지역의 관측 한계 및 동적인 환경 특성으로 인하여 지역 규모의 에어로솔 특성에 관한 연구는 매우 제한적으로 이루어졌다(Park *et al.*, 2016; Yang *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2014).

따라서 본 연구에서는 2019년 12월 초에 발생한 연무 현상에 관하여 인공위성을 이용한 광역 관측 및 지상에서의 대기질 측정망 관측, 그리고 기상 자료를 이용한 궤적 분석 자료를 이용하여 연무 현상에 대한 대기오염물질의 분포 및 이동 현상에 관한 관계를 조사하였다. 즉 국내 대기질 저하 현상에 관한 원인 규명을 위하여 장거리 이동 특성과 기상학적 조건에 관한 요인적 분석 및 주요 배출원에 대한 오염물질의 이동확산 특성에 대한 정보 제공을 통하여 연무 현상의 원인 추정을 시도하였다. 본 연구 결과는 단일 연무 현상에 관하여 배출원 및 이동 현상에 관한 관계를 이해하는 데 유용한 정보를 제공할 것이다.

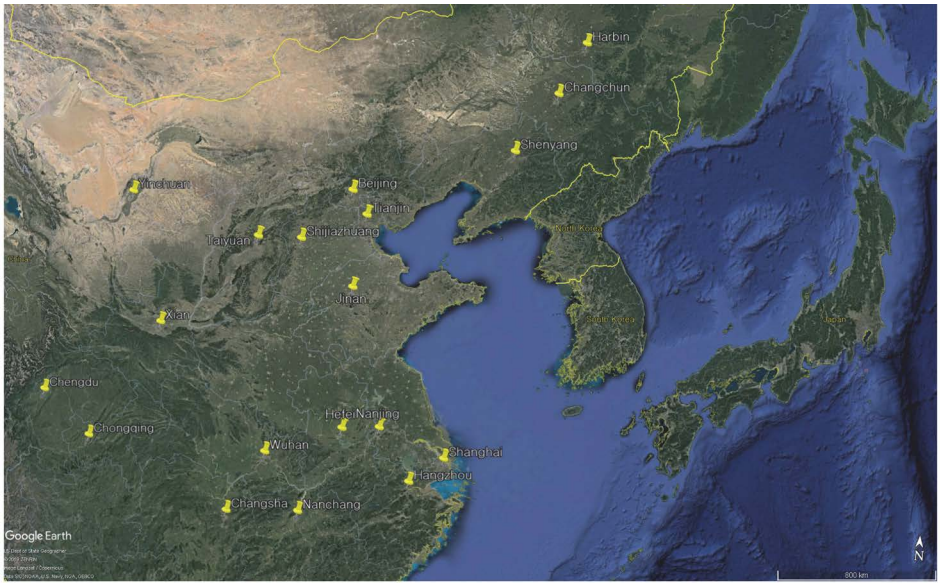


**Fig. 2.** Region of interest in this study (100°E~140°E, 25°N~50°N). Yellow pins represent selected ground observation sites in China.

**Table 1.** Specification of measurement instruments used in this study.

| Data | Instrument | Measured parameters | Spatial resolution |
|---|---|---|---|
| Satellite | MODIS | Aerosol optical thickness | 10 km |
| Satellite | MODIS | Fire position | 1 km |
| Ground station | PM monitor (β-guage) | $PM_{2.5}$ and $PM_{10}$ mass concentrations | Point |
| Meteorology | NOAA's NCEP Global Forecast System (GFS) | Temperature, humidity, wind speed, wind direction, visibility, solar radiation | 0.25 degree |

## 2. 자료 및 방법

### 2.1 관측 방법

본 연구에서 집중적으로 다루고자 하는 연무 사례는 2019년 겨울 첫 미세먼지 비상저감조치가 발령되었던 2019년 12월 10일~11일의 단일 사례로서, 해당 기간 국외 유입 과정을 고려하기 위하여 12월 2일부터 12일까지 기간으로 설정하였다. 그리고 연구 대상 지역은 한반도와 중국을 포함하는 영역(동경 100°~140°, 북위 25°~50°)으로서, 대부분의 인위적인 오염원이 포함되어 있는 지역을 대상으로 설정하였다(그림 2 참조). Rohde and Muller (2015)가 장기간 인공위성과 지상관측자료를 이용하여 작성한 중국의 주요 PM 배출원은 대도시와 산업시설이 위치한 동부 지역(예: Handan, Shijazhuang, Zibo, Tangshan, Linyi, Hangshou 등)을 포함하며, 본 연구의 대상 지역과 일치한다. 연무 발생 기간 동안 대기질의 시공간적 분포 및 변화 양상을 정성적, 정량적으로 분석하기 위하여 인공위성 자료와 지상관측 자료, 그리고 기상 자료가 사용되었으며, 각 자료 목록에 대한 상세 설명은 표 1과 같다.

