Journal of Environmental Science International
32(4): 205~220; April 2023

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2023.32.4.205

ORIGINAL ARTICLE

부산지역 $PM_{2.5}$의 COVID-19 영향 분석 - 수도권과 비교연구 (Ⅲ)

박민준[1] · 김철희[1),2)*]

[1)]부산대학교 지구환경시스템학부 대기과학전공, [2)]부산대학교 환경연구원

Impact Assessment of COVID-19 on $PM_{2.5}$ in Busan -Comparative Study in Busan vs. Seoul Metropolitan Area (Ⅲ)

Min-Jun Park[1)], Cheol-Hee Kim[1),2)*]

[1)]Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea

[2)]Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

In this study, impact of the COVID-19 outbreak on $PM_{2.5}$ mass and its five chemical components (NH_4^+, NO_3^-, SO_4^{2-}, OC, EC) in Busan was evaluated, and compared with that of Seoul. The study period over the recent three years was sub-divided into two periods: Pre-COVID (2018~2019) and COVID (2020) periods, and the differences in observed annual and monthly variations between the two periods were explored here. The results indicated that annual mean $PM_{2.5}$ mass concentrations decreased during the COVID period by 16% in Seoul and 29% in Busan, and the satellite-observed annual average of aerosol optical depth (AOD) over the Korean Peninsula also decreased by approximately more than 10% compared with that of the Pre-COVID period. All of the five chemical components decreased but no particular changes were found in their fractions occupied during the COVID period. However, over the Lock-down period (2020-March), the sulfate fraction decreased in Seoul, mostly reflecting the recent Chinese trends of aerosol characteristics, whereas the nitrate fraction considerably decreased in Busan, which was attributable to the local emission changes and their variabilities in Busan. Other meteorological characteristics such as higher frequencies of easterly winds in the Busan area during the COVID period were also discussed in comparison with those in the Seoul area.

Key words : COVID-19, Changes in $PM_{2.5}$ concentration, Lock-down effects

1. 서 론

미세먼지(Particulate Matter, PM)는 대기 중 고체, 액체상 혼합물로, 오염원에서 직접적으로 배출되는 1차 입자와, 가스상 전구물질의 대기 중 화학반응으로 생성되는 2차 입자로 구성된다(WHO, 2013). 초미세먼지($PM_{2.5}$)는 직경이 2.5 ㎛ 이하 입자로서 PM_{10}에 비해 인체 건강에 더 유해한 물질로 알려져 있어서 (Feng et al., 2016), 최근 WHO에서 권고하는 $PM_{2.5}$ 농도 기준은 연간 평균 5 ㎍/㎥, 24시간 평균 15 ㎍/㎥

Received 4 December, 2022; **Revised** 13 March, 2023;
Accepted 15 March, 2023
***Corresponding author** : Cheol-Hee Kim, Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-3687
E-mail : chkim2@pusan.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Averages of $PM_{2.5}$ mass, chemical component concentrations, and meteorological variables observed in March for both Pre-COVID and COVID periods in two areas: Busan and Seoul, respectively

(Unit : ㎍/㎥)

		$PM_{2.5}$	Amm.	Nit.	Sul.	OC	EC	T.	RH	W.S.
Seoul										
	Pre-COVID (March)	50.3	8.1	16.2	6.8	5.9	1.5	7.1	51.3	2.1
	COVID (March)	24.4	3.2	7.0	2.3	3.5	0.8	7.7	46.3	2.5
Busan										
	Pre-COVID (March)	32.0	4.0	6.6	5.3	6.4	1.4	10.5	54.1	3.6
	COVID (March)	16.4	1.7	2.4	2.3	3.3	0.9	10.4	56.9	3.5

로 강화되었다(WHO, 2021). 그럼에도 불구하고 우리나라에서는 최근 $PM_{2.5}$ 농도가 15 ㎍/㎥ 이상인 날이 자주 발생하였다.

최근 COVID-19 발생 이후 사회적 거리두기 정책이 여러 국가에서 시행되었다. 이에 따른 도심 지역의 활동 및 오염원에서의 배출량이 감소하여 전 세계 대도시를 포함한 다수의 지역에서 $PM_{2.5}$ 농도가 감소한 것으로 보고되었다(Chauhan et al., 2020). 동북아시아 국가, 특히 중국의 COVID-19 대응을 위한 방역 정책의 영향에 따라 $PM_{2.5}$ 질량 농도 및 화학성분 농도 변화에 관련한 연구가 중국 자체 내에서도 많이 진행되었다(Chen et al., 2020; Kumari et al. 2020; Xu et al. 2020; Badia et al. 2021). Xu et al.(2020)은 COVID-19가 처음 발생한 중국 중부에서 2020년 $PM_{2.5}$ 46.5%, PM_{10} 48.9%, SO_2 52.5%, CO 36.2%, NO_2 52.8% 감소한 것으로 보고하였으며, 인도의 경우, COVID-19 발생 이후 강력한 봉쇄정책(Lock down)에 따라 인도 5개 도시에서 $PM_{2.5}$ 농도가 최대 54%까지 감소한 것으로 분석되었다(Kumari et al., 2020).

국내에서도 COVID-19 발생 전후 대기오염물질 농도 변화에 관련한 연구가 진행되었다. Seo et al. (2020)은 서울과 대구를 중심으로 2020년과 지난 3년간 대기질을 비교한 결과, 서울과 대구에서 $PM_{2.5}$, PM_{10}, CO, NO_2의 현저한 농도 감소가 진행되었음을 확인하였으며, 그 예로 $PM_{2.5}$는 2017~2019년과 비교하여 2020년 3월 서울과 대구에서 각각 36%, 30% 감소된 것으로 분석되었다. Kwak et al.(2021) 연구에서도 국내 7대 도시(서울, 부산, 인천, 대전, 대구, 광주, 울산) 모두 사회적 거리두기 기간에 $PM_{2.5}$ 농도가 최대 25% 감소한 것으로 보고되었다.

이상의 국내외 선행 연구들은 COVID-19 발생 전후 평균 대기오염도와 미세먼지의 질량 농도만을 대상으로 분석하였으며, 국내, 특히 부산지역의 경우 COVID-19 발발 이후 상당한 시간이 지났음에도, 질량 및 화학성분까지 포함한 $PM_{2.5}$의 종합적 영향분석 연구는 찾아보기 힘들다. 부산지역은 대기오염물질 배출 특성과 국지기상 조건이 수도권에 비해 상당부분 상이하므로, 종합적인 COVID-19 영향 분석 연구, 특히 서울과 비교한 부산지역의 영향연구는 부산지역 $PM_{2.5}$의 저감 정책 측면에서도 중요한 시사점을 도출할 수 있으므로 매우 중요하게 수행되어야 할 연구 주제로 판단된다.

본 연구에서는 COVID-19 기간을 2020년 (1년)으로 한정하고 (본 연구에서는 COVID 기간으로 명명), COVID-19 이전인 2018 - 2019년 (2년간) (본 연구에서는 Pre-COVID 기간으로 명명)과 비교하여 그 변화를 분석하였고, 이를 서울지역과 비교하였다. 특히 COVID 기간의 변화된 $PM_{2.5}$ 질량 농도 뿐만 아니라 그 화학성분의 변화까지 종합적으로 추적하였고, 아울러 위성자료에 나타난 한반도 상공의 AOD 변화의 공간분포를 도출하여 이를 지상 측정자료와 비교하였고, 이 결과를 기상요소와 연관시켜 COVID-19가 부산지역 $PM_{2.5}$에 미치는 영향을 심도있게 파악하였다.

2. 자료 및 연구방법

본 연구에서는 부산과 서울지역의 $PM_{2.5}$ 농도, $PM_{2.5}$ 화학성분 (ammonium, nitrate, sulfate, OC, EC) 농도 및 기상요소 (기온, 습도, 풍속, 강수량 등) 시간 평균 자료를 사용하였다. $PM_{2.5}$ 농도 자료는 2018년 - 2020년 환경부에서 운영하는 Air Quality Monitoring System (AQMS)의 도시대기 측정망 자료이며, $PM_{2.5}$

Table 2. Air pollutant emissions from Clean Air Policy Support System(CAPSS) in Seoul and Busan areas in 2017, 2018 and 2019

(Unit : ton)

		pri. $PM_{2.5}$	SO_x	NO_x	VOCs	NH_3
Seoul	2017	2,926	1,493	77,096	66,948	3,804
	2018	3,973	1,095	88,319	72,393	3,469
	2019	2,732	998	71,009	63,690	3,547
Busan	2017	2,617	9,526	51,870	42,945	1,686
	2018	2,644	7,897	49,951	42,430	1,620
	2019	2,523	9,113	48,553	35,719	1,603

화학성분은 동일 기간 서울지역의 환경부 집중측정소(불광동) 자료를, 부산지역은 부산시 보건환경연구원에서 제공하는 지상 측정자료를 이용하였다. AQMS 자료는 2020년 12월 기준 부산 27개 지점, 서울 25개 지점에서 측정되며, 화학성분 자료는 부산은 3개 지점(연산동, 장림동, 부산 신항)의 자료를, 서울은 불광동 지점의 측정 자료를 이용하였다. 기상 자료는 서울과 부산 모두 Automated Synoptic Observing System (ASOS) 관측 자료를 이용하였고, AQMS 인접지점의 Automatic Weather Station (AWS)자료 참고하였다. ASOS는 부산(159)지점 서울(108)지점에서 관측되는 기상요소 자료이다(Fig. 1).

