



논문

춘절 기간 중국 불꽃놀이로 발생된 대기 오염물질의 한반도 유입 Air Pollutants on the Korean Peninsula Caused by Fireworks in China during Chinese Lunar New Year

김관철*

광주과학기술원 국제환경연구소

Kwanchul Kim*

International Environmental Research Institute, Gwangju Institute of Science and Technology

접수일 2018년 11월 29일
 수정일 2018년 12월 5일
 채택일 2018년 12월 6일

Received 29 November 2018
 Revised 5 December 2018
 Accepted 6 December 2018

*Corresponding author

Tel : +82-(0)62-715-3392
 E-mail : fehouse@gmail.com

Abstract This study investigated the effects of fireworks using aerosol optical depth (AOD) and aerosol optical properties (AOP) from Terra/Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and Sunphotometer, and PM data were observed in Gwangju, South Korea and Shanghai, China. During the Lunar New Year period in 2014, the PM_{2.5} concentration by fireworks in Shanghai showed the highest concentration (356 µg/m³) on the day of Lunar New Year, and air pollutants of long-range transport by fireworks were affected the increase of PM₁₀ concentration and aerosol optical depth over the Korean peninsula (PM₁₀: 129 µg/m³, AOD: 0.68). These results show that the effect of fireworks, which was recognized as a local air pollution problem, can be transported to the Korean peninsula from China. The results of this study can be very useful for monitoring the atmosphere by firework effect over the Korean Peninsula.

Key words: Firework, PM, AOD, MODIS, AERONET

1. 서론

밤하늘을 밝히는 불꽃놀이는 화려한 색깔로 보는 이의 마음을 사로잡지만 대기 환경에는 대기 중 미세 먼지 농도를 증가시킨다. 이는 폭죽에 많은 금속성 물질을 포함되어 있기 때문이다. 예를 들어 납(Pb)은 불꽃 폭발을 일으키는 점화기로 널리 사용된다. 망간(Mn)과 이산화망간(Mn dioxide)은 밝은 빛을 위한 연료와 산화제 역할을 하며, 크롬(Cr)은 추진체의 연소 속도 촉매로 사용된다. 니켈(Ni)은 불꽃놀이를 위한 전기 점화 장치의 역할을 한다(Berger *et al.*, 1995). 이러한 금속성 물질들은 대기 중에 잔류하여 인간의 건강에 심각한 영향을 줄 수 있다. 미세먼지 농도가 급격하게 증가하면 천식 및 호흡기 질환, 심혈관 계

통에 영향을 주기도 한다(Shrey *et al.*, 2011).

그동안 새해 맞이 중국 등불 축제, 미국의 독립기념일, 프랑스의 대혁명 기념일 바스티유의 날(Bastille Day), 힌두교의 빛의 축제 인도의 디왈리(Diwali) 등에서 불꽃놀이 축제가 대기 환경에 미치는 연관성에 대한 연구가 이루어졌다(Licudine *et al.*, 2012; Perrino *et al.*, 2011; Vecchi *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2007). 그동안 불꽃놀이에 의한 대기 영향 연구는 대부분 에어로졸의 질량 및 화학적 특성의 변화를 관측하기 위한 시도였다. 이들 연구 중 일부는 에어로졸 광학적 특성과 연관시키기 위한 시도가 있었지만(Devara *et al.*, 2015; Vyas and Saraswat, 2012), 기존 연구에서는 장거리 수송되는 대기 오염물질의 공간적 특성 분포가 아니라 불꽃놀이에서 발생한 오염물

질에 의한 지역적 대기 변화를 탐구하는데 초점을 두고 있었다.

중국에서는 음력 1월 1일인 설날을 춘절이라고 부른다. 봄의 축제로도 알려진 중국의 춘절에는 액운을 쫓고 복을 드리우기 위해 음력 새해를 맞아 불꽃놀이를 한다. 중국의 전통문화이다. 매년 중국 정부에서는 대기 오염의 증가와 화재 발생을 막기 위해 불꽃놀이를 자체 조치를 취하고 있지만 여전히 대도시 및 인구밀집 지역을 중심으로 불꽃놀이가 행해지고 있어 이로 인한 대기 오염물질 발생은 심각한 수준이다.