위성 관측 자료는 대표적인 지구관측위성인

TERRA와 AQUA 위성에 탑재된 MODIS 센서 관측 자료 중 Level 2 Aerosol Optical Thickness (AOT)와 Fire position (FP) 자료이며, 미국 NASA의 위성 자료 DB (https://earthdata.nasa.gov/)로부터 획득하였다. MODIS는 다중 파장 분광센서로서 TERRA와 AQUA 두 인공위성에 탑재되어 운영되었으며, 한반도 상공을 하루 2~4회 정도 지나가는 궤도를 가지고 있다. MODIS 에어러솔 자료는 NASA에서 개발된 에어러솔 산출 알고리즘을 사용하여 산출된 자료로서 파장 550 nm에서의 AOT이다(Levy *et al.*, 2013; Hsu *et al.*, 2013). MODIS 에어러솔 산출 알고리즘은 육지와 해상에서 복사전달과정의 해석 차이로 인하여 서로 다른 알고리즘을 사용하여 개발되었으며, AOT의 정확도는 육지에서 $\Delta AOT = \pm 0.05 \pm 0.15 AOT$ (Tanré *et al.*, 1997), 해양에서 $\Delta AOT = \pm 0.03 \pm 0.05 AOT$ (Remer *et al.*, 2005)를 가지는 것으로 알려져 있다. 가장 최근에 업데이트된 알고리즘은 Level 2 (version 6.1)로서 한반도 인근 지역에서의 정확도가 기존의 version 5보다 개선된 것으로 보고되었다(Lee, 2018). MODIS FP는 적외 채널(주로 파장 4 μm와 11 μm 채널)에서 열적 에너지 발산을 측정한 결과로서, 코드네임 MOD14 또는 MYD14를 가지고 있다. MODIS FP 정보는 가장 최근의 버전인 Collection 6 자료가 사용되었으며, 이전 버전인 Collection 5 자료가 오차범위는 2.4%인 데 반하여 Collection 6 자료는 1.2%를 가지고 있는 것으로 알려져 있다(Giglio *et al.*, 2016). 이러한 MODIS FP 자료는 화재 지점에 대한 공간 및 시간적 변화 분포를 모니터링함으로써, 화재 발생 빈도 또는 강도의 변화를 식별하는 데 사용될 수 있다.

지상관측자료는 2019년 12월 1일부터 12일 동안 국내와 중국의 대기환경관측망에서 관측된 일 평균 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$ 농도 관측 자료를 사용하였다. 중국의 관측망 자료는 주로 대도시 위주의 관측 사이트를 선택적으로 사용하였다. 기상관측자료는 시공간적 연속성 확보를 위하여 위성관측자료와 동일한 영역의 격자형 자료구조를 가지는 기상 재분석(reanalysis) 자료를 사용하였다.

## 3. 결과 및 토의

### 3. 1 국내 미세먼지 농도 변화

그림 3은 전체 관측 기간 중 지상 관측망에서 관측된 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$ 농도를 광역시와 도 단위로 평균한 값으로서 지역별 시간에 따른 PM 농도 변화를 보여준다. 전체 시도 단위에서 관측된 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$ 농도의 변화는 6일을 기점으로 서서히 상승하여 10일과 11일에 최고값을 나타내었다. 이후 12일부터는 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$ 농도값이 전반기에 보였던 농도 수준의 값으로 낮아졌으므로 이전의 청정 대기조건으로 돌아간 결과를 나타내고 있다. 관측 기간 전국 평균값의 범위는 $PM_{10}$이 $37.54 \pm 19.67$ μg/m$^3$, $PM_{2.5}$가 $23.88 \pm$

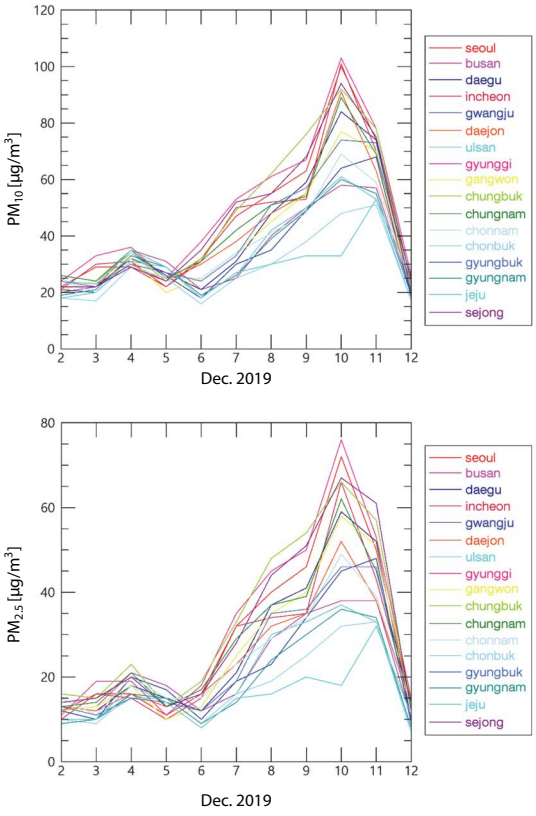


**Fig. 3.** Time series of $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ mass concentrations measured in 8 major cities and 9 provinces of Korea during 2~12 December 2019.

