

코로나19 전후 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인 비교분석

Analysis of the Factors Affecting Fine Dust Concentration Before and After COVID-19

최우철* · 정규수**

Choi, Woo-Chul*, and Cheong, Kyu-Soo**

Abstract

This study conducted a comparative analysis of the factors affecting the concentration of fine dust before and after COVID-19. Of these, the dominant factor was CO, and the influence between variables increased even after COVID-19. In the case of PM10, the influence of wind direction and wind speed variables decreased, which is thought to be due to the reduction of westerly-based foreign air pollutants following China's containment policy. Comparative analysis by season showed that the influence of temperature and humidity was higher in winter. In spring, the influence of wind direction and speed decreased with changes in the westerly wind and the influence of China's containment policy. In summer and autumn, when the concentration of fine dust is relatively low, the influence of CO after COVID-19 was rather high, indicating that continuous CO management is necessary. Considering the relationship between these air pollutants and the meteorological environment, it is judged that fine dust reduction measures should be implemented.

Key words : Covid-19, Fine Dust, Factors Affecting Fine Dust, Multiple Linear Regression

요 지

본 연구는 코로나19 전후의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인을 비교분석하였다. 이를 위해 미세먼지 농도를 종속변수, 기상인자 및 대기오염물질을 독립변수로 설정하여 다중선형회귀분석을 수행하였다. 미세먼지 영향인자 중 지배인자는 CO로서 PM10, PM2.5에서 모두 다른 변수보다 월등히 높은 영향력을 끼치는 것으로 분석되었으며, 코로나 이후에도 변수 간의 영향력은 오히려 더욱 높아졌다. 국외 편서풍 영향을 보다 많이 받는 PM10의 경우 풍향, 풍속 변수의 영향력이 낮아졌는데, 이는 중국의 봉쇄정책에 따른 국외 대기오염물질의 감소 때문으로 추정된다. 계절별로 보면, 겨울의 경우 온·습도가 높을 때 미세먼지 농도가 함께 높아지는 경향이 있고, 코로나 이후에 그 영향력이 더욱 높아지는 것으로 분석되었다. 봄에는 편서풍과 중국의 봉쇄정책 영향으로 풍향, 풍속 영향력이 낮아졌다. 상대적으로 미세먼지 농도가 낮은 계절인 여름과 가을의 경우 코로나 발생 이후 CO의 영향력이 오히려 높게 분석되었다. 향후 이러한 대기오염물질 및 기상환경과의 관계성을 기반으로 한 미세먼지 저감대책이 수립되어야 할 것이다.

핵심용어 : 코로나19, 미세먼지, 미세먼지 영향요인, 다중선형회귀분석

1. 서 론

2019년 12월 촉발된 코로나19 여파로 산업, 경제, 관광 등 모든 분야에서 크나큰 변화를 맞게 되었다. 팬데믹 이후 공장 가동률, 자동차 통행량 등의 감소는 역설적으로 대기환

경을 개선시키는데 기여하게 되었다. Zhang et al. (2020) 연구에 따르면, 중국 주요 도시(청두, 충칭, 루저우)의 코로나 발병 직후 2020년 2월의 대기오염 수치는 이전 3년 평균값보다 PM 2.5 17.9%, PM10 30.8%, SO2 83.8%, CO 19.8%, NO2 62.1% 감소한 것으로 나타났다. Kumar et al. (2020)

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원(Tel: +82-31-910-0203, Fax: +82-31-910-0465, E-mail: wcchoi@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Research Specialist, Department of Future & Smart Construction Research, KICT

