

논문

COVID-19 팬데믹 중 전라북도 PM_{2.5}의 농도 변화와 건강위해성 평가

Variation of PM_{2.5} Concentration during the COVID-19 Pandemic in Jeollabuk-do, Korea and Its Health Effect

마창진, 강공언^{1)*}

일본 후쿠오카여자대학교 환경과학과, ¹⁾원광보건대학교 보건의료행정과

Chang-Jin Ma, Gong-Unn Kang^{1)*}

Department of Environmental Science, Fukuoka Women's University, Fukuoka, Japan

¹⁾Department of Health and Medical Administration, Wonkwang Health Science University, Iksan, Republic of Korea

접수일 2024년 7월 22일
수정일 2024년 7월 31일
채택일 2024년 8월 1일

Received 22 July 2024
Revised 31 July 2024
Accepted 1 August 2024

*Corresponding author
Tel : +82-(0)63-840-1286
E-mail : gukang@wu.ac.kr

Abstract In this study, the improvement in PM_{2.5} concentration due to the Corona Virus Infectious Disease 19 (hereafter called as "COVID-19") pandemic and the reduction of health hazards from mandatory mask-wearing were experimentally and theoretically investigated. Jeollabuk-do, a region with high PM_{2.5} concentration nationwide and designated as an Air Quality Management Region (AQMR), was selected as the target area for this study. Unlike previous studies, the efficiency of masks in blocking PM_{2.5} for various respiration patterns based on human behavior was experimentally evaluated using a medical ventilator (ADV-1000MK2) for the first time. The results showed that the blocking efficiency of PM_{2.5} by masks ranged from 54.7% to 68.5% at rest, 56.0% to 70.0% during ordinary activities, and 67.1% to 80.6% during exercise. Compared to 2019, the year before COVID-19, the reduction rate of PM_{2.5} concentration in 2020 during the pandemic was 26.9% in AQMR areas and 16.7% in non-AQMR areas of Jeollabuk-do, Korea. The deposition amount of PM_{2.5} in the alveolar-interstitial (AI) region for one year in 2020 was 15.98 mg for men and 9.62 mg for women in AQMR, and 30.37 mg for men and 22.33 mg for women in non-AQMR. As a result of calculating the delay in allergic airway inflammation (AAI) days before and after COVID-19, it was estimated that in AQMR, men experienced a delay of 129 days and women 190 days, while in non-AQMR, men experienced a delay of 59 days and women 69 days.

Key words: PM_{2.5}, COVID-19, Jeollabuk-do, Mask, Health

1. 서론

대기오염은 호흡기 질환을 증가시키며, 특히 유아와 노인 사망의 주요 원인이 되고 있다(Brauer, 2010). Brauer (2010)와 Cohen *et al.* (2017)의 연구에 따르면 대기오염으로 인해 전 세계적으로 연간 약 700만 명이 사망하고 있으며, 전 세계 90% 이상의 사람들이 오염된 공기를 호흡하고 있다. 이러한 문제는 개발도상국 뿐만 아니라 선진국에서도 나타나는데, 예를 들어 2012년 유럽에서는 대기 입자로 인해 193,000명이

사망하였다(Ortiz *et al.*, 2017). 일본 도쿄에서 진행된 경유차 배출가스와 사망률의 관계에 대한 연구에서는 하루 PM_{2.5} 농도가 10 µg/m³ 증가할 때마다 뇌혈관 질환 사망률이 1.3% 증가한다고 보고하였다(Yorifuji *et al.*, 2011). 최근 세계보건기구(WHO, 2022)에 따르면 2019년 기준 대기오염은 전 세계적으로 연간 420만 명을 사망에 이르게 하며, 이 중 많은 수가 고농도 PM_{2.5} 노출에 의한 것으로 나타났다. 한편, Ostro (2004)는 미세먼지 수준을 3 µg/m³로 낮추면 호흡기 질환으로 인한 사망률을 낮출 수 있다고 밝혔다.

현재 우리나라에서는 고농도 PM_{2.5} 일수가 점점 증가하면서, 그로 인한 질병 발생 또한 심각한 상황에 놓여 있다. 국립환경과학원 대기환경연보 (NIER, 2020)에 따르면 최근 3년간 서울시 PM_{2.5} 농도는 23~25 µg/m³로 WHO 연평균 권고기준보다 두 배 이상 높은 수치를 기록하고 있다. 이런 가운데, 정부는 2019년 4월 2일에 대기오염이 심각한 지역의 대기질 개선을 위해 종합적인 시책을 추진하고, 대기오염원의 체계적 및 광역적 관리를 목적으로 ‘대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법 (약칭: 대기관리권역법)’을 제정하였으며, 총 4개 권역 (8개 특·광역시, 69개 시·군)의 대기관리권역 (Air Quality Management Region, AQMR)을 지정하였다 (National Law Information Center, 2024). 전국의 대기관리권역 중에서도 중부권 권역에 포함된 전주시, 익산시, 군산시가 소재한 전라북도의 PM_{2.5} 농도는 2015년 기준으로 평균 34 µg/m³를 기록하면서 전국에서 가장 높게 나타났다 (Jeonbuk Ilbo, 2016). 또한, 2017년 전국 63개 도시별 PM_{2.5} 연평균 농도를 비교한 결과 사천이 18 µg/m³인 반면, 익산시가 36 µg/m³로 전국에서 가장 높게 나타났다 (NIER, 2018).

2019년 12월 1일 중국 우한에서 처음 확인된 코로나바이러스감염증-19 (이하 COVID-19)는 이후 2주 만에 전 세계로 빠르게 확산되었다 (Huang *et al.*, 2020). 우리나라의 경우 2020년 1월 20일에 첫 확진환자가 보고된 후 4월 30일까지 12,240건이 발생하였다. 이 예상치 못한 감염병의 확산 방지를 위하여 2020년 2월 23일부터 정부는 외출자제와 이동제한, 학원 등 각종 교육시설에서의 수업금지과 개학연기 등 다양한 규제를 시행하였다. 이와 같은 정부의 각종 규제에 대한 시민들의 협조로 2020년 3월 1일 동대구역 KTX 승하차 인원은 2,909명으로 전년도 같은 날의 6.6% (4만 3,863명)로 감소하였다 (Hankukyungjae, 2020). 교통량의 경우 전국적으로 2019년과 2020년 1월 2주째 금요일에 각각 353만여 대와 354만여 대로 거의 차이가 나지 않았으나, 대구에서 COVID-19 집단감염이 보고된 2월 19일 이후인 2월 3주 금요일 (2월 21일)

에는 전년도 같은 날에 비해 6.4% 감소하였다. 이후 2월 23일 심각 단계로 격상되면서 3월 1주에 가장 낮은 321만여 대의 교통량을 나타내었다 (Han and Jang, 2020).