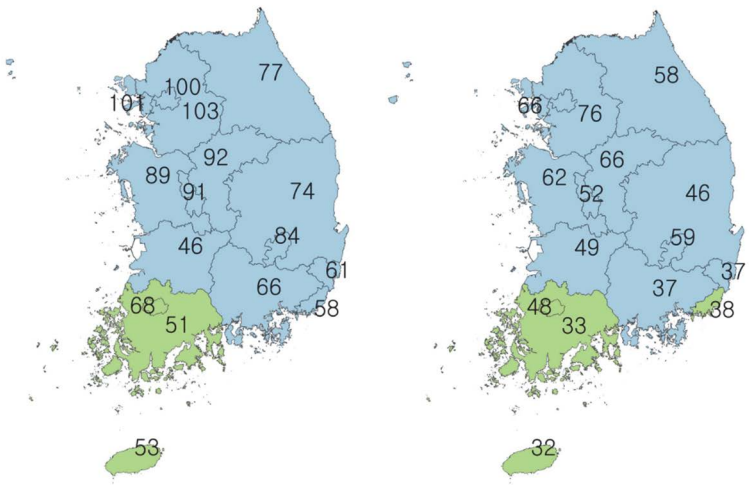


**Fig. 4.** Maximum values of (left) $PM_{10}$ and (right) $PM_{2.5}$ mass concentrations recorded during the haze period. Color represents day recorded of maximum PM concentration values (blue color: 10 December, green color: 11 December 2019).

15.31 μg/m$^3$으로 관측되었다. 그러나 연무 현상이 발생한 12월 10~11일의 PM 농도는 $PM_{10}$이 71.12±16.47 μg/m$^3$, $PM_{2.5}$가 48.00±13.33 μg/m$^3$으로 각각 평상시보다 89.5%와 101.0%가 상승하였다.

그림 4는 전체 관측 기간 중 최대 농도값에 대한 지역별 분포와 해당 날짜를 나타낸다. 최대 PM 농도는 경기도의 $PM_{10}$이 103 μg/m$^3$, $PM_{2.5}$가 76 μg/m$^3$을 기록하였고, 서울 및 경기도권의 오염도가 타 지역보다 높게 나타났다. 한편, 최대 농도가 나타난 날짜는 전라남북도 및 제주도를 제외한 전국이 12월 10일에 관측되었다. 그리고 최대 농도의 분포는 북동>남서 방향으로 구배가 나타남이 확인되었다. 그림 3과 그림 4의 결과는 국내에서 나타난 연무 현상의 원인이 국내 주요 인위적 발생원과 함께 외부에서의 유입된 미세먼지가 경기도 서부에서 유입되어 한반도로 유입된 가능성을 나타내는 것이다. 따라서 이 연무 현상에 대한 외부 유입가능성에 대한 분석을 위하여 인접 국가인 중국의 PM 관측 자료에 대한 경향 분석이 필요하며, 상세 결과는 다음 장에서 논의될 것이다.

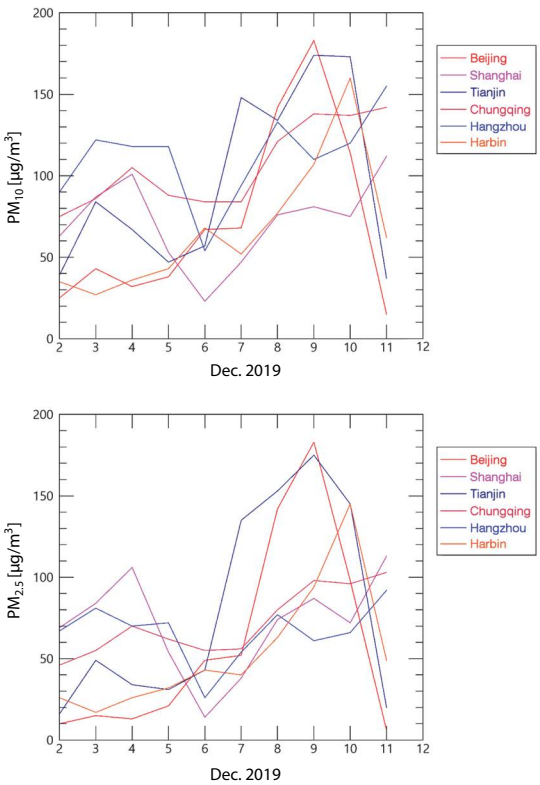


**Fig. 5.** Time series of (top) $PM_{10}$ and (down) $PM_{2.5}$ mass concentrations measured in 6 major cities of China during 2~12 December 2019.

