



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이학석사 학위논문

코로나19 기간 중 동아시아지역
에어로졸의 광흡수 특성 변화

Changes in Aerosol Light Absorption Observed in
East Asia during the COVID-19 Lockdown

2022년 2월

서울대학교 대학원

지구환경과학부

심 규 영

코로나19 기간 중 동아시아지역
에어로졸의 광흡수 특성 변화

Changes in Aerosol Light Absorption Observed in
East Asia during the COVID-19 Lockdown

지도 교수 김 상 우

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함
2021년 10월

서울대학교 대학원
지구환경과학부
심 규 영

심규영의 이학석사 학위논문을 인준함
2021년 12월

위 원 장 _____ (인)

부위원장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

초 록

본 연구에서는 2020년 1월부터 시작된 코로나19의 확산과 이로 인한 경제 활동 봉쇄 조치로 인위적인 에어로졸 및 전구물질 배출량이 감소함에 따라 동아시아 지역에서 관측된 에어로졸의 광흡수 특성 변화와 이로 인한 기후복사효과를 지상 직접 관측(in-situ)과 AERONET 썬포토미터를 통한 대기 기주 특성 관측 자료를 기반으로 분석하였다.

지역에 따른 에어로졸 광학 특성의 변화 양상에는 차이가 있었으나, 2020년 2월과 3월에 대체로 뚜렷한 에어로졸 광학두께의 감소가 관측되었다. 특히, 2020년 3월에 에어로졸 광학두께가 이전 5년(2015-2019) 평균 대비 약 31-46% 감소하였다. 대기 기주에서의 에어로졸 광흡수 정도를 나타내는 광흡수 에어로졸 광학두께 역시 같은 기간 약 22-34% 감소하는 특성을 보였다.

지표 근처에서 관측된 에어로졸의 광산란 계수는 이전 5년 평균 대비 2020년 3-4월에 약 20% 가량 감소한 데 반해, 에어로졸 광흡수 계수는 유의미한 차이를 보이지 않았다. Potential Source Contribution Function (PSCF) 분석 결과, 이 기간 에어로졸 광흡수 계수가 유의미한 변화가 관측되지 않은 것은 국내에서 배출된 광흡수 에어로졸의 영향으로 사료된다.

에어로졸 광학두께의 감소로 지표면에서의 에어로졸 직접복사 강제력은 2020년 3월 연구 대상지역에서 약 17-28% 감소하였으나, 대기 중 에어로졸에 의한 직접복사강제효율은 오히려 이전 5년(2015년-2019년)과 비교하여 약 24-36% 높게 나타났다. 코로나19 기간 중 산란 에어로졸의 뚜렷한 감소는 광흡수 에어로졸의 상대적 비율 증가로 귀결되었으며, 이는 에어로졸 광학두께의 감소 대비 복사강제력의 감소가 적게 나타나는 주요한 원인이 되었다.

주요어 : 에어로졸, 광흡수 에어로졸, 에어로졸 복사강제력, 코로나19

봉쇄

학 번 : 2020-26053

목 차

제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 배경	1
제 2 절 연구 목적	4
제 2 장 연구 방법	5
제 1 절 관측 지점	5
제 2 절 관측 자료 및 분석	7
제 3 절 황사 입자(흄먼지)에 의한 광흡수 효과 제거	12
제 3 장 연구 결과	13
제 1 절 관측 개황	13
제 2 절 대기 기주 에어로졸의 광학 특성	16
제 3 절 지표면 에어로졸의 광학 특성	22
제 4 절 에어로졸의 직접복사강제력 및 복사강제효율	26
제 4 장 결론 및 제언	29
참고문헌	31
Abstract	37

표 목차

Table 1. Instruments and data	11
Table 2. Observed dates of the Asian dust at the ground weather station of the Korea Meteorological Administration (KMA).....	12
Table 3. Percent changes in monthly mean AOD at 500 nm between 2020 and mean of 2015 to 2019.....	19
Table 4. Percent changes in monthly mean AAOD at 440 nm between 2020 and mean of 2015 to 2019.....	21

그림 목차

Figure 1. Changes of air pollution concentration during the COVID-19 lockdown.	3
Figure 2. Overview of the study region.....	6
Figure 3. Monthly mean of MODIS AOD at 550 nm and ERA5 geopotential height & wind field at 850hPa level from 2015 to 2019 and 2020.....	15
Figure 4. Time-series of AERONET AOD at 500 nm for February and March from 2015 to 2020.....	16
Figure 5. Monthly variations of column AOD at 500 nm at three AERONET sites	18
Figure 6. Monthly variations of column AAOD at 440 nm at three AERONET sites	20
Figure 7. Monthly variations of surface aerosol scattering and absorption coefficient at Anmyon	23
Figure 8. Potential source locations for high aerosol absorption coefficients for 2015-2019 and 2020.....	25
Figure 9. Monthly variations of aerosol direct radiative forcing and forcing efficiency	28

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

코로나19는 2019년 말 중국 우한에서 최초 보고된 이후 전세계로 급속도로 확산되어 2020년 3월 세계보건기구(WHO)에 의해 공식적으로 팬데믹(Pandemic)으로 선언되었다(WHO, 2020). 코로나19가 확산됨에 따라 전세계 각국에서는 감염 확산을 방지하기 위해 사회적 거리두기에서부터 전면적인 봉쇄 조치(lockdown)에 이르기까지 다양한 정책들이 시행되었고 그 결과 경제 활동은 급격히 제한되었다. 이러한 코로나19 봉쇄 조치는 전세계적으로 대기질의 변화를 가져왔다. 각 국의 주요 도시들에서 실시된 연구들은 이 기간 중 미세먼지(Particulate Matter, PM), NO₂, SO₂와 같은 대기오염물질 농도의 감소를 일관되게 보고하였다(Abdullah et al., 2020; Berman et al., 2020; Jephcote et al., 2021; Dantas et al., 2020; Li et al., 2020; Tobias et al., 2020). 그러나, 코로나19 기간 중 배출량의 확연한 감소에도 불구하고 베이징-톈진-허베이 지역을 포함하는 중국 동북부에서는 풍속 약화와 높은 습도 등의 기상 영향으로 예상치 못한 대기오염물질의 증가가 일어나 오히려 대기질이 악화된 경우도 있었다(Le et al., 2020; Wang et al., 2020). 이에 더해 오존의 경우 많은 도시에서 봉쇄 기간에 다른 대기오염물질과 달리 오히려 증가하기도 하였다(Collivignarelli et al., 2020; Lian et al., 2020; Liu et al., 2020; Nakada et al., 2020; Sharma et al., 2020).

대한민국 역시 2020년 1월 코로나19가 최초 보고 된 이후 감염자 수가 급격히 증가하여 정부는 2020년 2월 23일 위기경보 단계를 최고단계인 ‘심각’ 단계로 격상하였고 곧 이어 사회적 거리두기를 시행하였다. 이러한 정책 시행은 산업활동과 교통량의 감소를 가져왔다. 그 결과 다른 국가들에서와 마찬가지로 국내에서도 대기질의 개선이 나타났으며, Ju et al. (2020)에 따르면 2020년 3월에 전국 평균 PM_{2.5},

PM₁₀, NO₂, CO의 농도가 전년도에 비해 각각 45.45%, 35.56%, 20.41%, 17.33% 감소하였다.

대기 중의 에어로졸(aerosol)은 태양복사를 산란시키거나 흡수함으로써 지구 복사 수지를 직접적으로 변화시킨다(Charlson et al., 1992). 암모늄, 질산염, 황산염과 같은 광산란 에어로졸은 대기를 냉각시킬 수 있는 반면(Charlson et al., 1992), 광흡수 에어로졸은 태양의 단파 복사에너지를 흡수한 후 장파 복사 형태로 방출함으로써 지구대기를 가열시켜 온실기체와 함께 지구온난화를 유발하는 인자로 작용하고 있다(Bond et al., 2013). 블랙카본(Black Carbon, BC)과 브라운카본(Brown Carbon, BrC)과 같은 탄소성 에어로졸들이 대표적인 광흡수 에어로졸로 알려져 있으며, 이들은 불완전 연소 과정에서 주로 생성된다(Bond et al., 2013; Laskin et al., 2015). Bond et al. (2013)에 의하면 동아시아는 블랙카본으로 인한 복사효과가 큰 곳 중 하나이며 특히 인위적인 요인에 의한 블랙카본 배출량이 많은 지역이다. 코로나19로 인한 봉쇄 조치는 블랙카본 농도에도 영향을 미쳤다. Xu et al. (2020)에 따르면 코로나19 봉쇄 기간 중에 블랙카본의 농도가 지역에 따라 38%에서 49%까지 감소하였으며 Jia et al. (2021)에 따르면 코로나19 봉쇄 조치로 인해 중국 동부와 중국 북부지역에서 블랙카본의 배출량이 각각 70%, 48%까지 감소하였다.

대기오염물질의 배출원이 집중된 중국과 대한민국을 중심으로 겨울철과 봄철 고농도 미세먼지와 이와 관련된 연무(haze)가 빈번히 발생하고 있다. 이러한 가운데 인위적인 대기오염물질 배출의 극적인 감소가 이루어진 코로나19 기간에 대한 연구는 인위적인 오염 영향을 평가하고 향후 대기오염물질 저감 정책 수립에 중요하게 활용될 수 있다. 이와 같은 맥락에서, 지상 직접 및 원격 관측 자료를 활용하여 본 연구에서는 코로나19 봉쇄조치에 따른 동아시아 지역 에어로졸의 광흡수 특성 변화와 관련된 복사효과를 조사하였다.

