

논문

중국 화력발전소의 대기오염물질 배출 저감 효과가 지역 대기질 개선에 미치는 영향

Effect of Reduced Emissions from Thermal Power Plants in China on Local Air Quality Improvement

이권호, 신성균^{1),*}

강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과, ¹⁾서울기술연구원 기후환경연구실

Kwon-Ho Lee, Sung-Kyun Shin^{1),*}

Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University, Gangneung, Republic of Korea

¹⁾Division of Climate & Environmental Research, Seoul Institute of Technology, Seoul, Republic of Korea

접수일 2022년 3월 24일
수정일 2022년 4월 7일
채택일 2022년 4월 11일

Received 24 March 2022
Revised 7 April 2022
Accepted 11 April 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)2-6912-0956
E-mail : skyun@sit.re.kr

Abstract In September 2021, China encountered the shortage of coal and emission activity shrunk to the lowest it had been since February 2020, when coronavirus lockdowns paralyzed the economy. Despite social and economic concerns, this event has brought unexpected positive consequences for environmental quality. In this study, we investigated the impact of restricted thermal power plants operations on local air quality is investigated. For this purpose, social statistics, satellite observations, ground-based air quality measurements, and meteorology data were analyzed to estimate the spatio-temporal characteristics of air pollutants. As a result, significant reductions in the concentrations of air pollutants were found. It was about 11.13% lower than the reduced concentration due to the coronavirus lockdowns period in China. Compared to the average value during the normal year for 2015~2019, large decreased values of SO₂ (−38.81%), CO (−24.78%), NO₂ (−54.26%), PM₁₀ (−51.60%), and PM_{2.5} (−56.35%) were measured in Seoul, Korea. Satellite observation data confirm that these large drop in air pollution levels occurred in both countries, serving as a valuable proof of the emission control impact on local air quality. Moreover, the easterly wind along with the increased precipitation rate in China could affect the wet deposition and dilution of air pollutants.

Key words: Emission, Air quality, Air pollutants, Aerosol

1. 서론

지난 수십 년간 인구 증가와 도시화로 인해 중국을 포함한 많은 개발도상국에서 대기질 상태가 지속적으로 악화되었다(WHO, 2016). 그리고 대기환경 기준물질인 일산화탄소(CO), 질소 산화물(NO 및 NO₂), 이산화황(SO₂), 오존(O₃) 및 입자상 물질(PM)의 대기 중 농도 증가는 심혈관 건강에 부정적인 영향을 미친 것으로 알려져 있다(US EPA, 2018; Lelieveld *et al.*,

2015). 그러나, 최근 대기오염물질의 배출을 줄이기 위한 인위적인 노력으로 주요 배출원의 제어, 교통 제한과 같은 시도는 긍정적인 효과를 나타내면서 온실 가스는 물론 대기오염물질의 배출이 크게 감소한 것으로 보고되었다(Wong *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2020). 예를 들면, 중국에서 개최된 올림픽과 같은 국제적인 행사기간 동안 공장과 자동차 운행 제한 등의 통제 정책은 오존을 제외한 기준 오염물질의 농도를 상당히 감소시킨 것으로 보고되었다(He *et al.*, 2016).

사회적인 현상이 대기질에 직접적인 영향을 끼친 사례는 최근의 코로나 봉쇄에 관한 사례를 들 수 있다. 최근의 코로나 봉쇄로 인한 교통량 저감 및 사회적 활동 감소는 대기오염물질의 배출량 감소뿐만 아니라 지역 대기질에 긍정적인 영향을 나타냈음에 관한 연구 사례가 보고되었다(Chen *et al.*, 2020; Xu *et al.*, 2020). 경제 활동 및 운송 제한으로 인한 배출량 감소는 대기오염물질 중 CO (36%) 및 NO₂ (30~52.8%) 농도의 감소와 상관관계가 높았으며(Filonchyk *et al.*, 2020), 미국항공우주국(National Aero Space Agency; NASA)과 유럽우주국(European Space Agency; ESA)의 인공위성 관측 결과에서는 2020년 1월에서 2월 사이 중국 동부와 중부의 NO₂ 농도가 10~30% 감소한 것을 보고하였다(ESA, 2020; NASA, 2020).

한편, 2021년 9월부터 중국에서는 이례적인 석탄 공급 부족과 가격 상승으로 인하여 대부분의 석탄을 연료로 사용하는 많은 화력발전소가 가동 시간을 줄이거나 멈추었다는 사실이 알려졌다(Forbes, 2021). 중국의 석탄 화력발전에 의한 전력 생산량은 2020년 기준 전체 전력 생산의 64.2% (cf. 한국=36.3%)를 차지하고 있으며(BP, 2021), 석탄 가격의 상승으로 화력발전소의 가동이 중단된 것이 주요 원인으로 알려졌다. 석탄의 부족은 발전소의 가동 및 공장 폐쇄, 교통 제한과 같은 연쇄 효과가 나타나게 되었으며, 중국 내 석탄 화력발전소의 운영 저하는 가정에서의 전력 에너지 부족 및 산업 시설의 운영에도 영향을 미쳤다. 원자재 부족으로 인해 발전 에너지 생산에 부족이 발생했음에도 불구하고, 이번 에너지 위기는 코로나 봉쇄 효과와 마찬가지로 대기오염물질의 배출량 저감으로 인한 대기 환경에 대한 긍정적인 결과를 예측 가능하다.

중국의 대기질 현황은 국내 대기질과 밀접한 관련이 있으며(Lee and Park, 2020), 배출량의 저감이 국내 대기환경에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다. 따라서, 본 연구에서는 2021년 가을에 발생한 대기질 개선 현상에 관하여 중국의 배출원 변화, 지상에서의 지점 대기질 관측, 인공위성을 이용한 광역 대기 관측, 그리고 기상 조건 분석 자료를 이용하여 중국의 배출

저감이 지역 대기오염물질에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위하여 국내 대기질 개선 현상에 관한 원인 규명을 위하여 장거리 이동 특성과 기상학적 조건에 관한 요인적 분석 및 주요 배출원에 대한 오염물질의 이동확산 특성에 대한 정보 제공을 목적으로 하였다. 본 연구 결과는 인위적인 배출원 조절이 지역 내 대기질에 미치는 관계를 이해하는 데 유용한 정보를 제공할 것이다.

2. 자료 및 방법

2.1 자료

본 연구의 연구기간은 중국의 석탄 부족 현상이 보고되었던 2021년 가을을 포함하는 기간이며, 해당 기간에 대한 상대적인 비교를 위하여 이전 6년 동안(2015년~2020년)을 대상으로 설정하였다. 연구 대상 지역은 동경 100°~140°, 북위 25°~50°에 해당하는 한반도와 중국을 포함하는 영역으로서, 중국의 석탄 화력발전소가 위치하고 있는 지역을 설정하였다(그림 1 참조). 전체 기간 동안 대기오염물질의 시공간적 변화를 정성적, 정량적으로 분석하기 위하여 지상 대기질 관측 자료, 위성 관측 자료, 기상 자료가 사용되었으



Fig. 1. Locations of the selected ground based air quality monitoring stations within a region of interest in this study (100°E~140°E, 25°N~50°N).

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

Data	Instrument	Measured Parameters	Resolution
Statistics	–	Thermal power	Monthly
Satellites	MODIS	Aerosol optical thickness	10 km × 10 km
	OMI	NO ₂ column density	0.25° × 0.25°
	GPM	Precipitation rate	0.1° × 0.1°
Ground stations	Air quality monitor	SO ₂ , CO, NO ₂ , O ₃ , PM _{2.5} and PM ₁₀ mass concentrations	Daily, point
Meteorology	NOAA's NCEP reanalysis	Wind speed, wind direction	Daily, 0.25 degree

며, 각 자료는 표 1에 상세한 설명을 하였다.