### 3. 2 중국의 미세먼지 농도 변화

그림 5는 중국 지상 관측망 중 선택된 도시 (Bei-

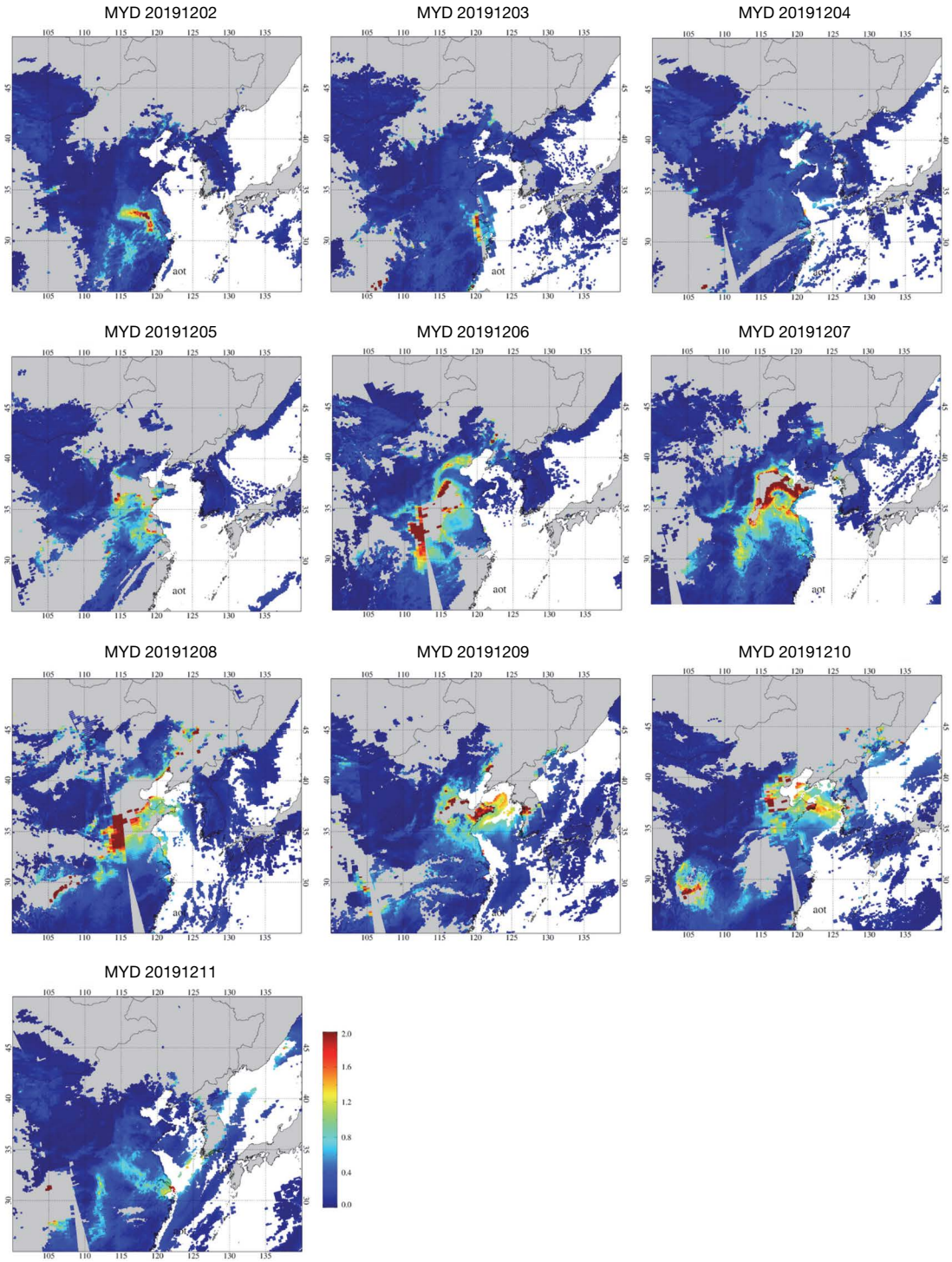


**Fig. 6.** AQUA MODIS AOT map during 2~11 December 2019.

jing, Shanhai, Tianjin, Chungqing, Hangzhou, Harbin)에서 관측된 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$ 농도를 일 단위 평균한 농도 변화를 보여준다. 중국 6개 도시에서 관측된 $PM_{10}$과 $PM_{2.5}$ 농도의 변화는 6일을 기점으로 서서히 상승하여 9일과 10일경에 최고값을 나타내었고, 이는 국내보다 1~2일 정도 먼저 발생한 것이다. 전체 관측 기간 평균값의 범위는 $PM_{10}$이 85.08±40.77 μg/m$^3$, $PM_{2.5}$가 65.26±43.29 μg/m$^3$으로 관측되어 국내 PM 평균값보다 $PM_{10}$은 2.27배, $PM_{2.5}$는 2.73배 높은 값을 보였다. 더욱이 Beijing의 경우, 2019년 12월 9일에 $PM_{2.5}$ 농도가 183 μg/m$^3$으로 매우 높은 값이 관측되었다. 이후 12월 10일 이후부터 PM 농도는 낮아지기 시작하여 청정 상태를 나타냄으로써, 미세먼지 농도에 대한 시간적 편차가 발생하였음을 알 수 있다.

이상의 결과를 통하여 중국에서도 고농도 연무 현상이 국내보다 먼저 발생하였으며, PM 농도의 수준이 국내보다 2배 이상 높았음을 확인하였다. 따라서 특정 기상 조건에서 중국의 대기오염물질이 국내로 유입될 수 있는 가능성을 제기할 수 있으며, 이러한 가설을 확인하기 위하여 관심 대상영역 내의 기상 자료 및 위성관측자료에 대한 분석은 필수적이다. 다음 장에서는 연무 발생 기간 동안의 기상 자료 및 위성 관측 자료에 대한 상세 결과가 논의될 것이다.