본 연구에서는 또한 위성자료를 이용하여 COVID-19 전후의 에어로졸 광학깊이(Aerosol Optical Depth, AOD) 특성을 분석하였다. 본 연구에 사용된 AOD 위성자료는 미 항공 우주국 National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)에서 제공하는 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) v2 재분석자료이다. 사용된 위성자료의 공간 해상도는 0.5° × 0.625°로서, 본 연구의 영역과 시기에 맞게 2018년 - 2020년 월별 평균 자료를 위도 24° - 51°, 경도 109° - 140°의 동아시아 영역에 대하여 total aerosol extinction AOD [550 nm] 자료를 도출하였고, 도출된 AOD 자료를 지상 측정된 $PM_{2.5}$ 농도 변화와 연관시켜 분석하였다. 아울러 중국의 Lock-down 기간 장거리 수송 특성을 서울과 부산을 지역별로 파악하기 위하여 미국 해양기상청 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에서 제공하는 HYSPLIT 모델로부터 도출되는 바람의 역궤적을 분석하였다.

지상 측정된 $PM_{2.5}$의 질량 및 성분자료를 분석하는 과정에서, 결과의 신뢰도를 높이기 위해 자료의 3/4 취득률(시간별 일별 75%) 이상의 자료만을 선별하여 사용하였고, 강수에 의한 침적 효과와 자연 발생한 황사 사례를 배제하기 위하여 강수나 황사가 보고된 날은 본 연구에서 제외하였다. 이상의 여러 사용된 자료들, 예를 들어 $PM_{2.5}$ 질량과 화학성분 및 각종 기상요소의 측정된 시간평균 자료들은 Interactive Data Language (IDL) program으로 일, 월, 연평균자료를 계산하였고 시간 및 공간 분포를 통해 그 특성을 파악하였다.

본 연구에서는 먼저 Pre-COVID 기간 (2018년-2019년)과 COVID 기간 (2020년)을 각각 정의하여 부산과 서울의 지역별 $PM_{2.5}$ 질량과 화학성분의 연·월평균 측정자료에 나타난 농도 수준과 특성을 비교·분석하는 데 주력하였다. 또한 COVID-19 발생 초기인 2020년 3월의 경우, 중국 COVID 최초 발생지인 우한시를 포함한 중국 대도시들의 Lock-down 기간으로서 중국에서의 매우 급격한 배출량 저감이 발생한 특별한 시기이므로, 본 연구에서는 Lock-down 기간인 2020년 3월을 특별 사례로 선정하여 그 변화 특성을 자세히 살펴보았다. Lock-down 기간의 종관기상 특성과 장거리 수송 조건을 분석하여 우리나라의 $PM_{2.5}$ 저감 농도 특성과의 연관성을 살펴보기 위하여 Lock-down 기간의 모든 날에 대하여 HYSPLIT 모델의 역궤적 자료를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. COVID 기간의 연평균, 월평균 농도 변화

COVID-19 발생 전, 후의 두 기간 (Pre-COVID와 COVID 기간) 부산과 서울지역의 $PM_{2.5}$ 농도와 화학성분

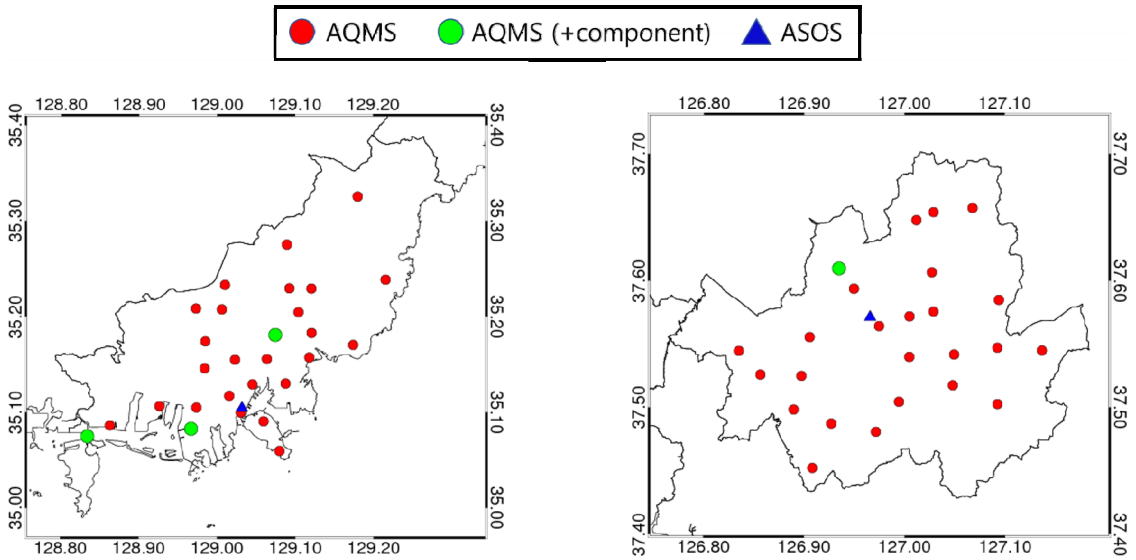


Fig. 1. Locations of the air pollution monitoring stations and meteorological observation sites in Busan (left) and Seoul (right).

농도의 장기 평균값을 먼저 살펴보았다. Fig. 2에 두 기간의 부산과 서울지역 CO와 $PM_{2.5}$ 질량 및 주요 화학성분인 황산염, 질산염, 암모늄, OC, EC의 연평균 농도를 나타내었고, 구체적인 수치는 부록에 제시하였다. Fig. 2에서 알 수 있듯이, 두 지역 모두 예상대로 Pre-COVID 기간에 비해 COVID 기간의 $PM_{2.5}$와 CO 농도 수준이 급격히 감소된 것을 확인할 수 있으며, 그 감소량은 서울지역의 경우 질량 농도 기준 $PM_{2.5}$ 약 16%, CO 약 10% 감소하였으며, 부산에서는 $PM_{2.5}$ 약 29%, CO 농도 약 5% 감소하였음을 확인하였다. 1차 대기오염물질의 배출량 지표인 CO의 감소량보다 $PM_{2.5}$의 농도가 더 크게 감소한 것은 두 지역 모두 2차 생성 $PM_{2.5}$의 중요함을 잘 시사해 준다.

각 지역별 화학성분 농도 구성 비율은 서울지역의 경우 Pre-COVID 기간 2년 평균 농도는 nitrate (33%) > OC (22%) > sulfate (21%) > ammonium (18%) > EC (6%) 순으로 나타났으며, COVID 기간의 연평균 농도는 nitrate (34%) > OC (22%) > sulfate (20%) > ammonium (19%) > EC (5%) 순으로서, 서울지역은 두 기간 모두 nitrate와 OC성분이 전체의 50% 이상을 차지하고 있었으며, COVID 기간의 화학성분 비율 변화는 크지 않은 것으로 조사되었다. 마찬가지로 부산지역에서도 Pre-COVID 기간 2년 평균 OC (30%) > sulfate (26%) > nitrate (21%) > ammonium (15%) > EC (8%) 순으로 나타났으며, COVID 기간 연평균은 OC (29%) > sulfate (24%) > nitrate (23%) > ammonium (16%) > EC (8%) 순으로서, 두 기간 모두 부산지역에서는 OC와 sulfate가 전체의 50% 이상을 차지하는 주요성분으로 분석되었으며, COVID 기간 (전체 평균)의 성분별 구성 비율 또한 서울과 마찬가지로 크게 변하지 않은 것으로 조사되었다. 따라서 $PM_{2.5}$ 질량 농도가 COVID 기간에 크게 감소된 것과는 달리 화학성분 농도의 비율 순위 변화는 없는 것으로 나타났다. 즉, 서울과 부산 두 지역 모두 COVID에 의한 화학성분 농도 변화는 $PM_{2.5}$ 질량농도 감소분에 대부분 선형적으로 비례하여 감소된 것으로서 배출 성분이나 2차 생성과정에서의 대기화학적 변화는 크지 않은 것으로 추정되었다(Fig. 2). 각 화학성분 농도의 표준편차 또한 감소한 것으로 나타났는데, 이는 COVID-19 기간 사회적 거리두기로 인한 배출량이 감소함에 따라 $PM_{2.5}$ 고농도 횟수가 급감한 것에 기인한 것으로 해석하였다.

이상의 연평균 농도 변화는 장기간의 평균이므로 월별 변화 경향을 살펴보기 위하여 두 기간의 각 월평균 농도 변화를 살펴보았다. Fig. 3은 두 기간의 부산과 서울의 $PM_{2.5}$ 질량 및 화학성분 농도의 월평균 차, 즉 Pre-COVID 기간과 COVID 기간의 두 월평균 농도 차

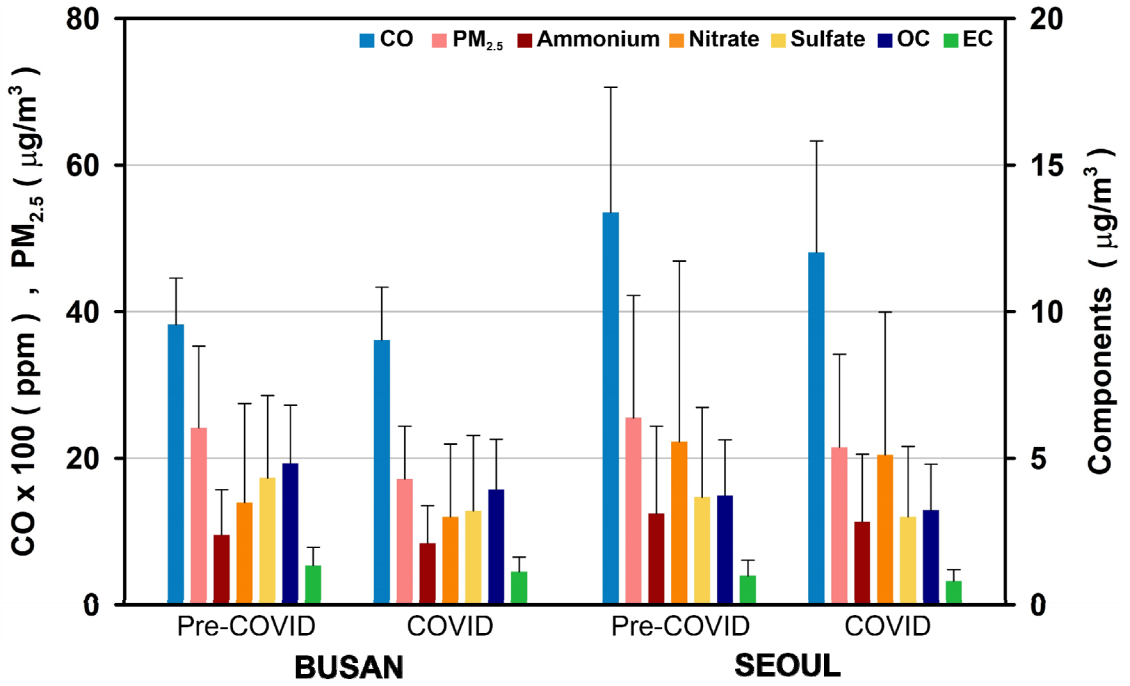


Fig. 2. Concentrations of $PM_{2.5}$ with chemical components and CO during Pre-COVID (2018-2019) and COVID (2020) periods.