2.2 통계 자료

본 연구에서 사용된 통계 자료는 중국의 석탄 화력 발전소의 연도별 발전량 정보를 포함하며, 중국 국가 통계국(National Bureau of Statistics of China) (<https://data.stats.gov.cn/>)으로부터 획득하였다. 그리고 전 세계의 석탄 화력발전소에 대한 정보를 제공하는 Global Coal Plant Tracker (GCPT) (<https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/>)에서 현재 가동 중인 석탄 화력발전소의 목록을 수집하였다. GCPT 데이터는 2021년 현재까지 전 세계 화력발전소의 위치와 가동 능력에 대한 정보를 제공해 준다.

2.3 지상 관측 자료

지상 관측 자료는 2015년~2021년 기간 동안 중국의 대기환경관측망에서 관측된 일 대기환경기준물질의 농도 관측 자료를 사용하였다. 중국의 대기질 관측망 자료는 한반도와 인접한 위치에 있는 대도시 위주의 9개 지점의 관측 사이트(Harbin (45.75°N, 126.65°E), Changchun (43.88°N, 125.32°E), Shenyang (41.79°N, 123.43°E), Beijing (39.91°N, 116.40°E), Shijiazhuang (38.04°N, 114.48°E), Jinan (36.67°N, 116.99°E), Hefei (31.86°N, 117.28°E), Shanghai (31.22°N, 121.46°E), Hangzhou (30.29°N, 120.16°E))를 선택적으로 사용하였다. 그리고 국내의 대기질 관측 자료는 최대 인구 밀집 지역인 서울시의 각 지점별 평균 관측 정보를 사용하였다.

2.4 인공위성 관측 자료

인공위성 관측 자료는 대표적인 지구관측위성인 TERRA 위성에 탑재된 MODIS 센서 관측 자료 중 Level 3 (version 6.1) Aerosol Optical Thickness (AOT) 자료 (<https://earthdata.nasa.gov/>)이다. MODIS는 다중 파장 분광센서로서, 한반도 상공을 하루 2~4회 정도 지나가는 저궤도에서 관측하고 있다. MODIS 에어로솔 자료는 육지와 해양에 최적화된 두 가지 서로 다른 에어로솔 산출 알고리즘(즉, Dart target algorithm (Levy *et al.*, 2013)과 Deep blue algorithm (Hsu *et al.*, 2013))을 사용하여 산출된 AOT이다. MODIS AOT의 정확도는 전 세계 지상 관측망 자료와의 비교를 통하여 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. 그리고, 한반도 인근 지역에서의 지상 관측 자료와 비교한 Bias 값은 약 -0.046 ± 0.028 (Dart target algorithm)과 -0.024 ± 0.015 (Deep blue algorithm)으로 보고되었다(Lee, 2018).

강수량 측정값은 인공위성 관측 자료 중 Integrated Multi-satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG) 자료를 사용하였다(Tan *et al.*, 2019). 이 산출물은 다양한 강수 관측용 위성에 탑재된 적외선 센서, 수동형 마이크로파(Passive Microwave) 센서, 레이더 센서, 지상 관측으로부터 획득한 강수량으로부터 Goddard 프로파일링 알고리즘(Goddard profiling algorithm; GPROF2017)과 Combined Ku Radar-Radiometer Algorithm (CORRA)으로 보정

된 결과물이다(Huffman *et al.*, 2019). IMERG 강수량 산출물은 30분마다 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ (약 10×10 km) 해상도를 가지는 결과물로서, 중국의 지상 강우계와의 관측 값과 비교한 결과는 좋은 정확도를 가지는 것으로 알려져 있다(Liu *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2018).

2.5 기상 재분석 자료

본 연구에서 사용된 기상자료는 강수량과 바람에 관한 정보를 포함하며, 강수량은 위에서 설명된 인공 위성 관측 자료를 사용하였으나 바람은 기상 재분석 자료를 사용하였다. 바람 정보의 시공간적 연속성 확보를 위하여 위성 관측 자료와 동일한 영역의 격자형 자료구조를 가지는 NCEP/NCAR 재분석(reanalysis) 자료(Kalnay *et al.*, 1996)를 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 중국의 화력발전 배출량

전 세계 에너지 생산 보고서(GEM, 2021)에 의하면, 2020년까지 새로운 석탄 발전 개발에 대한 계획은 전 세계 대부분 지역에서 감소되었지만 중국에서는 오히려 증가하였다. 중국은 2020년에 전 세계적으로 제안된 신규 석탄 화력 용량 87.4 GW 중 85%인 73.5 GW를 보유하고 있으며, 이로 인하여 2015년 이후 개발 중인 전 세계 석탄 발전량이 처음으로 연간 증가로 이어진 결과가 되었다. COVID-19로 인한 경제 침체 이후, 중국의 석탄 개발은 각 지방정부에서 석탄을 사용하여 경제를 활성화함에 따라 크게 성장했다. 이러한 성장은 중앙정부가 석탄 집약적 거대 프로젝트를 포함하여 국가 경제를 성장시키기 위해 신규 석탄 발전소 허가에 대한 제한을 완화하고 대출을 증가시켰기 때문에 가능하였다(GEM, 2021). 최근 중국은 2060년까지 탄소 배출량 0을 달성하는 것을 목표로 하였으나(<https://news.un.org/en/story/2020/09/1073052>), 석탄 보유량을 2020년 현재 1,080 GW에서 2030년까지 1,200 GW 급 이상으로 늘리는 것을 추진하고 있다

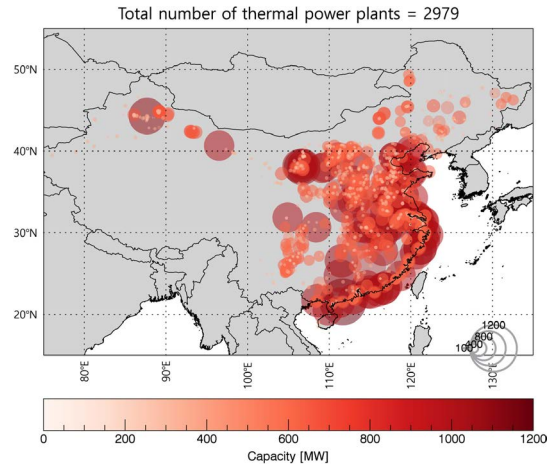


Fig. 2. Locations and thermal power capacities of coal power plants in China.

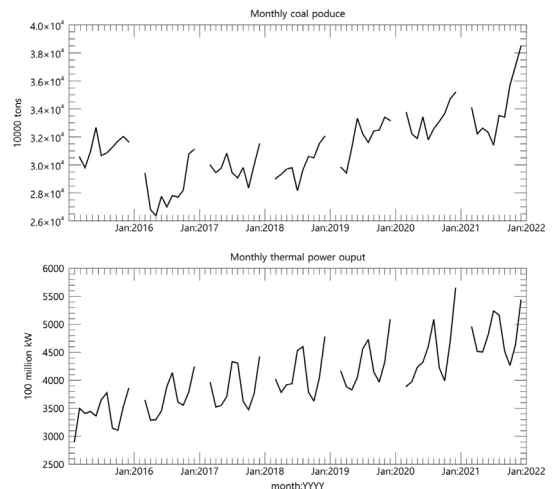


Fig. 3. Monthly coal produces (unit: 10000 tons/month) and thermal power outputs (unit: 100 million Kw/month) in China. Data sources are available from the National Bureau of Statistics of China (<https://data.stats.gov.cn/>).

(GEM, 2021).

