서울시 구로구에서 COVID-19 발생 전·후 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 변화에 따른 인구집단 노출평가

김동준¹ , 민기홍¹ , 최영태¹ , 신준섭¹ , 우재민¹ , 김동준¹ , 신정현¹ , 조만수¹ , 성경화² , 최윤희³ , 이채관⁴ , 최길용⁵ , 양원호^{1,2,*}

¹대구가톨릭대학교 산업보건학과, ²대구가톨릭대학교 환경보건모니터링센터, ³가천대학교 의과대학 예방의학교실, ⁴인제대학교 의과대학 환경·산업의학연구소, ⁵안양대학교 환경에너지공학과

Evaluation of Population Exposures to PM_{2.5} before and after the Outbreak of COVID-19

Dongjun Kim¹, Gihong Min¹, Yongtae Choe¹, Junshup Shin¹, Jaemin Woo¹, Dongjun Kim¹, Junghyun Shin¹, Mansu Jo¹, Kyeonghwa Sung², Yoon-hyeong Choi³, Chaekwan Lee⁴, Kilyoong Choi⁵, and Wonho Yang^{1,2,*}

¹Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, ²Center of Environmental Health Monitoring, Daegu Catholic University, ³Department of Preventive Medicine, Gachon University College of Medicine, ⁴Institute of Environmental and Occupational Medicine, Medical School, Inje University, ⁵Department of Environmental Energy Engineering, Anyang University

ABSTRACT

Background: The coronavirus disease (COVID-19) has caused changes in human activity, and these changes may possibly increase or decrease exposure to fine dust (PM_{2.5}). Therefore, it is necessary to evaluate the exposure to PM_{2.5} in relation to the outbreak of COVID-19.

Objectives: The purpose of this study was to compare and evaluate the exposure to PM_{2.5} concentrations by the variation of dynamic populations before and after the outbreak of COVID-19.

Methods: This study evaluated exposure to PM_{2.5} concentrations by changes in the dynamic population distribution in Guro-gu, Seoul, before and after the outbreak of COVID-19 between Jan and Feb, 2020. Guro-gu was divided into 2,204 scale standard grids of 100 m×100 m. Hourly PM_{2.5} concentrations were modeled by the inverse distance weight method using 24 sensor-based air monitoring instruments. Hourly dynamic population distribution was evaluated according to gender and age using mobile phone network data and time-activity patterns.

Results: Compared to before, the population exposure to PM_{2.5} decreased after the outbreak of COVID-19. The concentration of PM_{2.5} after the outbreak of COVID-19 decreased by about 41% on average. The variation of dynamic population before and after the outbreak of COVID-19 decreased by about 18% on average.

Conclusions: Comparing before and after the outbreak of COVID-19, the population exposures to PM_{2.5} decreased by about 40%. This can be explained to suggest that changes in people's activity patterns due to the outbreak of COVID-19 resulted in a decrease in exposure to PM_{2.5}.

Key words: COVID-19, particulate matter (PM_{2.5}), dynamic population, population exposure

Received October 28, 2021

Revised November 24, 2021

Accepted November 25, 2021

Highlights:

- PM_{2.5} after COVID-19 decreased by about 41% on average in late Feb, 2020.
- The variation of dynamic population after COVID-19 decreased by about 18%.
- The population exposures to PM_{2.5} decreased by about 40% after COVID-19.

*Corresponding author:

Department of Occupational Health,
Daegu Catholic University, Hayang-Ro
13-13, Hayang-eup, Gyeongsan 38430,
Republic of Korea
Tel: +82-53-850-3739
Fax: +82-53-850-3736
E-mail: whyang@cu.ac.kr