를 나타낸 그림이다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 두 지역 모두 Pre-COVID 기간 대비 COVID 기간 대부분의 월별 $PM_{2.5}$ 질량 및 화학성분의 감소 경향을 확인할 수 있다. 특히 중국 Lock-down이 있었던 3월의 경우 $PM_{2.5}$ 질량과 성분 농도 모두 눈에 띄게 큰 폭으로 감소한 것을 확인하였다. 또한 4 - 7월에는 서울과 달리 부산지역에서 sulfate의 농도가 특히 감소하였는데, 이는 부산지역의 배출 특성 (Kim et al., 2020)과 부산지역에 적용된 선박 배출저감 정책, 계절관리제, 총량제 등 국내 시행된 다양한 정책에서도 기인한 것으로 추정된다. 특히 선박 배출 저감정책의 하나로서 COVID 기간의 부산지역 국제해사기구(International Maritime Organization; IMO) 2020 정책에 따라 시행된 세계 모든 해역에서 선박용 연료의 황 함유율 감소정책에 의한 SO_2 선박 배출량 감소 등 IMO 정책 시행 또한 상당히 중요하게 작용한 것으로 본 연구에서는 해석하였다 (3.2절 참고). 일반적으로 부산지역, 특히 여름철 타 지역 대비 상대적으로 높은 SO_2 농도와 화학성분 중에서 상대적으로 높은 sulfate 비율은 COVID 기간에는 자체 배출량 감소로 인해 질량 농도 감소에 비례하여 낮아진 결과와 더불어 IMO 정책에 의한 황의 선박 배출량 감소가 여름철에 특히 부산의 sulfate의 감소량에 상대적으로 크게 기여한 것으로 해석된다. 반면 여름철 중에서 8월의 경우 그 이전 두 달 (6월과 7월)과는 달리 COVID 기간임에도 불구하고 월평균 농도가 Pre-COVID 기간 대비 오히려 소폭 증가한 것이 확인되는데, 이는 여름철의 경우 COVID 기간의 기상 효과 등 다른 기여 요인의 계절적 특성이 우세하게 작용한 것으로 본 연구에서는 추정하였으나 더 구체적인 원인을 규명하기 위한 추가적인 연구가 필요해 보인다.

Fig. 4는 위성자료로부터 동북아시아 영역에서 도출한 Pre-COVID 및 COVID 두 기간의 AOD의 월평균 차이를 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 COVID 기간에는 이전 2년 기간인 Pre-COVID 기간에 비해 우리나라 연평균 AOD는 평균적으로 약 10% 감소한 것으로 계산되었으나 각 월별 차이는 다양하게 나타났다. 특히 2020년 3월 (Lock-down 기간)에 한반도와 한반도의 서쪽 해상에서 AOD가 매우

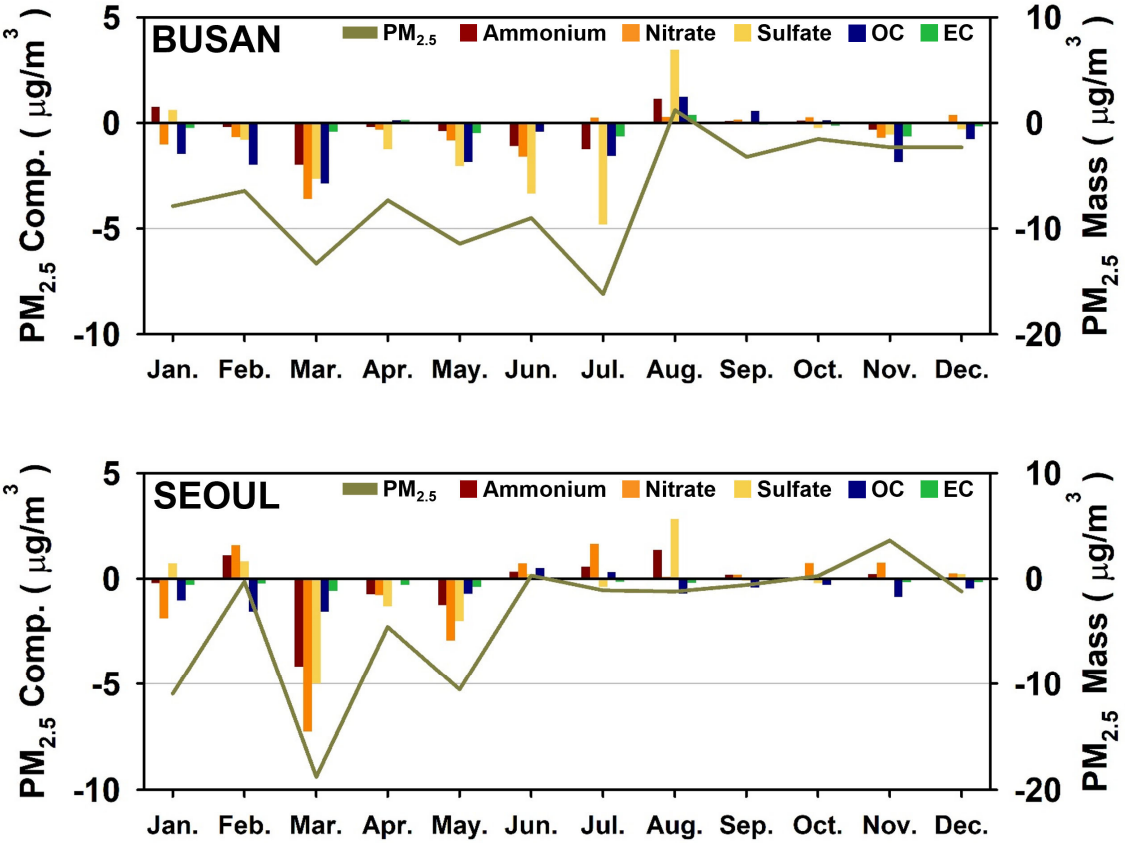


Fig. 3. Differences in monthly means of $PM_{2.5}$ and chemical components between Pre-COVID and COVID periods.

급감한 것을 확인할 수 있고(Fig. 4), 그 최대 감소량은 550 nm 파장 기준 0.3 – 0.4 정도로 나타났다. 감소된 AOD가 한반도 서해상 전역에 분포되어 있는 것을 감안하면, 풍하지역에서 중국 Lock-down 영향이 이동하여 나타난 것으로 유추할 수 있다. 이러한 Lock-down 기간의 감소된 대기오염물질의 장거리 이동 결과는 Fig. 3의 지상 측정망 자료에서도 확인되는데, 동일 기간 두 지역, 특히 서울지역에서 지상 측정된 $PM_{2.5}$ 월평균 농도 차이가 다른 계절에 비해 확연히 감소하였다는 점에서 2020년 3월의 경우 외부 요인인 중국 Lock-down 효과의 장거리 수송 영향이 우세하였음을 위성자료를 통해 간접적으로 확인할 수 있었으며, 본 연구에서는 이와 병행하여 국내에서 시행된 계절관리정책, 총량제 등 국내 요인 또한 적지 않은 것으로 추정하여 추가적인 분석을 수행하였다.

국내 요인으로서 COVID 기간 미세먼지 저감정책에 의한 농도 감소 요인을 살펴보기 위하여, 2020년 3월 미세먼지 계절관리정책 효과분석을 골자로 하는 환경부 보도자료(KMOE, 2020)를 참고하였다. 이 자료에 의하면 Lock-down 기간이 포함된 2020년 2월 – 3월의 국내 $PM_{2.5}$ 농도는 전년 동기 (2019.02-03) 대비 13.6 ㎍/㎥ 더 개선된 것으로 분석하였고, 농도 개선에 기여한 요인과 기여율(%)은 국외 요인 21%, 기상효과 43%, 국내 정책효과 18%, 기타 18%로 추정하였다 (KMOE, 2020). 이 결과는 국내보다는 국외 요인을 소폭 더 크게 추정한 것을 알 수 있었다. 한편, 항구 도시인 부산의 경우 IMO 2020 정책 시행에 의한 선박 연료유의 황 함유량 저감 정책은 부산지역의 주요 2차 생성 $PM_{2.5}$ 전구물질인 SO_2의 농도가 크게 감소시킬 수 있으며, 실제 분석 기간 $PM_{2.5}$ 실측 농도 또한 감소한 것으로 나타났다(Park, 2021). 그러나 월평균 농도(Fig. 3) 시계열에서는 Lock-down 기간인 2020년 3월에 가