**한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 연구위원(E-mail: ksc@kict.re.kr)

Ph.D., Research Fellow, Department of Future & Smart Construction Research, KICT

연구에서는 인도의 경우 코로나 19 이후 강력한 봉쇄정책(Lock down)에 따라 5개 도시에서 PM2.5 농도가 최대 54% 감소한 것으로 분석되었다. Badia et al. (2021)은 코로나 발생 이후 스페인 바로셀로나의 이동 제한 및 재택근무에 따른 도시 대기오염 감소치를 측정하였는데, 재택근무를 주당 2, 3, 4일 강화할수록 NO2의 농도는 4% (-1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 8% (-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 10% (-6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 감소한 것으로 분석되었다. 국내 역시 Vuong et al. (2020)에 따르면, 대구에서 촉발한 코로나 확산과 이에 따른 봉쇄 조치가 발병 전(1월 1일~2월 17일)과 후(2월 18일~4월 30일), PM10 3.75%, PM2.5 30.9%, NO2 36.7%, CO 43.7%, SO2 21.3% 감소시킨 것으로 분석되었다. 하지만 이들 연구는 코로나 확산 직후의 단기간 대기질을 대상으로 연구하여 중장기적 대기질의 경향은 파악할 수가 없었다. 또한 미세먼지를 비롯한 대기오염물질의 농도 변화에 초점이 맞추어져 미세먼지 농도에 미치는 영향인자의 비교분석이 적극적으로 이뤄지지 않았다. 코로나 전후 비교분석에 앞서 보다 장기간으로 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인이 무엇인지 살펴볼 필요가 있다. Park et al. (2011)은 서울시 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인 분석을 수행하였다. 온도, 풍향, 풍속, 기압, 강수량 등의 기상요인 중 서울시의 미세먼지 농도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 풍향과 풍속으로 분석되었다. 인천을 대상으로 한 Shin et al. (2007) 연구에서는 풍향은 서풍계열일 경우, 풍속은 0~6 m/s 구간에서, 일기 유형은 황사 시, 해륙풍의 경우 해풍 발생 시 PM10의 농도가 높게 나타났음을 알 수 있었다. Choo et al. (2017)은 서울시를 대상으로 PM2.5 농도 산출을 위한 경험적 다중선형모델분석 연구를 수행하였다. 그 결과, 상대습도, 풍속, 풍향, 기온 등의 기상요인이 미세먼지 농도에 영향을 끼치는 것으로 분석되었다. Chae (2009)은 풍속과 풍향이 PM10 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 기상요인인 풍향, 풍속을 중심으로 온도, 상대습도, 강우요인과 대기오염물질인 SO2, NO2, CO를 함께 변수로 활용하였다. 일반적으로 풍속과 미세먼지 농도가 부(-)의 관계를 보이거나, 오염도가 높은 서풍 계열이 주 풍향으로 작용하는 경우 정(+)의 관계가 나타나는 현상을 보였다. Kim and Moon (2021)은 노후 산업단지를 대상으로 기상 데이터와 미세먼지 데이터를 활용한 머신러닝 기반 미세먼지 예측 모형을 연구하였다. 종속변수는 PM10, 독립변수는 기상 및 대기오염 인자 22개 중 다중공선성 및 변수별 유의 정도를 고려하여 PM2.5, NO2, SO2, 일교차, 풍속, 습도, 시정 등 7개의 변수로 구성하였다. 이를 토대로 계절별 예측력 분석을 수행하였다. Lim (2019) 역시 기상환경데이터와 머신러닝을 활용한 미세먼지 농도 예측 모델 연구를 수행하였다. 종속변수는 PM10이며, 다중공선성 등 변수간 상관관계를 고려하여 최종 독립변수로 투입된 대기요인은 O3, CO, SO2, 강수량, 풍속, 풍향, 일조, 일사, 전운량, 중하층운량, 최저운고, 시정, 달(월) 등으로 구성하였다. Lee and Oh (2020)은 대기 습도가 광산란

미세먼지 측정에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 기상인자로는 상대습도와 기온만을 선택하였으며, 그 결과 상대습도는 미세먼지 농도와 높은 양의 상관관계를 나타내는 것으로 분석되었다. 선행연구를 정리하면, 미세먼지에 영향을 미치는 기상인자는 온도, 습도, 풍향, 풍속, 강수량이, 대기오염물질은 CO, NO2, SO2 등이 주요 요인으로 분석되었다.

앞서 살펴본 바와 같이 1년 이상의 중장기적 코로나 전후 미세먼지농도의 경향과 주요 영향요인에 대한 연구는 제시되지 않은 상황이다. 포스트코로나 시대와 맞물려 탄소 및 미세먼지 저감 등의 정책적 노력의 결과에 따라 향후 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인들이 어떻게 달라지는지를 파악해야 되는 시점이다. 이에 본 연구는 코로나 전후로 간주할 수 있는 2019년과 2020년의 시간별 미세먼지 관측데이터를 토대로 그 변화 추이를 살펴보고, 미세먼지 농도에 영향을 끼치는 인자를 비교분석하고자 한다. 또한 상당수 편서풍에 따른 국외 대기오염물질 영향을 받으며 사계절 기후특징이 뚜렷한 국내 여건을 고려하여 계절별 비교분석을 함께 수행하여 그 시사점을 도출하고자 한다.

2. 연구의 내용과 방법

2.1 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 경기도 고양시로 설정하였다. 해당 지역의 주엽동 도시대기질 측정소의 미세먼지 농도 및 대기오염물질 정보, 고양시의 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)의 기상정보를 활용하였다. 코로나 전후의 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 코로나의 창궐시점을 살펴보았다. 코로나는 중국에서 2019년 12월 첫 환자가 발생한 뒤, 2020년 1월에 급속도로 확산되기 시작하였다. 국내의 경우 2020년 1월에 첫 환자가 발생한 뒤, 2월 대구를 시작으로 전방위적으로 확산되었다. 시간적으로 다소 차이가 있으나, 중국의 미세먼지 영향을 받는 국내 대기환경 특성과 분석자료 활용의 용이성을 고려하여, 시간적 범위는 코로나 이전 2019년, 코로나 이후 2020년으로 설정하였다.