본 연구에서는 2014년 중국 춘절 기간 불꽃놀이에 의해 발생하는 대기 오염물질이 장거리 수송되어 국내 대기 환경에 미친 영향을 중국 상하이와 광주에서 측정된 미세먼지 자료와 선포토미터의 에어로졸 광학적 특성 자료를 이용하여 분석하고자 한다. 장거리 수송된 미세먼지의 이동 경로 및 에어로졸 광학적 두께를 파악하기 위해 역궤적 분석과 위성자료를 활용하여 광역적 모니터링이 동시에 이루어졌다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 불꽃놀이에 의한 오염물질이 발생하는 중국 상해지역과 장거리 수송되는 오염물질의 영향을 받는 광주지역을 선정하여 춘절 연휴 기간인 2014년 1월 28일부터 2014년 2월 2일까지 미세먼지의 측정 자료 및 원격탐사 관측 자료를 사용하였다.

한반도에서는 광주과학기술원을 관측지점으로 선정하였다. 광주과학기술원 측정소는 광주지역 북쪽 끝에 위치하여 북쪽에는 논밭이나 산으로 둘러싸여 있으며 봄철 3~5월에는 주변 논밭에서 생체 소각(Biomass Bunning)이 간헐적으로 발생한다. 남쪽에는 도심지역이 밀집해 있고 남서쪽 약 3 km 떨어진 공단지역에서 발생하는 대기오염물질의 영향을 받기도 한다. 중국 상하이지역으로부터는 약 500 km 이상 떨어져 있다.

NASA에서 운영하는 AErosol RObotic NETwork

(AERONET)의 선포토미터(sunphotometer) 자료는 1993년 처음 관측이 시작된 이후 점차 전 지구적으로 확대되어 관측이 시행되고 있다. 태양광을 사용하며 다파장에서의 에어로졸 광학적 두께 및 특성 값을 제공하고 있다. 선포토미터로 측정된 에어로졸 광학 두께는 지표면에서부터 대기 최상층(TOA; Top Of Atmosphere)까지 존재하는 광소산계수의 총합이며, 입자상 오염물질의 농도 분포를 평가하는 간접적 지표로 사용된다. 광주과학기술원의 선포토미터 사이트(Gwangju_GIST; 35.228°N, 126.843°E)는 태양이 떠 있는 시간에 15분에 한 번씩 자료를 생산하고 있으며, 태양광의 파장별 소산계수를 측정하여 에어로졸 광학적 두께(Aerosol Optical Depth; AOD)를 산출하며, 파장역지수(Angstrom exponent) 사용하면 입자의 크기 특성, 입자의 크기 분포를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 선포토미터의 에어로졸 광학적 두께 자료를 NASA's AERONET Data Synergy Tool (http://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/bamgommas_interactive)에서 제공하는 구름의 영향이 제거된 데이터 검토정 자료인 Level 2.0 자료를 사용하였다(Holben *et al.*, 1998).

Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer (MODIS) Level 1B와 Level 2 collection 6는 NASA의 Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System (LAADS) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)에서 측정된 자료를 사용하였고 Terra 위성의 MODIS L1B 자료는 AOD를 산출에 사용되었다. 이때 분석 알고리즘은 Lee and Kim, 2010에서 제시한 MODIS SaTellite Aerosol Retrieval (MSTAR) 방법을 사용하여 1 km 해상도를 산출하였고, MODIS/Terra Level 2 collection 6 자료 10 km 해상도의 AOD 자료를 활용하였다.

본 연구의 광주지역의 PM₁₀ 농도 자료는 β -ray 방법으로 측정된 국가 대기질 측정망의 자료 D/B를 이용하였으며 AirKorea (<http://airkorea.or.kr>) 1시간 평균 미세먼지(PM₁₀) 자료를 사용하였다. 연구에 사용된 광주 건국동 측정 사이트는 광주과학기술원 사이

트에서 약 2 km 이내로 가까운 거리에 위치해 있어 비교가 가능하다.

중국 상해에 위치한 미국 영사관 (32.211°N, 121.448°E)에는 PM_{2.5}를 측정하는 대기질 모니터링 사이트가 있다. 관측기기는 MetOne BAM-1020으로 측정된 1시간 평균 자료를 트위터에 실시간 공개하고 있어 분석에 활용하였다 (<https://twitter.com/cgshanghaiair>).