그림 2는 2021년 현재 중국에서 운영 중인 총 2,979 개의 석탄 화력발전소의 지리적 위치 분포와 운영 용량(단위: MW)을 나타낸다. 대부분의 중소 규모의 화력발전소들은 내륙에 분포하고 있으나, 500 MW 급 이상의 대형 화력발전소는 주로 동부 해안지역이나

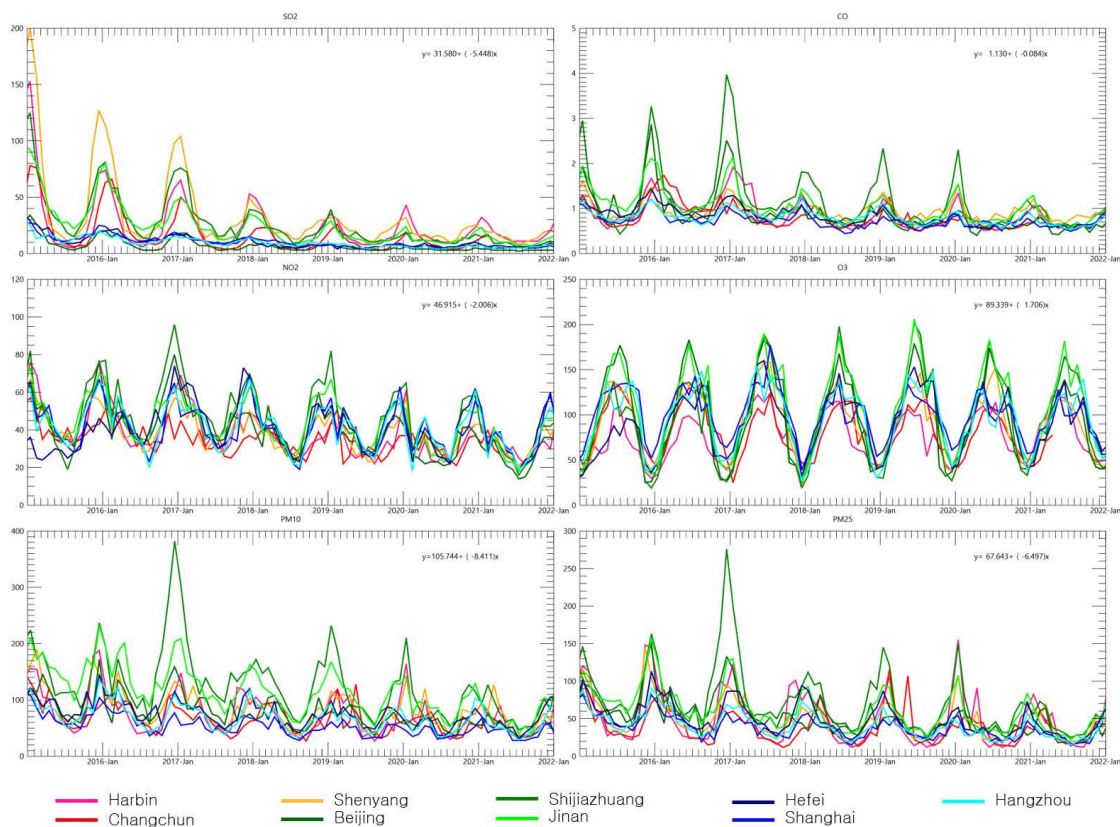


Fig. 4. Monthly mean concentrations of air pollutants measured at the selected 9 cities (Harbin, Changchun, Shenyang, Beijing, Shijiazhuang, Jinan, Hefei, Shanghai, and Hangzhou) in China during 2015~2021.

주요 탄광이 위치한 내몽골에 위치하고 있다. 따라서, 중국의 화력발전소가 정상적으로 가동 시에 배출되는 대기오염물질은 발전소 인근지역뿐 아니라 기상 조건에 따라 장거리 이동과정을 통해 한반도로 유입될 가능성이 있으나, 이에 대한 영향을 정량적으로 분석한 연구 사례는 전무하다.

그림 3은 중국의 월별 석탄 생산량과 화력발전량의 시계열 변화를 나타낸다. 중국의 석탄 생산량은 2016년부터 꾸준히 증가하였으며, 2021년 4~9월까지 기간 동안에 급감하였다. 화력발전 용량도 석탄 생산량과 마찬가지로 연도별 증가추세를 보이며, 여름과 겨울철에 전력소비에 대비하여 전력 생산이 증가하는 계절별 변화추세가 뚜렷하다. 그러나, 2021년 가을부터는 석탄 생산량이 급감하여 전력 생산량이 연도별

생산 추세보다 약간 낮은 경향을 보였다.

3.2 중국 주요도시의 대기오염물질 농도 변화

그림 4는 중국 지상 관측망 중 선택된 도시(Harbin, Changchun, Shenyang, Beijing, Shijiazhuang, Jinan, Hefei, Shanghai, Hangzhou)에서 관측된 대기오염 기준물질의 월평균 농도 변화를 나타낸다. 오존을 제외한 나머지의 대기오염물질의 농도는 2015년 이후로 점차 줄어들고 있는 경향과 함께, 지역별 편차가 다소 나타나고 있음을 알 수 있다. 2015년의 평균농도를 기준으로 2019년까지 각 연도별 대기오염물질별 연도별 농도 변화율(Concentration of Change Rate; CCR)은 다음의 식 (1)과 같이 계산하였다.

$$CCR = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta C_i / n)}{C_{ref}} \times 100 [\%/yr] \quad (1)$$

위 식에서 ΔC_i 는 각 연도별 농도 변화량, n 은 총 연도, C_{ref} 는 기준이 되는 연도의 농도값으로서 본 연구에서는 2015년의 지역 평균값을 사용하였다. 각 오염물질별 CCR 계산 결과는 $SO_2 = -17.25\%/yr$, $CO = -7.46\%$, $O_3 = 1.91\%/yr$, $NO_2 = -4.27\%/yr$, $PM_{10} = -7.95\%/yr$, $PM_{2.5} = -9.61\%/yr$ 으로서, 2차 생성 오염물질인 O_3 을 제외한 오염물질이 최근까지 줄어들고 있는 결과를 보였다. 이러한 변화추세를 나타내던 2015~2019년 기간 이후 2020년에는 COVID-19로 인한 사회적 봉쇄가 대기오염물질 배출 저감에 영향을 미치게 되었다.

표 2에는 관측기간을 사회적인 이슈가 없었던 정상기간(Normal period (Nr): 2015~2019), 코로나 봉쇄기간(COVID-19 lockdown period (Cv): 2020), 그리고 석탄 부족 기간(Coal shortage period (Cs): 2021)의 세 기간으로 분리하여 각 오염물질별 평균 농도값을 비교하였다. 코로나 봉쇄기간 동안에는 충분한 에너지가 생산/공급되었음에도 불구하고, 에너지 사용량의 저하가 대기오염물질의 배출 저감에 큰 영향을 미쳤다. 이로 인하여 과거보다 적은 양의 대기오염물질의 농도값이 관측되었다. 즉, 정상기간 대비 코로나 봉쇄기간 동안의 연평균 대기오염물질의 농도 저하 수준($\Delta(Cv-Nr)$)은 $SO_2 = -10.33 \mu g/m^3$, $CO = -0.21 mg/m^3$, $O_3 = -0.57 \mu g/m^3$, $NO_2 = -7.53 \mu g/m^3$, $PM_{10} = -23 \mu g/m^3$, $PM_{2.5} = -14.23 \mu g/m^3$ 이었다. 그리고 정상기간 대비 석탄 부족 기간의 저감 수준($\Delta(Cs-Nr)$)은 $SO_2 =$