### 3.3 인공위성을 이용한 광역 모니터링

인공위성은 대기 칼럼 내에 존재하는 오염물질의 상대적인 총량에 관한 정보를 제공해 주며, 광역 감시가 가능한 장점이 있다. 따라서 고농도 연무 현상이 발생한 기간 동안의 인공위성 관측 정보는 입자상 물질의 공간적인 분포 변화를 파악하는 데 도움을 줄 수 있다. MODIS AOT의 시공간 분포를 분석한 결과는 그림 6과 같으며, 12월 2일~3일에는 주로 Hefei, Nanjing, Shanghai 등 동남부 지역의 AOT 값이 높았지만 12월 4일에는 청정한 대기 상태가 유지되었다. 그러나 12월 5일부터 10일까지 산동반도를 포함한 동북부의 대부분 지역이 높은 AOT 값을 나타내고 있어 이 지역의 대기질이 매우 악화되었음을 알 수 있다. 그리고 12월 11일에 다시 낮아졌으며, 이러한 결과는 3.3절의 지상관측 PM 농도 변화 패턴과 일치한다.

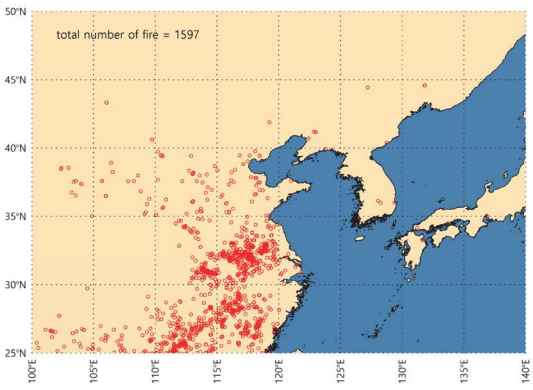


**Fig. 7.** MODIS observed fire positions during 2~11 December 2019.

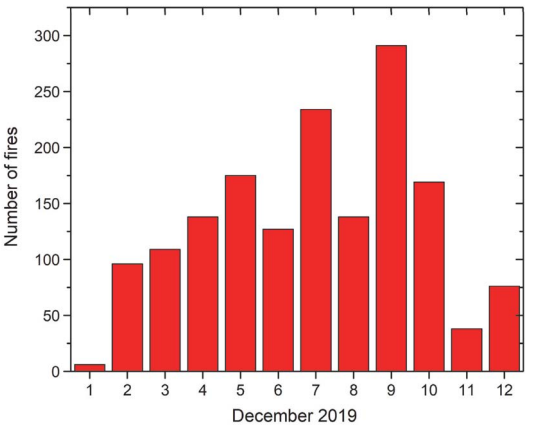


**Fig. 8.** Daily fire numbers observed from the MODIS during 2~11 December 2019.

12월 5~7일에 중국 내륙에서 높은 AOT 값을 나타낸 에어로솔 플룸(aerosol plume)은 12월 8일 보하이만(Bohai Bay)과 서해로 이동하였고, 12월 9일에는 경기도와 수도권 일부에서 관측이 되었다. 그리고 12월 10일에는 한반도를 따라 남하하면서 점차 약해지고 있는 경향이 나타났다. 이러한 경향은 3.2절의 국내 PM 농도의 일변화와 공간적 분포 결과와 일치한다. 그러나 12월 10일과 11일에 한반도 내륙에는 구