불꽃놀이에 의해 발생된 오염물질의 이동을 확인하기 위해서는 미국 해양대기청(NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT 모델 (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model, www.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php) 자료를 사용하였다. HYSPLIT 모델에 사용된 기상장은 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) GDAS (Global Data Assimilation System)에서 제공하는 GDAS1 모델이다.

3. 연구 결과

그림 1은 2014년 1월 29일부터 2014 2월 2일까지 Terra의 MODIS LIB에서부터 MSTAR 알고리즘으로 분석된 1 km 해상도 에어로졸 광학적 두께 (좌)와 Terra로 분석된 MODIS L2 10 km 해상도 에어로졸 광학적 두께 (우)를 일별로 나타낸 것이다. 에어로졸의 광학적 두께는 대기 중에 존재하는 에어로졸에 의해 빛이 산란과 흡수를 통해 소산되는 양을 측정하는 것으로 일반적으로 대기 중에 에어로졸이 많이 분포하면 값이 높아진다. 관측 기간 동아시아지역은 편서풍의 영향으로 중국에서 발생한 높은 농도의 에어로졸이 한반도 상공을 지나 일본까지 장거리 수송되고 있음을 확인할 수 있었다. 본격적인 불꽃놀이가 시작하기 전인 1월 29일에는 한반도에는 에어로졸 광학적 두께가 0.3 이하로 농도가 낮았다. 춘절 전날인 1월 30일부터 상해 주변 지역 에어로졸 광학적 두께가 눈에 띄게 증가하여 춘절 1월 31일 이후에는 중국 상해지역에서 에어로졸 광학적 두께가 1.0이 넘는 고농

도가 측정되었으며, 장거리 수송으로 에어로졸이 한반도 남쪽지역과 제주도지역까지 영향을 주는 것을 위성 자료로부터 확인할 수 있었다.

매년 반복되는 불꽃놀이에 의한 에어로졸 광학적 두께의 변화를 보기 위해 Terra 위성의 MODIS L2 collection 6을 자료를 2001년부터 2014년까지 해상도 10 km 픽셀을 10 km × 10 km 격자 평균하였다. 상해 지역 에어로졸 광학적 두께를 춘절을 기준으로 이틀 전 (그림 2(a)), 하루 전 (그림 2(b)), 춘절 (그림 2(c)), 하루 후 (그림 2(d))를 평균하였다. 춘절 2일 전에는 상해 주변지역의 평균 에어로졸 광학적 두께 농도가 춘절일에 비해 상대적으로 낮았다가 춘절 하루 전에 상해의 주요 건물과 야경을 가장 잘 조명할 수 있는 황푸강 주변을 중심으로 평균 에어로졸 광학적 두께 농도의 증가가 뚜렷하게 나타났고, 춘절부터는 상해 및 주변지역까지 에어로졸의 증가 지역이 확대되어 인구분포가 높은 지역을 중심으로 급격하게 에어로졸 광학적 두께의 증가가 일어났다.

그림 3은 춘절 기간에 측정된 중국 상해지역 미국 영사관에서 측정된 2014년 1월 29일부터 2014년 2월 2일까지 시간당 PM_{2.5} 농도와 광주지역 건국동 측정소에서 측정된 PM₁₀의 농도 변화를 보여준다. 상해에서는 PM_{2.5}의 농도가 1월 29일에 22시부터 급격하게 증가하여 23시에 100 µg/m³을 초과하였고 점차 증가하여 춘절 하루 전 1월 30일 23시에서 춘절 1월 31일 0시에 1시간 평균 PM_{2.5} 농도가 356 µg/m³을 기록할 만큼 높아졌다. 이는 US EPA의 24시간 기준 평균 (<https://www.epa.gov>) 35 µg/m³보다 약 10배 이상 높은 수치를 보였고, 중국의 24시간 1차 기준 PM_{2.5} 농도 75 µg/m³보다 약 4.7배 높았다. 광주의 경우에는 1월 30일 15시에는 11 µg/m³를 기록하여 강수로 인한 미세먼지가 거의 없는 맑은 날을 보이다가 22시에 갑자기 PM₁₀ 농도가 증가하여 1월 31일 춘절이 되자 129 µg/m³를 기록하였다. 이는 한국 연평균 미세먼지 농도 기준 50 µg/m³에 약 2.6배로 높아졌다. 광주지역은 설 연휴로 인해 산업활동이 제한적이고 강수에 의한 세정작용으로 미세먼지 농도가 거의 없는 상태에