2.2 연구 방법

본 연구의 목적은 코로나 전후 미세먼지 농도에 영향을 미치는 요인을 비교 분석하는데 있다. 선행작업으로 코로나 전후 미세먼지 농도 변화를 확인하기 위해 2019년과 2020년의 일간 미세먼지 농도의 변화 추이를 살펴본다. 이후 실질적인 코로나 전후 영향인자의 비교분석을 위해 다중선형회귀 분석을 수행한다. 다중회귀분석은 결과가 되는 종속변수와

1) 본 연구는 한국건설기술연구원의 'AI 영상인식 기반 내주변 3차원 미세먼지정보 구축 기술 개발' 과제의 일환으로 수행되었다. 후속연구로서 영상분석이 진행될 예정이며, 이에 따라 CCTV 및 대기질 측정소가 위치한 경기도 고양시 일산서구가 본 연구의 공간적 범위로 설정되었다.

원인이 되는 독립변수 간 인과관계를 추정하는 회귀분석으로, 종속변수가 1개, 독립변수가 2개 이상일 때의 회귀모델에 대한 분석을 수행한다(Lim, 2019). 다중회귀분석을 아래 식과 같이 표현되며, 상수 및 계수를 추정함을 목적으로 한다.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots \beta_i x_i + \epsilon_i$$

(x : 독립변수, Y : 종속변수, β : 회귀계수, β_0 : Y 절편, $\beta_0 \dots i$: 독립변수의 기울기, ϵ_i : 오차)

미세먼지 농도를 종속변수, 기상인자 및 대기오염물질을 독립변수로 설정하여, 코로나 전후 미세먼지 농도에 미치는 영향요인을 비교분석한다. 이때 회귀계수는 표준화계수와 비표준화계수로 분류되는데 표준화계수는 독립변수가 종속변수에 미치는 영향력을 나타내며, 비표준화계수는 독립변수가 1 증가할 때 종속변수가 증가하는 양을 의미한다. 본 연구에서는 표준화계수와 비표준화계수를 함께 사용하여 비교 분석한다. 우리나라는 사계절의 특징이 뚜렷하다. 특히 서풍 계열의 겨울과 봄에는 대기환경에서 중국의 영향이 큰 편이므로, 계절별 분석을 함께 수행하여 그 시사점을 찾고자 한다(Fig. 1).

2.3 자료 수집 및 변수 설정

본 연구의 미세먼지 및 대기오염물질 농도는 환경부 산하 한국환경공단에서 운영하는 에어코리아 홈페이지(Korea Environment Corporation)를 통해 공간적 범위인 고양시의 주엽동 도시대기질 관측소 데이터를 수집하였다. 기상환경

데이터는 기상청 기상자료개방포털(Korea Meteorological Administration)을 통해 고양시의 방재기상관측자료(AWS)와 파주시의 종관기상관측자료(Automated Synoptic Observing System, ASOS)를 활용하였다. 수집기간은 시간적 범위인 2019년 1월 1일 00시부터 2020년 12월 31일 24시까지의 731일 동안의 17,544개의 시간단위 데이터이다.

로데이터를 살펴보면, 주엽동 도시대기질 관측소에서 수집되는 PM2.5, PM10, 오존(O), 이산화질소(NO2), 일산화탄소(CO), 아황산가스(SO2) 6종과 고양시 AWS에서 수집되는 온도, 습도, 풍향, 풍속, 기압, 강수량 6종, 파주시 ASOS에서 수집되는 일조, 전운량, 시정 3종 등 총 15종의 데이터가 수집되었다. 이 중 종속변수는 미세먼지 농도 값으로 PM2.5와 PM10 값이다. 독립변수는 단계별 소거작업을 진행하였다. 첫째, 타변수와 연관되는 후차적 생성 요인인 O3와 시정 변수를 소거하였다. 대기오염물질 중에서는 O3가 태양 복사와 그 전구체(예. NO2, CO 등)에서 생성되는 2차 오염물질이며(Vuong et al., 2020), 시정 역시 미세먼지, 대기 오염물질, 온도, 습도 등에 따라 관측되는 후차적 생성요인이다. 둘째, 독립변수 간 상관성 및 다중공선성이 높은 NO2, 일조 변수를 소거하였다. NO2는 CO와의 상관성이 높았으며, 상대적으로 CO보다 모형 설명력이 떨어지는 것으로 나타났다. 일조 역시 전운량, 습도와 상관성이 높았으며, 세 변수 중 가장 낮은 설명력을 보였다. 셋째, 단계적 회귀분석을 통해 P-Value 값이 유의미하지 않거나 모형에 안정성을 주지 못하는 기압, 전운량 변수를 소거하였다. 이에 최종 분석에 활용된 독립변수는 CO, SO2, 온도, 습도, 풍향, 풍속, 강수량 등 7종이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 코로나 전후 대기질 변화 추이

코로나 전후의 미세먼지 농도 PM10과 PM2.5의 전반적인 추이를 비교해보았다(Table 1). PM10의 경우 코로나 전(2019년)의 연평균 농도값은 $48.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 후(2020년)는 $38.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 차이를 보였다. PM2.5의 경우 코로나 전 $28.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 코로나 후 $23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 공기 대기질이 개선되었다. 월별 차이를 살펴보면, PM 10의 경우 대기질이 전반적으로 좋지 않았던 1~3월, 5월에 $16\sim 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 코로나 전의 미세먼지 오염도가 더욱 심한 편으로 나타났다(Fig. 2). PM 2.5 역시 1~5월 사이에 최대 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (3월) 코로나 전의 대기질이 더욱 좋지 않은 것으로 조사되었다. 대기오염물질의 경우 코로나 전후 연평균 NO2, SO2는 각각 0.0030, 0.0004 ppm 감소하였지만, CO는 오히려 0.0216 ppm 증가하였다(Fig. 3). CO의

2) 이례적으로 6월에는 코로나 후의 미세먼지 오염도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 높게 나타났는데, 이는 코로나 확산 감소 추세에 따른 단기적 사회활동의 증가 때문으로 판단된다.