서울특별시도 COVID-19의 예방 및 확산 차단을 위하여 마스크 착용 방역지침 준수 행정명령 (고시 제 2022-67호)을 고시하였으며 (Seoul Metropolitan Government, 2022), 이후 COVID-19 확진자 수의 감소에 따라 2024년 4월에는 중앙방역대책 본부의 「마스크 착용 방역지침 준수 명령 및 과태료 부과 업무지침」이 폐지되고, 지자체별 마스크 착용 의무화 행정명령이 해제되었다 (부산의 경우, 부산광역시 고시 제2024-135호) (Busan Metropolitan City, 2024).

한편, COVID-19 팬데믹으로 인해 전 세계적으로 많은 변화가 일어났다. 그중에서도 수질과 대기질 개선이 크게 주목을 받았다. NASA와 유럽우주기구 오염감시위성이 제공한 위성영상 (NASA, 2020)의 경우 COVID-19 팬데믹 기간 중 중국 전역의 대도시에서 NO₂ 농도가 얼마나 극적으로 개선되었는지를 보여주었다. COVID-19의 예상치 못한 긍정적인 측면으로 PM_{2.5} 등 대기오염물질의 농도가 크게 개선되었는데, 이로 인해 사람들의 건강수명을 늘리는 데 어느 정도 효과가 있는지에 대해 검증을 하는 것은 매우 의미 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 대기관리권역 중에서 중부권에 속하며 전국적으로 PM_{2.5} 농도가 높은 전라북도 지역을 대상으로, COVID-19 발생 전후의 PM_{2.5} 농도 변화와 그에 따른 건강위해성을 실험적 및 이론적으로 평가하고자 하였다. 이를 통해 포스트 코로나 시대에 있어서 선택적 마스크 착용의 필요성을 제안하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 마스크의 PM_{2.5} 차단 효율의 실험적 평가

COVID-19 팬데믹으로 인해 전 세계적으로 일상생활

활에서도 마스크 착용이 시행되면서 마스크 착용에 따른 $PM_{2.5}$ 차단 효과에 대한 평가가 많은 연구자들에 의해 이루어졌다. Adrian *et al.* (2023)은 저가의 $PM_{2.5}$ 센서와 마네킹을 이용한 연구를 통해 마스크 유형에 따라 60~85% 범위의 $PM_{2.5}$ 차단 효과를 보고하였다. Arunnart (2021)은 용도별 시판용 마스크를 대상으로 한 $PM_{2.5}$ 차단 효과 실험을 통해 N95 마스크의 효율(97.2%)이 가장 높았고, 외과용 마스크(56.3~83.2%), 면포 마스크(40.9~42.4%), 모슬린(muslin) 무명이나 양모 등의 털실을 평직으로 한 얇은 직물의 총칭) 천 마스크(37.8%), 스펀지 마스크(33.5%)가 뒤를 이었다고 보고하였다. 지금까지 수행된 대부분의 마스크 성능 평가 연구는 공기흡입 펌프를 사용해 일정량의 유량으로 공기를 마스크에 불어넣는 단순한 방법을 채택하였으며, 실제 사람의 행동에 따른 호흡 패턴별 $PM_{2.5}$ 의 차단 효과에 대한 평가는 아직 보고된 바 없다.

따라서, 본 연구에서는 의료용 인공호흡기(ADV-1000MK2, Mera Co.)를 사용하여 들숨과 날숨을 재현한 후, 사람의 행동에 따른 호흡패턴별 마스크에 의한 $PM_{2.5}$ 의 차단 효과를 실험적으로 평가하였다. 그림 1에 시판용 마스크의 $PM_{2.5}$ 차단 성능을 평가하기 위한 실험장치의 모식도를 나타내었다. 여기에서 두 대의 $PM_{2.5}$ 모니터(TSI®, IPM_{2.5}-AD)는 광산란 방식을 이용하여 실시간으로 마스크 통과 전후의 $PM_{2.5}$ 농도

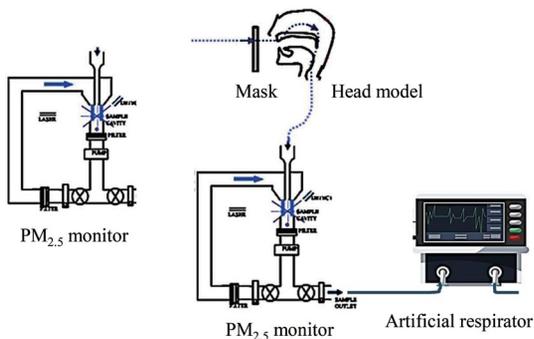


Fig. 1. Schematic of the experimental setup for evaluating the $PM_{2.5}$ blocking performance of commercial surgical masks.

를 측정할 수 있으며, 그 결과를 이용해 마스크의 $PM_{2.5}$ 차단 효율(B.E., %)을 산출하였다. 시판용 마스크의 경우 일반인이 시중에서 손쉽게 구입할 수 있는 보건용 마스크, 외과용 마스크, 비말차단용 마스크의 총 5가지 상품을 대상으로 하였다. 마스크의 입자 차단 효과는 마스크 착용상태 즉, 마스크와 얼굴 사이의 빈틈 유무에 의해 크게 달라질 수 있다. 본 연구에서는 빈틈이 없는 마스크의 착용상태를 재현한 후 안정시(rest: 수면, 앉기), 평상시(ordinary: 가벼운 활동), 운동시(excise: 격렬한 활동) 각각의 호흡패턴에 따른 $PM_{2.5}$ 의 차단 효과를 평가하였다. 호흡 지속시간, 즉 마스크의 사용시간은 출퇴근시간을 포함한 일반적인 일과시간에 해당하는 10시간으로 맞추었다. 마스크에 의한 $PM_{2.5}$ 차단 효과 실험 시 마스크 통과 전의 $PM_{2.5}$ 농도 범위는 $20 \pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

인공호흡기 사용 전후에 마스크의 입자 흡착 여부를 가지적으로 확인하기 위하여, 본 연구에서는 높은 휘도와 빔 전류로 인해 고해상도의 선명한 화상을 얻을 수 있는 주사형 전자현미경(JEM-1400 Plus, JEOL)을 사용하였다. 그림 2(a)는 사용 전 외과용 마스크의 전자현미경 사진($\times 100$)을 나타낸 것이다. 직경 약 $20 \mu\text{m}$ 의 폴리프로필렌(polypropylene) 섬유가 불규칙적으로 여러 층을 형성하고 있음을 알 수 있다. 그림 2(b)는 공기를 불어넣은 후 마스크 섬유의 확대 사진($\times 1,200$)을 나타낸 것이다. 여기에서 마스크 섬유 표면에 많은 수의 다양한 입자가 부착되어 있음을 알 수 있다. 또한, 이들 입자는 마스크 내부의 섬유보다는 마스크 겉면의 섬유에 주로 흡착 차단되었음을 확인할 수 있다.