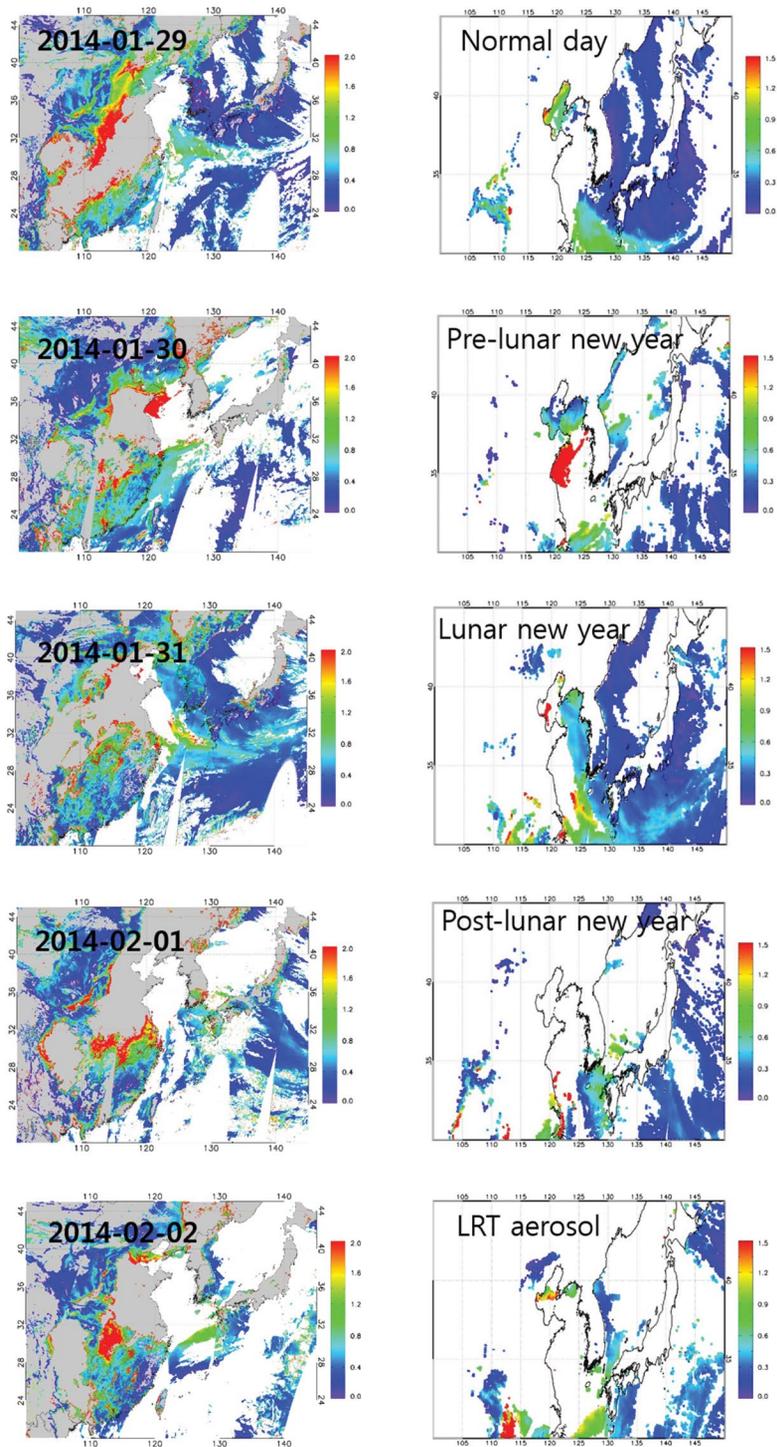


Fig. 1. Spatio-temporal distribution of Terra MODIS MSATR AOD (left) L2 AOD (right) over Northeast Asia during Lunar New Year period in 2014.