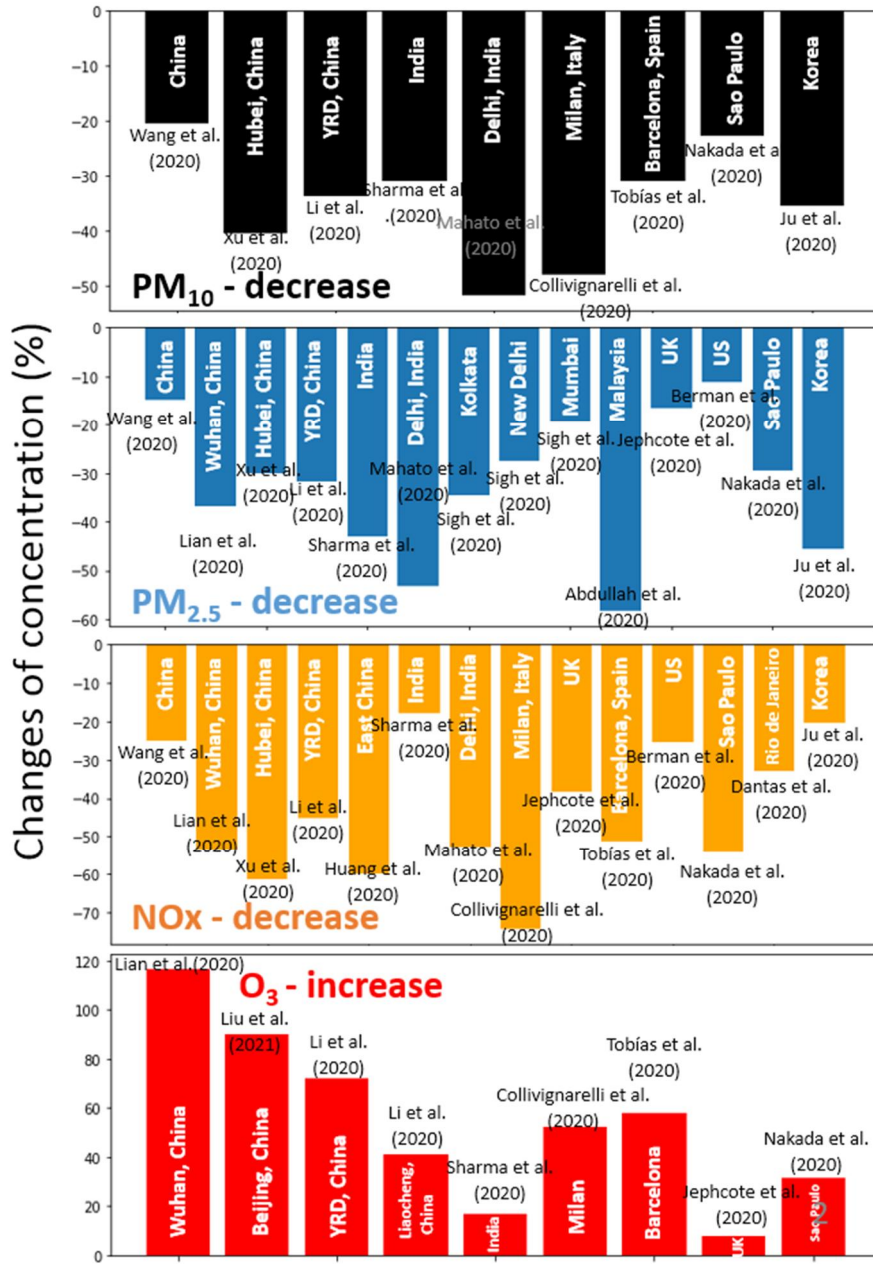


Figure 1. Changes of air pollution concentration during the COVID-19 lockdown. PM and NOx concentrations decreased, while ozone (O₃) concentration increased.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 코로나19로 인한 봉쇄 기간 중 동아시아에서 관측된 에어로졸의 광흡수 특성과 이로 인한 대기 중 태양 복사 흡수 효과를 알아보려고 한다. 이에 따른 세부적인 연구 목적은 다음과 같다.

- (1) 코로나19 기간 지상 원격관측 및 위성 관측을 통해 관측된 동아시아 지역 대기 기주 에어로졸의 광학적 특성 분석
- (2) 코로나19 기간 지표면에서 지상 직접 관측을 통해 관측된 지표 부근 에어로졸의 광학적 특성 분석
- (3) 코로나 19 기간의 에어로졸의 직접복사강제력 및 복사강제효율변동 특성 분석

제 2 장 연구 방법

2.1 관측 지점

본 연구에서는 중국 동부와 한반도를 포함하는 동아시아 지역을 대상으로 연구를 진행하였다. 그 가운데 각기 다른 특성을 가지는 세 곳의 관측소(베이징, 서울, 안면도)에서 측정된 AERONET 썬포토타미터 관측 자료와 안면도에서 측정된 지상 직접 관측(in-situ) 자료를 분석하였다.

베이징은 중국의 수도인 동시에 BTH (Beijing-Tianjin-Hebei)라 불리는 중국 북부 최대 광역도시권의 일부로 지난 수 십 년 간의 빠른 산업화와 도시화의 결과 인위적인 오염물질 배출 증가로 인한 극심한 대기오염이 발생하고 있는 지역이다(Han et al., 2014). 특히, 초미세먼지를 포함한 미세먼지로 인한 대기오염은 베이징의 가장 중요한 문제로 꼽혀왔다(Hu et al., 2014). 본 연구에서는 베이징 북부 40.00°N, 116.38°E, 해발고도 59m에 위치한 Institute of Remote Sensing and Digital Earth (RADI)에서 측정한 자료를 사용하였다.

서울은 대한민국의 수도로서 주변 경기도를 포함하여 거대한 광역대도시권을 형성하고 있으며 베이징과 마찬가지로 인위적인 오염물질로 인한 대기오염이 심각한 지역이다. 이에 더해 서울의 대기질은 중국으로부터 수송되는 장거리수송 대기오염물질에 의해 영향을 받기도 한다(Lee et al., 2019). 본 연구에 사용된 관측 자료는 서울 남부에 위치한 서울대학교(37.46°N, 126.95°E, 해발고도 116m)에서 측정되었다.

안면도 자료의 경우 충남 태안군 안면읍에 위치한 안면도 기후변화감시센터 (36.32°N, 126.19°E, 해발고도 45.7m)에서 측정하였다. 안면도 기후변화감시센터는 에어로졸, 온실가스, 대기복사, 자외선의 변화를 실시간으로 모니터링 하는 등 WMO (World

Meteorological Organization)/GAW (Global Atmosphere Watch) 지역급 관측소이다. 지리적으로 서해안에 위치하므로 상대적으로 국지적 배출의 영향이 적고, 중국 발 대기 오염물질의 장거리 수송의 영향 또한 받으므로 동아시아의 배경대기 연구에 적합한 지리적 조건을 갖고 있다(Ham et al., 2019).

각 측정소의 위치를 Figure 2에 나타내었다.



Figure 2. Overview of the study region. Blue dots denote AERONET sites and red circle denotes surface in-situ measurement site. Taken from Google Earth.

2.2 관측 자료 및 분석

2.2.1 대기 기주 에어로졸 광학 특성

썬포토미터(Sun Photometer)는 태양광을 직접 관측하거나 산란광을 관측하여 에어로졸 정보를 산출하는 장비로서 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth), 옹스트롬지수(Ångström Exponent), 위상함수(Phase Function), 에어로졸 크기분포(Aerosol Size Distribution), 단산란 알베도(Single Scattering Albedo) 등의 정보를 산출한다. AERONET Cimel Sun/sky radiometer 는 8개의 파장영역(340, 380, 440, 500, 675, 870, 1020, 1640 nm)에서 태양 직접 복사와 산란된 태양 복사를 관측한다. 태양 직접 복사를 관측하여 전 파장 영역에서의 관측으로부터 투과율을 구하고 비어-램버트 법칙(Beer-Lambert Law)을 기반으로 레일리 산란과 미량 기체에 의한 흡수효과 제거하여 에어로졸 광학두께를 계산한다. 또, 4개의 파장대(440, 675, 870, 1020 nm)에서 다양한 산란 각에 대하여 산란된 태양 복사를 관측하여 에어로졸 산란위상함수를 측정한다. 또한 역산 알고리즘(Inversion)을 이용하여 대기 기주 내 에어로졸의 복사 굴절률(Refractive Index), 단산란 알베도, 에어로졸 크기분포, 에어로졸 직접 복사강제력(Aerosol Direct Radiative Forcing) 등을 계산한다.

에어로졸의 복사강제력은 에어로졸 광학두께, 단산란 알베도, 비대칭 인수(Asymmetry Parameter)를 변수로 하여 대기복사 전달모델을 통해 계산된다. AERONET에서 제공하는 에어로졸의 복사강제력은 에어로졸이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 태양 조도의 차이로 계산한다. 본 연구에서는 동아시아에 위치한 3곳의 AERONET 측정소(베이징, 서울대학교, 안면도)에서 측정한 에어로졸 광학두께 및 단산란 알베도, 비대칭 인수를 이용하였다.

2.2.2 에어로졸 광산란 계수 및 광흡수 계수

본 연구에서는 지표면 부근 에어로졸의 광흡수 특성을 알아보기 위해 국립기상과학원 안면도 기후변화감시센터에서 측정된 네펠로미터(Nephelometer) 및 에셀로미터(Aethalometer) 자료를 분석하였다.

네펠로미터는 에어로졸에 의한 광산란 정도를 측정하는 관측 기기로서 수직으로 위치되어 있는 광원과 광학 측정 장치를 통해 기체입자나 에어로졸에 의해 산란되는 빛을 기하학적으로 적분하여 광산란 계수를 측정한다.

네펠로미터의 광원에서 나온 빛은 인렛(inlet)을 통해 들어온 샘플공기에 의해 다 각도로 산란되어 측정부로 들어간다. 이렇게 샘플공기에 의해 산란된 빛은 스플리터(splitter)에 의해 3개의 파장(400-500, 500-600, 600-800 nm)으로 나뉘어진다. 각 파장 별로 측정된 광자수를 보정을 통해 노이즈를 제거하면 실제 샘플공기에 의해 산란되어 온 광자수를 구할 수 있다. 이 광자수를 이용해 광산란계수를 구하는 과정은 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_{\text{sca}} = K \cdot C_m - W - \sigma_{\text{air}} \quad (1)$$

위 식 (1)에서 K는 보정 계수, C_m 는 보정 된 광자 수, W는 기기 내부 벽면에 의한 광원의 산란, σ_{air} 는 측정 시 온도와 압력 상태에서의 순수 공기에 의한 광산란 계수를 의미한다. 즉, 보정된 광자 수와 보정계수를 곱한 값에서 순수 공기에 의한 산란과 기기 내부의 산란을 제거해 주면 에어로졸만의 광산란 계수를 구할 수 있다(Anderson and Ogren, 1998).

본 연구에서는 TSI 3563 3-wavelength(450, 550, 700 nm) Integrating Nephelometer를 사용하여 5분 간격으로 관측된 에어로졸 광산란 계수를 1시간 평균하여 분석하였다.