표 1은 시판용 마스크의 종류에 따른 호흡패턴별 $PM_{2.5}$ 의 차단 효율(%)에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. 차단 효율(B.E., %)은 다음 식에 의해 산출되었다.

$$B.E._{PM_{2.5}}(\%)$$

$$= \frac{PM_{2.5\text{front-mask}}(\mu\text{g}/\text{m}^3) - PM_{2.5\text{rear-mask}}(\mu\text{g}/\text{m}^3)}{PM_{2.5\text{front-mask}}(\mu\text{g}/\text{m}^3)} \times 100$$

여기에서, $PM_{2.5 \text{ front-mask}}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 $PM_{2.5 \text{ rear-mask}}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)는 각각 마스크 통과 전후의 $PM_{2.5}$ 농도를 의미한다.

표 1에서 호흡량(mL/time)과 호흡횟수(time/min)는 성인 남녀의 평균치(Kita, 2005)를 의미하며, 이들은 앞서 언급한 의료용 인공호흡기에 입력시켜야 하는 필수 정보에 해당한다.

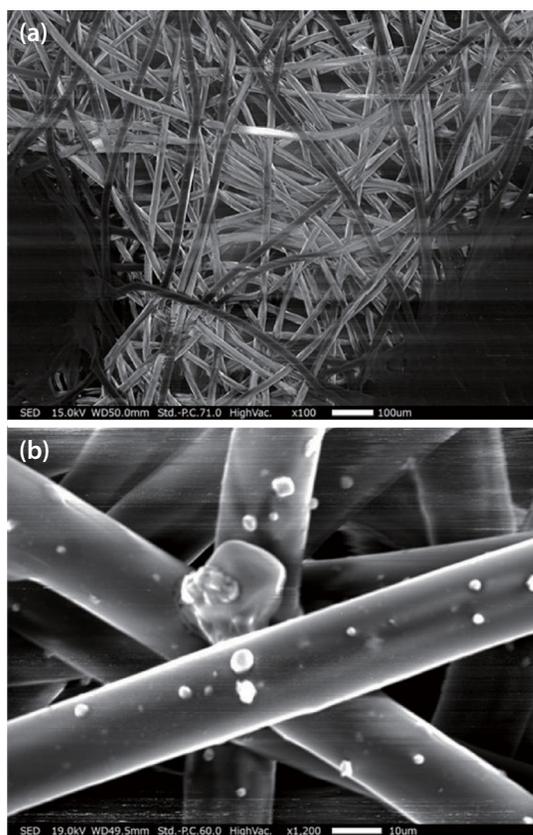


Fig. 2. Electron microscope images of a commercial surgical mask (a) and the particles attached to the mask fibers (b).

마스크의 $PM_{2.5}$ 차단 효율은 호흡패턴에 따라 차이를 보였는데, 안정 시 54.7~68.5%, 평상시 56.0~70.0%, 운동 시 67.1~80.6% 수준이었다. 호흡패턴에 따른 평균 $PM_{2.5}$ 차단 효율은 운동 시 (74.45%) > 평상시 (63.51%) > 안정 시 (62.14%) 순으로 높게 나타났다. 이는 호흡패턴에 따른 호흡량 및 호흡횟수의 차이와 사용 중 마스크 표면에 형성되는 입자층(dust cake)이 입자를 효율적으로 차단하는 데 기여하기 때문으로 보인다. 마스크 표면에 형성되는 입자층은 $PM_{2.5}$ 농도가 높을수록 더 짧은 시간에 형성되어, 이후의 입자차단에 더욱 효과적일 것으로 예상된다. 따라서, $PM_{2.5}$ 농도별 마스크 차단 효율에 대한 추가적인 실험이 요구되며, 이와 더불어 성별 및 연령별 호흡량과 호흡횟수를 고려한 실험 또한 필요하다고 할 수 있다.

운동 시 마스크에 의해 차단된 입자가 가장 많다는 것은 마스크를 착용하지 않고 야외에서 운동할 경우 상대적으로 많은 양의 입자상 대기오염물질이 체내에 유입될 수 있음을 시사한다.

2.2 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 $PM_{2.5}$ 의 호흡계 침착량 산정

COVID-19 유행으로 감염병 관리 및 방역조치가 시행되면서 자동차 통행이나 교육기관의 등하교, 산업활동 등 인간활동에 대한 다양한 제한 조치가 이루어졌다. 이로 인해 COVID-19 팬데믹 기간 중 인간활동은 감소하게 되고 이로 인해 감염병이 발생하기 전에 비해 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 인체 호흡기계 침착량은 달라지게 된다.

따라서, 본 연구에서는 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 $PM_{2.5}$ 의 호흡기계(폐포간질, alveolar-interstitial (AI)) 침착량을 산정한 후 그 결과에 따른 건

Table 1. $PM_{2.5}$ blocking efficiency of commercial masks depending on respiration patterns.

Respiration pattern	Breathing amount (mL/time)	Respiration time ($\text{time}/\text{min.}$)	$PM_{2.5}$ blocking efficiency (%)					Average (%)
			Mask-A	Mask-B	Mask-C	Mask-D	Mask-E	
Rest	540	12	54.87	68.49	65.01	67.66	54.66	62.14
Ordinary	600	13	56.14	69.96	66.36	69.03	56.04	63.51
Exercise	900	21	67.15	80.57	77.29	80.14	67.12	74.45

강위해성 저감효과(건강수명 연장)를 이론적으로 평가하였다. 성인 남녀를 대상으로 PM_{2.5}의 AI 침착량 산정에 있어서, 대기관리권역(AQMR)에서는 남녀 모두를 사무직 근로자로, 비대기관리권역(Non-AQMR)에서는 남녀 모두를 농업종사자로 가정해 그에 따른 행동패턴을 결정하였다. 그중에 비대기관리지역(Non-AQMR)에서의 가벼운 활동(Light activity)은 외부에서의 농경활동을 의미하며, 기타 상세한 내용의 경우 표 3에 나타내었다.