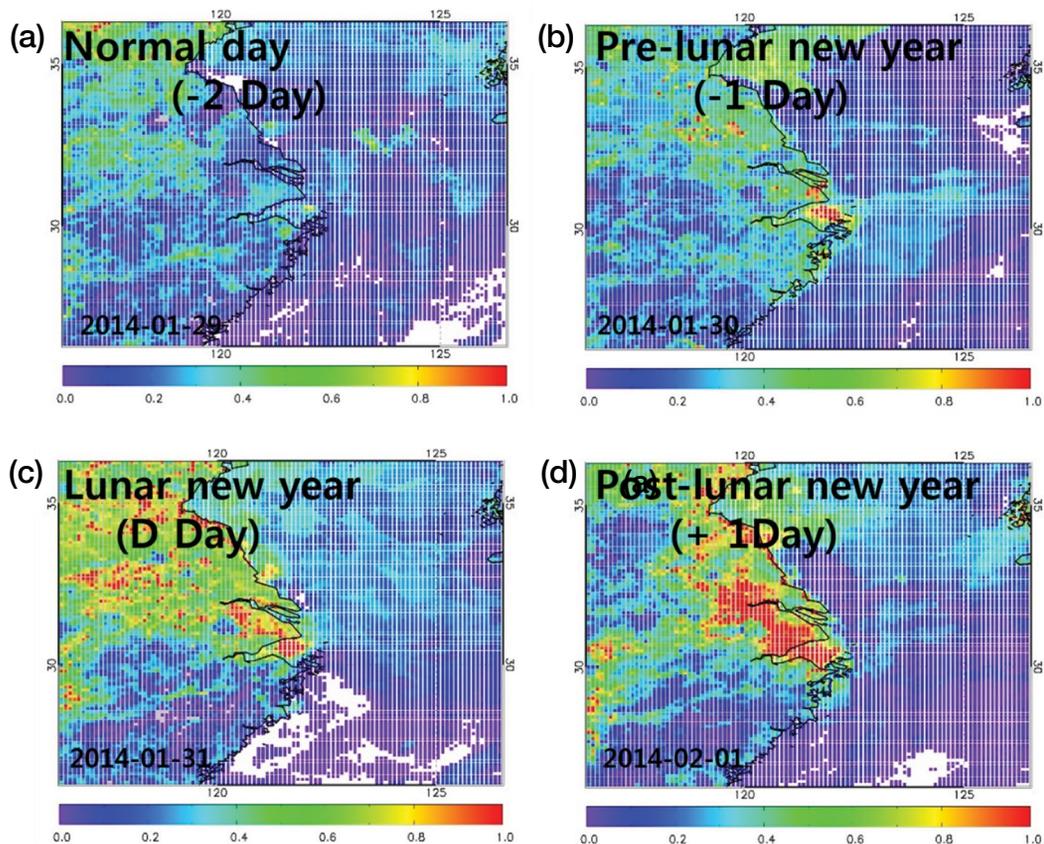


Fig. 2. 14-year Average MODIS-AOD for (a) normal day, (b) pre-lunar new year, (c) lunar new year, and (d) post-lunar new year.

서 갑자기 PM₁₀ 농도가 증가하는 것은 외부적으로 유입에 의한 미세먼지의 영향으로 판단되었다. 불꽃놀이가 주로 행해지는 1월 30일 자정과 31일 자정에 상해지역에서 높은 미세먼지 농도가 반복적으로 높아지는 현상이 발생하였고 곧바로 광주지역에 미세먼지가 같이 높아졌다.

유입된 PM₁₀의 발생지를 분석하기 위해 NOAA의 HYSPLIT 모델을 사용하여 PM₁₀ 농도가 가장 높았던 2014년 2월 1일 00시를 기준으로 1,000 m, 1,500 m, 2,000 m 높이에서의 48시간 역궤적 분석을 수행하였다(그림 4). 역궤적 분석은 공기괴(Air mass) 이동 경로 및 미세먼지 가능 배출원에 대한 일차적인 정보를 보여준다. 역궤적 분석 결과 중국 상해에서 발생한 에어로졸이 제주도 서쪽지역을 통과하여 광주지역까

지 직접적으로 영향을 받을 것으로 판단된다. 따라서, 위성자료와 역궤적 분석 방법의 결과로 2014년 춘절에 광주지역에 갑자기 발생한 고농도 미세먼지의 영향의 원인은 중국 상해지역에서 발생한 불꽃놀이의 미세먼지 영향으로 판단된다. 장거리 수송된 중국발 미세먼지가 광주지역에 PM₁₀ 농도를 급격하게 높이는 것으로 추정된다.