I. 서 론

공기 중 초미세먼지(Fine Particulate Matter, $PM_{2.5}$)는 사람에게 건강에 악영향을 줄 수 있기 때문에 관심이 지속적으로 높아지고 있다. $PM_{2.5}$ 는 공기역학적 입자직경이 $2.5 \mu m$ 이하인 입자상 물질로 천식과 같은 호흡기 질환과 폐기능을 저하시킨다.¹⁾ 또한, 코점막을 자극하면서 알레르기성 비염, 알레르기성 결막염을 유발시키거나 악화시킨다.²⁾ $PM_{2.5}$ 는 국제 암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)가 선정한 그룹 1에 속하는 발암물질로 분류되어 있으며, 암을 포함하여 건강에 다양하게 악영향을 야기한다.³⁾ 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 $PM_{2.5}$ 의 농도가 $10 \mu g/m^3$ 증가할 때 마다 장기 노출에 따른 심폐질환으로 인한 사망률이 6~13% 정도 증가한다고 보고하였다.⁴⁾

한국은 1960년대 이후부터 급격한 산업화 과정을 거치면서 많은 변화를 경험하게 되었고, 산업화를 통한 대기오염물질로 인한 환경문제가 발생되어 왔다. 대기오염을 시키는 원인은 다양하며, 화사와 같이 바람에 의해 토양의 흙먼지가 날려 대기오염을 유발할 수도 있고, 산불이나 화산에 의해 먼지나 매연이 발생하는 등 대기오염의 원인은 다양하게 존재한다. 자연적 발생원으로 인한 대기오염보다는 발전소, 공장 등 산업시설의 배출, 자동차 배기 등의 대부분 인간의 활동에서 비롯되는 인위적 배출원이라 할 수 있다.⁵⁾

한편 2019년에 시작된 코로나바이러스감염증-19 (Corona Virus Disease 19, COVID-19)로 인한 한국에서의 첫 확진사례

가 2020년 1월 20일에 보고되었다.⁶⁾ 이로 인해 한국의 방역당국은 2020년 1월 20일 감염병 위기경보 단계를 주의단계로 상향하여 대응하였으나,⁷⁾ 지속적으로 COVID-19 확진자가 발생하여 방역당국은 2020년 1월 27일 감염병 위기경보 단계를 경계단계로 격상하였다.⁸⁾ 이러한 노력에도 불구하고 2020년 2월 18일 대구광역시에서 집단발병이 시작되어 방역당국은 2020년 2월 23일 감염병 위기경보 단계를 경계단계에서 최고단계인 심각단계로 격상시켰으며 전국의 학교에 휴업을 명령 및 개학을 1주일 연기를 하는 등 사람의 활동에 제약을 두는 결과를 초래하였다.⁹⁾

COVID-19로 인한 사람들의 활동 변화는 대기 중 $PM_{2.5}$ 를 포함한 대기오염물질의 농도 변화를 야기할 수 있으며,^{10,11)} 이러한 농도 변화는 노출양상의 변화를 가져올 가능성이 있다.¹²⁾ 따라서, 본 연구는 COVID-19 발생 초기의 감염병 위기단계 주의수준 기간 및 경계수준 기간과 심각수준 기간의 인구 유동 및 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 농도 변화를 이용하여 인구집단의 $PM_{2.5}$ 노출양상을 비교·평가하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 연구대상 지역 선정

본 연구는 서울시 구로구를 대상 지역으로 선정하였다. 구로구는 2019년 12월 기준으로 서울시 전체 인구 중 4.18%에 해당하는 439,343명이 거주하며¹³⁾ 면적은 약 20.12 km^2 이다. COVID-19 발생 초기의 감염병 위기단계 주의수준 기간 및 경

Fig. 1. The locations of SAMI (Sensor-based Air Monitoring Instrument) in Guro-gu, Seoul

계수준 기간인 2020년 1월 26(일), 30(목), 31일(금)과 심각수준 기간인 2020년 2월 23일(일), 27일(목), 28일(금)로 선정하였다. 여기서 1월은 사람들이 COVID-19에 인식이 낮은 상태이며, 2월은 사회적 거리 두기 등 인식이 높은 상태로 가정하여 각각 COVID-19 발생 전과 후로 정의하였다. 인구 노출을 평가할 때 고해상도로 평가하기 위해 구로구 전체 면적을 100 m×100 m 크기의 격자로 총 2,204개로 나누어 적용하였다.