$-12.01 \mu g/m^3$, $CO = -0.31 mg/m^3$, $O_3 = -8.57 \mu g/m^3$, $NO_2 = -12.91 \mu g/m^3$, $PM_{10} = -33.40 \mu g/m^3$, $PM_{2.5} = -22.59 \mu g/m^3$ 으로서, 코로나 봉쇄기간과 비교하여 약 11.13% 수준의 대기오염물질이 감소되었음을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 통하여 중국의 대기오염물질 농도가 최근 감소하고 있는 추세를 고려했을 때에도 사회적인 환경 변화가 대기오염물질의 농도 저하에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있다. 더욱이, 코로나 봉쇄로 인한 인위적인 배출 저감이 대기질 개선에 뚜렷한 효과를 나타냈음에도 불구하고, 이후에 발생한 석탄 부족으로 인한 배출 저감은 이보다 대기질 개선 효과가 높게 나타났음을 확인하였다. 따라서, 배출원이 밀집된 중국의 배출원 및 대기질 농도값의 변화를 고려할 때, 중국의 대기오염물질의 변화가 국내 대기질과 연관될 수 있는 가능성을 제기할 수 있다. 이러한 가설을 확인하기 위하여 연구 대상 지역 내의 인공위성 관측 자료와 기상 조건에 대한 분석은 필수적이므로 다음 장에서는 동일 기간 동안의 기상 자료 및 위성 관측 자료에 대한 상세 결과가 논의될 것이다.

3.3 국내 대기오염물질 농도 변화

그림 5는 2015~2021년 기간 중 서울시 지상 관측망에서 관측된 대기환경 기준물질 농도에 대해 각 기간별(즉, 정상기간(Normal period: 2015~2019), 코로나 봉쇄기간(COVID period: 2020), 그리고 석탄 부족 기간(Coal shortage period: 2021)) 월평균한 결과값의 변화를 나타낸다. 각 그래프의 색은 정상기간 동안 평균

Table 2. Mean concentrations of air pollutants measured at the selected 9 cities (Harbin, Changchun, Shenyang, Beijing, Shijiazhuang, Jinan, Hefei, Shanghai, and Hangzhou) in China for different periods. Nr, Cv, Cs represent normal, COVID-19 lockdown, and coal shortage periods, respectively.

Pollutant	Nr (2015~2019)	Cv (2020)	Cs (2021)	$\Delta(Cv-Nr)$	$\Delta(Cs-Nr)$
$SO_2 [\mu g/m^3]$	20.68	10.35	8.68	-10.33	-12.01
$CO [mg/m^3]$	0.96	0.75	0.65	-0.21	-0.31
$O_3 [\mu g/m^3]$	92.75	92.19	84.19	-0.57	-8.57
$NO_2 [\mu g/m^3]$	42.90	35.37	29.99	-7.53	-12.91
$PM_{10} [\mu g/m^3]$	88.92	65.93	55.52	-23.00	-33.40
$PM_{2.5} [\mu g/m^3]$	54.65	40.41	32.06	-14.24	-22.59

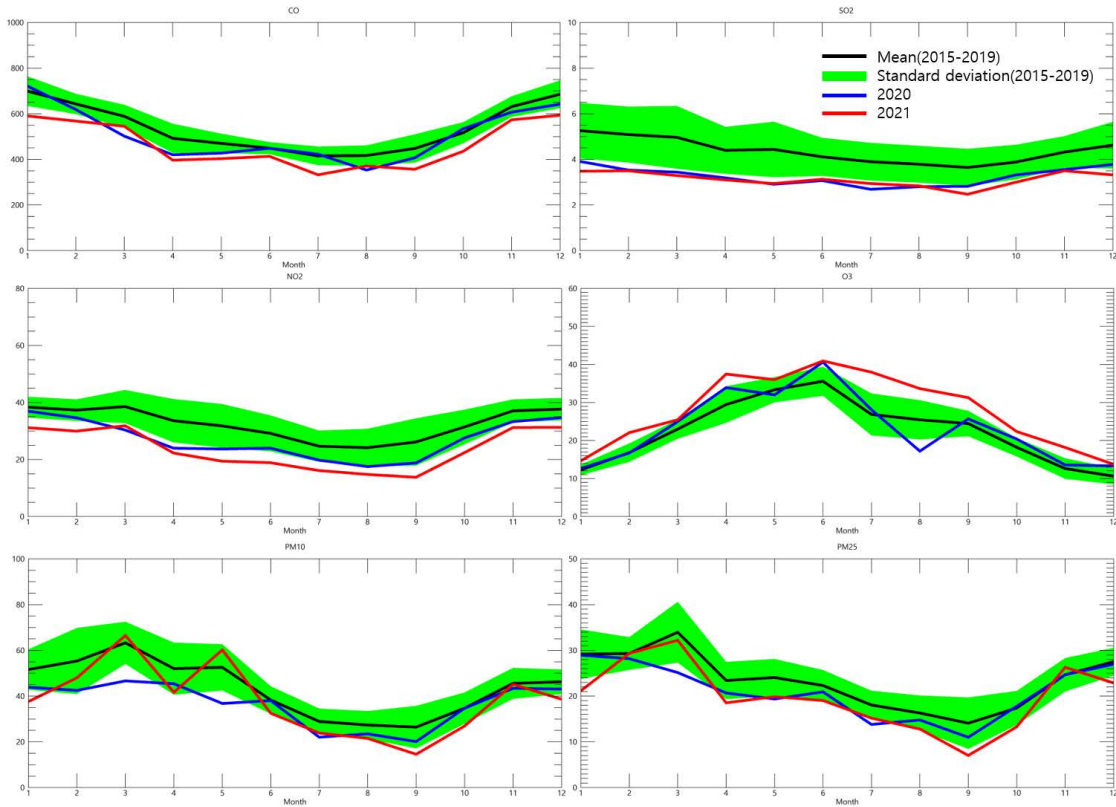


Fig. 5. Monthly mean concentrations of air pollutants measured in Seoul, Korea during 2015~2021. Units for gases (CO, SO₂, NO₂, O₃) and particles (PM₁₀ and PM_{2.5}) are ppb and µg/m³.

값(검정)과 표준편차 범위(녹색), 2020년(파랑), 2021년(적색)을 의미한다. 전체 월별 대기오염물질 농도의 변화는 2차 오염물질인 O₃는 연도별 증가경향으로 인하여 2020년이나 2021년에도 연속적으로 증가하였다. CO, SO₂, NO₂는 정상기간보다 낮아진 농도값을 보였다. 특히, NO₂의 경우는 연도별 증감에 대한 뚜렷한 변화가 낮음에도 불구하고 코로나 봉쇄기간과 석탄 부족 기간에 뚜렷한 농도 저하가 나타났다. PM은 봄철 황사나 꽃가루와 같은 자연적인 발생원에 대한 영향을 제외하면, 여름철과 가을철에 농도 저하를 발견할 수 있다. 특히, 석탄 부족으로 인한 배출량 감소가 발생했던 2021년 9월부터 오존을 제외한 모든 대기오염물질의 농도가 낮아졌기 때문에 대기질의 상태는 과거 5년 동안의 수준보다 나아진 청정 대기 조건