에셀로미터는 대기 중에 존재하는 블랙카본 질량농도를 필터 기반 원리를 바탕으로 측정하는 관측 기기이다. 인렛을 통해 흡입된 공기는 필터에 포집 되고 다이오드에서 빛을 방사하면 필터 아래쪽에서 에어로졸이 존재하는 부분과 존재하지 않는 부분에 빛의 감쇄도 차이가 생기게 된다. 이 감쇄도 차이를 비어-램버트 법칙에 적용하여 블랙카본 농도를 계산할 수 있다(Arnott et al., 2005). 대기 중의 에어로졸이 빛을 흡수하는 정도를 나타내는 에어로졸 광흡수 계수(Aerosol Absorption Coefficient)는 블랙카본의 질량농도와 큰 상관관계를 가지고 있으므로 보정식을 통해 블랙카본 질량농도를 에어로졸 흡수계수로 변환할 수 있다 (Weingartner et al., 2003; Arnott et al., 2005; Schmid et al., 2006).

본 연구에서는 7과장 AE-31 에셀로미터를 사용하여 분당 2.9L 유량으로 유입되는 공기를 포집하여 5분 간격으로 관측된 블랙카본 질량농도를 측정하였다. 에어로졸 광흡수 계수는 Schmid et al. (2006)에서 제시한 다음 식을 사용하여 구하였다.

$$\sigma_{\text{abs}} = \frac{\sigma_{\text{ATN}}}{C \cdot R(\text{ATN})} \quad (2)$$

위 식 (2)에서 σ_{ATN} 은 빛의 감쇄 계수이며 C는 포집된 에어로졸에 의한 다산란 효과를 보정하는 상수이며 R(ATN)은 필터에 포집된 에어로졸의 양을 보정하는 상수이다.

5분 간격으로 관측된 블랙카본 질량농도와 이로부터 보정된 에어로졸 이로부터 보정된 에어로졸 흡수계수를 1시간 평균하여 분석하였다.

2.2.3 MODIS (MODERate resolution Imaging Spectrometer)

동아시아 에어로졸의 시공간적 변동을 분석하기 위하여 550 nm 파장에서의 에어로졸 광학두께를 1° x 1° 해상도로 제공하는 위성 관측 자료인 MODIS/Aqua collection 6(C6) 에어로졸 자료를 사용하였다 (Platnick et al., 2017). MODIS C6 에어로졸 관측요소는 최신

업데이트된 MODIS land and ocean algorithm에 의해 계산된다. MODIS 센서에 대한 자세한 설명은 Remer et al. (2005) 및 Levy et al. (2013)에 서술되어 있다. 본 연구에서는 동아시아의 에어로졸 광학 특성 변화를 평가하기 위해 MODIS land and ocean algorithm에 의해 산출된 에어로졸 광학두께 데이터를 2015-2020년 2월부터 5월에 대해 분석하였다.

2.2.4 ERA5 재분석 자료

동아시아 지역의 중관 기상 패턴 분석을 위하여 유럽중기 예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)에서 제공하는 ERA5 재분석자료를 이용하였다. ERA5는 31km 공간해상도를 가지고 수직적으로는 37개의 기압고도에 대한 기상요소 데이터를 포함하며 1950년부터 현재까지의 데이터를 제공한다(Hersbach et al., 2020). 본 연구에는 2015-2020년 2월부터 5월까지의 동아시아 지역 중관 기상 패턴 분석을 위해 850hPa 지위고도와 수평 바람 자료를 분석에 사용하였다.

2.2.5 HYSPLIT 모델

본 연구에서는 대기 상 에어로졸의 이동과 유입 경로를 파악하기 위해 미국 NOAA/ARL(National oceanic and atmospheric administration/Air research lab.)에서 개발된 HYSPLIT(Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델을 사용하였다. 이 모델은 공기 궤의 이동 패턴을 조사하기 위한 궤적 분석을 위해 많이 사용되는 모델로 본 연구에서는 2015-2020년 2월부터 5월까지 매시간 단위 안면도에 도달한 72시간 역 궤적을 계산하여 에어로졸의 배출원을 추정하는데 사용되었다. 입력 기상 자료는 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)에서 제공하는 전 지구 기상 자료인 GDAS1($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)를 사용하였다.

Table 1. Instruments and data.

Instrument	Measured and derived parameters	Wavelength (nm)
Nephelometer	Aerosol Scattering Coefficient	450, 550, 700
Aethalometer	Aerosol Absorption Coefficient	370, 470, 520, 590, 660, 880, 950
AERONET Sun Photometer	Aerosol Optical Depth (AOD) Absorption Aerosol Optical Depth (AAOD) Single Scattering Albedo (SSA) Asymmetric factor (<i>g</i>)	440, 500, 675, 870, 1020
MODerate resolution Imaging Spectrometer	Aerosol Optical Depth (AOD)	550

2.3 황사 입자(흙먼지)에 의한 광흡수 효과 제거

블랙카본과 브라운카본을 포함한 탄소성 에어로졸 외에도 대기 상 흙먼지(mineral dust) 역시 빛을 흡수하여 지구 복사강제력에 상당한 영향을 미친다(Laskin et al., 2015). 황사 입자(흙먼지)는 400 nm 이하의 자외선 파장범위에서 빛을 더 강하게 흡수하는 특성을 가진다(Bergstrom et al., 2007). 동아시아의 경우 봄철 황사의 영향이 큰 지역으로 황사의 유입 여부나 빈도에 따라 에어로졸의 광흡수 특성도 크게 달라질 수 있다(Kim et al., 2005). 그러나, 본 연구에서는 코로나19로 인한 인위적인 배출량 감소 영향을 고찰하기 위해 분석 과정에서 황사 입자에 의한 효과를 제거하고 분석을 진행하였다. 이를 위해 우선 기상청에서 발표한 황사 관측 일의 데이터를 분석과정에서 제외하였다. 기상청 황사 관측 일은 Table 2에 정리하였다. 또한, Russell et al. (2010)과 Shin et al. (2019)에서 제시한 방법론에 따라 440–875nm 옹스트롬 지수가 1보다 작거나 1020nm에서의 편광 소멸도가 0.16보다 큰 관측 자료는 황사 영향이 우세한 것으로 판단되어 분석에서 제외하였다.

Table 2. Observed dates of the Asian dust at the ground weather station of the Korea Meteorological Administration (KMA).

Year	February	March	April	May	Total days
2015	22,23	1,2,21,22,30,31	–	–	8
2016	–	6	23,24	6,7	5
2017	–	–	19	5,6,7,8	5
2018	–	–	6,15	–	2
2019	–	–	5	1,2	3

2020	22	-	4	-	2
------	----	---	---	---	---

제 3 장 연구 결과

3.1 관측 개황

Figure 3은 MODIS로 측정된 550nm 에어로졸 광학두께와 ERA5 재분석자료의 850hPa 지위고도 및 바람장을 월별로 2015-2019년의 평균, 2020년, 2020년과 2015-2019년 평균과의 차이로 각각 나타낸 것이다. 대기 중 에어로졸들은 그 종류와 크기 등 성질에 따라 수일 정도의 대기 중 체류시간을 가지며 지역적 기상 패턴이 에어로졸 수송과 축적에 영향을 미쳐 에어로졸 광학두께의 시공간적 변화에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 동아시아 주변의 바람 장과 에어로졸 광학두께를 연관 지어 나타내었다.

2020년 2월부터 이전 5개년에 비해 낮은 에어로졸 광학두께가 지역적으로 나타났다. 베이징을 중심으로 여전히 높은 에어로졸 광학두께가 나타났으나 중국 동남부지역에서는 550nm 파장에서의 에어로졸 광학두께가 0.2-0.4까지 감소하며 뚜렷한 감소가 나타났다. 이는 2020년 1월 말부터 시행된 우한시 봉쇄 조치로 인한 배출량 감소의 영향으로 보인다. 2020년 3월의 경우 더욱 광범위한 지역에서 에어로졸 광학두께의 감소가 나타났으며 중국의 풍하측에 위치한 한반도에서도 마찬가지로 에어로졸 광학두께의 감소가 나타나 전국적으로 에어로졸 광학두께가 0.1-0.2 가량 감소하였다. 4월의 경우 앞선 2, 3월에 비해 뚜렷한 에어로졸 광학두께의 감소가 나타나지 않았으며 오히려 한반도 북부와 만주지방을 중심으로 0.3이상의 에어로졸 광학두께 증가가 나타나기도 하였다. 5월에는 이전 5년과 비교하여 뚜렷한 에어로졸 광학두께의 차이를 보이지 않았다. 이러한 차이는 2020년 3월 중국의 봉쇄 조치 완화와 경제활동 회복 이후 4월부터 대기오염물질의 농도 역시 평년수준으로 높아짐을 보고한 선행 연구와도 일치한다(Fan et al., 2021).

2020년과 이전 5년의 850hPa 바람장의 차이를 살펴본 결과 2020년 2월에는 편서풍이 약화되어 동아시아 지역 전반에서 이전 5년에 비해 낮은 풍속이 나타났다. 이로 인해 동아시아 지역에 대기 중 에어로졸 축적에 유리한 대기 정체 패턴이 나타났으며 이는 과거 사례들을 살펴보았을 때 고농도 미세먼지 사례가 발생하기에 유리한 조건이었다. 그러나, 이러한 대기 패턴의 호조건에도 불구하고 중국 동남부를 중심으로 낮은 에어로졸 광학두께가 나타나 인위적인 배출량 감소가 대기 중 에어로졸 농도에 큰 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다(Koo et al., 2020). 반면 2020년 3월의 경우, 풍속이 이전 5년과 비슷한 수준을 관측되었으며, 대기 정체 현상 역시 거의 관측되지 않았다. 이와 같은 복합적인 요인으로 인해 에어로졸 광학두께의 감소가 배출량 감소에 의한 것인지 기상학적 요인에 의한 것인지는 설명하기 어렵다. 4월에는 북풍이 과년도에 비해 강화되는 특성을 보였으며 5월에는 이전 5년과 비교하여 별 다른 차이가 나타나지 않았다.