COVID-19 발생 전인 2019년과 팬데믹 기간인 2020년의 각각 1년간 PM_{2.5}의 AI 침착량을 산출하기 위해, 본 연구에서는 Löndahl *et al.* (2007)이 제안한 호흡기계 침착량 산정식을 목적에 맞게 개량한 다음 식을 이용하였다.

$$Dep_{PM_{2.5}} (\text{mg/year}) = T_{exp} (\text{h}) \times C_{PM_{2.5}} (\mu\text{g}/\text{m}^3) \times R_{I/O} (1 - E_{mask-cut}) \times F_{dep, in AI} \times R_{bre} (\text{m}^3/\text{h}) \times 365 \text{ day/year} \times 10^{-3} \text{ mg}/\mu\text{g}$$

여기에서, PM_{2.5}의 호흡기계 AI 침착량 산정을 위한 변수는 다음과 같다.

T_{exp} (h): 각 행동패턴별 하루 중 활동시간

$C_{PM_{2.5}}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$): 해당 지역의 PM_{2.5} 농도

I/O ratio: 옥외 대기 중 PM_{2.5} 농도에 대한 실내 PM_{2.5}

농도 비(Choi and Kang, 2018)

$(1 - E_{mask-cut})$: PM_{2.5}의 마스크 통과율(호흡패턴별 마스크에 의한 차단율에 의해 계산)

$F_{dep, in AI}$: PM_{2.5}의 폐포간질 최대 침착률(Yamada *et al.*, 2007)

R_{bre} (m^3/h): 호흡패턴별 호흡량(Yamada *et al.*, 2007)

3. 결과 및 고찰

3.1 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 전북지역의 PM_{2.5} 현황

그림 3은 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 전북지역의 PM_{2.5} 농도 변화를 알아보기 위해 2019년 1월부터 2020년 12월까지 대기관리권역(AQMR)과 비대기관리권역(Non-AQMR)으로 나누어 PM_{2.5} 농도 변화를 나타낸 것이다. 또한 전북지역 PM 농도의 시계열별 농도 변화를 주변 지역과 비교할 수 있도록 인근 행정구역인 전남과 충남을 대상으로 하여 월별 평균농도를 나타내었다. 이와 함께 같은 기간 동안의 전국 누적 COVID-19 확진자 수도 제시하였다. 여기에서 대기관리권역(AQMR)은 전주시, 익산시, 군산시의 총 19개 대기측정소에서 측정된 월평균 농도를, 비

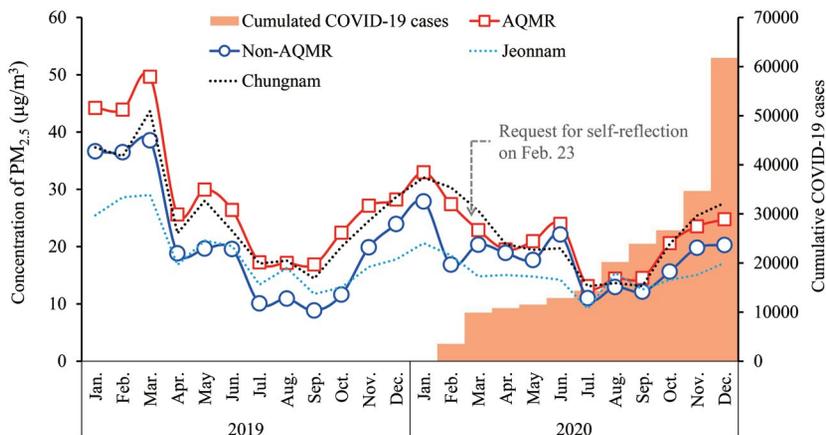


Fig. 3. Monthly variations in the concentration of PM_{2.5} in the AQMR and the non-AQMR of Jeonbuk, Jeonnam, and Chungnam, Korea, and the number of confirmed COVID-19 cases nationwide from 2019 to 2020.

대기관리권역(Non-AQMR)은 무주군과 장수군의 총 2개 측정소의 월평균 농도를 의미한다. 행정구역 상 인근 지역인 전남의 경우 목포시 용당동 등 총 43개 대기측정소에서 그리고 충남의 경우 천안시 성황동 등 총 39개 대기측정소에서 측정된 월평균 농도를 의미한다.

전북지역 내 대기관리권역(AQMR)과 비대기관리권역(Non-AQMR)에서의 PM_{2.5} 농도 분포를 살펴보면, 전주시 등 대기관리권역(AQMR)이 무주군과 장수군의 비대기관리권역에 비해 상대적으로 높은 농도를 보이며, 전체적으로 비슷한 시계열 농도 변화를 나타내었다. 대기관리권역(AQMR)의 경우 충남지역과 유사한 시계열 농도 변화를 보인 반면, 비대기관리권역(non-AQMR)의 경우 전남지역과 유사한 시계열 농도 변화를 나타내었다.

표 2는 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 대기관리권역(AQMR)과 비대기관리권역(Non-AQMR)에서의 PM_{2.5} 평균농도와 그 감소율을 나타낸 것이다. 더불어, 2019년과 2020년 3월을 기준으로 PM_{2.5} 평균농도와 그 감소율에 대해서도 제시하였다. 여기에서 2020년 3월의 경우 COVID-19 팬데믹 발생으로 인해 정부에서 외출 및 이동을 제한했던 직후의 시점에 해당한다고 볼 수 있다.