2. 실내 및 실외 PM_{2.5} 농도

구로구에 실외 PM_{2.5} 농도 측정을 위해 센서기반 측정장비(Sensor-based Air Monitoring Instrument, SAMI) 24대를 약 1 km² 간격으로 설치하였다(Fig. 1). 설치장소는 구로구의 주민센터 15개, 학교 3개, 사회복지관 2개, 노인복지회관, 주민공동이용시설, 도서관 및 생활체육관 1개이다. 본 연구에 사용된 SAMI는 PM_{2.5} 농도, 온도 및 상대 습도를 측정할 수 있는 센서를 기본으로 한 모니터링 장치이다. 이 모니터링 장치는 20~25°C의 온도와 70% 이하의 상대 습도를 유지하도록 설계되었다. SAMI의 세부 사양은 Fig. 2와 같다. 측정 기간은 2020년 1월 26(일), 30(목), 31일(금)과 2020년 2월 23일(일), 27일(목), 28일(금)로 선정하였다. SAMI로 측정한 PM_{2.5} 농도 측정값은 1분 단위로 수집되어 공공기관을 위해 개발된 G-Cloud(Government Cloud)에 Cloud에 실시간 저장되었다. 측정된 농도값의 신뢰도를 높이기 위해 이상치를 4분위 범위(Inter Quartile Range, IQR)를 이용하여 구분하였다. 상한값과 하한값은 ±1.5 IQR을 벗어난 측정값들을 이상값(outlier)으로 판정 후 제외하였다.¹⁴⁾

측정된 실외 PM_{2.5} 농도 데이터는 역거리 가중법(Inverse Distance Weight, IDW)을 적용하여 2,204개 격자별 농도를 추정하였다(식 (1)).¹⁵⁾ 실내 PM_{2.5} 농도는 서울시에서 수행한 Park 등(2020)¹⁶⁾의 연구 결과의 실내 및 실외 PM_{2.5} 농도비(indoor to outdoor concentration ratio, I/O ratio)인 0.747을 적용하였다.

$$z_p = \frac{\sum_{i=1}^n z_i w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

여기서, z_p 는 실외 p 에서의 추정 농도이고, z_i 는 실외 i 에서의 측정 농도, w_i 는 보간법을 이용한 가중치 농도, n 은 보간법에 사용되는 SAMI의 개수이다.

3. 시간활동 양상

구로구 실내·외 인구 분포는 2019년 통계청의 생활시간조사(Time-Use Survey) 분석 결과를 이용하였다.¹⁷⁾ 시간활동 양상 조사는 5년마다 실시되는 국가 조사로, 조사에 참여한 사람들은 행동과 위치를 정해진 시간마다 시간활동 일지에 기록한다. 이 생활시간조사의 서울시 참여자의 결과를 이용하였고, 서울 시민의 실내외 재실율은 Park 등(2020)¹⁶⁾의 연구 결과를 적용하여 연령(5세 단위), 성별 및 시간(1시간 단위)에 따른 결과에 실내외 재실율을 적용하여 각 격자별 실내 및 실외 인구수를 계산하였다.

4. 인구 유동 평가

구로구의 인구 분포는 pilot pattern cell database (pCell DB)에 의해 추정된 격자별 인구 수를 활용하였다. pCell 기법은 네트워크 방식의 위치를 기반으로 이동 전화의 GPS 신호를 사용하는 것이 아닌 네트워크 방식으로 사용하는 이동전화 사용자의 위치를 추정하는 기법이다.^{18,19)} 무선 통신 시스템의 pCell 데이터는 기지국의 신호 범위를 기반으로 격자(100 m×100 m) 내에서 연령과 성별을 제외한 개인 정보가 없는 사람의 수를 추정하였다. 격자(100 m×100 m)는 실외 PM_{2.5} 농도 측정의 격자와 같다. 추정된 인구 분포는 시간활동 양상과 같이 각 격자별로 1시간 단위의 존재인구 차이를 분석하여 24시간 동안 통합한 인구 유동을 평가하였다.