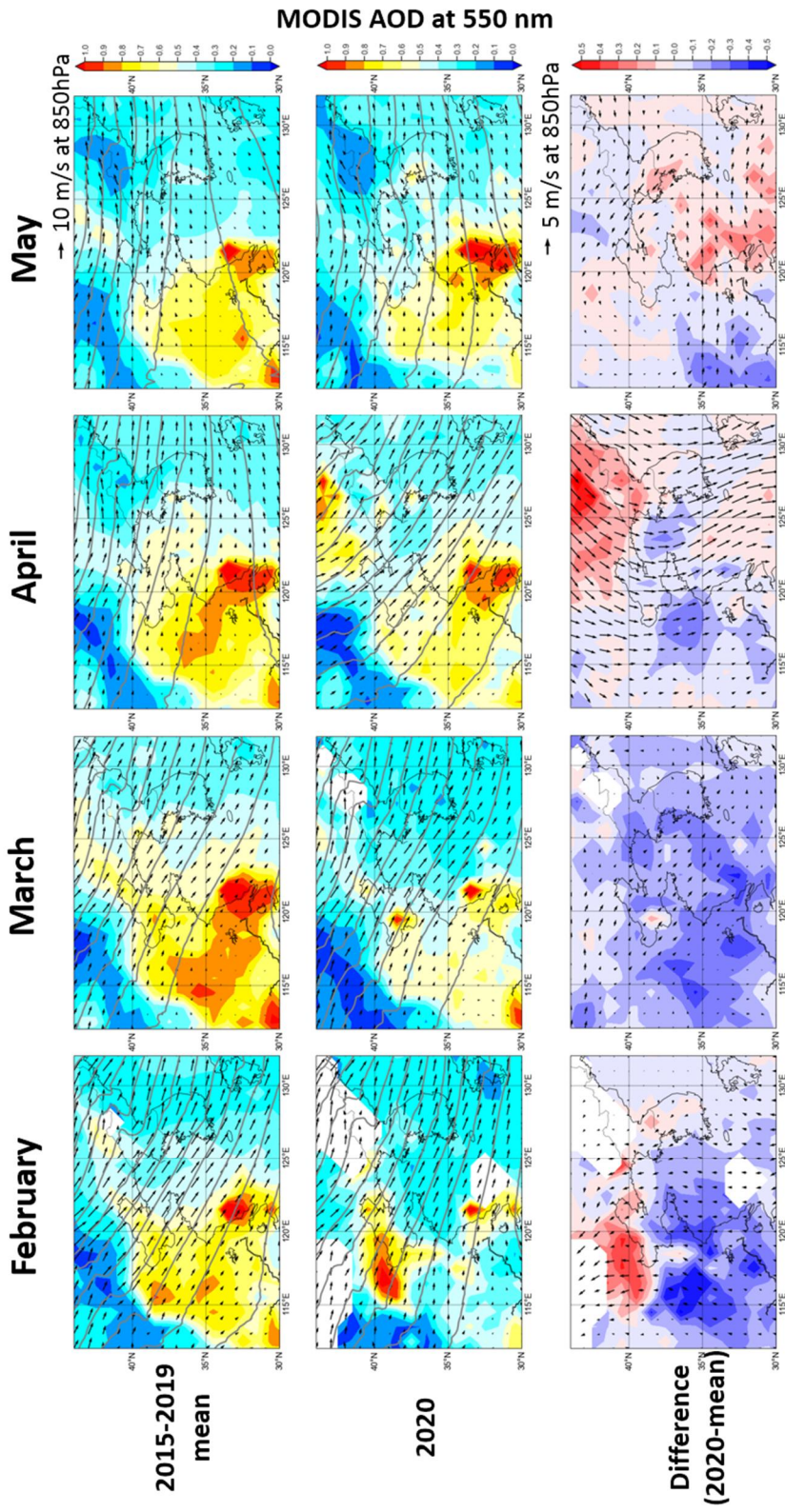


Figure 3. Monthly mean of MODIS AOD at 550nm and ERA5 geopotential height & wind field at 850hPa level from 2015 to 2019 and 2020.

3.2 대기 기주 에어로졸의 광학 특성

AERONET 선편포토미터 관측으로부터 얻은 연직 기주 적분된 에어로졸의 특성을 분석하였다.

Figure 4은 관측기간 동안 AERONET 선편포토미터로 측정된 500nm 에어로졸 광학두께를 앞선 MODIS 관측에서 가장 큰 월변화를 보였던 2월과 3월에 대해서 각각 그린 것이다. 2월의 경우 베이징에서 앞선 MODIS 관측 결과와 마찬가지로 2020년에 이전 5개년에 비해 비슷하거나 높은 에어로졸 광학두께 값(0.558 ± 0.53)을 보였으며 서울과 안면도는 앞선 해들과 비슷한 수준을 보였다. 반면 3월의 경우 3곳의 관측소 모두 에어로졸 광학두께가 큰 고농도 사례들이 감소하면서 월 평균과 표준편차가 모두 감소하는 특성을 보였다. 이는 앞선 MODIS 관측 결과와도 일치하는 결과이다.

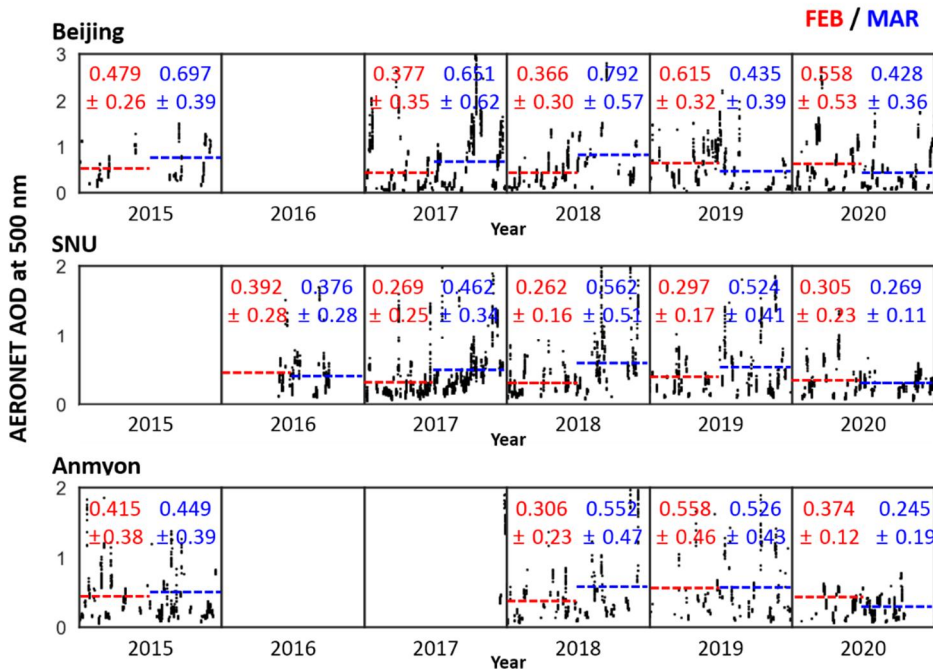


Figure 4. Time-series of AERONET AOD at 500 nm for February (red) and March (blue) from 2015 to 2020. Mean values and standard deviations for each month are mentioned in each panel.

통계적인 분석을 위하여 동일한 자료를 월별 상자 그림(box plot) 형식으로 2020년과 이전 5년을 비교하여 나타내었다(Figure 5). 2015-2019년 평균 대비 2020년의 월평균 에어로졸 광학두께의 변화율을 Table 3에 나타내었다. Figure 5와 Table 3에서 확인할 수 있듯 2020년의 경우 이전 5년과 비교하여 대체로 에어로졸 광학두께가 감소하는 경향을 보였다. 이는 해당 기간 대기 기주 상 에어로졸의 부하량이 감소하였음을 의미한다.

그러나 베이징의 경우 2월에 중국의 전면적인 봉쇄 조치의 시행으로 오염물질 배출량이 감소하였음에도 불구하고 오히려 에어로졸 광학두께가 이전 5년과 비교하여 31.8%가 증가한 것으로 나타났는데 이는 이 기간 중 해당 지역의 풍속 약화와 높은 습도 등의 오염물질 생성과 축적에 유리한 기상조건과 생성되었고 이에 더해 인근 허베이성과 허난성, 산시성 지역으로부터의 대기오염물질의 유입이 일어나 대기 중 에어로졸의 부하량이 증가하였고 그 결과 에어로졸 광학두께 역시 증가한 것으로 보인다(Le et al., 2020; Zhao et al., 2020; Wang et al., 2021).

에어로졸 광학두께의 변화는 지역별로 차이가 있었지만 공통적으로 3월에 가장 큰 감소가 나타나 평균적으로 에어로졸 광학두께가 평년에 비해 550nm 파장에서 0.2가량 감소하였다. 즉, 지역에 따라 31-46%의 감소가 일어났다. 이는 3월에 대기 기주 상 에어로졸의 부하량이 가장 크게 감소하였음을 의미한다. 4월 역시 이전 5년에 비해 9-20% 낮은 에어로졸 광학두께가 나타나 여전히 에어로졸의 부하량이 적게 유지되었음을 보였다. 5월에 이르러서는 한국 지역의 두 측정소는 2020년이 2015-2019년과 비교하여 뚜렷한 에어로졸 광학두께의 차이를 보이지 않았으며 베이징의 경우에도 월 평균의 감소가 나타났으나 에어로졸 광학두께가 큰 고농도 사례들이 증가한 것을 확인할 수 있었다.