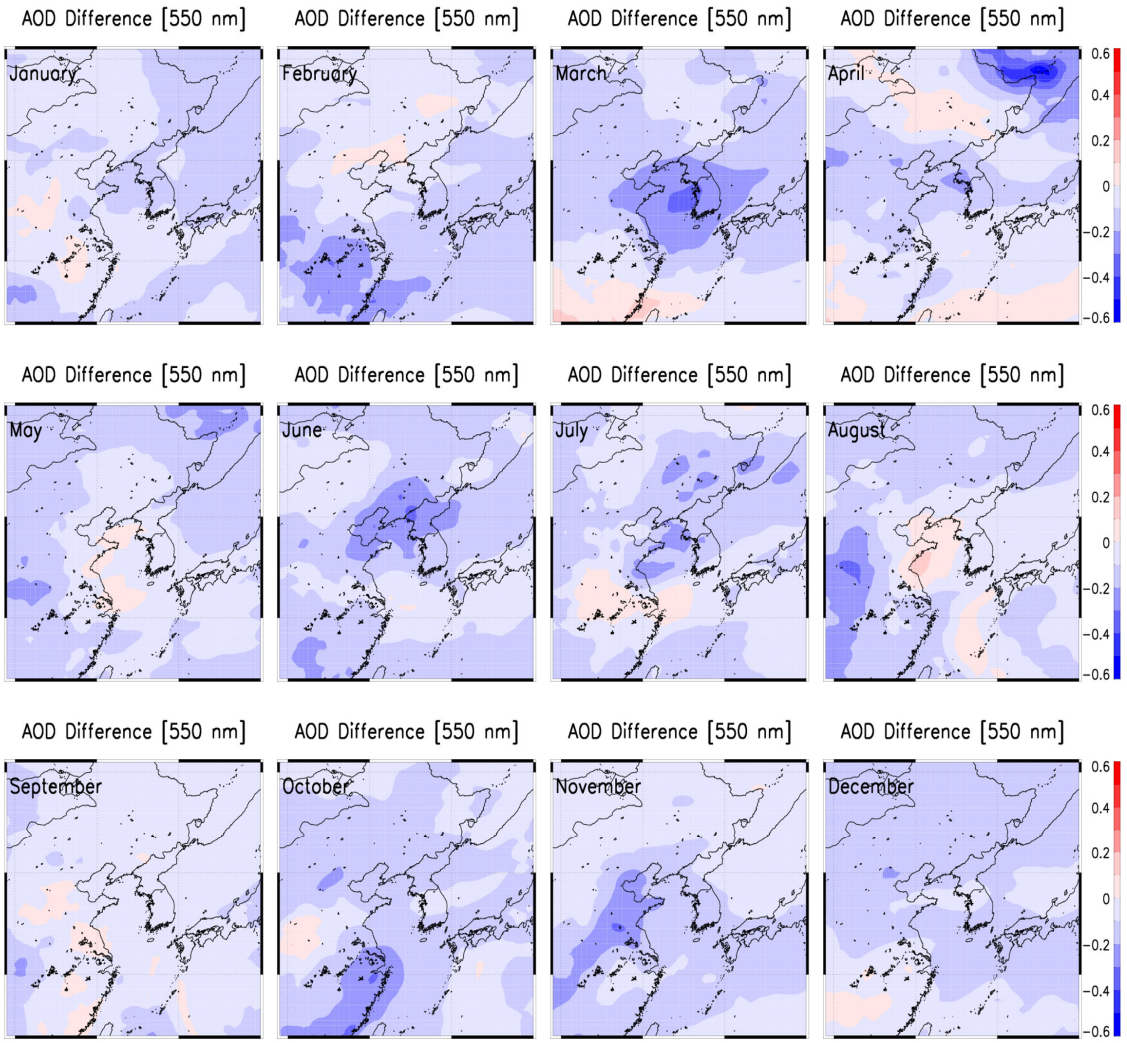


Fig. 4. Differences in satellite-observed monthly average Aerosol Optical Depth(AOD)s between Pre-COVID and COVID periods.

장 현저하게 감소하였으며 이는 국내 요인으로서는 계절관리제, 총량제, IMO 2020 정책이 가장 중요한 정책 요소로 추론하였다.

Fig. 4에서 또한 주목할 만한 사실은 Fig. 3에서 나타났던 8월 농도의 소폭 증가 현상이다. 본 연구에서는 여러 원인 중에서 특히 COVID 기간인 2020년 8월에 있었던 일본 니시노시마 화산 폭발의 영향이 COVID 기간의 sulfate 농도를 일부 상승시킨 것으로 분석하였다(Ma et al., 2022). Fig. 4에서 나타난 COVID 기간 중 8월의 중국 산동반도 근처의 뚜렷한 AOD 증가 현상은 본 연구에서는 뚜렷한 근거를 찾지 못하였으나, 추가적인 원인 규명이 필요해 보인다. 그 외, COVID 기간 9월 이후에는 우리나라 혹은 한반도 근처의 $PM_{2.5}$ 및 화학성분 농도 변화에 있어서 주목할 만한 차이는 없는 것으로 분석하였다(Fig. 3 and Fig. 4).

이상에서 COVID 기간 측정 농도 감소요인으로 국내·외 요인을 모두 정성적으로 기술하였으나, 구체적이고 정량적인 기여도 분석은 모델링 연구 등 추가적인 연

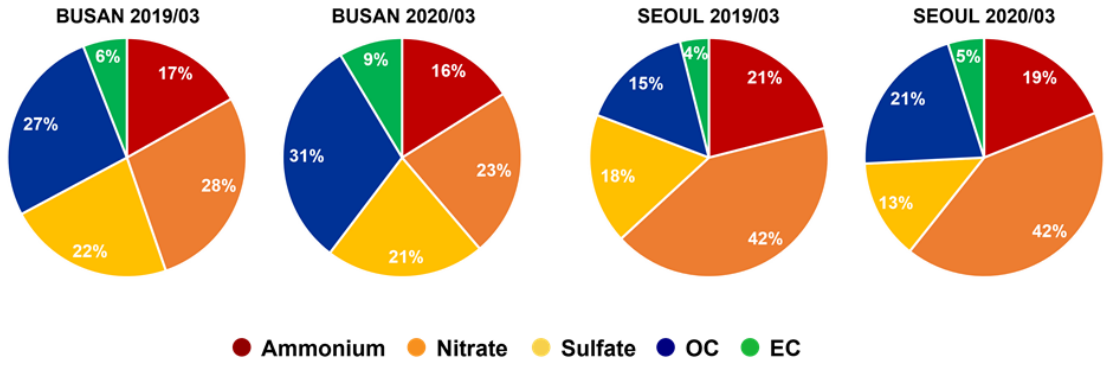


Fig. 5. Pie charts of $PM_{2.5}$ chemical components(%) observed in March for both Pre-COVID and Lock-down periods in twc areas, respectively.

구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 분석 기간을 Lock-down 기간인 2020년 3월에 한정해 보면, COVID 기간의 위성자료에 나타난 동북아시아 영역의 AOD 분포와 함께, 2020년 3월 당시의 측정자료 결과로부터 서울과 부산 두 지역의 COVID에 의한 농도 감소 경향이 상대적으로 다른 계절(월)에 비해 월등히 우세하였다는 점에서 본 연구에서는 농도 감소의 주요 원인을 외부 요인, 특히 중국의 Lock-down에 의한 배출량 감소 영향이 가장 우세한 것으로 해석하였으며, 이에 따라 Lock-down 기간에 한정하여 위성 자료 등을 토대로 COVID 영향을 추가 분석하였다.

3.2. Lock-down 기간 (2020년 3월) COVID 영향 분석

앞 절에서 살펴본 Lock-down 기간의 급격한 농도 변화를 자세히 살펴보기 위하여 2020년 3월 전 기간의 $PM_{2.5}$ 질량 및 화학성분의 일별 농도 변화와 기상요소를 Pre-COVID 기간의 3월과 비교하였다. Table 1에 Pre-COVID 3월과 COVID 3월 (Lock-down 기간)의 부산과 서울지역 $PM_{2.5}$ 질량 및 주요 화학성분인 황산염, 질산염, 암모늄, OC, EC의 월평균 농도 및 기상 요소들 (기온, 상대습도, 풍속)을 요약하였고, Fig. 5에 동일 기간 두 지역의 3월 평균 화학성분 구성 비율을 나타내었다. 먼저 지역별 두 기간 3월 측정된 질량농도 변화는 Table 1에 제시하였듯이 서울지역은 Pre-COVID 기간 $PM_{2.5}$의 3월 평균 50.3 ㎍/㎥, 일평균 최대 135.0 ㎍/㎥이었고, Lock-down 기간 2020년 3월 평균 24.4 ㎍/㎥, 일평균 최대 45.1 ㎍/㎥로서 월평균 50.0%, 일평균 최대값 66.6% 감소한 것으로 나타났다. 부산지역의 경우 Pre-COVID 기간 $PM_{2.5}$의 3월 평균 32.0 ㎍/㎥, 일평균 최대 65.6 ㎍/㎥에서, COVID 기간 3월 평균 16.4 ㎍/㎥, 일평균 최대 30.3 ㎍/㎥로서 월평균 45.7%, 일평균 최대값 53.8% 감소하였다(Table 1). 따라서 두 지역을 단순 비교해 보면 부산보다는 서울에서 월평균과 일 최대치의 감소가 더 현저하게 나타난 것을 알 수 있으며, 이는 서울의 경우 봄철 중국으로부터의 대기오염물질의 장거리 이동 영향이 부산지역에 비해 상대적으로 더 빈번한 풍계와 지리적 특성 때문으로 해석된다(Kim et al., 2020).

각 화학성분 농도 또한 감소 경향을 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과 화학성분 비율은 서울지역의 경우 Pre-COVID 3월에 nitrate (42%) > ammonium (21%) > sulfate (18%) > OC (15%) > EC (4%) 순으로 나타났으며. Lock-down 3월에는 nitrate (42%) > OC (21%) > ammonium (19%) > sulfate (13%) > EC (5%) 순으로 나타났다. 이 비율로부터 Lock-down 3월에는 3.1절에 기술한 Pre-COVID 3월 대비 소폭 다르게 나타난 것을 알 수 있는데, OC의 비중이 늘고, sulfate의 비율이 낮아진 것을 확인할 수 있다 (Fig. 5 and Table 1).