PM _{2.5} sensor model	SD-16C (Sentry, Korea)
	Measuring method	Light scattering spectrometer
	Particle size range	0.3 μm~25 μm
	Reproducibility	±5%
	Flow rate	0.5 L/min
	Resolution	0.1 μg/m ³

Fig. 2. Specification of instrument for measuring PM_{2.5} in this study

Table 1. Comparison of outdoor PM_{2.5} concentrations before and after the outbreak of COVID-19 in Guro-gu, Seoul

Concentration		Date	Before COVID-19			After COVID-19		
			Jan 26 th (Sun)	Jan 30 th (Thu)	Jan 31 th (Fri)	Feb 23 th (Sun)	Feb 27 th (Thu)	Feb 28 th (Fri)
SAMI	N		39,672	41,217	40,609	40,682	42,304	43,133
	Outdoor concentration		23.90±18.70	11.34±4.69	26.01±12.96	9.61±3.05	7.15±3.05	19.41±7.45
	Mean±SD			20.42±14.85			12.06±10.31	
	GM (GSD)		14.04 (3.44)	10.51 (1.47)	22.19 (1.85)	9.13 (1.38)	6.58 (1.49)	18.23 (1.14)
	Percentile	25%	5.66	7.98	15.36	7.53	4.82	14.35
		50%	20.44	10.22	26.97	9.21	6.03	17.69
		75%	38.68	13.69	34.65	11.44	9.06	22.59
		95%	58.86	20.22	47.20	15.15	13.16	33.54
UAMS	Outdoor concentration		21.75±17.97	10.67±10.47	21.04±16.66	21.46±21.11	7.67±6.80	19.83±19.15
	Mean±SD			17.72±14.63			16.32±14.00	

Mean: Arithmetic average, GM: Geometric mean, GSD: Geometric standard deviation, SAMI: Sensor-based Air Monitoring Instrument, UAMS: Urban Air Monitoring Station.

Fig. 3. Variation of PM_{2.5} concentration according to 100 m×100 m grid before and after the outbreak COVID-19 in Guro-gu, Seoul

5. 인구집단 노출

구로구에서 구분한 2,204개의 격자별 PM_{2.5} 농도와 인구 분포를 사용하여 구로구 전체 인구의 PM_{2.5} 노출을 평가하였다. 노출평가는 식 (2)를 이용하였다. 실외 PM_{2.5} 농도, 인구 분포 및 인구 노출은 Quantum GIS software (QGIS) 프로그램을 사용하였다.

$$\text{Population Exposure} = c_i p_i + c_o p_o \quad (2)$$

여기서 c_i 는 실내 노출 농도, c_o 는 실외 노출 농도, p_i 는 실내 인구 수, p_o 는 실외 인구수이다.

구로구 전체 인구의 PM_{2.5} 노출을 평가하기 위해 각 격자의 노출 농도에 사람 수를 가중하여 산출하였다(식 (3)).

$$\text{PWAC} = \sum_{i=1}^n \frac{c_i p_i + c_o p_o}{p_i p_o} \quad (3)$$

여기서 PWAC는 인구 가중 평균농도(population-weighted average concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이고, c_i 는 격자 n 의 실내 노출 농도, c_o 는 격자 n 의 실외 노출 농도, p_i 는 격자 n 의 실내 인구수, p_o 는 격자 n 의 실외 인구수이다.

III. 결 과

1. 실외 PM_{2.5} 농도

1월 26(일), 30(목), 31(금)과 2월 23(일), 27(목), 28(금)의 평균 PM_{2.5} 농도와 표준편차값을 Table 1에 제시하였고, 실외 PM_{2.5} 농도를 격자별로 시각화하였다(Fig. 3). COVID-19 감

Fig. 4. Variation of dynamic population distribution according to 100 m x 100 m grid before and after the outbreak of COVID-19 in Guro-gu, Seoul

염병 위기단계 주의수준 기간 및 경계수준 기간인 1월 26(일), 30(목), 31일(금)의 실외 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 각각 $23.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $11.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $26.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 도시대기측정망 (Urban Air Monitoring Station, UAMS)의 실외 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 $21.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $10.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $21.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 감염병 위기단계 심각수준 기간인 2월 23(일), 27(목), 28일(금)의 실외 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 각각 $9.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $19.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, 도시대기측정망의 실외 $PM_{2.5}$ 평균 농도는 $21.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $19.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. SAMI로 측정된 실외 평균농도가 도시대기측정망의 측정값에 비해 낮게 측정된 것을 확인할 수 있었다. 일, 목, 금요일 중 금요일이 1월, 2월 모두 $PM_{2.5}$ 의 농도가 가장 높게 나타났다. 1월 3일 동안에 비해 2월 3일 동안에서 실외 $PM_{2.5}$ 평균 농도가 낮았으며, 평균적으로 41% 감소하였다.