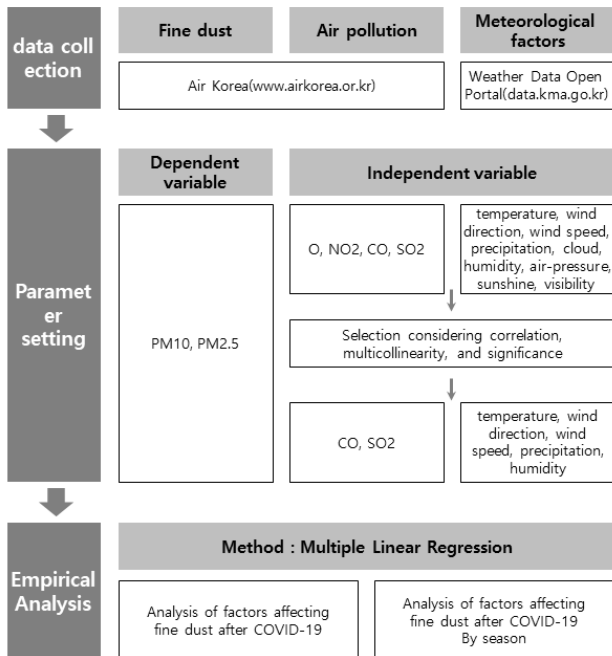


Fig. 1. Empirical Analysis Procedure

Table 1. Difference in Fine Dust After COVID-19

Month	PM10			PM2.5		
	2019	2020	gap	2019	2020	gap
1 M	71.4	45.5	-25.9	39.1	28.2	-10.9
2 M	57.5	41.1	-16.4	34.6	26.4	-8.2
3 M	74.1	50.4	-23.7	49.6	26.2	-23.4
4 M	47.8	48.8	1.0	25.3	21.6	-3.7
5 M	62.0	41.6	-20.4	37.9	25.1	-12.8
6 M	33.5	43.9	10.4	25.8	27.5	1.7
7 M	32.7	29.4	-3.3	26.6	21.4	-5.2
8 M	29.0	24.2	-4.8	20.3	19.2	-1.1
9 M	28.6	18.4	-10.2	14.5	16.0	1.5
10 M	42.0	34.1	-7.9	19.1	19.6	0.5
11 M	51.0	43.0	-8.0	23.1	25.5	2.4
12 M	46.7	39.5	-7.2	29.3	23.1	-6.2
AVG	48.0	38.3	-9.7	28.8	23.3	-5.5

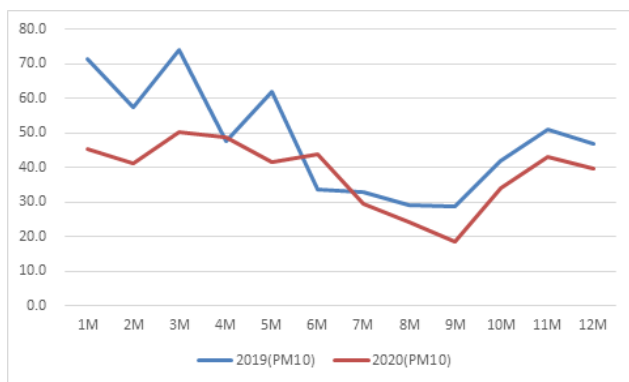


Fig. 2. Difference in PM10 After COVID-19

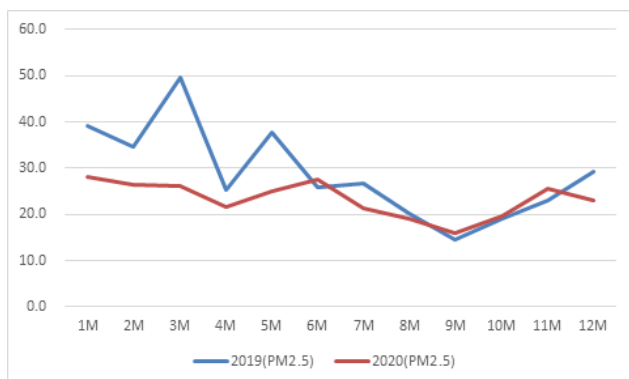


Fig. 3. Difference in PM2.5 After COVID-19

경우 차량 배기량, 타이어 마모 등 도로교통과 관련하여 오염 발생원인일 가능성이 큰 요소이다. 학계에 따르면,

급격히 늘어난 친환경차(전기/하이브리드차량 등)의 무거운 배터리 하중으로 인해 도로 아스팔트 마모에서 발생하는 대기오염물질의 양이 늘어난 것으로 분석되었다³⁾.