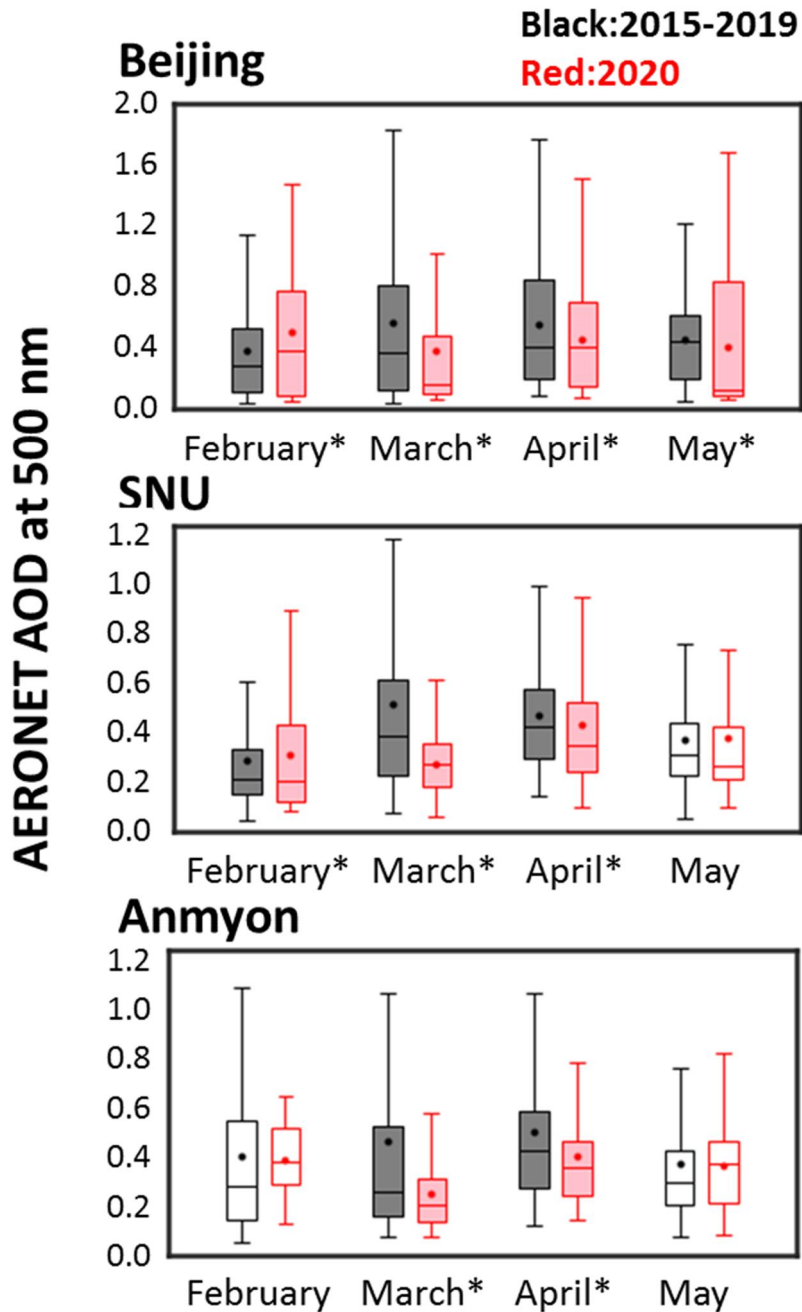


Figure 5. Monthly variations of column AOD at 500 nm at three AERONET sites. Black denotes mean of 2015 to 2019 and red denotes 2020. Filled box indicates significant difference within 95% confidence level. The bottom and top of the box show the 25th and 75th percentiles. Median is shown in the box. The bottom and top of the whisker show the 5th and 95th percentiles. Dots denote mean.

Table 3. Percent changes in monthly mean AOD at 500 nm between 2020 and mean of 2015 to 2019.

	February	March	April	May
Beijing	+31.8%*	-31.1%*	-18.7%*	-9.9%*
SNU	+9.1%*	-46.2%*	-9.3%*	+2.8%
Anmyon	-5.4%	-45.5%*	-20.6%*	-2.2%

* significant difference within 95% confidence level

AERONET 썬포토미터 관측을 통해 얻은 에어로졸 광학두께와 단산란 알베도를 이용하여 구한 광흡수 에어로졸 광학두께 (Absorption aerosol optical depth, AAOD)의 변화를 분석하여 상자 그림과 표로 나타내었다(Figure 6, Table 4). Figure 6와 Table 5에서 확인할 수 있듯이 2020년의 경우 이전 5년과 비교하여 대체로 광흡수 에어로졸 광학두께가 감소하는 경향을 보였다. 앞서 분석한 에어로졸 광학두께가 감소한 것과 마찬가지로 광흡수 에어로졸 광학두께 역시 동기간 감소하였다. 이는 해당 기간에 전체 에어로졸의 부하량이 감소하였을 뿐만 아니라 광흡수 에어로졸 역시 감소하였음을 의미한다.

그러나 베이징의 경우 2월중 에어로졸 광학두께는 증가한 반면 광흡수 에어로졸 광학두께는 감소하는 특성을 보였다. Wang et al. (2021)에 따르면 이 기간 중 광흡수 에어로졸인 블랙카본의 대기 기주 농도가 약 30% 가까이 감소한 반면, 광산란 특성을 가지는 황산염, 질산염, 암모늄과 같은 2차 에어로졸의 생성이 증가하였다. 그 결과, 550nm 파장에서 에어로졸 광학두께는 0.2 증가한 반면 단산란 알베도는 0.02 감소하였다.

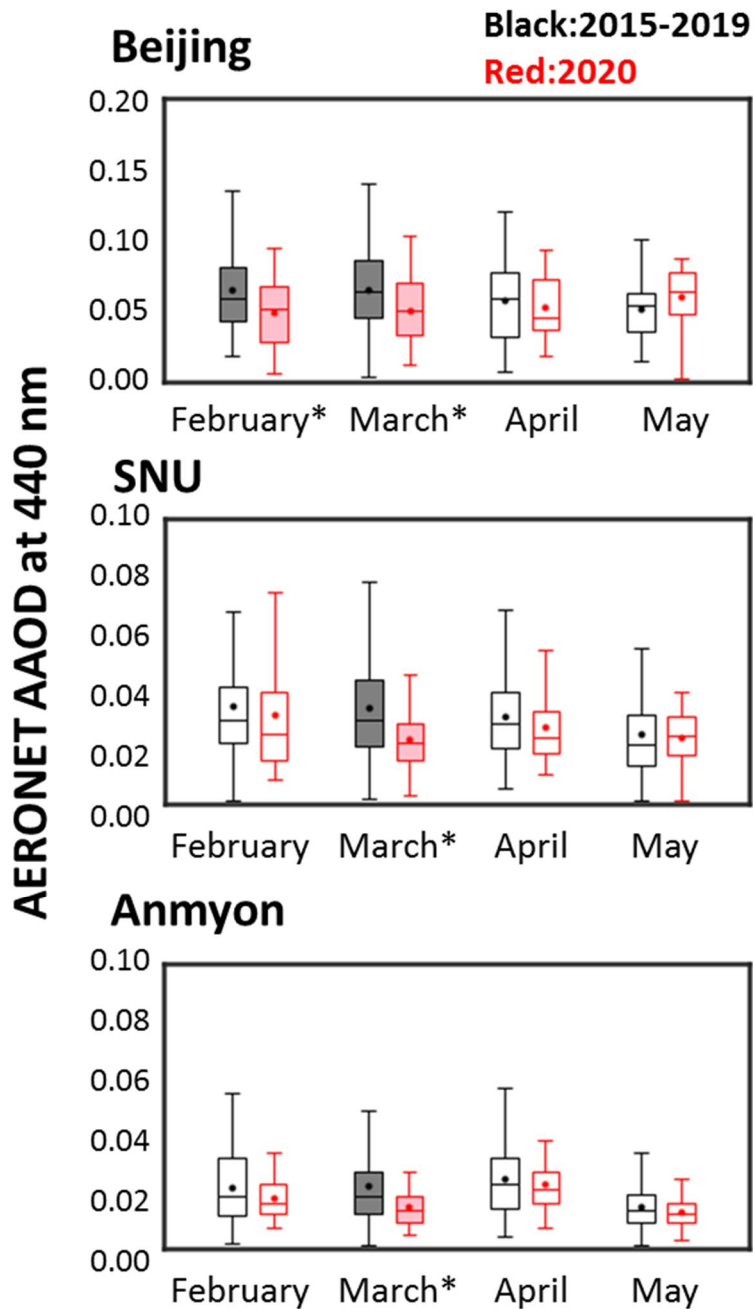


Figure 6. Monthly variations of column AAOD at 440 nm at three AERONET sites. Black denotes mean of 2015 to 2019 and red denotes 2020. Filled box indicates significant difference within 95% confidence level. The bottom and top of the box show the 25th and 75th percentiles. Median is shown in the box. The bottom and top of the whisker show the 5th and 95th percentiles. Dots denote mean.

Table 4. Percent changes in monthly mean AAOD at 440nm between 2020 and mean of 2015 to 2019

	February	March	April	May
Beijing	-24.3%*	-22.1%*	-9.1%	+16.1%
SNU	-7.6%	-32.3%*	-12.4%	-5.6%
Anmyon	-13.7%	-34.4%*	-8.4%	-14.8%

* significant difference within 95% confidence level

2020년의 광흡수 에어로졸 광학두께는 전 지역에서 3월에 가장 뚜렷하고 유의미한 감소가 나타났다. 관측 지점에 따라 22-34%의 감소가 나타났으며 이는 대도시 지역에서 블랙카본의 주요한 배출원인 차량 운행 및 산업 활동이 코로나19 봉쇄 조치로 인해 감소한 영향으로 해석된다.

3.3 지표면 에어로졸의 광학 특성

Figure 7은 안면도에 위치한 기후변화감시센터에서 네펠로미터와 에셀로미터로부터 특정된 에어로졸 광산란 계수(550nm)와 광흡수 계수(520nm)를 월별로 나타낸 것이다.

2020년 관측된 에어로졸의 광학 특성 중 에어로졸 광산란 계수(550nm)의 평균값과 표준편차는 $78.27 \pm 56.02 \text{ Mm}^{-1}$ 로 이전 5년 값 $87.78 \pm 62.80 \text{ Mm}^{-1}$ 보다 다소 낮게 나타났다. 2월과 5월의 경우, 2020년과 이전 5년의 에어로졸 광산란 계수가 큰 차이를 보이지 않은 것에 비해 3월과 4월에는 2020의 에어로졸 광산란 계수가 약 20% 감소하며 유의미한 변화를 보였다. 대부분의 에어로졸들이 광산란 특성을 가지고 있음을 고려할 때 이러한 광산란계수의 감소는 선행 연구들에서 보고된 이 기간 중 지상 PM 농도 감소와도 관련이 있다. 특히 Ju et al. (2020)에서는 2020년 3월 전국 평균 PM_{2.5}와 PM₁₀의 농도가 각각 전년 대비 45.45%, 35.56% 감소하였다고 보고하였다.

에어로졸 광흡수 계수의 경우 광산란 계수와는 다른 변화를 보였다. 2020년 관측된 에어로졸 광흡수 계수(550nm)의 평균값과 표준편차는 $8.58 \pm 5.40 \text{ Mm}^{-1}$ 로 이전 5년 값 $8.11 \pm 4.84 \text{ Mm}^{-1}$ 보다 높게 나타났다(통계적으로 유의하지 않음). 월별로 비교했을 때도 2020년이 이전 5년의 평균과 비슷하거나 높은 에어로졸 광흡수 계수 값을 보였다. 그러나 그 차이는 크지 않았으며, 95% 신뢰수준에서 통계적으로 유의미한 차이를 보이지 않았다. 이는 중국을 비롯한 여러 국가에서 코로나19 봉쇄 기간 중 블랙카본의 농도 감소와 이로 인한 에어로졸의 광흡수 감소를 보고한 Xu et al. (2020)이나 Kaskaoutis et al. (2021) 등 선행연구들과 상반되는 결과이며, 앞서 확인한 대기 기주 상 광흡수 에어로졸 광학두께 감소와도 배치되는 결과이다.