2. 인구 유동 평가

평일과 주말의 주간 및 야간시간의 인구 분포를 시각화하여 Fig. 4에 나타내었으며, 평일과 주말의 유동 인구 수치를 Table 2에 나타냈다. 감염병 위기단계 주의수준 기간 및 경계수준 (Orange level) 기간인 1월 26(일), 30(목), 31일(금)의 총 유동 인구의 평균은 380,404명, 766,144명, 719,423명으로 나타났다. 감염병 위기단계 심각수준(Red level) 기간인 2월 23(일), 27(목), 28일(금)의 총 유동 인구의 평균은 331,790명, 617,853명, 573,319명으로 나타났다. 1월 3일 동안과 2월 3일 동안의 인구 유동을 비교할 때 1월에 비해 2월에서 각각 일요일, 목요일, 금요일 12.78%, 19.36%, 20.31%로 평균 약 18% 감소한 것으로 나타났다.

3. 인구집단 노출

구로구 전체 인구의 $PM_{2.5}$ 노출수준을 Fig. 5에 나타냈다. 감염병 위기단계 주의수준 기간 및 경계수준 기간인 1월 26(일), 30(목), 31일(금)의 인구가중 평균 노출농도(PWAC)는 각각 $18.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $8.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $19.76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 감염병 위기단계 심각수준 기간인 2월 23(일), 27(목), 28일(금)의 PWAC는 각각 $7.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $5.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $14.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 1월과 2월의 결과를 비교하였을 때, 일요일의 경우 59.4%, 목요일 36.05%, 금요일 24.75% 낮은 것을 확인할 수 있었다. 평균적으로 약 40% 감소하였다. 감염병 위기단계

주의수준 기간 및 경계수준 기간인 1월 3일 동안에는 한국 연평균 $PM_{2.5}$ 대기환경기준인 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 값을 보였지만, 감염병 위기단계 심각수준 기간인 2월 3일 동안에는 연평균 $PM_{2.5}$ 대기환경기준을 초과하지 않았다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 COVID-19 발생 전·후 서울시 구로구의 유동 인구 변화 및 실외 $PM_{2.5}$ 농도의 변화가 인구집단 노출에 미치는 영향을 파악하였다. COVID-19 확진자가 한국에서 급격히 증가하기 시작한 2020년 2월을 기준으로 감염병 위기단계 주의수준 기간 및 경계수준 기간인 2020년 1월 26(일), 30(목), 31일(금)과 감염병 위기단계 심각수준 기간인 2020년 2월 23(일), 27(목), 28일(금)을 연구 기간으로 선정하였다. 선정한 연구 기간은 겨울철과 황사 등 구로구 외부에서 유입되는 영향인자를 고려한 것으로, 연구기간 동안 황사는 관측되지 않았다.

