

논문

서울 도심에서 2018년부터 2023년까지 1~3월 관측된 핵생성 모드 에어로졸의 뚜렷한 감소

Significant Decrease of Nucleation Mode Particles in Seoul (January~March, 2018~2023)

박은호^{1),*}, 강경식²⁾, 최유진²⁾, 신수현²⁾, 황우진¹⁾, 서지훈³⁾, 김만해¹⁾, 김상우^{1),4)}¹⁾서울대학교 지구환경과학부, ²⁾국립환경과학원 대기환경연구과³⁾전남대학교 환경에너지공학과, ⁴⁾서울대학교 기후대기환경연구소Eunho Park^{1),*}, Kyeong-sik Kang²⁾, Yu Jin Choi²⁾, Su-Hyun Shin²⁾, Woojin Hwang¹⁾, Jihoon Seo³⁾, Manhae Kim¹⁾, Sang-Woo Kim^{1),4)}¹⁾School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea²⁾Atmospheric Environmental Research Department, National Institute of Environmental Research, Incheon, Republic of Korea³⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Republic of Korea⁴⁾Climate and Atmospheric Environment Research Institute, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

접수일 2026년 3월 18일

수정일 2026년 4월 20일

채택일 2026년 5월 6일

Received 18 March 2026

Revised 20 April 2026

Accepted 6 May 2026

*Corresponding author

Tel : +82-(0)2-880-8149

E-mail : peh0508@snu.ac.kr

Abstract Atmospheric nanoparticle concentrations in polluted urban areas are significantly modulated by local emission sources, yet the long-term response of nucleation mode particles to emission reductions remains poorly constrained. Over the past decade, strengthened air quality management policies in South Korea, together with COVID-19 social distancing measures (2020~2021), have contributed to notable improvements in urban air quality. This study investigates changes in aerosol particle number size distributions and new particle formation (NPF) events in Seoul during January~March of 2018~2023, encompassing the COVID-19 social distancing period (2020~2021). The mean total particle number concentration (N_{tot}) for particles in the 10~500 nm diameter range was $8,370 \pm 4,710 \text{ cm}^{-3}$, substantially higher than those at background sites. Nucleation mode (10~25 nm) particles accounted for 18% of the total, indicating a dominant contribution of local traffic emissions. Over the study period, N_{tot} decreased substantially from $10,556 \pm 4,012 \text{ cm}^{-3}$ in 2018~2019 to $7,734 \pm 2,431 \text{ cm}^{-3}$ in 2020~2021, and further to $6,871 \pm 1,882 \text{ cm}^{-3}$ in 2022~2023. The decline was most pronounced for nucleation mode particles, whose fractional contribution decreased from 20% in 2018~2019 to 13% in 2020~2021 and 14% in 2022~2023, corresponding to a reduction of more than 50% in absolute number concentration. Concurrently, the frequency of NPF events decreased from 18% in 2018~2019 to 13% in 2020~2021 and remained at 15% in 2022~2023. These trends in nucleation mode particle concentrations were consistent with concurrent decreases in traffic volume and NO_2 concentrations.

Key words: Particle number size distribution, New particle formation, Nucleation mode particles, traffic emission reduction

1. 서론

핵생성 모드(nucleation mode) 에어로졸은 일반적으로 25 nm 이하의 입경을 가지는 극초미세입자로 정의된다(Kerminen *et al.*, 2018). 이러한 핵생성 모드

에어로졸은 대기 중에서 응축(condensation) 및 응집(coagulation) 과정을 통해 입경이 증가하여 기후학적 측면에서 태양복사를 산란 및 흡수하여 대기의 복사 수지에 영향을 미친다. 또한, 구름 응결핵(cloud condensation nuclei, CCN)으로 작용하여 구름 형성과

강수 과정에도 기여할 수 있다(Ramanathan *et al.*, 2001; Twomey, 1974). 한편, 매우 작은 크기로 인간의 호흡기에 깊숙이 침투하여 폐포에 도달할 수 있으며, 폐포~모세혈관 장벽을 통과하여 혈류를 통해 심혈관계 및 기타 민감한 장기로 이동함으로써 염증 반응 및 세포 손상을 유발한다(Oberdörster *et al.*, 2005).

도심 지역에서는 핵생성 모드 에어로졸의 수농도가 교외 또는 배경 지역에 비해 약 수 배 이상 높은 것으로 보고된다(Kerminen *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2002). 대형 발전소와 같은 대규모 배출원이 제한된 도시에서 핵생성 모드 에어로졸은 승용차, 버스 및 화물차 등 도로 주행 차량에서 직접 배출(direct emission)로 형성될 수 있다(Park *et al.*, 2026; Li *et al.*, 2023). 또한, 도심 지역에서 핵생성 모드 에어로졸은 도로 주행 차량에서 배출되는 기체상 전구물질(질소산화물, 휘발성유기화합물, 황산화물)이 광화학 반응을 통해 입자 생성(new particle formation, NPF)을 일으켜 형성되기도 한다(Brean *et al.*, 2024; Li *et al.*, 2023).