COVID-19 발생 전인 2019년의 연평균 PM_{2.5} 농도는 대기관리권역(AQMR)이 29.1 µg/m³였으며, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 21.5 µg/m³로 나타났다. 한편 COVID-19 팬데믹 기간인 2020년의 연평균 PM_{2.5} 농도는 대기관리권역(AQMR)이 21.2 µg/m³였으며, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 17.9 µg/m³로 나타났다. COVID-19 발생 전인 2019년도에

비해 팬데믹 기간인 2020년의 PM_{2.5} 농도 감소율은 대기관리권역(AQMR)에서 26.9%인 반면, 비대기관리권역(Non-AQMR)에서는 16.7%로 나타나, 대기관리권역에서 상대적으로 높은 저감률을 보였다. 이는 일반적으로 알려진 바와 같이, PM_{2.5}의 인위적 발생원인 자동차, 공장, 각종 산업시설 등이 상대적으로 도시 지역에 많이 분포해 있는 상황에서, 정부의 COVID-19 방역을 위한 외출 및 이동제한 등의 각종 규제에 의한 결과로 사료된다. 팬데믹 기간 중 외출 및 이동을 제한했던 직후의 2020년 3월 기준 PM_{2.5} 평균농도는 대기관리권역(AQMR)이 22.9 µg/m³였으며, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 20.3 µg/m³로 나타났다. 이러한 농도는 COVID-19 발생 전인 2019년 3월의 49.6 µg/m³와 38.5 µg/m³에 비해, 대기관리권역(AQMR)과 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 각각 53.9%와 47.3% 수준으로 감소하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이, 인간활동의 제한이 교통량 감소와 산업활동 규모 축소로 이어지고, 이로 인해 PM_{2.5} 발생의 주요 원인인 화석에너지 사용량이 줄어들어 대기질이 개선된 결과로 볼 수 있다. 이러한 측면에서 예상치 못했던 COVID-19 팬데믹은 인간활동의 제한이 대기오염물질을 줄이는 데 효과적이라는 것을 보여주었다. 팬데믹 기간 동안의 이러한 사례는 PM_{2.5}를 포함한 대기오염물질의 저감대책을 마련할 때 실질적인 참고 자료가 될 수 있다. 따라서, 팬데믹 기간 동안의 대기질 관련 데이터 분석은 매우 중요한 의미를 가지며, 이를 활용할 경우 향후 대기오염 저감정책을 더 효과적으로 설계할 수 있을 것이다.

한편, 국내의 COVID-19에 따른 이동제한 등의 요인이 2020년 2월 23일에 시행되었는데, 그 이전의 두

Table 2. Variations in the concentration of PM_{2.5} and its reduction rate (%) in the AQMR and the non-AQMR of Jeonbuk, Korea, before (2019) and during (2020) the COVID-19 pandemic.

Region	PM _{2.5} (µg/m ³)		Reduction rate (%)	PM _{2.5} (µg/m ³)		Reduction rate (%)
	Before COVID-19	During COVID-19		Mar. 2019	Mar. 2020	
AQMR	29.06	21.23	26.93	49.63	22.89	53.89
Non-AQMR	21.54	17.95	16.69	38.53	20.31	47.28

달간 즉, 1월과 2월의 $PM_{2.5}$ 농도는 2019년의 같은 기간보다 큰 폭으로 낮아졌다. 이는 COVID-19 확진자가 최초로 보고된 중국 후베이성 우한시가 2020년 1월 23일 오전 10시를 기해 한시적 봉쇄령(lockdown)을 내렸으며, 그 이후 중국의 다른 대도시들도 이동제한 조치를 취하면서 중국 내 $PM_{2.5}$ 발생량이 줄었기 때문으로 보인다. 이로 인해 국내로 유입되는 $PM_{2.5}$ 양이 감소한 것으로 볼 수 있다.

3.2 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 $PM_{2.5}$ 의 호흡기계 침착량

COVID-19에 의한 인간활동의 제한은 $PM_{2.5}$ 농도를 현저하게 감소시키는 결과로 이어졌다. 따라서, 본 연구에서는 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 $PM_{2.5}$ 의 호흡기계(폐포간질, alveolar-interstitial (AI)) 침착량을 산정한 후 그 결과에 따른 건강위해성 저감(건강수명 연장) 효과를 이론적으로 평가하였다.

표 3은 COVID-19 발생 전인 2019년 기준 연간 $PM_{2.5}$ 의 AI 침착량 산정에 필요한 정보와 산출 결과를 나타낸 것이다. 침착량 산정에는 Yamada *et al.* (2007)에 의해 보고된 남녀 성별 및 4가지 행동패턴에 따른 호흡률(R_{bre} , m^3/h) (표 3과 4)을 적용하였다. 이는 앞서 마스크의 $PM_{2.5}$ 차단 효율 평가를 위해 표 1에 제시한 성인 기준치의 분당 호흡수 및 회당 호흡량으로부터

계산되는 결과와 다소 상이하지만, 보다 구체적인 행동패턴에 따른 호흡률의 상세한 자료를 의미한다.

표 3의 산출 결과에 따르면 전북지역 대기관리권역(AQMR)에서는 남성이 46.84 mg, 여성이 31.90 mg인 반면, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 남성이 72.20 mg, 여성이 54.70 mg으로 나타났다.

표 4는 COVID-19 팬데믹 기간 중이었던 2020년 기준 연간 $PM_{2.5}$ 의 AI 침착량 산정에 필요한 정보와 산출 결과를 나타낸 것이다. 이 기간에 전북지역 대기관리권역(AQMR)의 남녀 사무직 근로자는 사무실 내 근무 및 휴식(sitting/rest), 실내에서의 보행 등 가벼운 활동(light activity), 실외에서의 운동(heavy activity)에서 모두 마스크를 착용한 상태로 가정하였다.

COVID-19 팬데믹 기간 중 $PM_{2.5}$ 의 AI 침착량은 전북지역 대기관리권역(AQMR)에서는 남성이 15.98 mg, 여성이 9.62 mg인 반면, 비대기관리권역(Non-AQMR)에서는 남성이 30.37 mg, 여성이 22.33 mg으로 나타났다. 또한, COVID-19 팬데믹 기간 중 비대기관리권역(Non-AQMR)에서는 농경 등 주간활동(light activity)의 11.5시간 중 1시간은 쇼핑 등 실내활동을 가정하여 마스크를 착용한 것으로 가정한 후 침착량을 구하였다.

그림 4는 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 동안 지역별 및 성별에 있어서 각각의 행동패턴에 따른

Table 3. Annual $PM_{2.5}$ deposition (mg) in the AI region for the male and female in the AQMR and the non-AQMR of Jeonbuk before COVID-19.