실외 $PM_{2.5}$ 농도는 센서 기반 장비인 SAMI로 측정된 농도값을 역거리가중법을 적용하여 각 격자의 농도를 추정하였으며, 실내 $PM_{2.5}$ 농도는 실외 $PM_{2.5}$ 농도를 실내의 농도비(I/O ratio)를 적용하여 산출하였다. SAMI는 광산란법으로 $PM_{2.5}$ 를 측정할 수 있다. 그러나 센서를 이용하여 측정된 농도값은 정확도가 낮을 수 있기 때문에 결과값을 보정해야 한다. Williams 등 (2014)²⁰과 Cho 등 (2016)²¹은 광산란법의 결과에 대해 정확도를 높이기 위해 중력법으로 측정된 데이터를 사용하여 보정하였다. Guak 등 (2018)²²은 광산란법과 공정시험방법인 중력법 모두 사용하여 $PM_{2.5}$ 를 측정할 수 있는 장비인 MicroPEM에 대해 도시대기측정망과의 동일 위치에서 진행한 실험에서 상관관계가 $R^2=0.930$ 로 양호하다는 것을 보고하였다. Park 등 (2020)²³은 본 연구에서 사용한 SAMI로 측정된 결과값을 비교하기 위해 중력법을 이용하는 도시대기측정망과 비교 평가하였다. 보정한 SAMI와 도시대기측정망의 $PM_{2.5}$ 농도를 비교하였을 때, $R^2=0.957$ 로 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. 2020년 2월 27, 28일을 제외한 나머지 연구 기간에서 도시대기 측정망에서 측정된 값보다 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 지역 내 $PM_{2.5}$ 농도의 대표값을 나타내는 도시대기 측정망은 대기 오염원과 같은 공간적 농도 변화를 나타내는 것에 한계가 있다.^{24,25)}

Table 2. Variation of dynamic population distribution before and after COVID-19 outbreak in Guro-gu, Seoul

	Before COVID-19			After COVID-19		
	Jan 26 th (Sun)	Jan 30 th (Thu)	Jan 31 th (Fri)	Feb 23 th (Sun)	Feb 27 th (Thu)	Feb 28 th (Fri)
Number of population (people)	380,404	766,144	719,423	331,790	617,853	573,319
Mean±SD		621,990±171,889			507,654±125,677

Fig. 5. Population-weight average exposure to PM_{2.5} before and after the outbreak of COVID-19 in Guro-gu, Seoul

COVID-19의 확산을 줄이기 위해 감염병 위기단계를 심각 수준으로 격상시켜 전국의 학교를 휴교 및 개학 1주일 연장 등 사람들의 활동에 제약을 두거나, 인터넷을 통한 비대면 활동의 확대로 실제 인구의 유동이 감소함을 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과로 산업 단지, 지하철역 등 사람의 활동이 많은 지역에서의 유동인구 및 PM_{2.5}의 농도가 감소함을 보였으며, 이를 바탕으로 인구 노출이 감소한 것으로 나타났다. 이러한 유동 인구의 변화가 실제 PM_{2.5}의 노출을 감소한 것으로 평가되었다.

Chauhan 등(2020)²⁶⁾에 따르면, COVID-19 발생 전·후의 PM_{2.5} 농도를 비교하였을 때 미국 뉴욕의 경우 20%, 스페인 사라고사 58%, 아랍에미리트 두바이 11%, 인도의 델리와 뭄바이는 각각 35%, 14% 감소하였다고 밝혔다. 본 연구에서는 2020년 1월 3일 동안과 2월의 3일 동안의 PM_{2.5} 농도를 비교하였을 때, 일요일 59.79%, 목요일 36.95%, 금요일 25.37% 감

소한 것으로 나타났다.

최근 노출평가 연구는 센서기반 장비를 적용이 활발한 형편이다.^{27,28)} 센서를 이용한 노출평가는 적은 비용과 실시간 측정이 가능하다는 장점을 가지고 있으며, WiFi (wireless fidelity) 및 LTE (long term evolution) 네트워크와 같은 정보통신 기술을 사용하여 데이터 관리를 용이하게 할 수 있다.^{29,30)} 본 연구에서 PM_{2.5} 농도를 추정하기 위해 사용한 IDW 기법은 실측값을 이용하여 미측정 지점을 예측할 때 사용할 수 있는 기법이다.³¹⁾ 한편 Ju 등(2021)³²⁾의 연구에 의하면 대기고정측정망 측정 결과를 분석하여 COVID-19 발생 전·후 대기 중 PM_{2.5} 농도가 감소했음을 보고하였다. 하지만, 이 연구는 대기의 농도변이를 제시하였고 사람들의 노출을 나타내지는 못했다. 본 연구에서는 일정 지역(구로구) 전체 인구의 COVID-19 발생 전후 PM_{2.5} 노출을 비교 평가하였다.