이상의 결과는 최근 중국의 $PM_{2.5}$ 화학성분의 변화와 국내 화학성분 비율과 모두 연관되어 있음을 선행연구를 통해 유추할 수 있다. 예를 들어, 장거리 수송이 우세할 경우, 서해 백령도 측정소에서의 측정되는 외부유입 $PM_{2.5}$ 성분 중에서 최근 sulfate 성분이 줄고 nitrate 성분이 크게 증가하였음을 보고한 바 있다(Jo

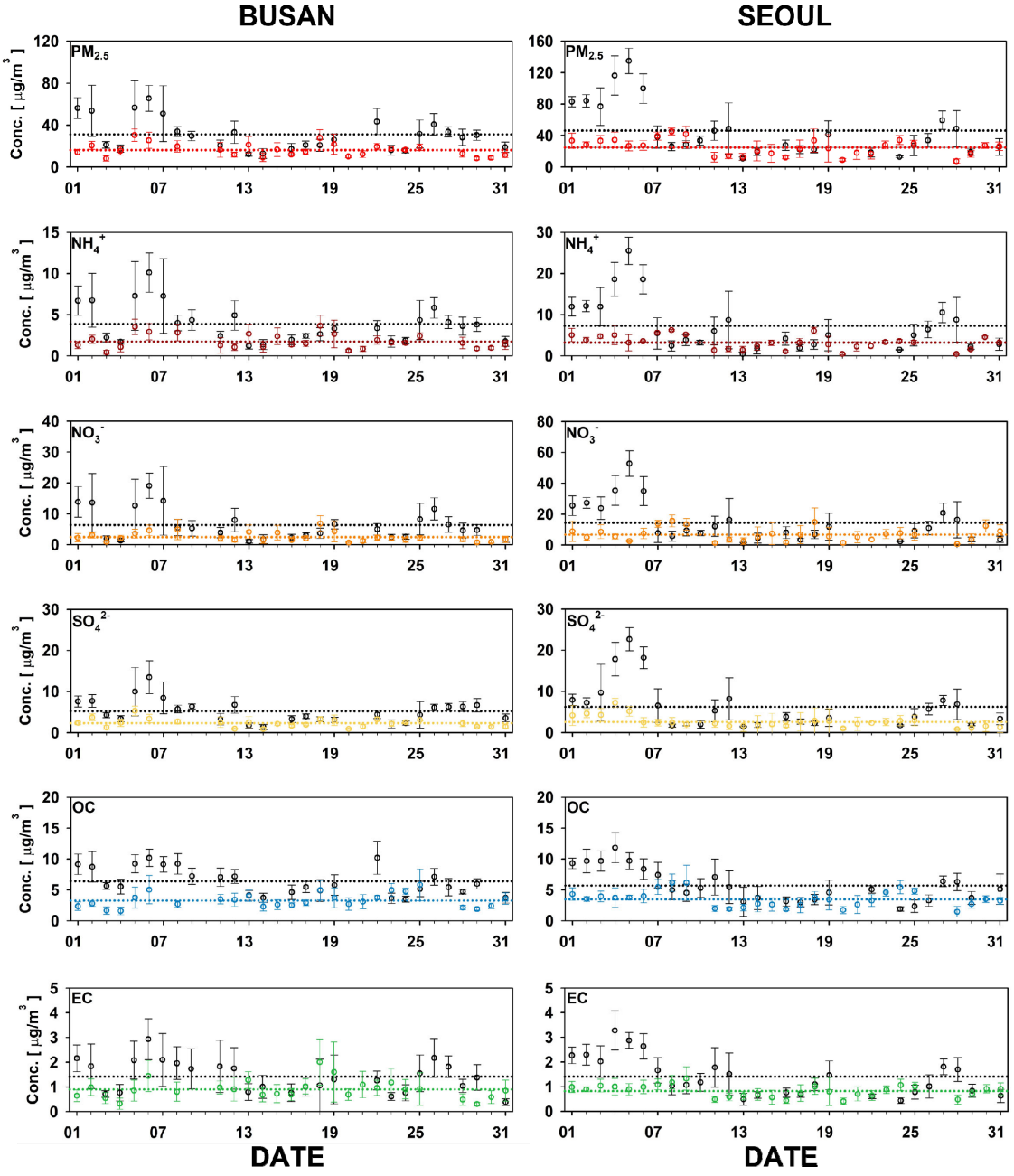


Fig. 6. Daily averages of $PM_{2.5}$ and components observed in March during COVID (color) and Pre-COVID (black) periods, and monthly averages (dot line) in March.

et al., 2020). 중국 내부에서도 유사한 결과들이 보고되었는데, 베이징에서는 sulfate가 2013년까지 소폭 증가 후 최근까지 감소하였고, nitrate는 과거 10년간 지속적으로 증가하였다(Lang et al., 2017; Wang et

al., 2020). 다만 OC의 경우 지역에 따라 편차가 있으며 북경 지역보다는 Yangtz River Delta를 포함한 중국 중부 혹은 남중국에서 지역에 따라 감소추세를 자주 보이기도 하였다(Wu et al., 2020). 따라서 COVID 기간의 중국으로부터의 장거리 이동량 감소는 결국 중국 대도시에서 우세했던 성분의 질량 감소 (예를 들어 북경 nitrate 등)를 의미한다고 볼 수 있다. 반면, 외부 유입이 적은 경우 국내의 대부분의 분석 결과들은 nitrate와 OC의 비율이 높음을 보고한 연구가 많다. 특히 OC의 증가는 KORUS-AQ 기간에 보고되었듯이 수도권에서의 다량의 자체 배출량과 연관이 더 많은 것으로 보고하였다(NIER, 2020). 결론적으로 2020년 3월 Lock-down 기간에는 중국에서 우세한 성분의 영향이 줄고 국내 성분 비율이 상대적으로 더 강하게 반영된 결과로 추정되나, 보다 자세한 변화 경향 조사와 더 심도있는 분석 연구가 필요해 보인다.

부산의 경우 서울지역과 상이한 결과를 보였다. Pre-COVID 3월에는 nitrate (28%) ≳ OC (27%) ≻ sulfate (22%) ≻ ammonium (17%) ≻ EC (6%) 순으로 나타났으며. Lock-down 3월에는 OC (31%) ≻ nitrate (23%) ≳ sulfate (21%) ≻ ammonium (16%) ≻ EC (9%) 순으로 나타나, 서울과 달리 Lock-down 3월 부산지역에는 nitrate 성분 비율이 줄고 OC 성분 비율이 늘어난 것이 특징이었다 (Fig. 5 and Table 1). 따라서 본 연구에서 사용된 자료를 기반으로 분석해 볼 때, Lock-down 3월 중 부산지역의 가장 큰 특징으로서는 nitrate 성분의 급감으로 요약할 수 있었다. 이러한 결과는 Kim et al.(2020)의 COVID 기간 이전인 Pre-COVID 기간의 부산지역 화학성분 분석 결과에서 알 수 있듯이, 부산지역은 서울에 비해 상대적으로 sulfate 성분이 우세하고 nitrate 비율이 높지 않으므로, 본 연구의 분석 기간인 COVID기간에는 서울과 마찬가지로 외부 요인이 줄어들면서 부산 자체의 화학성분 특성이 상대적으로 더 반영된 결과로 판단하였다. 다만 서울의 경우 Lock-down 기간 (3월)의 nitrate 농도가 sulfate와는 달리 부산보다 상대적으로 더 많이 감소한 것은 상대적으로 외부로부터의 장거리 수송 영향이 부산보다 더 유리한 지리적 특성에 기인하게 되며, 따라서 2019년까지 높아졌던 중국의 nitrate 성분이 2020년 3월 COVID에 의해 급격히 감소된 현상과 무관하지 않은 것으로 해석된다. 부산의 경우 중국으로부터의 장거리 수송 영향이 서울에 비해 상대적으로 적어서 분석기간 자체적인 배출량 감소와 상대적으로 더 연관성이 높을 것으로 판단된다. 정확한 기여도 분석은 중국 배출량 감소 등을 모두 고려한 3차원 모델링 기반으로 Brute-Force Method (BFM), Particulate Source Apportionment Technology (PSAT), High-order Decoupled Direct Method (HDDM) 등 다양한 기법들을 이용하여 보다 정량적인 기여율 결과를 도출할 수 있을 것이다.

Fig. 6은 부산과 서울지역의 Pre-COVID 기간 3월과 Lock-down 기간 3월의 일 평균 $PM_{2.5}$, ammonium, nitrate, sulfate, OC, EC 농도의 시계열을 나타낸 그림이다. 그림에서 검은색은 Pre-COVID (2019년 3월)을, 유색은 COVID (2020년 3월)의 값을, 점선은 3월 평균값을 나타낸다. 여기서도 동일하게 두 지역의 COVID 기간 월평균 농도가 Pre-COVID 기간의 월평균에 비해 뚜렷하게 감소하였음을 알 수 있다. Pre-COVID 기간에는 3월 7일까지 서울과 부산 모두 $PM_{2.5}$ 고농도 사례를 보였고 3월 25일 - 26일 2차 피크를 보이는 상당한 일평균 편차를 보였으나, Lock-down 기간에는 서울의 경우 3월 7 - 9일 $PM_{2.5}$와 nitrate 성분이, 그리고 부산의 경우 3월 5일 $PM_{2.5}$와 ammonium 성분이 3월 중 가장 높은 농도로 분석되었고, 그 농도 수준은 Pre-COVID 기간의 3월 평균 농도에 매우 근접하였으며, 그 외의 사례들은 COVID 기간 내내 대부분 일정 수준 이하의 낮은 농도를 유지하였음을 확인할 수 있다(Fig. 6).