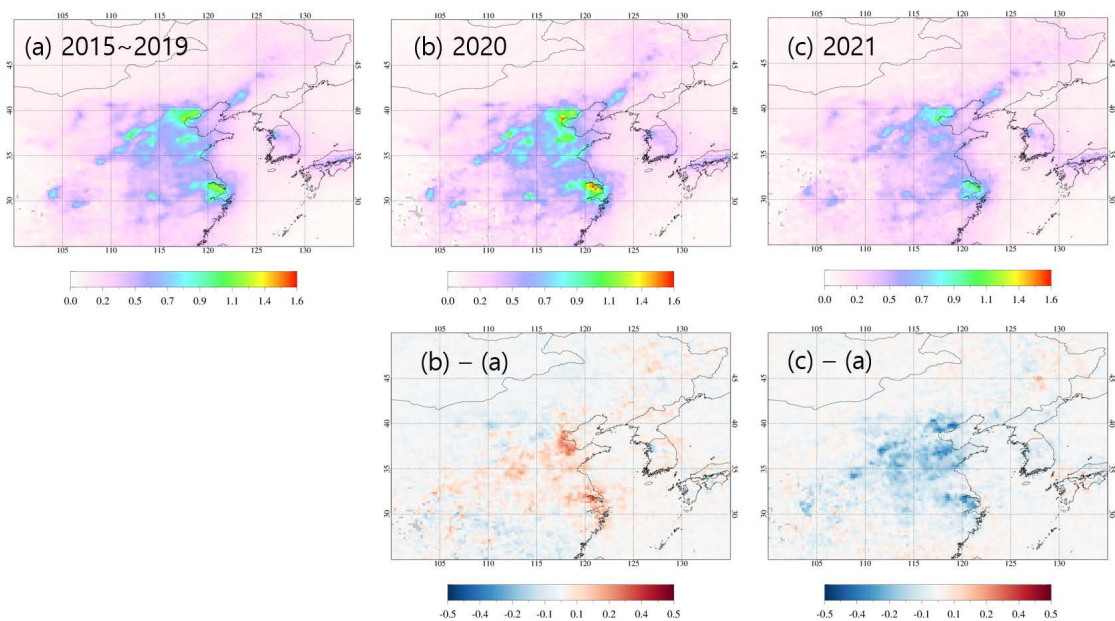
으로 돌아간 결과를 나타내고 있다.

2021년 관측 기간 중 9월 평균값은 SO₂ = 2.47 ppb, CO = 356.67 ppb, NO₂ = 13.77 ppb, O₃ = 31.27 ppb, PM₁₀ = 14.57 µg/m³, PM_{2.5} = 7.03 µg/m³으로 관측되었으며, O₃를 제외한 나머지 대기오염물질의 농도는 정상 연도 기간인 2009년~2015년의 평균 수치보다 낮은 값으로 관측되었다. 즉, 2021년 9월의 평균 농도값을 정상 연도 9월 평균값 대비 감소율은 SO₂ = -38.81%, CO = -24.78%, NO₂ = -54.26%, O₃ = 36.85%, PM₁₀ = -51.60%, PM_{2.5} = -56.35%으로 큰 감소 비율이 나타났다. 따라서, 2021년 가을철의 대기질이 개선된 효과는 매우 크게 나타났음을 증명한다.

표 3은 서울에서 관측된 대기 오염물질의 평균 농도값을 각 기간별로 비교한 결과를 나타낸다. 서울시는

Table 3. Mean concentrations of air pollutants measured at Seoul, Korea for different periods. Nr, Cv, Cs represent normal, COVID-19 lockdown, and coal shortage periods, respectively.

Pollutant	Nr (2015~2019)	Cv (2020)	Cs (2021)	$\Delta(Cv-Nr)$	$\Delta(Cs-Nr)$
SO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	4.84	3.25	3.12	-1.59	-1.72
CO [mg/m^3]	558.46	508.69	464.9	-49.77	-93.56
O ₃ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	21.14	23.26	27.81	2.12	6.67
NO ₂ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	35.36	27.11	23.59	-8.25	-11.77
PM ₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	45.99	43.08	38.65	-2.91	-7.34
PM _{2.5} [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	24.53	21.02	19.8	-3.51	-4.73

**Fig. 6.** OMI mean NO₂ column density (unit = 10^{16} molecules/cm²) in September for different periods of (a) 2015~2019, (b) 2020, and (c) 2021, respectively. Differences of (b)-(a) and (c)-(a) are also mapped over study area.

2차 생성물질인 오존을 제외하고, 코로나 봉쇄기간과 중국의 탄소 배출량 저감기간 동안 모두 정상기간의 연평균 농도값보다 적은 대기오염물질의 농도값이 관측되었다. 정상기간 대비 코로나 봉쇄기간 동안의 연평균 대기오염물질의 농도 저하 수준($\Delta(Cv-Nr)$)은 SO₂ = -1.59 ppb, CO = -49.77 ppb, NO₂ = -8.25 ppb, PM₁₀ = -2.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} = -3.51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 그리고 정상기간 대비 석탄 부족 기간의 저감 수준($\Delta(Cs-Nr)$)은 SO₂ = -1.72 ppb, CO = -93.56 ppb, NO₂ = -11.77 ppb, PM₁₀ = -7.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} = -4.73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서, 코로나 봉쇄기간 동안의 저감된 농도값과 비

교하여 약 8.19% 수준의 대기오염물질이 더욱 감소되었음을 확인할 수 있다.

3.4 인공위성 기반 대기오염물질 농도 변화

인공위성은 광역관측을 통하여 대기오염물질의 총량에 관한 정보를 제공하므로, 일정 기간 동안 관측된 정보는 대기오염물질의 시공간적인 분포 변화를 파악하는 데 유용하다. 그림 6은 OMI NO₂의 시공간 분포를 나타내며, 2015년부터 2021년 기간 동안의 9월평균값을 비교한 결과이다. 그림 6a는 중국 동북부 및 동부 지역, 한반도의 수도권의 NO₂가 0.5×10^{16} mole-

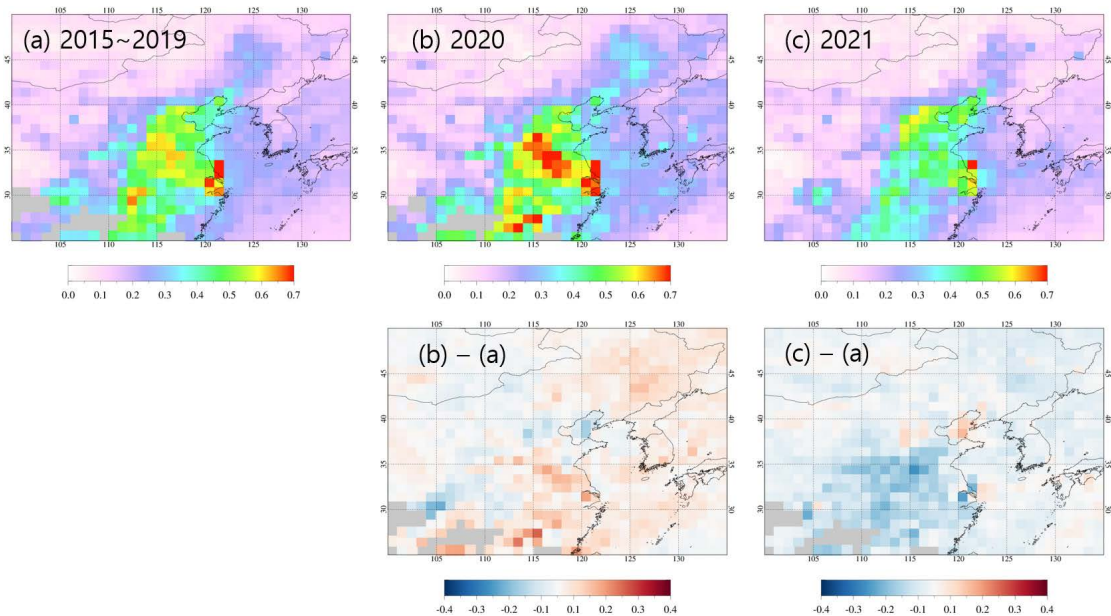


Fig. 7. MODIS monthly mean AOT in September for different periods for different periods of (a) 2015~2019, (b) 2020, and (c) 2021, respectively. Differences of (b)–(a) and (c)–(a) are also mapped over study area.

cules/cm² 이상의 높은 값을 나타내며 주로 인구밀집 지역이나 산업시설에서 배출되는 원인에 기인한다. 2020년 중국에서는 이전 연도 평균값보다 다소 높은 범위의 NO₂ 값이 관측되었으나, 서울은 오히려 낮은 수준의 NO₂ 값이 관측되었다. 이와는 반대로, 2021년은 중국 대부분의 지역에서 정상 수준의 NO₂ 값보다 더욱 낮은 수준의 값이 관측되었으며, 이것은 이전의 지상 관측 NO₂ 결과와 일치한다. 보다 정량적인 관측 값의 비교를 위하여 중국 동부를 포함하는 북위 25~43도와 동경 110~123도 내부의 정방형 지역의 평균값은 정상기간 동안 0.411×10^{16} molecules/cm², 2020년 0.430×10^{16} molecules/cm², 2021년 0.354×10^{16} molecules/cm²이었다. 그리고 2020년은 정상기간 대비 0.019×10^{16} molecules/cm², 2021년은 정상기간 대비 -0.056×10^{16} molecules/cm²로서, 2021년의 배출량의 감소로 인한 지역 내 칼럼 농도의 감소량을 나타내고 있다.