인구 유동 평가시 1시간 단위로 격자별(100 m×100 m) 인구를 산출하였고, 전체인구의 노출평가시 구로구 전체 인구로 가중평균을 한 것으로, 구로구를 경계로 인구 유입과 유출을 고려하지 않았다. 또한 2019년 통계청의 생활시간조사 데이터를 활용하였기 때문에 COVID-19 발생 이후의 실내외 재실율을 파악하지 못한 한계점이 있다. 이런 한계점에도 어떤 특정 지역의 전체인구의 PM_{2.5} 노출을 평가할 수 있는 현재의 유일한 방법이다.¹⁵⁾

본 연구는 코로나 발생 이전 3일과 이후 3일의 일정지역 인구집단의 PM_{2.5} 노출 수준을 평가하였기 때문에 대표성이 낮을 수 있다. 따라서 코로나 발생 전후 장기간 노출정도를 평가하는 연구가 앞으로 필요할 것으로 생각하며, 사람의 활동 변화가 PM_{2.5} 발생 및 노출에 끼치는 영향을 추가 연구할 필요가 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 COVID-19 발생 초기의 주의경보 기간과 심각경보 기간에서 인구 유동과 대기 중 PM_{2.5}의 농도와 인구 유동에 따른 공기 중 PM_{2.5} 노출수준을 비교 평가 하였다. 감염병 위기단계 주의수준 기간 및 경계수준 기간인 1월 3일 동안에 비해 감염병 위기단계 심각수준 기간인 2월 3일 동안에서 인구 유동, 대기 중 PM_{2.5} 농도, 대기 중 PM_{2.5}에 대한 일정지역 전체인구의 노출이 약 40% 정도 감소하였다. 이러한 결과를 바탕으로 사람의 활동이 대기 중 PM_{2.5} 농도에 영향을 주며, 동시에 노출에도 변화를 줄 수 있음을 나타내었다. 본 연구방법은 타 지역의 인구 유동과 대기 중 PM_{2.5} 농도값을 이용하여 인구 노출을 평가할 때 이용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활공감환경정보기술사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2018001350001).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Jang A. Impact of particulate matter on health. *J Korean Med Assoc.* 2014; 57(9): 763-768.
- Choe J, Lee Y. A study on the impact of PM_{2.5} emissions on respiratory diseases. *J Environ Policy Adm.* 2015; 23(4): 155-172.
- International Agency for Research on Cancer. Outdoor Air Pollution Volume 109. Lyon: International Agency for Research on Cancer; 2016.
- World Health Organization. Health Effects of Particulate Matter. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe; 2013.
- Yoo B. The influence of air pollution level on resident's evaluation and cognition for indoor environment in Ulsan. *J Korean Hous Assoc.* 2010; 21(3): 87-94.
- Kim J, Choe P, Oh Y, Oh K, Kim J, Park S, et al. The first case of 2019 novel coronavirus pneumonia imported into Korea from Wuhan, China: implication for infection prevention and control measures. *J Korean Med Sci.* 2020; 35(5): e61.
- Korea Disease Control and Prevention Agency. In the Quarantine Stage, the Crisis Alert for Infectious Diseases was Raised to the Yellow Stage to Confirm Patients of COVID-19 from Overseas. Available: https://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a20501010000&bid=0015&act=view&list_no=365794 [accessed 26 October 2021].
- Korea Disease Control and Prevention Agency. Infectious Disease Alert was Raised Level Yellow Stage to Red Stage. Available: https://www.kdca.go.kr/board/board.es?mid=a20501010000&bid=0015&act=view&list_no=365889 [accessed 26 October 2021].
- Choi JY. COVID-19 in South Korea. *Postgrad Med J.* 2020; 96: 399-402.
- Lokhandwala S, Gautam P. Indirect impact of COVID-19 on environment: a brief study in Indian context. *Environ Res.* 2020; 188: 109807.
- Kwak K, Han B, Park K, Moon S, Jin H, Park S, et al. 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.* 2021; 14: 1155-1168.
- Pope C, Burnett R, Thun M, Calle E, Krewski D, Ito K, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA.* 2002; 287(9): 1132-1141.
- Guro District Office. Guro-gu Population in the 4th Quarter of 2019. Available: <https://www.guro.go.kr/www/selectBbsNttView.do?bbsNo=671&nttNo=43332&pageUnit=10&key=2146&pageIndex=1> [accessed 16 November 2021].
- Frigge M, Hoaglin D, Iglewicz B. Some implementations of the boxplot. *Am Stat.* 1989; 43(1): 50-54.
- Park J, Jo W, Cho M, Lee J, Lee H, Seo S, et al. Spatial and temporal exposure assessment to PM_{2.5} in a community using sensor-based air monitoring instruments and dynamic population distributions. *Atmosphere.* 2020; 11(12): 1284.
- Park J, Kim E, Choe Y, Ryu H, Kim S, Woo B, et al. Indoor to outdoor ratio of fine particulate matter by time of the day in house according to time-activity patterns. *J Environ Health Sci.* 2020; 46(5): 504-512.
- Statistics Korea. Results of Time Activity Survey in 2019. Available: http://kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/6/4/index.board [accessed 18 October 2021].
- Kim G, Han G, Cho C. Improvement case study about pCell network based positioning solution. *Telecommun Rev.* 2008; 18(2): 239-247.