Region	Behavioral patterns	T_{exp} (h/day)	$C_{PM_{2.5}}$ ($\mu g/m^3$)	$R_{I/O}$	$F_{dep, in AI}$		R_{bre} (m^3/h)		$Dep. PM_{2.5}$ (mg/year)	
					Male	Female	Male	Female	Male	Female
AQMR	Sleep	8	29.06	0.66	0.412	0.356	0.360	0.252	8.31	5.02
	Sitting/Rest	14	29.06	0.66	0.452	0.365	0.432	0.307	19.14	10.98
	Light activity	1	29.06	0.66	0.530	0.504	1.200	0.984	4.45	3.47
	Heavy activity	1	29.06	-	0.587	0.550	2.400	2.130	14.94	12.43
	Sum of year								46.84	31.90
Non-AQMR	Sleep	8	21.23	0.66	0.412	0.356	0.360	0.252	6.07	3.67
	Sitting/Rest	4	21.23	0.66	0.452	0.365	0.432	0.307	3.99	2.29
	Light activity	11.5	21.23	-	0.530	0.504	1.200	0.984	56.68	44.19
	Heavy activity	0.5	21.23	-	0.587	0.550	2.400	2.130	5.46	4.54
	Sum of year								72.20	54.70

Table 4. Annual PM_{2.5} deposition (mg) in the AI region of the male and female in the AQMR and the non-AQMR of Jeonbuk during the COVID-19 pandemic.

Region	Behavioral patterns	T_{exp} (h/day)	$C_{PM_{2.5}}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	$R_{I/O}$	$1-E_{mask-block}$	$F_{dep.in AI}$		$R_{bre.}$ (m^3/h)		$Dep. PM_{2.5}$ (mg/year)	
						Male	Female	Male	Female	Male	Female
AQMR	Sleep	8	21.54	0.66	-	0.412	0.356	0.360	0.252	6.16	3.72
	Sitting/Rest	14.5	21.54	0.66	0.36	0.452	0.365	0.432	0.307	5.29	3.04
	Light activity	0.5	21.54	0.66	0.36	0.530	0.504	1.200	0.984	1.65	0.46
	Heavy activity	1	21.54	-	0.26	0.587	0.550	2.400	2.130	2.88	2.39
	Sum of year									15.98	9.62
Non-AQMR	Sleep	8	17.95	0.66	-	0.412	0.356	0.360	0.252	5.13	3.10
	Sitting/Rest	4	17.95	0.66	-	0.452	0.365	0.432	0.307	3.38	1.94
	Light activity	11.5	17.95	-	0.36	0.530	0.504	1.200	0.984	17.25	13.45
	Heavy activity	0.5	17.95	-	-	0.587	0.550	2.400	2.130	4.62	3.84
	Sum of year									30.37	22.33

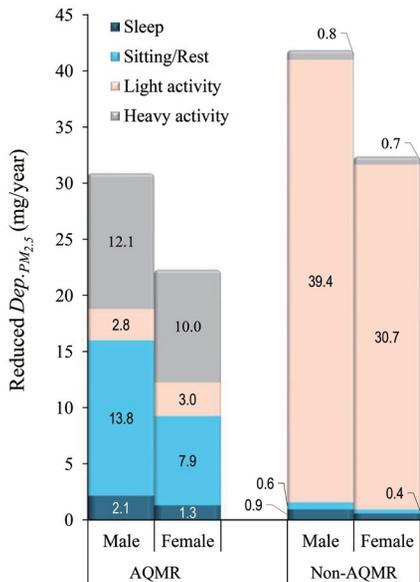


Fig. 4. The reduced annual $Dep_{PM_{2.5}}$ (mg/year) in the AI region for the male and female in the AQMR and the non-AQMR of Jeonbuk during the COVID-19 pandemic.

연간 PM_{2.5}의 AI 침착 저감량(mg/year)을 나타낸 것이다.

여기에서, 대기관리권역(AQMR)에서는 남녀 모두 사무실 내 근무 및 휴식(sitting/rest)과 실외에서의 운동(heavy activity) 시에 PM_{2.5}의 AI 침착량이 많이 저감된 것으로 나타났다. 이는 우선적으로 COVID-19

발생 전에 비해 팬데믹 기간 중에는 여러 가지 규제로 인해 PM_{2.5} 농도가 낮아졌고, 또한 팬데믹 기간 동안 마스크 착용 때문이라고 할 수 있다. 한편, 단 한 시간의 마스크 착용상태에서의 조깅 등 옥외운동(heavy activity) 시간에도 저감량이 높게 산출된 것은 앞서 표 1에서 언급한 바와 같이 운동 시의 호흡량 및 호흡수의 증가와 마스크의 PM_{2.5} 차단 효과가 74% 이상으로 다른 호흡패턴에 비해 높기 때문으로 사료된다.

전북지역 비대기관리권역(Non-AQMR)에서는 남녀 모두 농경 등 주간활동(light activity)이 전체 저감량의 94%를 차지하였다. 이는 COVID-19 팬데믹 기간 중 PM_{2.5} 농도가 저감되었다는 사실에 더해, 지역 특성상 농경활동에 할애한 시간이 길었던 점을 들 수 있다.

한편, 앞서 COVID-19 팬데믹 기간 중 PM_{2.5} 농도 저감률(%) (표 2)의 경우 대기관리권역(AQMR)이 비대기관리권역(Non-AQMR)보다 높게 나타난 것과는 대조적으로, PM_{2.5}의 AI 침착량은 비대기관리권역(Non-AQMR)이 대기관리권역(AQMR)에 비해 높게 나타났다. 이는 대기관리권역(AQMR)과 비대기관리권역(Non-AQMR)에서 가정된 하루 중 행동패턴과 그에 따른 호흡량($R_{bre.}$, m^3/h) 및 AI 침착률($F_{dep.in AI}$)의 차이 때문으로 사료된다.

3.3 PM_{2.5}의 AI 침착량 저감에 따른 호흡계 염증 지연 효과 평가

COVID-19는 사람들의 일상생활에 큰 불편함을 야기시켰지만, 한편으로는 각종 규제 및 마스크의 착용에 따른 PM_{2.5} 농도 및 호흡기계 침착량 저감이라는 긍정적인 효과 또한 유발시켰다. 이로 인해 저감된 PM_{2.5}의 호흡기계 침착량은 사람들의 건강위해성 개선에 어느 정도 기여하였는지 정량적으로 평가할 필요가 있다. 이에 대한 평가는 포스트 COVID-19의 대기오염물질 저감정책 및 관련법 제정, 그리고 일상생활에 있어서 선택적 마스크 착용의 활성화에 큰 의미를 부여할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 PM_{2.5}의 AI 침착량 저감에 따른 알레르기성 호흡기계 염증(Allergic airway inflammation, AAI)의 지연일수를 이론적으로 평가하였다. 우선, Balakrishnan and Jacob (2016)에 의해 수행된 실험용 쥐의 AAI 연구에서 실험용 쥐의 체중 1 kg당 AAI 유발 PM_{2.5} 노출량(Dose)이 1.58 mg/kg인 것을 확인하였다. 이 실험용 쥐에 대한 AAI의 Dose를 사람에 대한 노출량으로 변환하기 위해 다음의 식(Balakrishnan and Jacob, 2016)을 이용하였다.