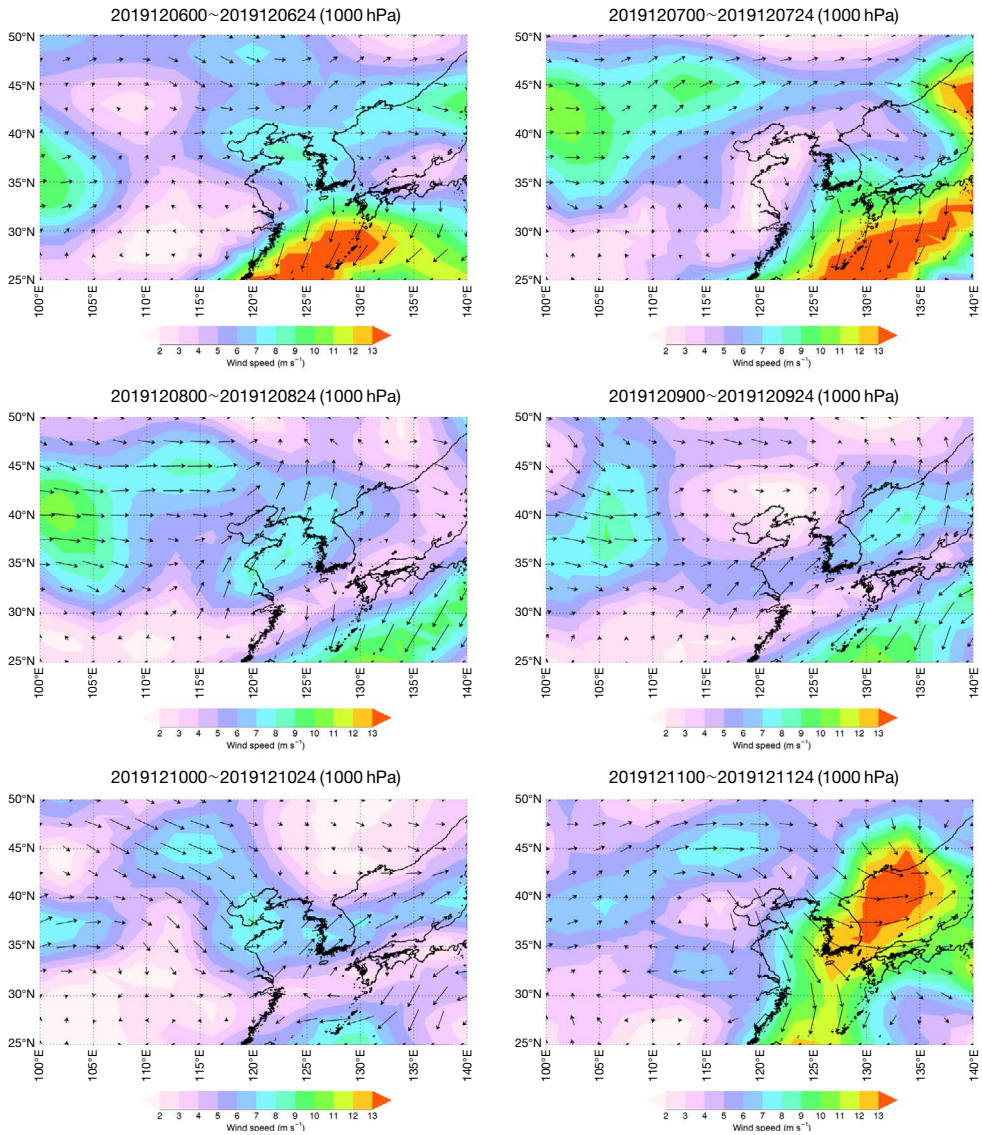


**Fig. 9.** NCEP reanalysis wind vector over wind speed map during 6~11 December 2019.

름이 위치하고 있어서 AOT 분석이 불가능하므로, 해당 지역에서의 오염성 입자에 의한 정보를 획득할 수 없는 단점이 있다.

그림 7은 MODIS를 이용한 화재 지점(Fire Position; FP) 탐지 결과로서, 2019년 12월 2일부터 11일까지 연구 대상 지역에서 발생한 화재 지점의 총 개수는 1,597개 지점이다. 한국과 일본의 몇 지점을 제외하고, 대부분의 화재 지점은 Hefei, Nanjing, Shanghai 등 동남부 지역의 AOT 값이 높았던 지역에 밀집되어 있으며, 북부 지역에 넓게 산포해 있음을 알 수 있다. 이러한 겨울철 화재 위치는 거의 매년 발견되고 있으며, Shin and Lee (2016)의 결과에서는 동아시아 화재 발생 지점 조사를 통하여 해당 지역에 위치한 농경지와 초지가 주요 발화지로 보고하였다. 이러

한 대량의 화재 지점에서 발생된 대기오염물질은 화재가 발생한 인근 지역 대기질에 영향을 미침과 동시에 장거리 이동 시 큰 문제가 될 수 있지만, 발생 규모와 빈도 그리고 그 영향에 대하여 종합적인 모니터링 및 영향평가에 대한 연구가 이루어지고 있지 않다.

그림 8은 MODIS FP의 일변화를 나타내며, 화재 발생 빈도 수의 변화는 12월 2일부터 증가하기 시작하여 12월 9일까지 계속 증가하였다. 이후 12월 10일부터는 화재 발생 빈도는 점차 줄어들기 시작하여 12월 11일에는 적은 수의 화재 지점이 탐지되었다. 이러한 화재 발생 빈도수의 일별 패턴은 지상 관측 PM 농도 변화 및 위성 관측 AOT 변화와 일치하므로, 중국 내륙의 고농도 연무 발생의 한 원인이 화재로 인한 것임을 증명한다.

### 3.4 기상 조건 및 궤적 분석

지상관측자료와 위성관측자료를 통하여 입자상 성분의 농축과 장거리 이동이 강한 연무 현상과 연관이 있는 것이 확인되었다. 고농도 연무 현상이 발생되기 이전인 12월 6일과 이후의 기상 조건이 PM 농도 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 재분석 자료를 이용하여 풍속과 풍향에 대한 공간 분포를 비교하였다(그림 9). 12월 6일은 중국 산동반도 이남지역 대부분이 낮은 풍속(<2 m/sec)의 정체성 기류가 위치하고 있고 북부지역은 4 m/sec 이상의 풍속과 서풍 계열의 바람이 한반도 방향으로 흐르고 있었다. 이러한 경향은 12월 7일까지 낮은 풍속을 가지는 기류가 만주지역으로 흐르는 것으로 나타났다. 이후 12월 8일 중국 산동반도를 포함하는 주변지역의 기류는 다소 풍속이 증가하였고(>4 m/sec), 한반도로 중서부로 이동하는 경향이 나타나기 시작하였으며 12월 9일까지 지속되었다. 12월 10일부터는 중국 북부지역의 기류가 산동반도를 거쳐 한반도로 이동하는 북부 기원의 바람이 흐르고 있었다. 바람의 경향을 요약하면, 중국내부에서 정체성 기류로 인한 오염물질의 누적, 남동부 지역의 기류가 북동부로 이동하여 한반도 중서부로 이동하여 빠르게 확산된 것으로 정리할 수 있다.