3.2 코로나 전후 미세먼지 영향인자 비교분석

코로나 전후 미세먼지 영향인자에 대한 직/간접적 비교분석을 위해 미세먼지 농도값 계산에 활용 가능한 비표준화 회귀계수와 변수 간 영향력 비교에 활용할 수 있는 표준화 회귀계수를 해석 시 함께 사용하고자 한다(Table 2).

결정계수(R2)의 경우 전반적으로 PM10보다는 PM2.5가, 2019년보다는 2020년이 높게 나타났다. 지배인자는 CO로서 특히, 2020년 PM2.5는 표준화계수가 0.826으로 타변수보다 월등히 높은 영향력을 미치는 것으로 나타났다. CO는 불완전연소에 기인한 1차 오염 생성물질로서 Won et al. (2021)과 Cha (2021)의 연구에서 모두 미세먼지농도와 가장 큰 상관관계 및 영향력을 갖는 대기오염물질로 분석되었다. 소각장 및 화석연료 사용(제조업 연소 등), 자동차 배기가스 및 타이어 마모 등의 불완전연소에 따른 CO 발생이 미세먼지 농도 증가에 직간접적으로 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다.

PM10의 변수별 분석결과를 살펴보면, 습도와 CO를 제외하고는 비표준화계수의 절대값이 2019년에 비해 2020년 모두 낮아진 것을 알 수 있다(2019년 p-value값이 유의미하지 않은 온도 변수는 해석에서 제외한다). 코로나 이후 전체적으로 PM10 농도가 낮아졌기 때문이다. CO의 경우 차량의 타이어 마모 과정에서 많이 발생하는 요인으로, 앞서 언급한 바와 같이 급격히 늘어난 친환경차의 도로 마모 현상이 PM10에 직간접적으로 영향을 끼쳤을 것으로 해석된다⁴⁾. PM2.5의 경우 온도를 제외하고 비표준화계수의 절대값이 코로나 이후 낮게 분석되었다(2020년 p-value값이 유의미하지 않은 풍속은 해석에서 제외한다). 이 중 CO의 계수값은 2019년 70.9에서 2020년 68.1로 큰 차이를 보이지 않았다. PM10과 PM2.5 모두 지배인자인 CO는 코로나 발생 후 미세먼지 농도가 낮아진 상황에서도 계수값의 차이가 없다는 것을 알 수 있었다. 이는 코로나 발생 이후임에도 증가한 CO의 농도 추이와 연관이 있을 것으로 예상된다. 앞서 설명했듯이, CO는 국내 발생요인 중 주로 자동차에서 배출되거나 도로 마모과정에서 발생하는 대기오염물질로서 교통통행량과도 연관이 있을 것으로 사료된다. 교통량정보제공시스템에 따르면, 2020년 전체도로의 평균 일교통량은 15,187대로서 2019년 15,348대보다 다소 낮지만, 2018년

- 영국 환경식품농부부(DEFRA) 자문기구인 대기질전문가그룹(AQEG)의 2019년 PM2.5 보고서에 따르면, 자동차 엔진에서 배출되는 미세먼지 농도값은 지속적인 규제에 따라 크게 줄어들었으나, 타이어, 브레이크 등 도로 마모에서 발생하는 미세먼지 양은 오히려 증가하는 추세로 분석되었다(Cho, 2020).
- Kim et al. (2020)에 따르면, 타이어 마모, 재부유 분진 등의 입자라 할 수 있는 PM10의 입경의 영역이 20.4%로 나타남에 따라, 터널 환기 설계기준 설정 시 엔진배출량 외 비엔진배출량에 대한 고려가 반드시 필요하다고 분석하였다.

Table 2. Analysis of Factors Affecting Fine Dust After COVID-19

Variable	PM10				PM2.5			
	2019		2020		2019		2020	
	non-standard	standard	non-standard	standard	non-standard	standard	non-standard	standard
tem	0.013	0.004	0.520***	0.249***	0.293***	0.140***	0.599***	0.412***
w-d	-5.173***	-0.077***	-2.425***	-0.054***	-5.980***	-0.128***	-2.680***	-0.087***
w-s	2.884***	0.094***	1.411***	0.075***	0.917***	0.043***	-0.192	-0.015
rain	-1.772***	-0.048***	-1.137***	-0.062***	-1.077***	-0.041***	-0.869***	-0.068***
hum	-0.056***	-0.037***	-0.057***	-0.057***	0.147***	0.143***	0.114***	0.163***
CO	85.0***	0.544***	87.4***	0.736***	70.9***	0.654***	68.1***	0.826***
SO2	5576.3***	0.207***	3107.8***	0.121***	3758.8***	0.200***	1923.9***	0.108***
R2	0.409		0.464		0.497		0.591	

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

※ tem: temperature, w-d: wind direction (dummy), w-s: wind speed, rain: precipitation, hum: humidity

14,964대, 2017년 14,921대, 2016년 14,525대 등 타연도에 비해 높은 수준이었다. 특히, 2020년의 친환경차의 국내 보급 추이를 살펴보면, 전기차는 2019년 대비 50% (134,962대), 하이브리드차는 33% (674,461대) 등 급격한 증가세를 보였다(KOSIS, 국가통계포털). 친환경차의 무거운 배터리 무게에 따른 도로 마모 오염물질 발생 우려가 나오는 상황이다. 자동차 통행량, 대기오염 배출량, 친환경차의 도로 마모에 따른 대기오염물질 발생 등 CO를 감소시킬 수 있는 정책적 대안이 필요한 결과로 해석된다.