Fig. 7은 동일 기간 일 평균 기온, 상대습도, 풍속, 일 최다 풍향을 나타낸 그림이다. 그림에 제시한 기상변수의 특징은 풍향을 제외한 일 평균 기온, 상대습도, 풍속은 월평균 값과 차이가 크지 않았고 Pre-COVID 3월과도 유사함을 알 수 있다. 다만 부산지역의 일 최다 풍향이 COVID 기간에는 북동 및 동풍 계열의 발생 빈도가 Pre-COVID 기간에 비해 특히 많은 것으로 조사되었다(Fig. 7). 따라서, 부산지역에서는 중국으로부터의 대기오염물질의 유입이 서울에 비하여 상대적으로 적고, 동남 해양으로부터 유입되는 청정한 대기의 영향을 자주 받았음을 의미하므로, 결국 부산의 $PM_{2.5}$ 농도 감소는 서울과 비교하여 볼 때, 중국의 장거리 이동량 감소 영향보다는 동풍 계열 등의 국지기상 요인에 의한 농도 감소 경향이 서울보다 상대적으로 더 우세한 것으로 해석하였다.

COVID 기간 기상 특성을 더 자세히 분석하기 위하여 기상요소-$PM_{2.5}$와의 연관성을 부산과 서울 두 지역에 대

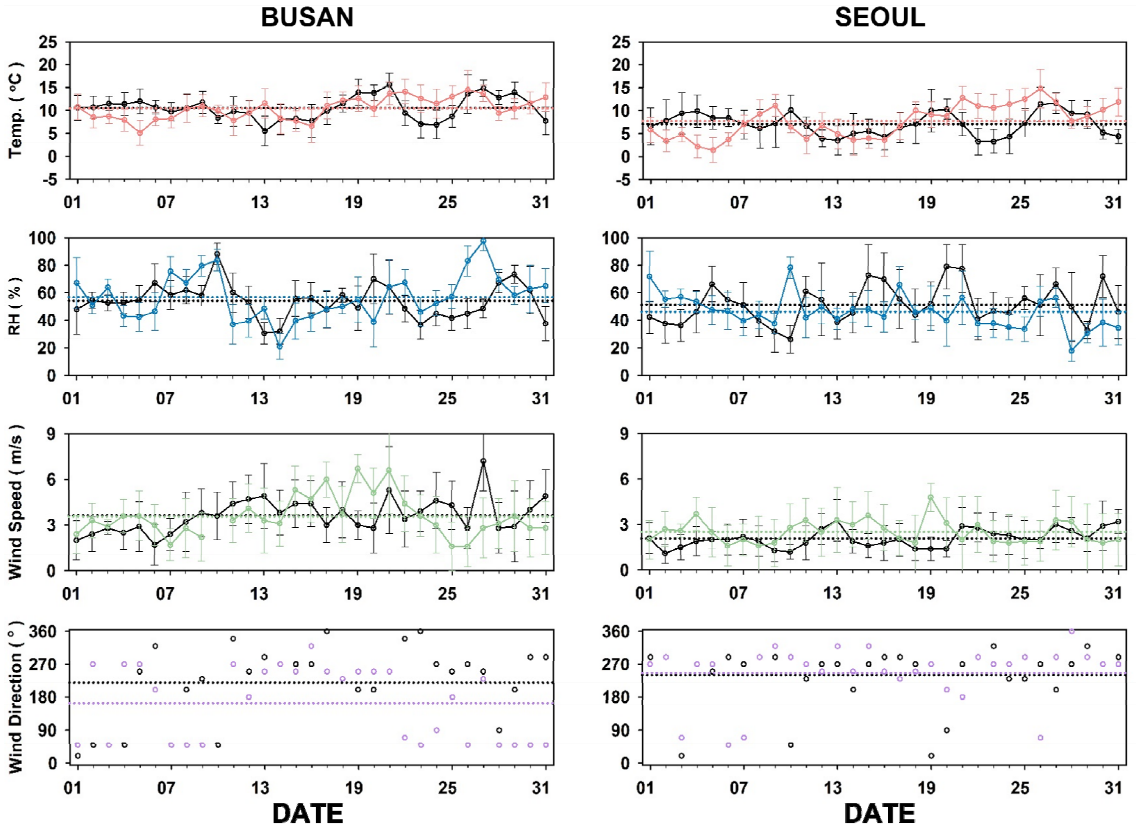


Fig. 7. Daily averages of meteorological variables observed during Pre-COVID (black solid lines) in 2019 and COVID periods (color lines). Also shown are monthly averages (dot line) observed in March in Busan (left) and in Seoul (right).

하여 각각 통계적으로 살펴보았다. 부산과 서울지역에서 2019년 3월 기준 운영된 ASOS(각 지역별 1개소)에서의 관측된 기상요소 일평균 자료와 AQMS(부산 27개소, 서울 25개소) 각 지역 일평균 $PM_{2.5}$ 농도간 상관계수(R)를 살펴보았다. 먼저 부산지역의 경우 Pre-COVID 기간 기상요소-$PM_{2.5}$와의 상관계수(R)는 기온(R= +0.32 ~ +0.35), 상대습도(R= +0.19 ~ +0.22), 풍속(R= -0.53 ~ -0.51)로서 기온과 상대습도는 약한 양(+)의 상관관계, 풍속은 음(-)의 상관관계를 보였다. 반면 COVID 기간에는 기온(R= -0.08 ~ -0.03), 상대습도(R= -0.06 ~ -0.01), 풍속(R= -0.13 ~ -0.05)로서 상관관계가 거의 0에 가까운 낮은 값을 보였다. 이는 Lock-down 기간에는 $PM_{2.5}$ 농도의 급감에 따라 고농도 피크 사례 빈도가 줄고, 이에 따라 Pre-COVID 기간에 비해 $PM_{2.5}$의 농도 편차 또한 매우 낮은 것에 우선 기인한 것으로 판단된다 (Fig. 6). 또한 Pre-COVID 기간에는 기온과 상대습도와의 양의 상관성이 있으며, 이를 통해 $PM_{2.5}$의 2차 생성에 유리한 기상 조건과 연관성이 있고, 아울러 풍속이 증가하면 $PM_{2.5}$ 농도가 감소하는 일반적인 기상요소-$PM_{2.5}$ 관계가 성립하는 반면, COVID 기간에는 모두 뚜렷하지 않은 특성을 보였다. 본 연구에서는 기상요소-$PM_{2.5}$ 연관성 분석에서 ASOS 자료가 아닌 AQMS 25개 각 지점별 인접 AWS자료와 일대일 분석을 시도하였으며, 그 결과 기온과 상대습도는 ASOS 자료를 이용한 결과와 유사하였으며, 풍속과의 평균 상관도는 ASOS 자료를 이용한 결과에 비해 0.1이하(최고 0.09)의 차이만을 확인하였다.

서울지역도 부산지역과 마찬가지로 Pre-COVID 기간 기온(R= +0.47 ~ +0.49), 상대습도(R= +0.11 ~ +0.17), 풍속(R= -0.26 ~ -0.25)로서 기온은 양(+)의

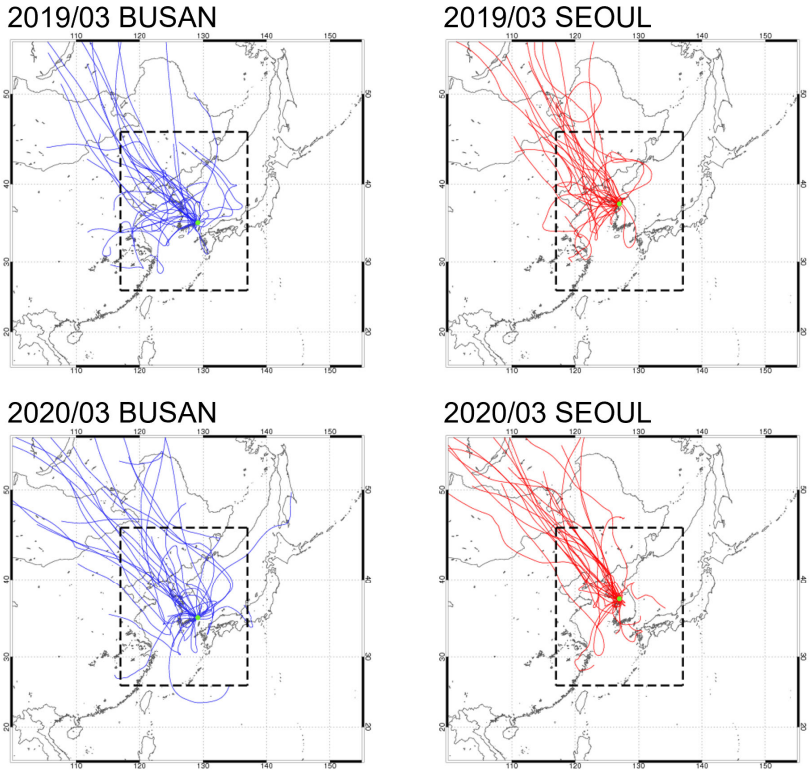


Fig. 8. Back-trajectories from HYSPLIT model in March 2019 (Pre-COVID) and 2020 (COVID) in Busan (left) and Seoul (right).