$$Dose_{PM_{2.5}Human} (mg/kg) = Dose_{Mouse} (mg/kg) \times R_{Km}$$

여기에서, $R_{Km} = \frac{K_m Mouse}{K_m Human}$ 이고, $K_m Mouse$ 와 $K_m Human$ 은 다음 식으로 구하였다.

$$K_m = \frac{Weight (kg)}{BSA(m^2)}$$

여기에서, BSA (Body Surface Area)는 일반적으로 신

체의 총 외부 표면적(m²)을 추정하기 위해 의료 분야에서 사용되는 신체계측 정보로 DuBois and DuBois (1916)가 제안한 다음 식을 이용하였다.

$$BSA (m^2) = 0.007184 \times Weight^{0.425} \times Height^{0.725}$$

위 식에서 한국 성인의 체중은 남성 71 kg, 여성 56.8 kg을 그리고 신장은 남성 177.2 cm, 여성 158.8 cm를 각각 대입하였다(KATS, 2015). 한편, 실험용 쥐의 표준체중과 BSA는 Balakrishnan and Jacob (2016)이 제시한 0.02 kg과 0.007 m²를 이용하였다. 그리고, 한국인 성인 남녀의 AAI 유발 PM_{2.5} 노출량(Dose) (AAI dose_{PM_{2.5}}(mg))은 다음 식을 이용해 산출하였다.

$$AAI dose_{PM_{2.5}Human} (mg) = Dose_{PM_{2.5}} (mg/kg) \times Weight (kg)$$

최종적으로 AAI를 유발시키는 데 소요되는 일수(Day to AAI dose_{PM_{2.5}})를 다음의 식으로 구하였다.

$$Day to AAI dose_{PM_{2.5}} = \frac{AAI dose_{PM_{2.5}}}{Day dose_{PM_{2.5}}}$$

표 5는 전북의 대기관리권역(AQMR)과 비대기관리권역(Non-AQMR)에서 성인 남녀를 대상으로 한 COVID-19 발생 전과 팬데믹 기간 중 PM_{2.5} 농도 변화에 따른 하루 동안 PM_{2.5}의 AI 침착량(Day dose_{PM_{2.5}}(μg/day))과 AAI 유발 PM_{2.5} 노출량(Dose) (AAI dose_{PM_{2.5}}(μg))을 나타낸 것이다. 또한, AAI dose_{PM_{2.5}}(μg)를 Day dose_{PM_{2.5}}(μg/day)로 나눔으로써, COVID-19 발생 전후에 AAI를 유발시키는 데 걸리는 일수(Days to AAI)를 구할 수 있었고, 그 일수의 차를 계산하여 최종적으로 AAI 지연일수(Days of delayed AAI)를 산출하였다.

Table 5. Number of days to cause AAI due to PM_{2.5} exposure before and after the COVID-19, and days of delayed AAI.

Region	Sex	Day dose _{PM_{2.5}} (μg/day)		R _{Km}	Weight (kg)	AAI dose _{PM_{2.5}} (μg)	Days to AAI		Days of delayed AAI
		Before COVID-19	During COVID-19				Before COVID-19	During COVID-19	
AQMR	Male	128.33	43.77	0.076	71.0	8525.7	66	195	129
	Female	87.41	26.35	0.080	56.8	7179.5	82	272	190
Non-AQMR	Male	197.80	83.22	0.076	71.0	8525.7	43	102	59
	Female	149.85	61.18	0.080	56.8	7179.5	48	117	69

산출 결과 AAI 지연일수는 대기관리권역(AQMR)의 경우 남성 129일간, 여성 190일간이었으며, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 남성 59일간, 여성 69일간으로 추정되었다. 두 지역 모두 남성보다 여성에서 AAI 지연일수가 길게 나타났다. 이는 비록 AAI $dose_{PM_{2.5}}$ (μg)의 경우 여성(7179.5 μg)이 남성(8525.7 μg)보다 낮지만, 표 4와 5에 나타낸 바와 같이, 남성에 비해 여성이 상대적으로 호흡량(R_{bre} , m^3/h)과 AI 침착률($F_{dep.in AI}$)이 낮고, 그 결과로 $Day\ dose_{PM_{2.5}}$ ($\mu\text{g}/\text{day}$) 또한 적게 나타났기 때문으로 보인다. 지역별로는 대기관리권역(AQMR)이 비대기관리권역(Non-AQMR)에 비해 남녀 모두 AAI 지연일수가 긴 것으로 나타났다. 이는 COVID-19 발생 전에 비해 팬데믹 기간 중 $Day\ dose_{PM_{2.5}}$ ($\mu\text{g}/\text{day}$)의 저감률과 AAI 지연일수가 비례관계에 있기 때문이다. 즉, 지연일수가 가장 긴 대기관리권역(AQMR) 여성의 경우 저감률((87.41-26.35)/87.41)의 값이 가장 크고, 지연일수가 가장 짧은 비대기관리권역(Non-AQMR) 남성의 경우 저감률((197.8-83.22)/197.8)의 값이 가장 낮기 때문이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대기관리권역 중에서 중부권에 속하며 전국적으로 PM_{2.5} 농도가 높은 전라북도 지역을 대상으로, COVID-19 팬데믹에 따른 PM_{2.5} 농도 개선과 마스크의 의무 착용에 따른 건강위해성 저감에 대해 실험적 및 이론적으로 평가하였다.