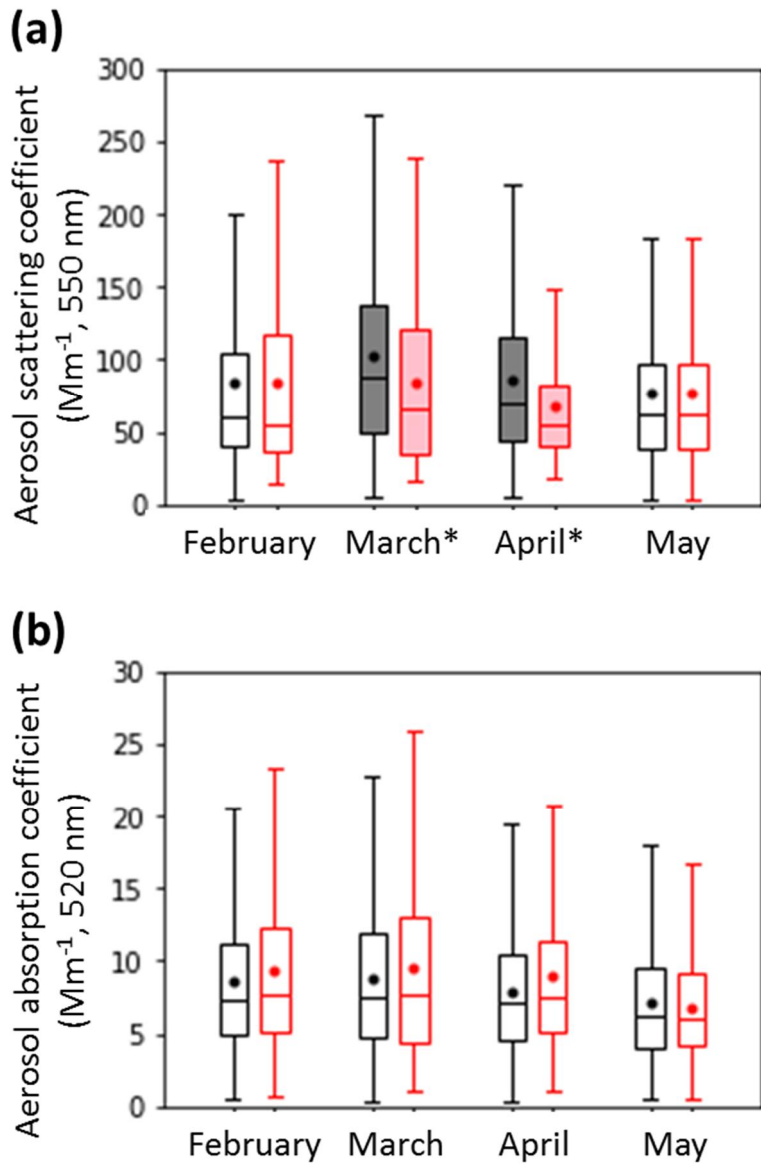


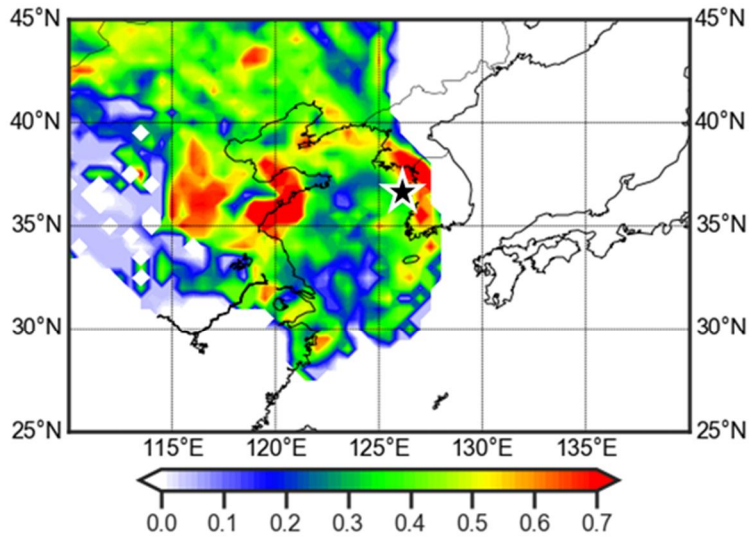
Figure 7. Monthly variations of surface aerosol (a) scattering coefficient and (b) absorption coefficient at Anmyon. Black denotes mean of 2015 to 2019 and red denotes 2020.

Figure 8은 HYSPLIT모델을 이용하여 2015-2020년 2월부터 5월에 대해 시간 단위 안면도에 도달하는 공기 궤의 3일 역 궤적을 계산하고 에어로졸 광흡수 계수에 대해 PSCF 분석을 진행한 결과를 나타낸 것이다. 각 격자의 색은 그 격자를 지난 공기 궤가 관측 지점에 도달하여 일정 치 이상의 높은 광흡수 계수를 나타낼 확률이다. 본 연구에서는 최근 10년간의 에어로졸 광흡수 계수 관측 값($8.2 \pm 1.4 \text{ Mm}^{-1}$)을 기준으로 평균+1표준편차 값인 11 Mm^{-1} 을 기준 값으로 설정하였다. 높은 PSCF 결과를 가진 격자 지역은 수용지점에 영향을 주었을 확률이 높은 잠재 오염원 지역이거나 가능한 경로이다.

분석결과 2015-2019년 높은 PSCF 값(>0.5)을 가지는 잠재적인 배출원은 산동반도를 비롯한 중국 동부지역과 안면도 인근의 국내 지역에 위치했다. 이를 바탕으로 안면도의 에어로졸 광흡수 계수는 중국 동부지역으로부터 수송된 장거리 수송 에어로졸의 영향과 함께 인근 지역에서 발생한 에어로졸의 영향을 모두 받는 것으로 판단할 수 있다. 이에 더해 Lee et al. (2019)에서 보고한 바와 같이 중국으로부터 수송된 장거리 수송 에어로졸 역시 안면도에 도달하기 전 국내 지역을 거쳐 안면도로 도달하므로 국외에서 기원한 장거리수송 에어로졸에서도 국내 배출원의 영향이 크게 작용할 수 있음을 확인하였다.

2020년의 경우 과거 5년에 비해 잠재 오염원이 더욱 광범위하게 나타났다. 베이징을 포함한 중국 동북부 지역에서도 높은 PSCF 값이 나타났다으며 특히 국내 지역들이 이전 5년에 비해 높은 PSCF 값을 보였다. 이로부터 2020년의 에어로졸 광흡수 계수가 국내 배출원의 영향을 많이 받았음을 확인 할 수 있었다. 이에 더해 선행 연구들에서는 한국의 경우 중국과 달리 전면적인 봉쇄(full lockdown)와 같은 강력한 조치를 시행하지 않았기 때문에 대기질의 개선이 극적이지 않았다고 보고하기도 하였다(Koo et al., 2020). 이로 인해 2020년의 에어로졸 광흡수 계수 역시 유의미한 변화를 보이지 않았던 것으로 보인다.

(a) 2015-2019



(b) 2020

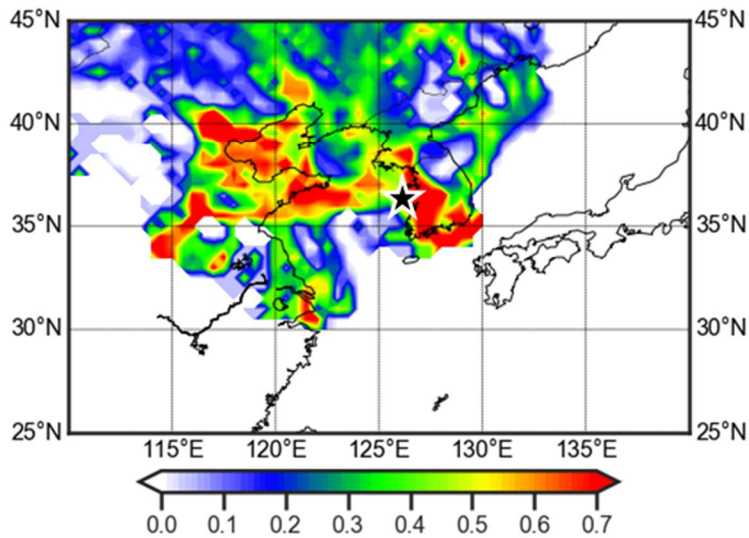


Figure 8. Potential source locations for high aerosol absorption coefficients ($> 11 \text{ Mm}^{-1}$) for 2015-2019 and 2020. The colors represent the contribution level of regions. Red color could be associated with the high possibility for the grid cell to be an emission source, while the blue color indicated low possibility.

3.4 에어로졸의 직접복사강제력 및 복사강제효율

관측 기간 동안 AERONET 쉐네포토미터로 연직 관측된 에어로졸 광학 특성을 이용하여 AERONET 네트워크에서 제공하는 에어로졸의 직접복사강제력과 복사강제효율을 분석하였다.

에어로졸의 복사강제력은 에어로졸 광학두께, 단산란 알베도, 비대칭 인수를 변수로 하여 대기복사 전달모델을 통해 계산된다. AERONET에서 제공하는 에어로졸의 복사강제력은 에어로졸이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 태양 플럭스(flux)의 차로 정의되며 다음 식에 의해 계산된다.

$$\Delta F_{TOA} = F^{\uparrow 0}_{TOA} - F^{\uparrow}_{TOA}$$

$$\Delta F_{BOA} = F^{\downarrow}_{BOA} - F^{\downarrow 0}_{BOA}$$

F는 에어로졸이 존재할 때의 태양 플럭스, F^0 는 에어로졸이 존재하지 않을 때의 태양 플럭스이며 TOA(Top Of Atmosphere)는 대기 상단, BOA(Bottom Of Atmosphere)는 대기 하단(지표면)을 의미한다. 화살표는 플럭스의 방향을 나타내는 것으로 ↓는 하향 플럭스, ↑는 상향 플럭스이다. ΔF 의 값이 양인 경우는 대기 온난화(가열 효과), 음인 경우에는 대기 냉각화(냉각 효과)를 의미한다. 에어로졸 복사강제효율은 에어로졸 복사강제력을 에어로졸 광학두께로 나누어 표준화시킨 것으로 다음과 같은 식을 통해 계산된다(Garcia et al., 2008).

$$\Delta FE_{TOA} = \Delta F_{TOA} / AOD$$

$$\Delta FE_{BOA} = \Delta F_{BOA} / AOD$$

Figure 9는 각 측정소에서 산정된 에어로졸의 직접복사강제력 및 복사강제효율(대기 상단, 대기, 지표)을 나타낸 것이다.