모형 내 변수간 영향력을 분석하기 위해 표준화계수를 살펴보았다. 황사와 같은 국외 대기오염물질의 영향을 보다 많이 받는 PM10의 경우 편서풍의 영향으로 풍향은 음(-, 서풍일 경우), 풍속은 양(강할 경우)의 부호로 나타났다. 두 변수의 표준화계수는 모두 코로나 이후 더 작게 나타났는데, 이는 강력한 봉쇄정책을 시행했던 중국의 영향이 일부 반영된 것으로 보인다. 이에 비해 강수량과 습도의 영향력은 2020년에 보다 높아진 것을 알 수 있었다. PM2.5의 경우 코로나 이후 온도, 습도, 강수량의 영향력이 보다 높아진 것을 알 수 있다. PM10, PM2.5 모두 CO의 영향력은 더욱 높아져 포스트 코로나 시대에도 CO 감축을 위한 노력은 반드시 필요할 것으로 사료된다. CO를 제외했을 때 코로나 이후의 PM2.5 농도는 온·습도의 영향력이 가장 높은 것으로 나타났다.

종합해보면, PM10, PM2.5 모두 CO가 미세먼지의 지배인자로서 코로나 이후 그 영향력은 더욱 높아진 것을 알 수 있었다. 중국의 봉쇄정책 및 국내 생산활동이 위축된 후 미세먼지 농도가 저감된 것은 그 영향인자에도 차이를 보였다. 국외 영향을 보다 많이 받는 PM10은 코로나 이후 줄어든 국외 대기오염물질의 감소 때문에 편서풍에 따른 풍향, 풍속에서의 영향력이 낮아진 것을 알 수 있었다. 하지만 국내

주요 대기오염 발생원인 중 하나인 CO의 영향력은 코로나 이후 더 높아졌으며, 특히 PM2.5의 경우 미세먼지 입자 생성에 영향을 주는 온·습도의 영향력 역시 함께 높아졌음을 알 수 있었다.

3.3 계절별 코로나 전후 비교분석

우리나라의 기후 특성상 미세먼지 농도는 계절별 차이가 크며, 이에 따라 미세먼지 농도에 영향을 끼치는 요인 역시 다를 것으로 예상된다. 이에 계절별 코로나 전후를 비교하고자 한다. 계절별 로데이터를 나눠서 회귀분석을 수행해야 함에 따라 모형의 설명력이 보다 높은 PM2.5를 대상으로 비교 분석하였다. 전체적인 결정계수(R2)는 2019년에 비해 코로나 발생 후인 2020년이 높게 나타났다. 편서풍에 따라 국외 영향을 많이 받는 봄철에는 코로나 이후 풍향과 풍속의 영향력 및 유의수준이 낮아졌음을 알 수 있다. 특히, 풍속은 코로나 이전 양(+)의 부호에서 코로나 이후 음(-)의 부호로 바뀌었다. 이는 코로나 이후 중국의 봉쇄정책에 따른 미세먼지 농도의 감소 때문일 것으로 해석된다. 봄에는 코로나 이후 상대적으로 온도와 습도의 영향이 높은 것으로 나타났다. 겨울의 경우 타계절에 비해 온도와 습도가 비표준화계수, 표준화계수 모두 높은 것이 특징이다. 겨울철 온·습도가 높을 때 미세먼지 농도가 함께 높은 대기특성이 반영된 것으로 보이며, 이에 따른 미세먼지 저감정책이 동반되어야 할 것으로 사료된다. 겨울철 코로나 전후를 비교했을 때 가장 큰 특징은 SO2의 큰 폭의 감소이다. SO2는 산업계에서 주로 배출되는데, Park (2021)의 연구에 따르면, 코로나 발생 이후 전년 대비 산업용 전기 판매량은 4.0%, 석탄 생산량은 13.6% 감소한 것으로 나타났다. 코로나 이후 산업계 생산량 감소와 겨울철 대기특성이 맞물려 그 영향력이 큰 폭으로 감소했을 것으로 해석된다(Table 3).