발생한 에어로졸의 광학적 두께 및 특성을 파악하기 위해서 광주지역에서 15분 간격으로 측정된 500 nm 파장에서의 선포토크미터 에어로졸 광학적 두께 값과 440~870 nm 두 개의 파장에서 파장역치수 값을 비교하였다(그림 5). 그림 5에서 에어로졸 광학적 두께는 2014년 1월 29일에 평균 0.10 ± 0.002 이하의 낮은 값을 보였고 1월 30일에는 강수로 인해 측정되지

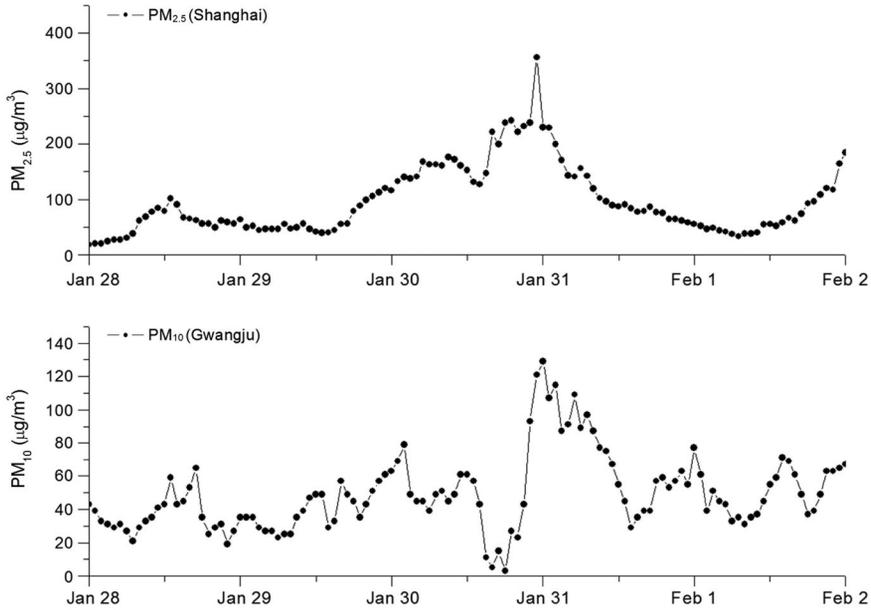


Fig. 3. Hourly variation of PM_{2.5} concentration in Shanghai, China and PM₁₀ concentration in Gwangju, Korea during Lunar New Year period in 2014.

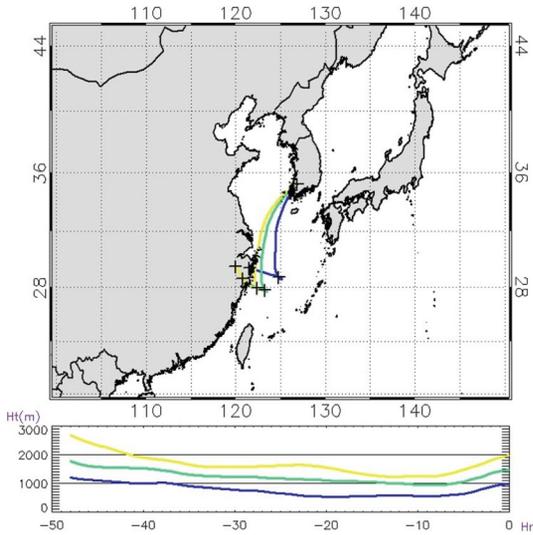


Fig. 4. The 2-day backward trajectories of air at 1000, 1500, and 1500 m altitude in February 1, 2014.

않았다. 춘절 1월 31일을 기점으로 상해에서 발생한 에어로졸에 의해 에어로졸 광학적 두께가 급격하게

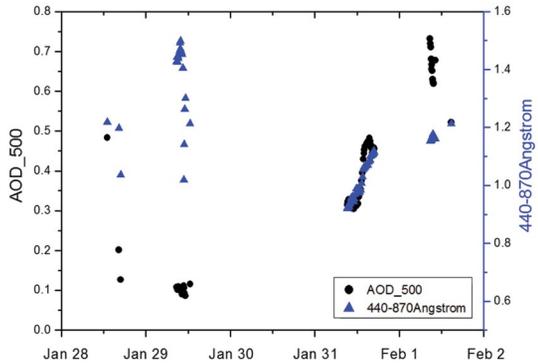


Fig. 5. Variations of Sunphotometer AOD at 500 nm and 404~870 Angstrom Exponent during Lunar New Year period in 2014.