마스크의 PM_{2.5} 차단 효과는 호흡패턴에 따라 차이를 보였고, 안정 시 54.7~68.5%, 평상시 56.0~70.0%, 운동 시 67.1~80.6%의 차단 효율을 보였다. COVID-19 발생 전인 2019년도에 비해 팬데믹 기간 중이었던 2020년도에 PM_{2.5} 농도 저감률은 대기관리권역(AQMR)에서 26.9%, 비대기관리권역(Non-AQMR)에서 16.7%로 나타나, 대기관리권역(AQMR)에서 상대적으로 높은 저감률을 보였다. COVID-19 팬데믹 기간인 2020년 기준 연간 PM_{2.5}의 AI 침착량은 대기관리권역(AQMR)에서 남성이 15.98 mg, 여성이 9.62

mg이었으며, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 남성이 30.37 mg, 여성이 22.33 mg으로 나타났다. COVID-19 발생 전후에 AAI 지연일수는 대기관리권역(AQMR)의 경우 남성이 129일간, 여성이 190일간으로 나타났으며, 비대기관리권역(Non-AQMR)의 경우 남성이 59일간, 여성이 69일간으로 추정되었다. 지역적으로는, 대기관리권역(AQMR)이 비대기관리권역(Non-AQMR)에 비해 남녀 모두 AAI 지연일수가 긴 것으로 나타났다. 이것은 COVID-19 팬데믹에 따른 각종 규제 및 마스크의 착용이 PM_{2.5}의 호흡기계 침착량을 줄여 사람들의 건강위해성 개선이라는 긍정적인 효과를 초래하였다는 점을 시사한다. 본 연구 결과는 포스트 COVID-19에 있어서 대기오염물질 저감 정책 및 관련법 제정, 그리고 일상생활에 있어서 선택적 마스크 착용 활성화 및 취약계층에 마스크지원 사업의 필요성에 과학적 근거가 될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 원광보건대학교 교내연구비 지원에 의해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Adrian, M., Aditya, I.D., Munir, M.M. (2023) New approach in evaluating mask filtration efficiency using low-cost PM_{2.5} sensor and mobile mannequin method, Atmospheric Pollution Research, 14(8), 101840. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101840>
- Arunnart, M. (2021) Efficiency of commercial face masks in PM_{2.5} prevention, Ramathibodi Medical Journal, 44(2), 11-17. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/ramajournal/article/view/243402> (accessed on Apr. 23, 2024).
- Balakrishnan, N.A., Jacob, S. (2016) A simple practice guide for dose conversion between animals and human, Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology, 7, 27-31.
- Brauer, M. (2010) How much, how long, what, and where: air pollution exposure assessment for epidemiologic studies of respiratory disease, Proceedings of the American

- Thoracic Society, 7, 111-115.
- Busan Metropolitan City (2024.05.01) Notice No. 2024-135 Effective date of revocation of administrative order. <https://www.busan.go.kr/covid19/Prevention04.do> (accessed on Apr. 23, 2024) (in Korean).
- Choi, D.H., Kang, D.H. (2018) Indoor/outdoor relationships of airborne particles under controlled pressure difference across the building envelope in Korean multifamily apartments, *Sustain*, 10, 1-14.
- Cohen, A.J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., Pope 3rd, C.A., Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., Dingenen, R.V., Donkelaar, A.V., Vos, T., Murray, C.J.L., Forouzanfar, M. (2017) Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, *Lancet*, 389, 1907-1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- DuBois, D., DuBois, E.F. (1916) A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known, *Archives of Internal Medicine*, 17, 863-871.
- Han, S.J., Jang, S.E. (2020) The Impact of COVID-19 on Transportation, *Korean Social Trends 2020*, Korean Statistical Research Institute, No. 11-1240245-000014-10, 289-296.
- Hankyungjae (2020.04.10) 52 Days of struggle... Daegu reports zero COVID-19 cases. <https://www.hankyung.com/society/article/2020041020261> (accessed on Apr. 23, 2024) (in Korean).
- Huang, C., Wang, Y., Li, X., Ren, L., Zhao, J., Hu, Y., Zhang, L., Fan, G., Xu, J., Gu, X., Cheng, Z., Yu, T., Xia, J., Wei, Y., Wu, W., Xie, X., Yin, W., Li, H., Liu, M., Xiao, Y., Gao, H., Guo, L., Xie, J., Wang, G., Jiang, R., Gao, Z., Jin, Q., Wang, J., Cao, B. (2020) Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China, *Lancet*, 395, 497-506. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5)
- Jeonbuk Ilbo (2016.02.19) PM_{2.5} 'Worst in Jeonbuk'. <https://www.jjan.kr/article/20160218574131> (accessed on Apr. 23, 2024) (in Korean).
- Kita, I. (2005) *The mechanism of breathing*, Natsu Co., ISBN 4816 338551 (in Japanese).
- Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2015.12) The final report on the 7th Korean Human Dimension Survey Project. <https://sizekorea.kr/human-info/meas-report?measDegree=8> (accessed on Apr. 23, 2024) (in Korean).
- Löndahl, J., Massling, A., Pagels, J., Swietlicki, E., Vaclavik, E., Loft, S. (2007) Size-resolved respiratory-tract deposition of fine and ultrafine hydrophobic and hygroscopic aerosol particles during rest and exercise, *Inhalation Toxicology*, 19, 109-116.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2020) Airborne nitrogen dioxide plummets over China. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/146362/airborne-nitrogen-dioxide-plummets-over-china> (accessed on Apr. 23, 2024) (in Korean).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Annual report of air quality in Korea, 2019, 161pp.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Annual report of air quality in Korea, 2017. 164pp.
- National Law Information Center (NLIC) (2024) Special Act on Improvement of Air Quality in Air Management Areas. <https://www.law.go.kr/LSW/main.html> (in Korean).
- Ortiz, C., Linares, C., Carmona, R., Diaz, J. (2017) Evaluation of short-term mortality attributable to particulate matter pollution in Spain, *Environmental Pollution*, 224, 541-551.
- Ostro, B., World Health Organization (2004) Outdoor air pollution: Assessing the environmental burden of disease at national and local levels, *Environmental Burden of Disease Series*, 5, 54. <https://iris.who.int/handle/10665/42909>
- Seoul Metropolitan Government (2022.02.15) Notice No. 2022-67. <https://news.seoul.go.kr/welfare/archives/522238> (accessed on Apr. 23, 2024) (in Korean).
- World Health Organization (WHO) (2022.12.19) Ambient (outdoor) air quality and health. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed on Apr. 23, 2024).
- Yamada, Y., Fukutsu, K., Kurihara, O., Momose, T., Miyabe, K., Akashi, M. (2007) Influences of biometrical parameters on aerosol deposition in the ICRP 66 human respiratory tract model: Japanese and Caucasians, *Aarozoru Kenkyu*, 22, 236-243, (in Japanese).
- Yorifuji, T., Kawachi, I., Kanedam, M., Takao, S., Kashima, S., Doi, H. (2011) Diesel vehicle emission and death rates in Tokyo, Japan: a natural experiment, *Science of The Total Environment*, 409(19), 3620-3627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.002>

Authors Information

마창진 (일본 후쿠오카여자대학교 환경과학과 교수)

(ma@fwu.ac.jp)

강공언 (원광보건대학교 보건의료행정과 교수)

(gukang@wu.ac.kr)