Table 3. Analysis of Factors Affecting Fine Dust After COVID-19 (Spring, Winter)

Variable	Spring				Winter			
	2019		2020		2019		2020	
	non-standard	standard	non-standard	standard	non-standard	standard	non-standard	standard
tem	.648***	.169***	.553***	.263***	1.577***	.309***	.888***	.270***
w-d	-8.068***	-.139***	-1.121*	-.039*	-3.970***	-.072***	-4.150***	-.113***
w-s	1.963***	.083***	-.697***	-.068***	-.174	-.008	.801***	.050***
rain	-6.661***	-.055***	-1.560***	-.050***	-5.820*	-.034*	-8.091***	-.136***
hum	.299***	.240***	.104***	.181***	.349***	.277***	.244***	.262***
CO	114.1***	.774***	89.2***	.728***	45.6***	.467***	61.8***	.700***
SO2	2284.2***	.129***	2040.8***	.098***	5158.8***	.249***	1421.0***	.067***
R2	0.649		0.626		0.583		0.720	

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

Table 4. Analysis of Factors Affecting Fine Dust After COVID-19 (Autumn, Summer)

Variable	Autumn				Summer			
	2019		2020		2019		2020	
	non-standard	standard	non-standard	standard	non-standard	standard	non-standard	standard
tem	.022	.013	.665***	.325***	.950***	.353***	.060	.020
w-d	-4.452***	-.149***	-2.408***	-.074***	-2.090***	-.080***	-2.179***	-.089***
w-s	-.771*	-.055*	-.223	-.015	-1.662***	-.111***	-1.024***	-.080***
rain	-1.199***	-.087***	-1.262***	-.048***	-.466***	-.051***	-.399***	-.072***
hum	.095***	.141***	.151***	.187***	.142***	.208***	-.078***	-.112***
CO	43.8***	.560***	71.2***	.823***	65.1***	.488***	73.8***	.569***
SO2	2980.6***	.127***	766.4*	.034*	2322.4***	.143***	2100.2***	.160***
R2	0.415		0.678		0.325		0.462	

*p<.05, **p<.01, ***p<.001

상대적으로 봄과 겨울에 비해 미세먼지 농도가 낮은 여름과 가을은 모형 설명력이 낮게 나타났다. 특히 대기오염이 적은 여름은 2019년 32.5%, 2020년 46.2%로 R2값이 현저히 낮은 것으로 분석되었다. 여름과 가을의 경우 CO의 비표준화계수 및 표준화계수가 오히려 코로나 발생 이후 높은 수치를 보였다. 여름과 가을에도 CO 감소대책이 지속적으로 이뤄져야 할 것이다. 가을의 경우 겨울과 마찬가지로 코로나 발생 이후 SO2가 큰 폭으로 감소하였다. 포스트 코로나 시대에도 SO2 등 대기오염물질의 적절한 감소대책이 필요한 결과로 해석된다(Table 4).

4. 결론

본 연구는 코로나 발생 전후 미세먼지농도에 영향을 미치는 요인들에 관하여 다중선형회귀분석을 기반으로 전체

기간 및 계절별 비교분석을 수행하였다. 전반적으로 미세먼지농도에 영향을 끼치는 지배인자는 CO로서 코로나 이후에도 비표준화 회귀계수 값의 큰 차이가 없었으며, 오히려 변수간의 영향력은 더 높게 분석되었다. CO는 불완전연소에 기인한 제조업 연소 등의 화석연료 사용, 자동차 배기가스 및 타이어 마모 등에 따라 주로 발생됨에 따라 친환경 에너지 전환, 대기오염 배출량 저감, 자동차 통행량 감소, 급격히 증가하고 있는 친환경차의 도로 마모에 따른 대기오염물질 발생량 저감 등을 위한 정책적 대안이 필요한 결과이다. 국외 영향을 보다 많이 받는 PM10의 경우 중국의 봉쇄정책에 따른 국외 대기오염물질의 감소 때문에 코로나 발생 이후 편서풍에 따른 풍향, 풍속 변수의 영향력이 낮아진 것을 알 수 있었다. 적극적인 대응을 위한 국외 미세먼지 이동현황 및 관련 분석 데이터 등 면밀한 모니터링이 필요하다.

국내 기상은 사계절 및 계절별 미세먼지 농도의 차이가

뚜렷한 기후특성을 갖는다. 편서풍에 의해 국외 영향을 많이 받는 봄철의 경우 중국의 봉쇄정책 등의 이유로 코로나 발생 이후 풍속 및 풍향의 영향력이 낮아졌다. 겨울의 경우 온·습도가 높을 때 미세먼지 농도가 함께 높아지는 경향이 있고, 코로나 이후에 그 영향력이 더욱 높아지는 것으로 분석되었다. 주로 산업계 생산과정에서 배출되는 SO₂의 경우 가을과 겨울철에 코로나 발생 이후 그 영향력이 큰 폭으로 감소하였다. CO, SO₂와 같은 대기오염물질과 미세먼지의 관계, 계절별 기후 특성 등에 대한 추가 분석이 필요하며, 이를 기반으로 한 세부적인 미세먼지 저감대책이 보완되어야 한다.