그림 7은 MODIS AOT의 9월 월평균값의 분포를 나타내며, 대기 중 에어로솔 입자의 상대적 부하량인

AOT 값이 높은 것은 대기 중 입자상 물질의 농도가 높은 것이다. 9월 평균 AOT 값은 정상기간 동안에는 중국 동부 지역과 내륙의 대도시 지역을 포함하여 광범위 지역에서 0.5 이상의 높은 수치가 나타났다. NO₂ 농도 변화와 마찬가지로 2020년에는 AOT 값의 증가가 나타났으며, 2021년의 AOT는 이전 연도보다 감소한 결과를 보였다. 이전의 NO₂와 마찬가지로, 중국 동부 지역의 평균값은 정상기간 동안 0.374, 2020년 0.397, 2021년 0.315이었다. 그리고 2020년은 정상기간 대비 0.023으로 증가된 값이 관측되었고, 2021년은 정상기간 대비 -0.060의 감소된 값을 나타냄으로 인하여 입자상 물질의 배출량이 감소되었음을 알 수 있다. 이러한 AOT의 변화 경향은 지상 관측 PM 농도 변화 및 위성 관측 NO₂ 변화와 일치하므로, 중국 내륙의 배출량의 변화가 지역 대기질에 영향을 미친 결과임을 증명한다.

3.5 기상 조건 분석

이전까지 석탄 화력발전소 배출 현황, 지상 관측 대

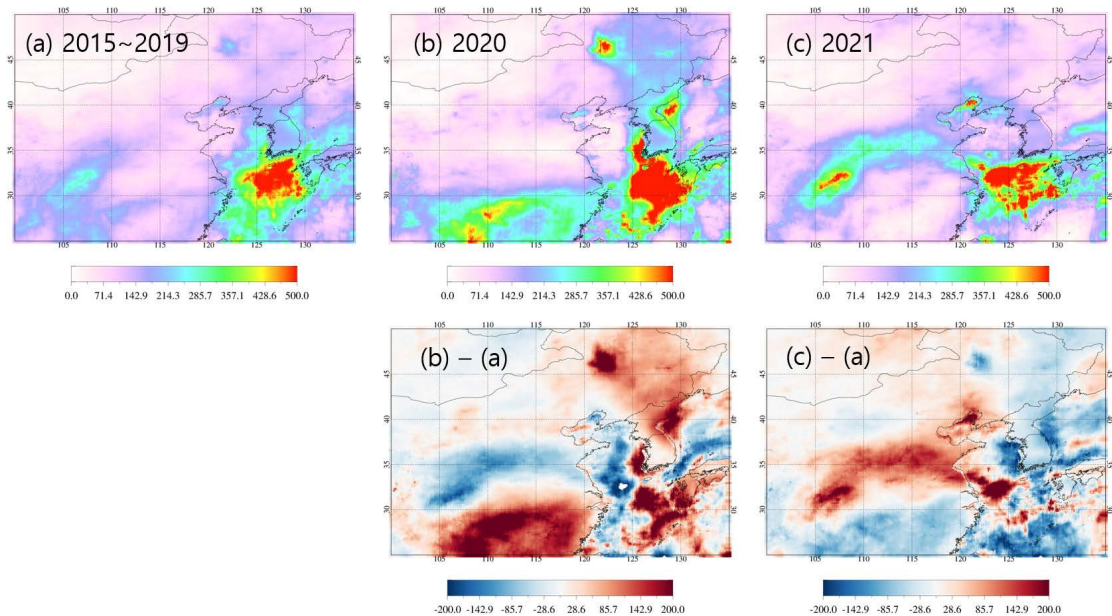


Fig. 8. GPM monthly mean precipitation rate in September for different periods of (a) 2015~2019, (b) 2020, and (c) 2021, respectively. Differences of (b)-(a) and (c)-(a) are also mapped over study area.

기오염물질 농도, 인공위성 기반 대기오염물질 관측 자료를 통하여 2021년 가을의 대기질 개선 결과가 중국의 배출량 감소에 따른 대기 중 오염물질의 부하량 저감과 연관이 있는 것이 확인되었다. 그러나, 정상적인 배출량 조건에서도 특정 기상 조건(예: 강수에 의한 세정 효과 또는 바람에 의한 환기 효과 등)에서는 대기질 개선이 가능하므로, 기상 조건이 대기오염물질 농도 변화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 재분석 자료로부터 연구대상 지역의 강수와 바람에 대한 공간 분석을 수행하였다.

그림 8은 GPM 자료를 이용한 각 기간별 9월 강수량(mm/month)이다. 2015년~2019년 정상기간 동안의 강수 패턴은 주로 북위 35도 이남의 중국 내륙지방과 제주도 남부에 걸쳐 발생하였다. 2020년 9월도 유사한 분포 경향을 보이나 정상기간에 비하여 강수 강도가 크고 북만주와 동해 일부 지역에서 강수가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나, 2021년 9월에는 중국 내륙의 강수지역이 동서방향으로 길게 퍼져 있으며, 보하이만 지역에도 강수가 증가하였다. 이보다 앞선

2021년 여름에는 중국 내륙지역의 홍수가 발생하여 주요 탄광지역에 자연재해를 유발하였으므로, 석탄 생산량 저하와 석탄 가격 상승의 주요 원인이 되었다. 그리고 2021년 9월의 강수지역의 변화는 대기오염도가 심한 동북부 - 베이징 - 산둥성을 포함하는 지역이 크게 증가하였으므로, 이로 인한 습식 세정 효과가 대기오염도 저감의 한 원인이 될 수 있다.