상승해 0.68까지 높아졌다. 파장역지수는 대기 중 부유하는 에어로졸의 크기분포를 나타내는 척도로 황사처럼 입자의 크기가 큰 에어로졸이 관측되었을 때 0에 가까운 낮은 값을 보이고 입자가 미세한 에어로졸 경우 2에 가까운 값을 갖는다. 파장역지수는 불꽃

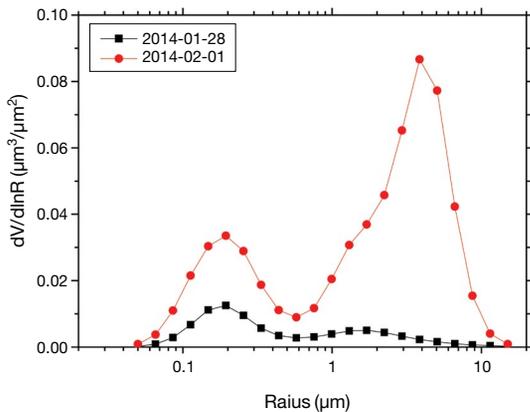


Fig. 6. Volume particle size distributions on January 28, 2014 (black rectangular line) and February 1, 2014 (red circle line).

놀이에 의한 에어로졸의 영향이 없는 1월 29일에 1.38 ± 0.13 , 불꽃놀이에 에어로졸에 영향을 받은 춘절 1월 31일에 1.02 ± 0.07 로 약간 낮아졌지만 큰 차이는 없었다. 하지만 입자 크기 분포 (Volume particle size distribution)는 차이를 보였다(그림 6). 맑은 날인 2014년 1월 28일에서는 미세먼지 중 미세입자와 조대입자의 분포가 비슷한 형태를 보였다. 하지만 춘절 1월 31일에는 상해지역에 발생한 $PM_{2.5}$ 의 영향으로 미세입자의 비율도 높아졌지만 조대입자의 비율은 더 높은 분포를 보였다. 이는 보통 미세입자 비율이 높아지는 형태의 겨울철 연무와 다른 입자의 크기 분포를 보였으며 장거리 수송된 에어로졸 중 조대 입자에 불꽃놀이에 의해 발생한 중금속이 섞여 있을 가능성이 높을 것으로 판단된다. 향후 관측에 중금속 분석을 통해 이를 규명해야 한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 중국 상해에서 불꽃놀이로 발생하는 고농도 미세먼지가 한반도에 영향을 끼치는지를 분석해 보았다. 이를 위해 Terra 위성의 MODIS 자료를 사용하여 2014년 춘절 기간에 에어로졸 광학적 두

께의 변화를 분석하였다. 중국 상해지역의 에어로졸 광학적 두께의 증가가 관측되었으며, 발생된 미세먼지는 장거리 수송되어 한반도의 광주지역에 미세먼지 농도 상승에도 영향을 끼치는 것으로 판단됐다. 2001년부터 2014년까지 중국 상해지역을 격자별 평균한 춘절 기간 에어로졸 광학적 두께 변화는 춘절이틀 전에는 낮았다가 춘절 하루전부터 급격히 증가하여 춘절과 춘절 다음 날까지 1.0이 넘는 높은 광학적 두께 값을 보였다.

중국 상해지역의 $PM_{2.5}$ 농도는 춘절 하루 전 저녁부터 급격하게 증가하여 23~24시 평균미세먼지 농도가 가장 높았다($356 \mu\text{g}/\text{m}^3$). 이때 광주지역에서도 PM_{10} 농도가 최고 $129 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기록하였고 춘절이틀 전에는 강우에 의해 낮은 미세먼지 농도를 보였다가 춘절에는 급격히 높아지는 것이 관측되었다. 이는 NOAA의 역궤적 분석 방법인 HYSPLIT 분석을 통해 고농도 미세먼지가 기류를 타고 한반도 광주지역에 영향을 끼치고 있음을 알 수 있었다. 춘절 기간에 광주지역의 에어로졸의 광학적 특성은 춘절에 에어로졸 광학적 두께가 0.6 이상의 높은 값을 보였고 파장역치수는 춘절에 약간 낮아졌지만 큰 변화가 없었다. 하지만 입자 크기 분포에서 조대 입자의 비율이 상대적으로 높아 중금속이 섞여있을 가능성이 있었다.