19. Kim S, Kim T, Kim C. Estimating the method of the number of visitors of water-friendly park using GPS location information. *Ecol Resil Infrastruct.* 2020; 7(3): 171-180.
20. Williams R, Kaufman A, Hanley T, Rice J, Garvey S. Evaluation of Field-deployed Low Cost PM Sensors. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency; 2014.
21. Cho S, Chartier R, Mortimer K, Dherani M, Tafatatha T. A personal particulate matter exposure monitor to support household air pollution exposure and health studies. Paper presented at: 2016 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC); 2016 Oct 13-16; Seattle, USA. Piscataway: IEEE, 2016. p. 817-818.
22. Guak S, Lee K. Different relationships between personal exposure and ambient concentration by particle size. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2018; 25(17): 16945-16950.
23. Park J, Ryu H, Kim E, Choe Y, Heo J, Lee J, et al. Assessment of PM_{2.5} population exposure of a community using sensor-based air monitoring instruments and similar time-activity groups. *Atmos Pollut Res.* 2020; 11(11): 1971-1981.
24. Fu X, Zhu X, Jiang Y, Zhang J, Wang T, Jia C. Centralized outdoor measurements of fine particulate matter as a surrogate of personal exposure for homogeneous populations. *Atmos Environ.* 2019; 204: 110-117.
25. Tastan M, Gokozan H. Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based e-nose. *Appl Sci.* 2019; 9(16): 3435.
26. Chauhan A, Singh R. Decline in PM_{2.5} concentrations over major cities around the world associated with COVID-19. *Environ Res.* 2020; 187: 109634.
27. Castell N, Dauge F, Schneider P, Vogt M, Lerner U, Fishbain B, et al. Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environ Int.* 2017; 99: 293-302.
28. Kumar P, Morawska L, Martani C, Biskos G, Neophytou M, Di Sabatino S, et al. The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environ Int.* 2015; 75: 199-205.
29. Lin Y, Chi W, Lin Y. The improvement of spatial-temporal resolution of PM_{2.5} estimation based on micro-air quality sensors by using data fusion technique. *Environ Int.* 2020; 134: 105305.
30. Madakam S, Ramaswamy R, Tripathi S. Internet of Things (IoT): a literature review. *J Comput Commun.* 2015; 3: 164-173.
31. Moschandreas D, Watson J, D'Abreton P, Scire J, Zhu T, Klein W, et al. Chapter three: methodology of exposure modeling. *Chemosphere.* 2002; 49(9): 923-946.
32. Ju M, Oh J, Choi Y. Changes in air pollution levels after COVID-19 outbreak in Korea. *Sci Total Environ.* 2021; 750: 141521.

〈저자정보〉

김동준(연구원), 민기홍(대학원생), 최영태(대학원생),
 신준섭(연구원), 우재민(학생), 김동준(학생),
 신정현(연구원), 조만수(교수), 성경화(연구원),
 최윤형(교수), 이재관(교수), 최길용(교수), 양원호(교수)