그림 9는 NCEP/NCAR 재분석 자료를 이용한 9월 평균 바람 벡터를 나타낸 결과이다. 정상기간의 바람 벡터는 주로 중국 동부 지역의 정체성 기류와 동남부 지역의 강한 동풍 계열의 바람이 나타나며, 남해 일부 지역의 강풍지역(>10 m/sec)은 그림 8a의 강한 강수지역과 일치한다. 2020년에도 이와 유사한 바람 벡터의 패턴이 나타났으나, 2021년에는 중국 동부 지역 대부분이 낮은 풍속(<5 m/sec)의 정체성 기류가 위치하고 있고, 한반도는 동풍 계열의 바람이 약하게 불었다. 2021년 9월의 바람 벡터의 분포 경향은 대륙기원의 오염물질의 수송에 대한 영향을 적게 할 뿐 아니라, 내륙에서 발생한 오염물질의 이동에 관여할 수 있

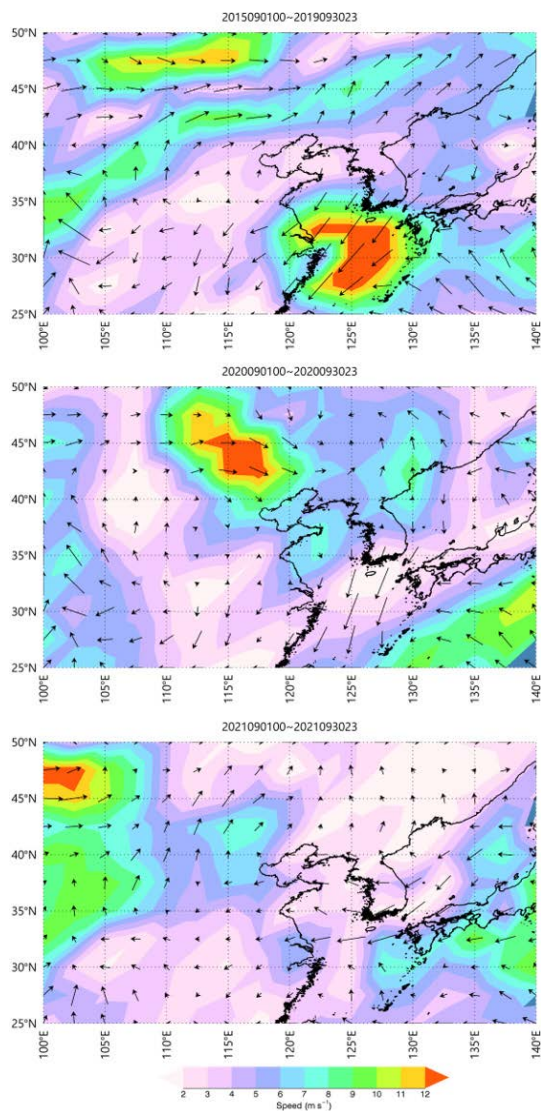


Fig. 9. NCEP reanalysis wind vector over wind speed contour map for different periods of September (upper) 2015~2019, (middle) 2020, and (lower) 2021.

으므로 국내 수도권 대기오염도의 저하 현상과 관련된 원인 중 하나로 설명할 수 있다.

3.6 요인별 지역 대기질 변화 영향

최근까지 아시아 지역의 급속한 산업화와 도시화로 인하여 배출된 오염물질로 인한 대기오염 사례가 증가하였으나, 대기질 개선을 위한 사회적인 변화로 인하여 오염물질의 배출 감소를 위한 국가적 노력이 진행 중이다. 그러나, 자유 대기 중으로 배출된 오염물질은 국가 간 이동이 가능하며, 인접 지역의 환경에 복잡한 영향을 나타낼 수 있다(Park *et al.*, 2013). 한반도는 대륙으로부터 발생하는 황사와 바이오매스 연소, 또는 인위적 오염원의 영향을 받고 있으므로, 지역 간의 대기오염물질의 이동이 흔하게 발생하는 곳이다(Lee and Park, 2020; Shin and Lee, 2016; Lim *et al.*, 2013; Lee, 2012).

지금까지, 대기질 관련 연구는 대기질이 악화되었거나, 대기오염문제에 대한 인과관계에 관한 연구가 대부분이었으나, 본 연구는 대기질이 개선된 2021년 가을 사례에 대하여 변화 요인과 현황에 관한 정량적 정성적인 분석을 수행하였다. 표 4에서는 대표적인 환경변화 요인과 변화 추세 및 지역대기에 미치는 영향에 대하여 요약하였다. 먼저 중국 내 석탄 화력발전소의 가동 중지에도 따른 배출량의 직접적인 감소는 해당 기간 동안 지상에서 관측된 대기오염물질의 농도 현황과 인공위성으로 관측된 대기오염물질의 분포 경향을 분석한 결과로부터 대기오염물질의 농도 저하에 크게 기여한 것을 알 수 있다. 특히, 미세먼지와 같은 에어로솔의 저감 효과는 매우 뚜렷하게 분석되었으며, 이로 인하여 가시적인 청정함과 함께 지역 대기질

Table 4. Summary of environmental change parameters and the anticipated local air quality effects during the 2021 coal shortage period in China.

Parameter	Change	Effects on local air quality
Thermal power plant operations	Decreased	Emission reduction
Precipitation	Increased	Wet deposition
Wind speed	Increased (easterly wind)	Dispersion or dilution
Aerosols	Decreased	Local air quality or visibility enhance
NO ₂	Decreased	Local air quality or visibility enhance

의 개선 효과가 나타났다. 석탄 연소 시 발생하는 NO_2 도 마찬가지로 화력발전소 시설들의 가동전과 후의 비교를 통하여 농도 저하를 알 수 있으며, 대기 중 NO_2 농도의 감소는 가시거리 증가와 함께 2차 오염 물질의 생성 저감에 기여를 한 것이다. 추가적으로, 2021년 가을은 직접적인 대기오염물질의 배출 저감 효과뿐만 아니라, 기상 요소 중 강수와 바람 패턴의 변화도 발견되었다. 배출원이 위치한 중국 지역 내 강수량과 풍속이 정상기간보다 증가하였을 뿐 아니라, 풍향도 동풍계열이 우세하여 대기오염물질의 확산과 이동 방향이 한반도 방향을 향하지 않은 사례이다. 따라서, 이와 같은 요인들에 대한 영향이 복합적으로 발생하였기 때문에 2021년 가을의 지역 대기질은 매우 좋아진 것으로 판단된다.

4. 결 론

최근 대기오염물질의 배출을 줄이기 위한 주요 배출원의 제어와 저감정책의 강력한 시행으로 대기오염 물질의 농도를 줄이는 데 큰 역할을 하고 있다. 이러한 가운데 2021년 가을은 이례적인 청정 대기 조건이 관측되었으며, 해당 기간 동안의 대기질 조건의 발생 원인과 관련성을 찾기 위하여 배출원, 지상, 인공위성, 및 기상 관측 자료를 이용한 배출원의 현황 및 사회적 이슈, 대기오염물질의 관측 농도 변화 및 지역적인 분포, 그리고 기상 조건의 변화를 분석하였다. 분석 결과를 토대로 대기질 개선 현상과 관련된 대기오염물질의 발생과 현황 특성에 대하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 국내에서 대기오염도가 좋아진 현상이 발생한 2021년 9월 서울의 월평균 오염물질의 농도는 $\text{SO}_2 = 2.47 \text{ ppb}$, $\text{CO} = 356.67 \text{ ppb}$, $\text{NO}_2 = 13.77 \text{ ppb}$, $\text{O}_3 = 31.27 \text{ ppb}$, $\text{PM}_{10} = 14.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5} = 7.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 정상 연도인 2015~2019년 기간 동안의 평균값 대비 감소율은 $\text{SO}_2 = -38.81\%$, $\text{CO} = -24.78\%$, $\text{NO}_2 = -54.26\%$, $\text{O}_3 = 36.85\%$, $\text{PM}_{10} = -51.60\%$, $\text{PM}_{2.5} = -56.35\%$ 으

로서 큰 저감 효과가 나타났다.

둘째, 동일 기간 동안 외부 유입에 대한 요인을 알아보기 위하여 해당 기간에 중국에서 보고되었던 석탄부족과 화력발전소 운영 저감 기록을 분석한 결과, 중국 동부 해안 지역을 따라 위치한 대형 화력발전소가 2021년 가을부터는 석탄 생산량이 급감하여 화력발전소의 운영시간이 줄어들었음을 확인하였다.