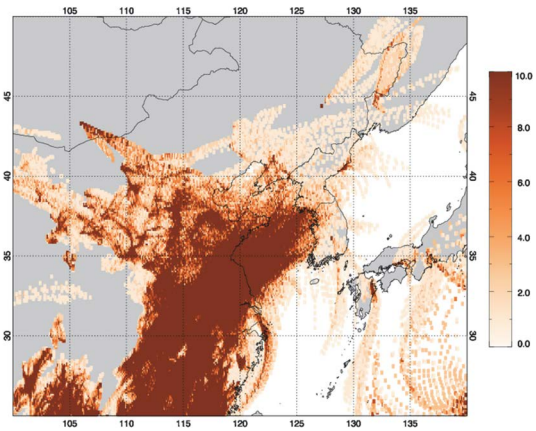


**Fig. 10.** Gridded forward trajectory results during 2~9 December 2019. Starting points of the forward trajectory are fire positions detected from the MODIS observations.

그림 10은 MODIS FP지점을 출발점으로 하는 전진궤적분석(forward trajectory)결과를 공간상의 격자별 누적값을 나타낸 결과이다. 각 격자별 수치는 12월 2일부터 9일까지 발생한 화재 지점과 기상 조건에 따라 이동한 air mass의 기록을 의미하므로, 큰 값을 가질수록 해당 지점에 화재로 인한 배출 오염물질이 영향을 받는 확률이 높다는 것을 알 수 있다. 이전의 결과와 마찬가지로, 궤적 분석 결과는 오염물질이 포함된 공기가 주로 발생원이 위치한 중국과 서해 및 한반도 중서부 지역에 집중적으로 지나갔음을 의미한다. 따라서, 이번 고농도 연무 사례는 중국의 화재 지점에서 배출된 바이오매스 연소성 오염물질과 기타 대륙에서 누적된 오염물질이 기상 조건의 영향으로 국내에 유입되어 미세 입자의 농도 증가에 기여하였을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

2019년 12월 발생한 고농도 연무 사례에 대하여 인공위성, 지상, 및 기상 관측 자료를 이용하여 입자상 물질의 광학두께, 화재 발생 지역, PM 질량 농도, 그

리고 기상 조건의 변화를 분석하였으며, 연무 현상과 관련된 입자상 물질의 발생 및 이동 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 국내에서 연무 현상이 발생한 12월 7~10일 기간을 제외한 2019년 12월 2일부터 12일까지 국내 PM 전국 평균값의 범위는 $PM_{10}$ = 27.26 ± 6.55 μg/m$^3$, $PM_{2.5}$ = 16.02 ± 6.12 μg/m$^3$이었고, 고농도 연무 현상이 발생한 12월 10~11일 기간은 $PM_{10}$ = 71.12 ± 16.47 μg/m$^3$, $PM_{2.5}$ = 48.00 ± 13.33 μg/m$^3$으로 각각 평상시보다 2.6배($PM_{10}$)와 3배($PM_{2.5}$) 상승하였다.

둘째, 동일 기간 동안 외부 유입 가능성을 알아보기 위하여 중국에 관측된 PM 농도의 변화를 분석한 결과, 주요 도시(Beijing, Shanhai, Tianjin, Chungqing, Hangzhou, Harbin)의 PM 농도의 최고값($PM_{10}$ = 85.08 ± 40.77 μg/m$^3$, $PM_{2.5}$ = 65.26 ± 43.29 μg/m$^3$)은 국내에서보다 1~2일 정도 먼저 발생하였고 이후 감소하는 경향이 국내의 연무 현상 발현 경향과 유사하였음으로 국내의 연무 현상과 관련이 있을 수 있음을 확인하였다.

셋째, 지상관측의 공간적 한계를 극복하기 위하여 위성 관측 자료를 이용하여 에어로솔 광학두께 분포 및 주요 발생원인 중 화재 발생 지역을 분석한 결과는 입자상 물질의 공간적 분포가 중국의 주요 오염원에서 축적되어 고농도 연무 현상이 발생한 기간 동안 한반도로 이동하고 있는 장면이 확인되었다. 그리고 인공위성에서 탐지된 중국 동부의 화재 발생 빈도수의 일별 패턴은 국내외 지상 관측 PM 농도 변화 및 위성 관측 AOT 변화와 일치하므로, 고농도 연무 발생의 한 원인이 화재로 인한 것으로 판단할 수 있었다.

마지막으로, 중국의 오염물질의 이동 경향을 알아보기 위하여 기상 자료 및 궤적분석결과는 12월 8일부터 풍향 변화에 따른 오염물질의 유입 경로가 극적으로 바뀌고 있어, 국내 고농도 연무 현상이 중국의 화재 지점에서 배출된 바이오매스 연소성 오염물질과 기타 대륙에서 누적된 오염물질이 기상 조건의 영향으로 국내에 유입된 결과였다.

그러나, 본 연구는 인공위성의 공간 해상도(약 500 m)로 인하여 화재 지점으로 탐지되지 못한 소규모 화재로 인한 배출을 고려하지 못한 점과, 국내 배출원의 현황을 정량화하지 못한 점으로 인하여 국내에서 배출된 오염물질이 연무 현상에 미치는 정밀한 기여도를 분석하지 못한 한계가 있다. 특히, 겨울철 시골지역에서 발생하는 인위적 배출원(난방, 취사, 산업시설 등)에서 발생된 오염물질이 안정된 대기조건에서 지역 규모로 미치는 영향은 아직 미지수이므로, 지역적인 특성에 맞는 연구 범위에서 입자상 물질의 화학 조성 및 장거리 이동에 따른 지역 대기질에 미치는 기여도 평가 등의 추가연구가 필요하다.