관측 기간 중 에어로졸 광학두께의 감소, 즉 대기 기주상 에어로졸의 감소로 인해 지상과 대기 상단에서의 복사강제력의 감소가 나타났다. 가장 큰 폭의 에어로졸 광학두께 감소가 나타났던 3월에

지표면에서의 에어로졸 직접복사강제력 역시 가장 크게 감소하여 지역별로 17-28% 감소하는 특성을 보였다. 대기 중 에어로졸이 감소함에 따라 지표면에 도달하는 태양 복사의 양은 그만큼 증가하여 지표면에서의 냉각 효과 또한 작게 나타나는 것을 알 수 있다.

반면 에어로졸 복사강제효율의 경우 2020년 3,4월 중 지표면에 대한 복사 효율이 증가하였고 그 결과 대기층에서의 에어로졸 복사효율이 이전 5년에 비해 24-36% 증가하였다. 이는 대기 기주 상에서 광산란 에어로졸에 대한 광흡수 에어로졸의 상대적 비율이 증가한 것으로 해석할 수 있다. 이러한 광흡수 에어로졸의 고농도 현상으로 인해 대기층에서의 태양 복사 흡수 효과가 크게 나타남과 동시에 이로 유발된 지표 냉각 또한 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2020년 3월 코로나 19 봉쇄 조치로 인한 배출량 감소로 에어로졸 광학두께의 감소가 나타났으며 이는 에어로졸 복사강제력의 감소로 이어져 지표 냉각을 약화 시켰으나, 광산란 에어로졸 대비 광흡수 에어로졸 비율 증가가 이루어져 대기층에서의 태양 복사 흡수가 증가하여 지표 냉각을 강화시키는 방향으로 작용하였다.

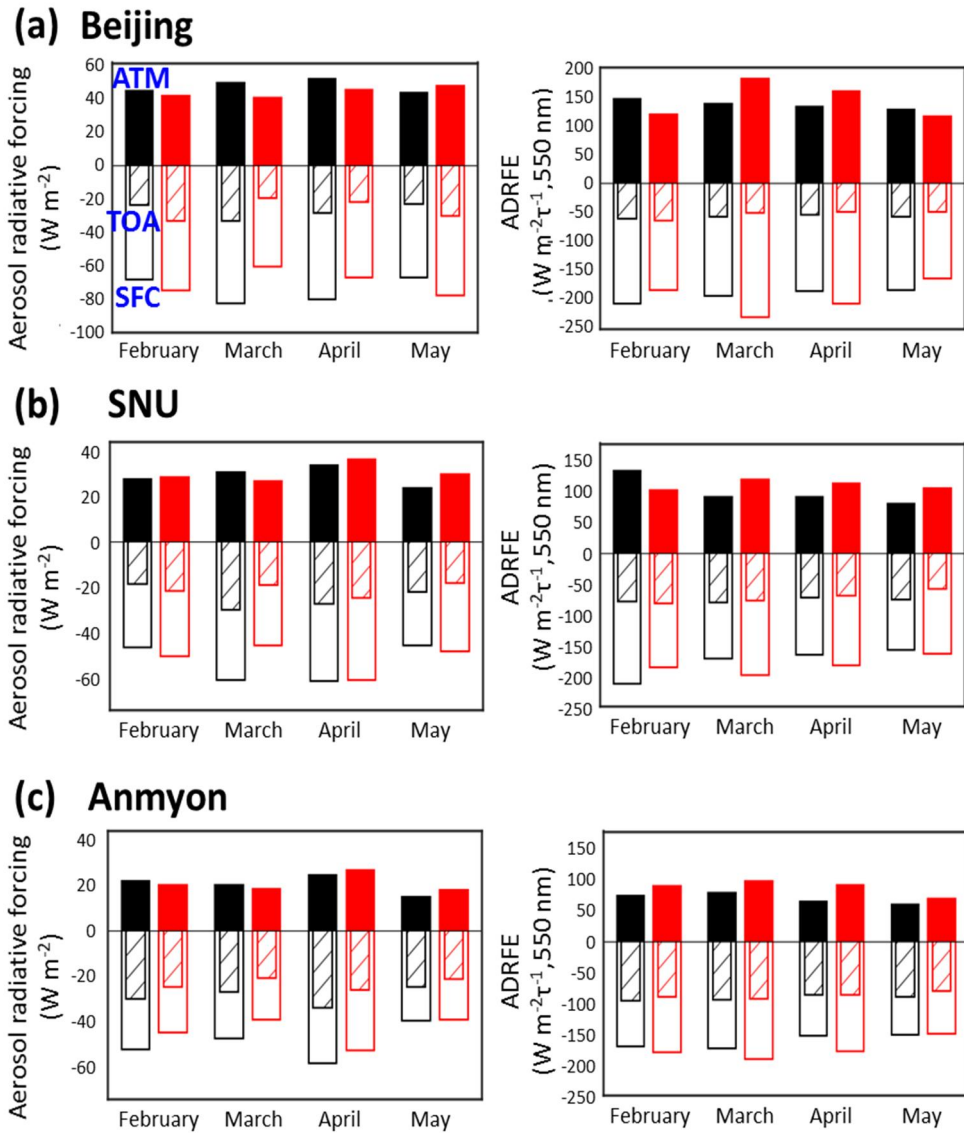


Figure 9. Monthly variations of aerosol direct radiative forcing and forcing efficiency at (a) Beijing, (b) SNU, (c) Anmyon. Empty bars show RF and RFe at surface, and dashed bars show RF and RFe at TOA. Filled bars show atmospheric forcing and forcing efficiency.

제 4 장 결론 및 제언

코로나19로 인한 봉쇄 기간 중 동아시아에서 관측된 에어로졸 광흡수 특성을 파악하기 위하여, 에어로졸 산란계수, 에어로졸 흡수계수, 에어로졸 광학두께, 그리고 흡수 에어로졸 광학두께의 변동성을 살펴보았다.

AEORONET 센포토미터로 측정한 대기 기주의 에어로졸 광학두께는 2020년 감소하는 경향을 보였다. 3월에 지역별로 가장 큰 에어로졸 광학두께 감소가 나타나 평균적으로 비해 31-46%의 감소가 나타났다. 이에 더해 광흡수 에어로졸 광학두께의 경우 전 지역에서 감소하는 경향을 보였다. 특히 3월에 에어로졸 광학두께의 경우와 마찬가지로 통계적으로 유의한 수준의 감소가 일어났으며 이는 해당기간에 광흡수 에어로졸 역시 감소하였음을 의미한다. 베이징의 경우 2월중 봉쇄 조치에도 불구하고 에어로졸 광학두께는 증가하고 흡수 에어로졸 광학두께는 감소하는 특성을 보였는데 Wang et al. (2020)에 따르면 이는 이 기간 중 빛을 산란시키는 2차 생성 에어로졸의 증가와 광흡수 에어로졸인 블랙카본의 농도 감소가 동시에 일어난 결과이다.

안면도 기후변화감시센터에서 측정한 지표면 에어로졸의 광학 특성 중 광산란 계수와 광흡수 계수는 대기 기주 에어로졸과는 일부 다른 변화를 보였다. 대기 기주에서 3월과 4월에 에어로졸 광학두께의 감소가 나타난 것과 동일하게 지표면 에어로졸의 광산란 계수 역시 3월과 4월에서 유의미한 감소가 나타나 약 20% 감소하였다. 반면 대기 기주에서 광흡수 에어로졸 광학두께가 감소한 것과 달리 지상에서 측정한 광흡수 계수의 경우 2020년에 평년과 비교하여 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 중국을 비롯한 기타 국가에서 코로나19 봉쇄 기간 중 블랙 카본의 농도 감소를 보고한 선행 연구들과도 상반되는 결과이다. PSCF 분석 결과 안면도의 에어로졸 광흡수는 중국과 국내 배출원의

영향을 모두 받고 있으며 2020년의 경우 국내의 영향이 더욱 컸음을 확인하였다.

관측 기간 동안 AERONET 전포토미터로 연직 관측된 에어로졸 광학두께, 단산란 알베도, 비대칭 인수를 이용하여 대기복사 전달모델을 통해 계산된 에어로졸의 직접복사강제력을 분석하였다. 관측 기간 중 에어로졸 광학두께의 감소로 인해 지상과 대기 상단에서의 복사강제력의 감소가 나타났으며 특히 에어로졸 광학두께가 가장 크게 감소했던 3월의 경우 지표면에서의 에어로졸 직접복사강제력 역시 크게 감소하여 지역별로 17-28% 감소하는 특성을 보였다. 반면 에어로졸 직접복사 강제효율은 오히려 이전 5년과 비교하여 높게 나타나 대기층에서의 에어로졸 복사효율은 이전 5년에 비해 24-36% 증가하였다. 코로나19 기간 중 산란 에어로졸에 대한 광흡수 에어로졸의 상대적 비율이 증가하였고 이는 에어로졸 광학두께의 감소 대비 에어로졸 복사강제력의 감소가 적게 나타나는 원인이 되었다.

인위적인 대기 오염물질 배출의 극적인 감소가 이루어진 코로나19 기간 중 대기 오염 물질 농도 변화를 연구하는 것에서 한 발 더 나아가 에어로졸의 광학적 특성 및 복사효과를 평가하는 것은 향후 대기 오염 물질 저감 및 기후 변화 대응 정책 수립에 활용될 수 있다는 점에서 그 의의가 있다.

참고 문헌

- Abdullah, S., Mansor, A.A., Napi, N., Mansor, W., Ahmed, A.N., Ismail, M. and Ramly, Z. (2020). Air quality status during 2020 Malaysia Movement Control Order (MCO) due to 2019 novel coronavirus (2019-nCoV) pandemic. *Science of The Total Environment*, 729, 139022.
- Anderson, T.L. and Ogren, J.A. (1998). Determining aerosol radiative properties using the TSI 3563 integrating nephelometer, *Aerosol Science and Technology*, 29(1), 57–69.
- Arnott, W.P., Hamasha, K., Moosmüller, H., Sheridan, P.J. and Ogren, J.A. (2005). Towards Aerosol Light–Absorption Measurements with a 7–Wavelength Aethalometer: Evaluation with a Photoacoustic Instrument and 3–Wavelength Nephelometer. *Aerosol Science and Technology*, 39, 17–29.
- Bergstrom, R.W., Pilewskie, P., Russell, P.B., Redemann, J., Bond, T.C., Quinn, P.K. and Sierau, B. (2007). Spectral absorption properties of atmospheric aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7, 5937–5943.
- Berman, J. and Ebisu, K. (2020). Changes in U.S. air pollution during the COVID–19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 739, 139864.
- Bond, T.C., co–authors. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 5380–5552.
- Charlson, R.J., Schwartz, S.E., Hales, J.M., Cess, R.D., Coakley, J.A., Hansen, J.E. and Hofmann, D.J. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*, 255, 423–430.