상관관계, 상대습도는 약한 양(+)의 상관관계가 나타났고, 풍속은 약한 음(-)의 상관관계를 보였다. COVID 기간에는 기온(R= +0.14 ~ +0.18), 상대습도(R= +0.20 ~ +0.24), 풍속(R= -0.50 ~ -0.48)로서 기온과 상대습도는 약한 양(+)의 상관관계, 풍속은 음(-)의 상관관계를 보였다. 이는 부산지역과 마찬가지로 Pre-COVID 기간에 비해 $PM_{2.5}$의 농도가 급감하고 편차 또한 낮게 나타나는 것에 기인한 것으로 해석되며, 일반적인 기상조건-$PM_{2.5}$ 관계 또한 동일하게 잘 성립함을 확인할 수 있다. 다만 기온의 경우 부산지역과 달리 $PM_{2.5}$ 농도와의 상관성이 상대적으로 절반정도 약한 것을 알 수 있는데, 이는 서울지역의 경우 겨울철 높은 질산염에 의한 $PM_{2.5}$ 고농도 사례가 자주 발생한 것에 기인한 것으로 해석된다. 서울의 경우 역시 AQMS 27 지점별 인접 AWS 자료와의 일대일 분석 결과에도 부산지역과 마찬가지로 기온과 상대습도는 유사한 결과를, 그리고 풍속과의 R은 ASOS를 이용한 결과에 비해 역시 0.1 이하(최고 0.08)의 차이를 확인하였다.

COVID 기간의 지역별 풍계의 빈도를 더 자세히 살펴보기 위하여 Lock-down 기간에 대하여 HYSPLIT 모델을 이용한 바람의 역궤적 결과를 도출하였다. Fig. 8은 Lock-down 기간에 HYSPLIT 모델로부터 도출한 부산과 서울지역 바람의 역궤적 분포를 계산한 후 이를 Pre-COVID 기간 (2019년 3월)과 비교한 그림이다, Fig. 8에서 알 수 있듯이, Pre-COVID 3월에 서울지역은 대부분 북서, 서풍 계열의 풍계가 우세하였고, 부산지역에도 서울과 비교하여 풍계가 크게 다르지 않았다. 반면 Lock-down 기간(2020년 3월)에는 서울지역의 경우 Pre-COVID 3월과 유사하게 서북서 및 서풍 계열의 바람이 우세하였으나(Fig. 8), 부산지역의 Lock-down 기간에는 북동, 동풍 계열의 바람이 Pre-COVID 기간에 비해 상대적으로 우세하였음을 알 수 있다.

Fig. 9에 두 지역에서의 일 평균 풍계와 $PM_{2.5}$ 농도

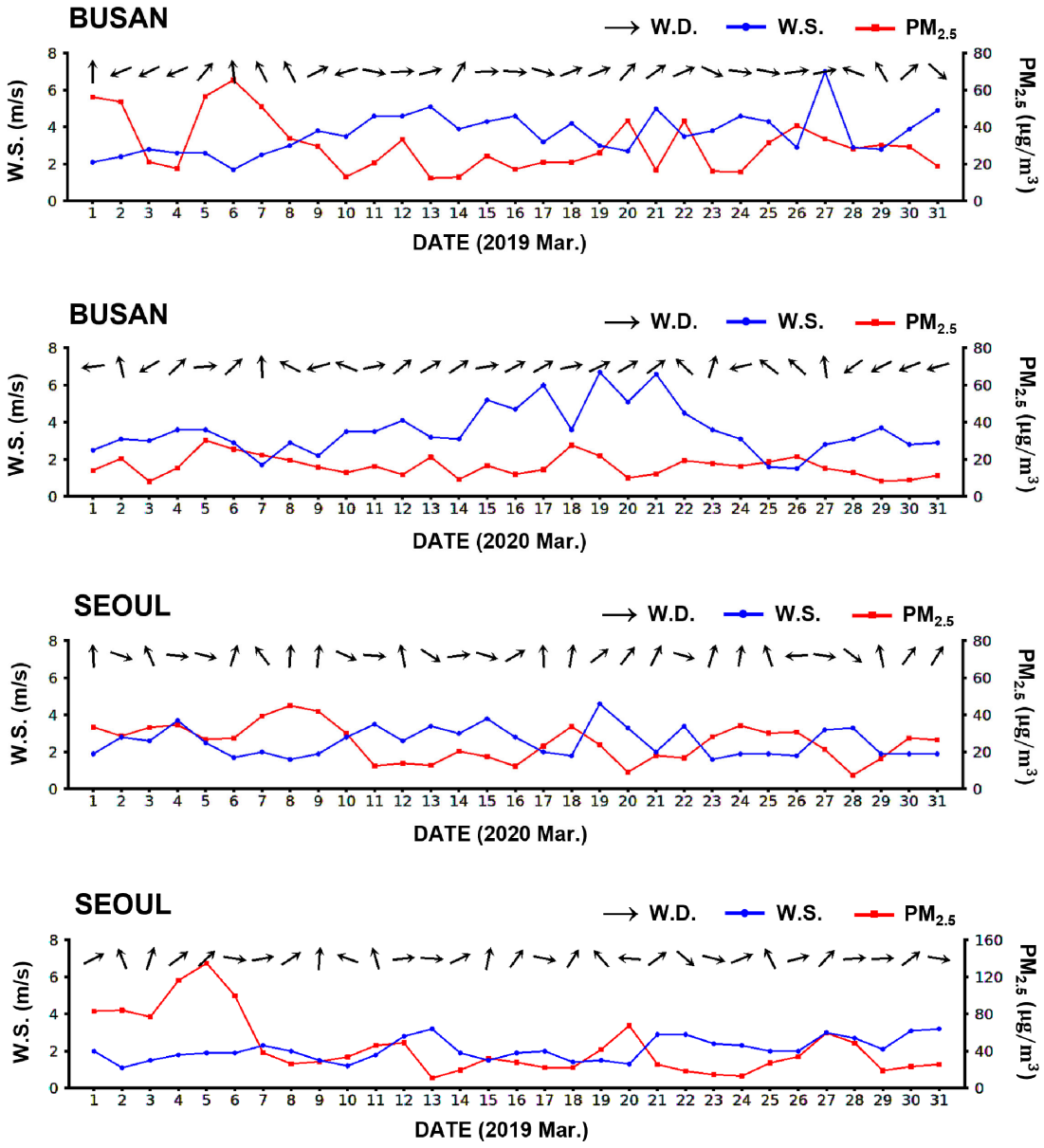


Fig. 9. Daily averages of wind directions, wind speeds and $PM_{2.5}$ concentrations during March 2019 (Pre-COVID period) and 2020 (COVID period).

를 나타내었다. 서울지역에서는 Pre-COVID 기간에 동풍 계열 4일, 서풍 계열 23일로 조사되었으며, COVID 기간에 동풍 계열 2일, 서풍 계열 17일로 서풍 계열의 발생 횟수가 감소하여 중국으로 부터의 수송영향이 감소한 것으로 판단할 수 있었다. 그림에서 제시된 COVID 기간의 지역별 서로 다른 풍계는 Fig. 7의 일최다 풍향 분포에서도 확인할 수 있다. Park et al.(2021) 연구 결과에서도 이러한 풍계의 변화가 COVID 기간의 $PM_{2.5}$ 농도 감소에 일부 영향을 준 것으로 분석하였다. 반면 부산지역의 경우 Pre-COVID 기

Appendix. Observed $PM_{2.5}$ mass, its chemical components, and CO concentrations before and during the COVID-19 period

	SEOUL		BUSAN	
	Pre-COVID	COVID	Pre-COVID	COVID
$PM_{2.5}$ (㎍/㎥)	25.51(±16.70)	21.48 ± 12.71	24.15 ± 11.13	17.14 ± 7.22
CO (ppb)	535.8 (±171.2)	481.0 ± 151.7	382.3 ± 63.3	361.1 ± 72.2
Ammonium (㎍/㎥)	3.11 ± 2.98	2.83 ± 2.31	2.38 ± 1.54	2.10 ± 1.28
Nitrate (㎍/㎥)	5.56 ± 6.16	5.11 ± 4.86	3.48 ± 3.37	3.00 ± 2.49
Sulfate (㎍/㎥)	3.67 ± 3.06	3.00 ± 2.40	4.32 ± 2.81	3.20 ± 2.57
OC (㎍/㎥)	3.73 ± 1.89	3.22 ± 1.57	4.83 ± 1.98	3.93 ± 1.71
EC (㎍/㎥)	0.99 ± 0.53	0.81 ± 0.39	1.34 ± 0.62	1.13 ± 0.50

간에 동풍 계열 8일, 서풍 계열 21일로 조사되었으며, COVID 기간에는 동풍 계열 13일, 서풍 계열 14일로 서풍 계열의 바람이 줄고 동풍 계열 바람이 발생 횟수가 크게 증가함에 따라 $PM_{2.5}$ 농도 변화에도 상당한 영향을 준 것으로 추론된다. 따라서 COVID 3월, 즉 Lock-down 기간 부산지역에서는 Pre-COVID 3월 혹은 서울지역의 COVID 3월과 달리 서풍 계열의 바람이 상대적으로 덜 발생하여, 서울에 비해 중국과 같은 외부 영향이 한층 감소된 것으로 해석하였으며, 오히려 북동 및 동풍 계열의 발생횟수 증가 및 이로 인한 청정한 해양 대기의 영향으로 부산지역 $PM_{2.5}$ 농도가 감소한 것으로 해석될 수 있다(Fig. 9). 결국, Lock-down 기간의 서울지역과 부산지역의 $PM_{2.5}$ 농도 감소량은 해당 기간의 기상요소의 변화, 특히 풍계 변화의 차이에 의해 두 지역간 $PM_{2.5}$ 농도의 상대적인 차이가 더 크게 발생하였을 것으로 해석하였다.