한편, 국내의 고농도 미세먼지 대응 관련 정책이 강력한 규제 중심으로 실현되고 있는 상황에서, 외부에서 유입된 고농도 미세먼지의 대한 대응이 아닌 국내 배출 규제만 이루어진다면 실효성이 매우 낮아질 것이다. 실례로, 금번 고농도 연무 사례가 외부 유입 영향이 큰 상황에서 차량 2부제 및 노후 차량 단속이 시행되어 경제활동을 위축시키는 효과를 낳을 것이므로, 보다 현실적이고 효과적인 대책이 필요한 시점이다.

## 감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2019R1I1A3A01062804).

## References

Giglio, L., Schroeder, W., Justice, C.O. (2016) The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products, Remote Sensing of Environment, 178, 31-41, https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054.

Hsu, N.C., Jeong, M.-J., Bettenhausen, C., Sayer, A.M., Hansell, R., Seftor, C.S., Huang, J., Tsay, S.-C. (2013) Enhanced deep blue aerosol retrieval algorithm: The second

generation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118, 9296-9315, https://doi.org/10.1002/jgrd.50712.

Lee, K.H. (2012) Impact of Northeast Asian biomass burning activities on regional atmospheric environment, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 15(1), 184-196 (in Korean with English abstract).

Lee, K.H. (2018) Estimation and validation of collection 6 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer aerosol products for East Asia, Asian Journal of Atmospheric Environment, 12(3), 193-203, https://doi.org/10.5572/ajae.2018.12.3.193.

Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A., Remer, L.A., Sayer, A.M., Hsu, N.C. (2013) The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean, Atmospheric Measurement Techniques, 6, 2989-3034, https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013.

Lim, J.H., Park, J.S., Ahn, J.Y., Choi, J.S., Oh, J., Moon, K.J., Hong, Y.D., Han, J.S. (2013) The characteristics of the air pollutants at Baengnyeong Island, a west inflow region of the Korean Peninsula, Journal of Korean Society of Urban Environment, 13(3), 267- 276 (in Korean with English abstract).

National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Annual report of air quality in Korea, 2018, Ministry of Environment, http://library.me.go.kr/search/DetailView.ax?sid=1&cid=5683728.

Oh, J., Park, J.-S., Ahn, J.-Y., Choi, J.-S., Lim, J.-H., Kim, H.-J., Han, J.-S. (2014) A study on the behavior of the Black Carbon at Baengnyeong Island of Korea peninsular, Journal of the Korean Society of Urban Environment, 14(2), 67-76 (in Korean with English abstract).

Park, S.-S., Cho, S.-Y., Jung, C.-H., Lee, K.-H. (2016) Characteristics of water-soluble inorganic species in $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ at two coastal sites during spring in Korea, Atmospheric Pollution Research, 7(2), 370-383, https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.018.

Park, S.-S., Kim, S.-J., Gong, B.-J., Cho, S.-Y., Kim, J.-C., Lee, S.J. (2013) Investigation on a haze episode of fine particulate matter using semi-continuous chemical composition data, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 29(5), 642-655 (in Korean with English abstract).

Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.-R., Ichoku, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F., Vermote, E., Holben, B.N. (2005) The MODIS Aerosol Algorithm, Products and Validation, Journal of Atmospheric Science, 62, 947-973, https://doi.org/10.1175/JAS3385.1.

Rohde, R.A., Muller, R.M. (2015) Air Pollution in China: Mapping of Concentrations and Sources, PLoS ONE, 10(8), e0135749, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135749.

Sayer, A.M., Smirnov, A., Hsu, N.C., Munchak, L.A., Holben, B.N. (2012) Estimating marine aerosol particle volume and number from Maritime Aerosol Network data, Atmospheric Chemistry and Physics, 12, 8889-8909, https://doi.org/10.5194/acp-12-8889-2012.

Shin, S.K., Lee, K.H. (2016) Trend analysis of wildland fires and their impacts on atmospheric environment over East Asia, Asian Journal of Atmospheric Environment, 10(1), 22-31, https://doi.org/10.5572/ajae.2016.10.1.022.

Tanré, D., Kaufman, Y.J., Herman, M., Mattoo, S. (1997) Remote sensing of aerosol properties over oceans using the MODIS/EOS spectral radiances, Journal of Geophysical Research, 102, 16971-16988, https://doi.org/10.1029/96JD03437.

Yang, G.-H., Lee, J.-J., Lyu, Y.-S., Chang, L.S., Lim, J.H., Lee, D.-W., Kim, S.-K., Kim, C.-H. (2016) Analysis of the recent trend of national background $PM_{10}$ concentrations over Korea, China, and Japan, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 32(4), 360-371 (in Korean with English abstract).

## Authors Information

이권호(강릉원주대학교 대기환경과학과 부교수)
박승식(전남대학교 환경에너지공학과 교수)