- Collivignarelli, M., Abbà, A., Bertanza, G., Pedrazzani, R., Ricciardi, P. and Miino, M.C. (2020). Lockdown for CoViD–2019 in Milan: What are the effects on air quality? *Science of The Total Environment*, 732, 139280.
- Dantas, G., Siciliano, B., França, B.B., da Silva, C.M. and Arbilla, G. (2020). The impact of COVID–19 partial lockdown on the air quality of the city of Rio de Janeiro, Brazil. *The Science of the total environment*, 729, 139085.
- Dubovik, O., Smirnov, A., Holben, B.N., King, M.D., Kaufman, Y.J., Eck, T.F. and Slutsker, I. (2000). Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 105, 9791–9806.
- Evangeliou, N., co–authors. (2021). Changes in black carbon emissions over Europe due to COVID–19 lockdowns. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2675–2692.
- Fan, H., Wang, Y., Zhao, C., Yang, Y., Yang, X., Sun, Y., and Jiang, S. (2021). The role of primary emission and transboundary transport in the air quality changes during and after the COVID–19 lockdown in China, *Geophysical Research Letters*, 48 (7), 091065.
- Han, L, Zhou, W., Li, W., and Li, L. (2014). Impact of urbanization level on urban air quality: A case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities, *Environmental Pollution*, Volume 194, 163–170.
- Ham, J.Y., Lee, M.J., Ryoo, S.B. and Lee, Y.G. (2019). *Atmosphere. Korean Meteorological Society*, Vol. 29, 429–438.
- Hersbach, H., Bell, B. and Berrisford, P. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999–2049.

- Hu, J., Wang, Y., Ying, Q. and Zhang, H. (2014). Spatial and temporal variability of PM_{2.5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Environment*, Volume 95, 598–609.
- Jephcote, C., Hansell, A.L., Adams, K. and Gulliver, J. (2021). Changes in air quality during COVID–19 ‘lockdown’ in the United Kingdom. *Environmental Pollution*, 272, 116011.
- Jia, M., Evangeliou, N., Eckhardt, S., Huang, X., Gao, J., Ding, A. and Stohl, A. (2021). Black Carbon Emission Reduction Due to COVID–19 Lockdown in China. *Geophysical Research Letters*, 48, 093243.
- Ju, M.J., Oh, J.H. and Choi, Y.H. (2020). Changes in air pollution levels after COVID–19 outbreak in Korea. *Science of The Total Environment*, 750, 141521.
- Kim, S.W., Yoon, S.C., Jefferson, A., Ogren, J.A., Dutton, E.G., Won, J.G., Ghim, Y.S., Lee, B.I. and Han, J.S. (2005). Aerosol optical, chemical and physical properties at Gosan, Korea during Asian dust and pollution episodes in 2001. *Atmospheric Environment*, Volume 39, 39–50.
- Koo, J.H., Kim, J.H. and Lee, Y.G. (2020). The implication of the air quality pattern in South Korea after the COVID–19 outbreak. *Scientific reports*, 10, 22462.
- Lack, D.A. and Langridge, J.M. (2013). On the attribution of black and brown carbon light absorption using the Ångström exponent. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 10535–10543.
- Laskin, A., Laskin, J. and Nizkorodov, S.A. (2015). Chemistry of Atmospheric Brown Carbon. *Chemical Reviews*, 115, 4335–4382.
- Le, T., Wang, Y., Liu, L., Yang, J., Yung, Y.L., Li, G. and Seinfeld, J.H. (2020). Unexpected air pollution with marked emission

- reductions during the COVID–19 outbreak in China. *Science*, 369, 702–706.
- Lee, S.Y., Kim, J.H., Choi, M.J., Hong J.M., Lim, H.K., Eck, T.F., Holben, B.N., Ahn, J.Y., Kim, J.S. and Koo, J.H. (2019). Analysis of long–range transboundary transport (LRTT) effect on Korean aerosol pollution during the KORUS–AQ campaign. *Atmospheric Environment*, 204, 53–67.
- Levy, R.C., Mattoo, S., Munchak, L.A, Remer, L.A, Sayer, A.M., Patadia, F. and Hsu, N.C. (2013). The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 2989–3034.
- Li, L., Li, Q., Huang, L., Wang, Q., Zhu, A., Xu, J., Liu, Z., Li, H., Shi, L., Li, R., Azari, M., Wang, Y., Zhang, X., Liu, Z., Zhu, Y., Zhang, K., Xue, S., Ooi, M., Zhang, D. and Chan, A. (2020). Air quality changes during the COVID–19 lockdown over the Yangtze River Delta Region: An insight into the impact of human activity pattern changes on air pollution variation. *Science of The Total Environment*, 732, 139282.
- Lian, X., Huang, J., Huang, R., Liu, C., Wang, L. and Zhang, T. (2020). Impact of city lockdown on the air quality of COVID–19–hit of Wuhan city. *Science of The Total Environment*, 742, 140556.
- Nakada, L., and Urban, R.C. (2020). COVID–19 pandemic: Impacts on the air quality during the partial lockdown in São Paulo state, Brazil. *Science of The Total Environment*, 730, 139087.
- Platnick, S., King, M. and Hubanks, P. (2017). MODIS Atmosphere L3 Daily Product. NASA MODIS Adaptive Processing System, Goddard Space Flight Center,
- Remer, L.A., Kaufman, Y.J., Tanré, D., Mattoo, S., Chu, D.A., Martins, J.V., Li, R.R., Ichok, C., Levy, R.C., Kleidman, R.G., Eck, T.F.,

- Vermote, E. and Holben, B.N. (2005). The MODIS Aerosol Algorithm, Products, and Validation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62, 947–973.
- Russell P. B., Bergstrom, R.W., Shinozuka, Y., Clarke, A.D., DeCarlo, P.F., Jimenez, J.L., Livingston, J.M., Redemann, J., Dubovik, O. and Strawa, A. (2010). Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 1155–1169.
- Schmid, O., Artaxo, P., Arnott, W.P., Chand, D., Gatti, L.V., Frank, G.P., Hoffer, A., Schnaite, M. and Andreae, M.O. (2006). Spectral light absorption by ambient aerosols influenced by biomass burning in the Amazon Basin. I: Comparison and field calibration of absorption measurement techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 3443–3462.
- Sharma, S., Zhang, M., Anshika, Gao, J., Zhang, H. and Kota, S.H. (2020). Effect of restricted emissions during COVID–19 on air quality in India. *Science of The Total Environment*, 728, 138878.
- Shen, L., Zhao, T., Wang, H., Liu, J., Bai, Y., Kong, S., Zheng, H., Zhu, Y. and Shu, Z. (2021). Importance of meteorology in air pollution events during the city lockdown for COVID–19 in Hubei Province, Central China. *Science of The Total Environment*, 754, 142227.
- Shin, S.K, Tesche, M., Noh, Y.M. and Müller, D. (2019). Aerosol–type classification based on AERONET version 3 inversion products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12, 3789–3803.
- Tobías, A., Carnerero, C., Reche, C., Massagué, J., Via, M., Minguillón, M.C., Alastuey, A. and Querol, X. (2020). Changes in air quality during the lockdown in Barcelona (Spain) one month into the SARS–CoV–2 epidemic. *Science of The Total Environment*, 726,

138540.

- Wang, Z., Huang, X., Ding, K., Ren, C., Cao, L. and Zhou, D. (2021). Weakened aerosol–PBL interaction during COVID–19 lockdown in northern China. *Geophysical Research Letters*, 48, 090542.
- Weingartner, E., Saathoff, H., Schnaiter, M., Streit, N., Bitnar, B. and Baltensperger, U. (2020). Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers. *Journal of Aerosol Science*, 34, 1445–1463.
- WHO. (2020). World Health Organization. WHO director–general's opening remarks at the media briefing on COVID–19 – 11 March 2020.
- Xu, L., Zhang, J., Sun, X., Xu, S., Shan, M., Yuan, Q., Liu, L., Du, Z., Liu, D., Xu, D., Song, D., Liu, B., Lu, G., Shi, Z. and Li, W. (2020). Variation in Concentration and Sources of Black Carbon in a Megacity of China During the COVID–19 Pandemic. *Geophysical Research Letters*, 47, 090444.
- Zhao, N., Wang, G., Li, G., Lang, J. and Zhang, H. (2020). Air pollution episodes during the COVID–19 outbreak in the Beijing–Tianjin–Hebei region of China: An insight into the transport pathways and source distribution. *Environmental Pollution*, Volume 267, 115617.

Abstract

Changes in Aerosol light absorption observed in East Asia during the COVID–19 lockdown

Gyuyoung Shim

School of Earth and Environmental Science

Seoul National University

Anthropogenic aerosol and precursor emissions decreased due to the lockdown measures implemented to stop the spread of COVID–19 that started in January 2020. In this study, the changes in the light absorption characteristics of aerosols observed in East Asia and the climate effects were investigated using the ground in–situ observation data and column observation data through AERONET.

Although differences in the pattern of changes in aerosol optical properties according to regions, in February and March 2020, aerosol optical depth (AOD) significantly decreased over East Asia. In particular, in March 2020, AOD decreased by 31–46% compared to the previous 5–year mean. Absorption aerosol optical depth (AAOD), which indicates the degree of aerosol light absorption in the atmospheric column, also decreased by 22–34% during the same period.

The surface aerosol scattering coefficient observed at Anmyon decreased by about 20% in March–April compared to the previous 5–year mean, whereas the aerosol absorption coefficient showed no significant difference. PSCF analysis confirmed that the aerosol absorption coefficient in 2020 was strongly affected by the light absorbing aerosols from domestic sources.

The aerosol direct radiative forcing at the surface decreased by

17–28 % due to the decrease of AOD, but the direct radiative forcing efficiency at the atmosphere increased by 24–36% in March 2020 compared to the previous 5 years. The ratio of light absorbing aerosol to scattering aerosol increased, and the decrease in radiative forcing was small compare to the decrease of AOD.

**Keywords : COVID–19 lockdown, light absorbing aerosols,
aerosol radiative forcing**

Student Number : 2020–26053