본 연구는 코로나 발생 전후 미세먼지 농도에 영향을 미치는 주요 요인과 계절별 분석을 함께 수행하여 포스트 코로나 시대에서의 계절별 미세먼지 및 관련 영향인자 관리 등에 대한 시사점을 도출하였다. 본 연구는 큰 틀에서의 거시적인 흐름을 살펴본 의의를 가지나, 고농도 미세먼지 일자별 분석, 영향요인별 세부분석 등 미시적 관점에서의 분석이 이뤄지지 않은 한계를 갖는다. 또한 경기도 고양시에 국한되어 분석한 본 연구의 공간적 한계를 극복하여 국내 미세먼지농도의 지역별 차이 및 영향요인 분석이 향후 연구에서는 이뤄져야 할 것이다. 미세먼지 관련 기상인자 및 대기오염물질에 관한 분석과 이를 국민생활에 반영할 수 있는 실용화 및 정책적 후속연구가 지속적으로 수행되어, 국민이 미세먼지로부터 안전한 생활을 영위하는데 도움이 될 수 있기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 연구비 지원(20210137-001)에 의해 수행되었습니다.

References

- Badia, A., Langemeyer, J., Codina, X., Gilabert, J., Guilera, N., Vidal, V., et al. (2021). A take-home message from COVID-19 on urban air pollution reduction through mobility limitations and teleworking. *Npj Urban Sustainability*, Vol. 1, No. 35, Open Access. doi:10.1038/S42949-021-00037-7
- Cha, E.N. (2021). *Correlation of air pollutants with urban air monitoring stations in Chungbuk Area*. Master's thesis, Chungbuk University.
- Chae, H.J. (2009). Effect on the PM₁₀ concentration by wind velocity and wind direction. *Journal of Environmental and Sanitary Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 37-54.
- Cho, J.W. (2020). Air pollutant emission and air pollutant reduction policy during China's 13th five-year regulation period: Focusing on vehicles. *The Korean Association for Contemporary Chinese Studies*, Vol. 22, No. 3, pp. 217-263.
- Choo, G.H., Lee, K.T., and Jeong, M.J. (2017). Analysis of empirical multiple linear regression models for the production of PM_{2.5} concentrations. *J. Korean Earth Sci*, Vol. 38, No. 4, pp. 283-292. doi:10.5467/JK ESS.2017.38.4.283
- Kim, H.G., Baek, D.S., and Yoo, J.O. (2020). An appropriateness review on the road tunnel ventilation standards by pollutants site measurement and case study. *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 22, No. 3, pp. 323-335.
- Kim, H.R., and Moon, T.H. (2021). Machine learning-based fine dust prediction model using meteorological data and fine dust data. *Journal of the Korean Association Geographic Information Studies*, Vol. 24, No. 1, pp. 92-111. doi:10.11108/kagis.2021.24.1.092
- Korea Environment Corporation. *Air Korea*. Retrieved from <https://www.airkorea.or.kr/>
- Korea Meteorological Administration. *Open MET Data Portal*. Retrieved from <https://data.kma.go.kr/>
- Kumar, P., Hama, S., Omidvarborna, H., Sharma, A., Sahani, J., Abhijith, K.V., et al. (2020). Temporary reduction in fine particulate matter due to 'anthropogenic emissions switch-off' during COVID-19 lockdown in Indian cities. *Sustainable Cities and Society*, Vol. 62, 102382. doi:https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102382
- Lee, C.H., and Oh, S.N. (2020). Effect of atmospheric humidity on fine dust measurement using the light scattering method. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 1, pp. 391-399.
- Lim, J.M. (2019). An estimation model of fine dust concentration using meteorological environment data and machine learning. *Journal of Information Technology Services*, Vol. 18, No. 1, pp. 173-186. doi:https://doi.org/10.9716/KITS.2019.18.1.173
- Park, A.K., Heo, J.B., and Kim, H. (2011). Analyses of factors that affect PM₁₀ level of Seoul focusing on meteorological factors and long range transferred carbon monoxide. *Particle and Aerosol Research*, Vol. 7, No. 2, pp. 59-68.
- Park, N.B. (2021). Decomposition analysis of greenhouse gas emissions in the power industry in Korea since the COVID-19 outbreak. *Journal of Energy Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 30-42.

Shin, M.K., Lee, C.D., Ha, H.S., Choi, C.S., and Kim, Y.H. (2007). The influence of meteorological factors on PM10 concentration in Incheon. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 23, No. 3, pp. 322-331.

Vuong, Q.T., Thang, P.Q., Park, M.K., and Choi, S.D. (2020). Effects of the COVID-19 lockdown on criteria air pollutants in the city of Daegu, the epicenter of South Korea's outbreak. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27, pp. 45983-45991. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11360-4>

Won, D.J., Kim, S.K., Kim, Y.H., and Song, K.Y. (2021). Prediction of fine dust in Gyeonggi-do industrial complex using machine learning methods. *Journal*

of KIISE, Vol. 48, No. 7, pp. 764-773. doi:10.5626/JO K.2021.48.7.764

Zhang, J., Cui, K., Wang, Y.F., Wu, J.L., Huang, W.S., Wan, S., and Xu, K. (2020). Temporal variations in the air quality index and the impact of the COVID-19 event on air quality in western China. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol. 20, No. 7, pp. 1552-1568. doi:<https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.06.0297>

Received	September 13, 2021
Revised	September 14, 2021
Accepted	October 5, 2021