본 연구를 통하여 중국에서 불꽃놀이로 발생한 고농도의 미세먼지가 장거리 수송되어 국내 대기에 직접적인 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 이는 국내 대기환경, 특히 미세먼지의 발생 동향을 파악하기 위해서 중국 등 국외에서 유입되는 미세먼지의 지속적인 모니터링이 필요함을 시사한다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단 학문후속세대양성 리서치 펠로우(NRF-2016R1A6A3A11936212)의 지원으로 수행되었습니다. 위성분석에 도움을 주신 강릉원주 대학교에 이권호 교수님께 감사드립니다. The author

also thanks the NASA-US for making available the Collection 6 MODIS data.

References

- Berger, B., Charsley, E.L., Rooney, J.J., Warrington, S.B. (1995) Thermal analysis studies on the zirconium/nickel alloy-potassium perchlorate-nitrocellulose pyro-technic system, *Thermochimica Acta*, 269-270, 687-696. [[https://doi.org/10.1016/0040-6031\(95\)02670-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(95)02670-3)]
- Devara, P.C.S., Vijayakumar, K., Safai, P.D., Made, P.R., Rao, P.S.P. (2015) Celebration-induced air quality over a tropical urban station, Pune, India, *Atmospheric Pollution Research*, 6(3), 511-520. [<https://doi.org/10.5094/APR.2015.057>]
- Holben, B.N., Eck, T.F., Slutsker, I., Tanre, D., Buis, J.P., Setzer, A., Vermote, E., Reagan, J.A., Kaufman, Y.J., Nakajima, T., Lavenu, F., Jankowiak, I., Smirnow, A. (1998) AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, *Remote Sensing of Environment*, 66(1), 1-16. [[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00031-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00031-5)]
- Lee, K.H., Kim, Y.J. (2010) Satellite remote sensing of Asian aerosols: a case study of clean, polluted, and Asian dust storm days, *Atmospheric Measurement Techniques*, 3(6), 1771-1784. [<https://doi.org/10.5194/amt-3-1771-2010>]
- Licudine, J.A., Yee, H., Chang, W.L., Whelen, A.C. (2012) Hazardous Metals in Ambient Air Due to New Year Fireworks During 2004-2011 Celebrations in Pearl City, Hawaii, *Public Health Reports*, 127(4), 440-450.
- Perrino, C., Tiwari, S., Catrambone, M., Torre, S.D., Rantica, E., Canepari, S. (2011) Chemical characterization of atmospheric PM in Delhi, India, during different periods of the year including Diwali festival, *Atmospheric Pollution Research*, 2(4), 418-427. [<https://doi.org/10.5094/APR.2011.048>]
- Shrey, K., Suchit, A., Deepika, D., Shruti, K., Vibha, R. (2011) Air pollutants: The key stages in the pathway towards the development of cardiovascular disorders. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 31(1), 1-9. [<https://doi.org/10.1016/j.etap.2010.09.002>]
- Vecchi, R., Bernardoni, V., Cricchio, D., D'Alessandro, A., Fermo, P., Lucarelli, F., Nava, S., Piazzalunga, A., Valli, G. (2008) The impact of fireworks on airborne particles. *Atmospheric Environment*, 42(6), 1121-1132. [<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.047>]
- Vyas, B., Saraswat, V. (2012) Studies of Atmospheric Aerosol's Parameters during Pre-Diwali to Post-Diwali festival period over Indian Semi Arid Station i.e., Udaipur, *Applied Physics Research*, 4(2), 40. [<https://doi.org/10.5539/apr.v4n2p40>]
- Wang, Y., Zhuang, G., Xu, C., An, Z. (2007) The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing, *Atmospheric Environment*, 41(2), 417-431. [<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.043>]

Authors Information

김관철 (광주과학기술원 국제환경연구소 연구조교수)