셋째, 중국의 화력발전소 주변에 위치한 주요 대도시에서 2021년 9월에 관측된 대기오염도는 $\text{SO}_2 = 12.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{CO} = 0.31 \text{ mg}/\text{m}^3$, $\text{O}_3 = 8.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{NO}_2 = 12.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{10} = 33.40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5} = 22.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서, 코로나 봉쇄기간으로 인한 저감 농도보다 약 11.13% 낮은 수치를 나타내었다. 이 결과는 화력발전소 및 석탄을 사용하는 주요 배출원에서의 오염물질의 배출 저하로 인한 결과로 판단된다. 그리고, 이러한 대기오염도 저감은 국내의 대기오염도 저감 현상과 유사한 경향으로 발생하였음을 확인하였다.

넷째, 인공위성 관측 기반의 NO_2 와 에어로솔 광학 두께 분포 결과는 2021년 9월 기간 동안 중국 동부 지역에서 배출된 NO_2 와 에어로솔 칼럼 농도값의 감소가 뚜렷하게 나타남을 확인하였다. 그리고 대부분의 배출원이 위치한 중국 동부 지역(북위 $25^\circ \sim 43^\circ$, 동경 $110^\circ \sim 123^\circ$)을 기준으로 정상기간인 2015~2019년 기간 평균과 2021년의 석탄 부족 기간 동안의 공간적 평균 값의 감소량은 각각 $\text{NO}_2 = -0.056 \times 10^{16} \text{ molecules}/\text{cm}^2$, $\text{AOT} = -0.060$ 과 같으며, 지상 관측 자료의 변화 패턴과 일치함을 확인하였다.

마지막으로, 기상 조건으로 인한 오염물질의 저감 경향을 알아보기 위하여 강수량과 바람을 분석한 결과는 석탄 부족 기간 동안 중국 내륙의 강수의 증가와 함께 동풍계열의 바람이 불었으므로, 습식 세정 효과와 풍향 변화에 따른 오염물질의 국내 유입 경로가 달라진 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 위와 같은 결론을 종합하면 2021년 가을의 대기질 개선 효과는 중국의 석탄 부족으로 인한 직접적인 대기오염물질의 배출 저감 효과뿐만 아니라, 기상 요소 중 강수와 바람 패턴의 변화로 인한 대기 중 오염

물질의 농도 저감이 복합적으로 발현된 결과로 요약된다.

그러나, 본 연구는 주요 배출원으로 가정된 중국의 화력발전소 운영 관련 배출량 변화에 기인한 대기오염물질의 농도에 관한 모의 실험이 고려되지 못한 점과, 국내 배출원의 영향을 정량화하지 못한 점으로 인하여 해당 기간 동안 국내에서 배출된 오염물질이 대기질 개선 사례에 미치는 정밀한 기여도를 분석하지 못한 한계가 있다. 따라서, 동북아시아 지역의 배출원의 특성을 고려한 대기오염물질의 배출에 따른 지역 대기질에 미치는 기여도 평가 등의 추가 연구가 필요하다.

한편, 본 연구를 통하여 사회적인 요인으로 인하여 발생한 배출량의 감소는 지역 대기질을 개선하는 데 큰 효과가 있음이 확인되었으므로, 향후 에너지 관련 정책이나 주요 대기 오염물질 배출 규제 정책에 대한 참고 자료로 활용 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2019R1I1A3A01062804)이며, 2021년도 서울특별시의 재원으로 일부 지원받아 수행된 연구입니다(No. 2021-IN-002). MODIS와 OMI 위성자료를 제공해 주신 NASA Atmosphere Archive & Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC)에 감사드립니다.

References

- Chen, Q.-X., Huang, C.-L., Yuan, Y., Tan, H.-P. (2020) Influence of COVID-19 event on Air Quality and Their Association in Mainland China, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1541-1551. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0224>
- European Space Agency (ESA) (2020) Coronavirus: Nitrogen Dioxide Emissions drop over Italy. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2020/03/Coronavirus_nitrogen_dioxide_emissions_drop_over_Italy
- Filonchyk, M., Hurynovich, V., Yan, H., Gusev, A., Shpilevskaya, N. (2020) Impact Assessment of COVID-19 on Variations of SO₂, NO₂, CO and AOD over East China, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1530-1540. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0226>
- Forbes (2021) China's Energy Crisis Deepens with Potentially Fatal Consequences. <https://www.forbes.com/sites/arielcohen/2021/10/19/chinas-energy-crisis-deepens-with-potentially-fatal-consequences/?sh=4d38a3171163>
- Global Energy Monitor (GEM) (2021) Global Energy Monitor, Sierra Club, CREA, Climate Risk Horizons, GreenID, Ekosfer, Boom and Bust 2021: Tracking The Global Coal Plant Pipeline. <https://globalenergybri.org/report/boom-and-bust-2021-tracking-the-global-coal-plant-pipeline-2/>
- He, G., Fan, M., Zhou, M. (2016) The Effect of Air Pollution on Mortality in China: Evidence from the 2008 Beijing Olympic Games, *Journal of Environmental Economics and Management*, 79, 18-39. <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2016.04.004>
- 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>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.-C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D. (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2)
- 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). <https://doi.org/10.11108/kagis.2012.15.1.184>
- 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>
- Lee, K.-H., Park, S.-S. (2020) Characteristics of Haze Episode in

- 2019 December by Using Satellite and Ground Measurements with Trajectory Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 128-138, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.1.128>
- Lelieveld, J., Evans, J.-S., Fnais, M., Giannadaki, D., Pozzer, A. (2015) The Contribution of Outdoor Air Pollution Sources to Premature Mortality on a Global Scale, *Nature*, 525, 367-371. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- 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).
- Liu, J., Du, J., Yang, Y., Wang, Y. (2020) Evaluating Extreme Precipitation Estimations Based on the GPM IMERG Products over the Yangtze River Basin, China, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 601-618. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1734103>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020) Airborne Nitrogen Dioxide Plummets over China. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china>
- 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). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2013.29.5.642>
- 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>
- 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>
- Sun, W., Sun, Y., Li, X., Wang, T., Wang, Y., Qiu, Q., Deng, Z. (2018) Evaluation and Correction of GPM IMERG Precipitation Products over the Capital Circle in Northeast China at Multiple Spatiotemporal Scales, *Advances in Meteorology*, 2018, 471473. <https://doi.org/10.1155/2018/471473>
- Tan, J., Huffman, G.-J., Bolvin, D.-T., Nelkin, E.J. (2019) IMERG V06: Changes to the Morphing Algorithm, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 36(12), 2471-2482.
- 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>
- The British Petroleum Company (BP) (2021) Statistical Review of World Energy 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2018) Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM). <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- Wang, P., Chen, K., Zhu, S., Wang, P., Zhang, H. (2020) Severe Air Pollution Events not Avoided by Reduced Anthropogenic Activities During COVID-19 Outbreak, *Resources, Conservation and Recycling*, 158, 104814. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104814>
- Wong, M.-S., Zhu, R., Kwok Y.-C.-T., Lee, K.-H. (2021) Association Between NO₂ Concentrations and Spatial Configuration: A study of the Impacts of COVID-19 Lockdowns in 54 US cities, *Environmental Research Letters*, 16(5), 054064.
- World Health Organization (WHO) (2016) Air Pollution Levels Rising in Many of the World's Poorest Cities. <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2016/air-pollution-rising/en/#.WrrLXYrQNwg.mendeley>
- Xu, K., Cui, K., Young, L.-H., Hsieh, Y.-K., Wang, Y.-F., Wan, S., Zhang, J. (2020) Air Quality Index, Indicatory Air Pollutants and Impact of COVID-19 Event on the Air Quality near Central China. *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 1204-1221. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.04.0139>

Authors Information

- 이권호 (강릉원주대학교 복사위성연구소 대기환경과학과 교수)
(kwonho.lee@gwnu.ac.kr)
- 신성균 (서울기술연구원 기후환경연구실 연구위원)
(skyun@sit.re.kr)