이상을 종합해 보면, 2020년 3월 Lock-down 기간의 서울지역 풍향의 변화는 서풍 계열 바람이 줄고 남풍 계열 바람이 소폭 늘어나 장거리 수송의 영향이 Pre-COVID 기간에 비해 줄고 자체 배출의 영향이 상대적으로 더 반영된 것으로 해석된다. 부산지역의 풍향의 변화는 Lock-down 기간에 서풍 계열이 발생 횟수가 줄어서 중국으로부터의 장거리 수송보다는 부산 자체 배출량 변화가 더 많이 기여하였을 것으로 분석하였으며, 반면 북동, 동풍 계열의 바람이 늘어났고 풍계의 변화 경향 또한 서울에 비해 상대적으로 더 크게 나타나서 동풍 유입에 따라 배출량이 적은 해양 기원의 대기의 영향을 다 자주 받았을 것으로 해석하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 풍향의 변화가 Lock-down 기간 $PM_{2.5}$ 농도의 부산과 서울지역 간 감소 경향의 차이를 유발한 것으로 판단하였고, Lock-down 기간의 이러한 특이 기상 조건과 아울러 Table 2에 제시한 CAPSS 자료에 나타난 두 지역간 배출량 차이 또한 매우 중요한 기초자료로서, 향후 서울-부산의 $PM_{2.5}$ 질량 및 성분농도와의 지역별 상관성 연구와 정량적 기여도 연구에 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 나아가 지역별 정확한 3차원 기상장과 대기질 모델의 입력자료를 토대로 한 모델링 민감도 실험을 통해 더 신뢰성 있는 COVID 영향을 정량적으로 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 부산과 서울지역의 COVID-19 발생 전후 기간 $PM_{2.5}$ 질량 및 화학성분 농도 변화를 분석하였고, COVID-19의 영향을 기상요소를 이용하여 두 지역간 대기화학 및 지역 특성을 비교·분석하였다. 먼저 COVID-19 발생 전후 연평균 등 장기간 특정된 $PM_{2.5}$ 질량 및 화학성분 분석을 통해 COVID 영향에 의한 농도의 변화량을 파악하였고, 월평균 농도의 지역적 변화 특성과 Lock-down이 있었던 3월의 농도 변화를 집중

적으로 분석하였다. 그 결과 다음의 결과를 얻었다.

Pre-COVID 기간(2018년-2019년)과 COVID 기간(2020년)의 부산과 서울지역의 연평균 $PM_{2.5}$ 질량농도를 조사해 본 결과, 서울지역은 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 약 16%, 부산지역에서는 약 29% 감소하였고. COVID 기간 $PM_{2.5}$ 월평균 농도는 최대 감소량을 보인 Lock-down 기간(2020년 3월)에는 서울과 부산에서 월평균 기준 각각 약 50% 및 46%의 유사한 감소량을 보였다. COVID 기간의 각 화학성분의 연평균 변화는 Pre-COVID 기간과 유사하였고, 이는 COVID 기간의 화학성분 농도 감소는 $PM_{2.5}$ 질량 농도 감소에 비례하여 선형적으로 감소하였음을 확인하였다. 지상 측정결과와 유사하게 위성자료로부터 추정한 한반도 주변 AOD 감소량은 연평균 약 10% 정도였으며, Lock-down 기간인 2020년 3월에 최대의 AOD 감소가 나타났다. Lock-down 기간 화학성분 농도는 서울지역에서는 Pre-COVID 3월에 비해 OC의 비중이 늘고, sulfate의 비율이 줄어들었으며, 부산지역에서는 서울과 달리 nitrate 성분 비중이 급감하고 OC의 비중이 증가한 것으로 나타났다. 이러한 특징과 함께 풍계 등의 기상 요인들을 종합적으로 분석해 본 결과 서울지역의 경우 부산보다는 최근의 중국의 고배출 지역의 배출량 저감 및 화학성분 변화와 상대적으로 연관성이 더 많은 것으로 분석되었고, 부산지역에서는 서울지역에 비해 상대적으로 장거리 수송보다는 COVID 기간의 자체 배출량 변화와 동풍 발생 등 기상 요인의 영향이 더 우세한 것으로 판단하였다.

본 연구는 위성 자료와 지상 측정자료만을 대상으로 한 연구 결과로서 다양한 기상요소를 이용한 추가 분석이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 COVID-19 기간 배출량의 변화와 지역별 $PM_{2.5}$의 2차 생성과 연관되는 더 다양한 기상학적 요소를 향후 추가 분석할 예정이며, 이러한 연구를 위해 무엇보다도 COVID 기간의 중국 핵심 대도시에서의 기상 및 대기질 자료와 배출량 자료를 확보해야 나갈 예정이다. 이와 병행하여 본 연구 결과의 신뢰도를 더 높이기 위해서는 지역 배출 특성과 상세한 기상 조건을 더 정교하게 고려한 정량적인 3차원 광화학 수송 모델을 수행할 필요가 있으며, 아울러 BFM, PSAT, HDDM 등의 다양한 모델링 기법을 동원하여 국내·외 및 지역별 상호 기여도 분석 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2020R1A6A1A03044834). 본 논문을 세심하게 심사해 주신 심사위원분들께 감사드립니다.

REFERENCES

Badia, A., Langemeyer, J., Codina, X., Gilabert, J., Guilera, N., Vidal, V., Segura, R., Vives, M., Villalba, G., 2021, A Take-home message from COVID-19 on urban air pollution reduction through mobility limitations and teleworking, npj Urban Sustain 1, 35.

Chauhan, A., Ramesh, P. S., 2020, Decline in $PM_{2.5}$ concentrations over major cities around the world associated with COVID-19, Environ. Res., 187, 109634.

Chen, H., Huo, J., Fu, Q., Duan, Y. S., Xiao, H., Chen, J. M., 2020, Impact of quarantine measures on chemical compositions of $PM_{2.5}$ during the COVID-19 epidemic in Shanghai, China, Sci. Total Environ., 743, 140758.

Feng, S., Gao, D., Liao, F., Zhou, F., Wang, X., 2016, The health effects of ambient $PM_{2.5}$ and potential mechanisms, Ecotoxic. Environ. Safety, 128, 67-74.

Jo, H. Y., Kim, C. H., 2013, Identification of long-range transported haze phenomena and their meteorological features over northeast asia, Applied Meteorol. and Climatol., 52, 1318-1328.

Jo, Y. J., Lee, H. J., Jo, H. Y., Woo, J. H., Kim, Y. H., Lee, T. H., Heo, G. Y., Park, S. M., Jung, D. H., Park, J. H., Kim, C. H., 2020, Changes in inorganic aerosol compositions over the Yellow Sea area from impact of Chinese emissions mitigation, Atmos. Res., 240, 104948.

Kim, J. M., Jo, Y. J., Yang, G. H., Heo, G. Y., Kim, C. H., 2020, Analysis of recent trends of particulate matter observed in Busan - comparative study on Busan vs. Seoul Metropolitan Area (I), J. Environ. Sci. Intl., 29, 177-189.

KMOE (Korean Ministry Of Environment), 2020, http://www.http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10525&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1370620.

Kumari, P., Toshniwal, D., 2020, Impact of lockdown measures during COVID-19 on air quality-A case study of India, Int. J. Environ. Health Res., 32, 503-510.

Kwak, K. H., Han, B. S., Park, K., Moon, S., Jin, H. G., Park, S. B., Baik, J. J., 2021, Inter- and intra-city comparisons of $PM_{2.5}$ concentration changes under

COVID-19 social distancing in seven major cities of South Korea, Air Qual. Atmos. Health, 14, 1155-1168.

Lang, J., Zhang, Y., Zhou, Y., Cheng, S., Chen, D., Guo, X., Chen, S., Li, X., Xing, X., Wang, H., 2017, Trends of $PM_{2.5}$ and Chemical Composition in Beijing, 2000–2015, Aerosol Air Qual. Res., 17, 412-425.

Lee, D. G., Choi, J. Y., Myoung, J. M., Kim, O, G., Park, J. H., Shin, H. J., Ban, S. J., Par, H. J., Nam, K. P., 2019, Analysis of a severe $PM_{2.5}$ episode in the Seoul Metropolitan Area in South Korea from 27 February to 7 March 2019: focused on estimation of domestic and foreign contribution, Atmos., 10, 756.

Ma, C. J., Kang, G. U., 2022, Effect of the eruption of Nishinoshima volcano in the summer of 2020 on air quality in Fukuoka and Busan, Asian J. Atmos. Environ., 16, 2021120.

NIER (National Institute of Environmental Research), National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2020, KORUS-AQ final science synthesis report, NIER-GP2020-121, Korea, USA.

Park, I. S., Park, M. S., Kim, S. H., Jang, Y. W., Lee, J., Owen, J. S., Cho, C. R., Jee, J. B., Chae, J. H., Kang, M., 2021, Meteorological characteristics during periods of greatly reduced $PM_{2.5}$ concentrations in March 2020 in Seoul, Aerosol air qual. Res., 21, 200512.

Park, J. H., 2021, Changes in the air quality of port areas following the implementation of the IMO 2020 sulfur limit, J. Environ. Sci. Intl., 30, 967-977.

Seo, J. H., Jeon, H. W., Sung, U. J., Sohn, J. R., 2020, Impact of the COVID-19 outbreak on air quality in Korea. Atmos., 11, 113.

Wang, X., Wei, W., Cheng, S., Lv, Z., Wang, C., Niu. Y., 2022, Composition analysis and formation pathway comparison of PM_1 between two pollution episodes during February 2017 in Beijing, China, Atmos. Environ., 223, 117223.

WHO (World Health Organization), 2013, Health effects of particulate matter policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central A sia. World Health Organization. Regional Office for Europe, https://apps.who.int/iris/handle/10665/344854.

WHO (World Health Organization), 2021, WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization, https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329.

Wu, S. P., Cai, M. J., Xu, C., Zhang, N., Zhou, J. B., Yan, J. P., Schwab, J., Yuan, C. S., 2020, Chemical nature of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the coastal urban Xiamen, China: Insights into the impacts of shipping emissions and health risk, Atmos. Environ., 227, 117383.

Xu, K., Cui, K., Young, L. H., Wang, Y. F., Hsieh, Y. K., 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 Air Qual. Res., 20, 1204-1221.

• Master's course. Min-Jun Park
Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, Pusan National University
alswns43215@pusan.ac.kr
• Professor. Cheol-Hee Kim
Atmospheric Sciences Major, Department of Earth Environmental System, and Institute of Environmental Studies, Pusan National University
chkim2@pusan.ac.kr