우리나라에서는 2000년대 이후 지속적인 대기오염물질 배출 저감 정책의 시행으로 기체상 오염물질 및 미세먼지의 질량농도가 유의미하게 감소하였다(Kim *et al.*, 2023a; Yeo and Kim, 2022). 특히, 2020년 코로나19 확산에 따른 사회·경제 활동의 위축은 단기간 내 대규모 배출 저감을 유도하여 PM₁₀, CO, NO_x 등의 농도 감소로 이어진 것으로 보고되었다(Kang *et al.*, 2020; Park *et al.*, 2020). 이러한 배출 저감에 따른 대기질 변화와 관련하여, 국외에서는 에어로졸 수농도의 변화에 대한 연구가 활발히 수행되어 왔으며, 특히 도심 지역에서는 도로 주행 차량 배출 저감이 핵생성 모드 에어로졸 수농도 감소의 주요 요인으로 보고되었다(Tang *et al.*, 2025; Eleftheriadis *et al.*, 2021). 국내에서도 배경 지역인 한반도 서해안을 대상으로 수행된 연구에서는 코로나19 봉쇄 기간 동안 입자 수농도 분포의 변화는 제한적이었으나, 입자 생성 현상의 발생 빈도의 감소가 관측되었으며, 이는 대륙으로부터의 유기 전구물질 배출 감소의 영향으로 해석된 바 있다(Park *et al.*, 2023). 하지만, 도로 주

행 차량 배출이 지배적인 도심 환경에서, 배출 저감이 입경별 수농도에 미치는 영향을 평가한 국내 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 서울에 위치한 수도권 대기환경연구소의 최근 6년(2018~2023년) 자료를 활용하여, 코로나19 사회적 거리두기 시행 시기(2020~2021년)를 전후한 기간 동안 핵생성 모드를 중심으로 도심 극초미세먼지의 입경별 수농도 분포 특성 변화를 분석하고, 교통량 및 NO₂ 농도와와의 연관성을 중심으로 그 변화 특성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 관측자료

본 연구에서는 서울시 은평구에 위치한 수도권 대기환경연구소(37.61°N, 126.19°E)에서 2018년부터 2023년까지 1~3월 동안 Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, TSI 3936)를 이용하여 10~500 nm 입경 범위의 1시간 평균 에어로졸 입경별 수농도 자료를 분석하였다. SMPS는 에어로졸 입자를 중성화하여 평형 전하 분포를 갖도록 한 후, 차등이동도분석기(Differential Mobility Analyzer, DMA)를 통해 전기적 이동도에 따라 입자를 분류하고, 응축입자계수기(Condensation Particle Counter, CPC)에서 뷰탄올을 이용하여 입자를 성장시켜 수농도를 측정한다(Hogrefe *et al.*, 2006).

또한 에어로졸 입경별 수농도의 최근 변동 특성과 그 원인을 해석하기 위하여 기체상 전구물질 농도, 교통량 및 기상 자료를 함께 활용하였다. 기체상 전구물질은 수도권 대기환경연구소에서 관측된 1시간 평균 NO₂ 및 SO₂ 농도 자료를 활용하였다. NO₂는 화학발광법을 기반으로 한 Thermo Scientific 42iQTL 분석기로 측정되었으며, SO₂는 자외선 형광법을 적용한 Thermo Scientific 43iQ 분석기를 통해 관측되었다. 기상 자료는 서울 종로구의 종관기상관측소(ASOS)에서 관측된 시간별 지상 풍속 자료를 활용하

였다. 교통량은 서울시 교통정보센터(Transport Operation and Information Service, TOPIS)에서 제공하는 2018년부터 2023년까지의 자료를 활용하였으며, 서울시 내 135개 지점에서 관측된 시간별 교통량 자료를 분석에 사용하였다. 교통량은 루프 검지기, 지자기 검지기 및 영상 검지기를 통해 관측되며, 본 연구에서는 각 지점에서 관측된 시간별 교통량 자료를 기반으로 서울시 전 지점의 평균 교통량을 산출하여 분석하였다(Seoul Metropolitan Government, 2024).

본 연구의 연구 기간인 1~3월은 대기경계층 높이가 상대적으로 낮고, 종관적으로 정제된 대기 조건이 빈번하게 나타나 경계층 내 난류 혼합이 약화되며 에어로졸의 확산이 제한된다(Kim *et al.*, 2023b). 또한 이 시기에는 시베리아 고기압이 한반도로 빈번하게 확장하면서 자유대류권에서 하강한 건조하고 차가운 공기의 영향을 받는다. 이로 인해 응축 손실(condensation sink)이 낮아지는 조건이 형성되어 다른 계절에 비하여 입자 생성이 빈번하게 발생한다(Park *et al.*, 2025). 따라서 본 연구에서는 도로 주행 차량 배출의 영향과 입자 생성 현상을 함께 분석하기 위해 연구 기간을 1~3월로 한정하였다.

2.2 입자 생성 현상의 판별 및 응축 손실 계산

입자 생성 현상은 SMPS로 관측된 입경별 입자 수농도 분포를 이용하여 Maso *et al.* (2005)에서 제시한 방법에 따라 판별하였다. 핵생성 모드(10~25 nm)에 에어로졸 수농도가 뚜렷하게 증가하여 핵생성 모드 입경대에서 최빈직경(modal diameter)이 형성되고, 이후 시간에 따라 최빈직경이 증가하는 사례를 입자 생성으로 정의하였다. 단, 도로 주행 차량 배출에 의해 나타나는 단기간 극초미세입자 증가와 입자 생성 현상을 구분하기 위해 입자 성장의 지속 시간과 발생 시간대를 함께 고려하였다. 교통 기원의 극초미세입자는 배출 직후 급격히 증가한 후 희석 및 응집에 의해 빠르게 감소하는 반면, 입자 생성은 일정 시간 이상 지속적인 입경 성장을 동반하는 특성을 보인다(Hussein *et al.*, 2004; Kulmala *et al.*, 2004). 이에 따라

최소 3시간 이상 연속적인 입자 성장이 관측되는 경우를 입자 생성 이벤트로 정의하였다(Maso *et al.*, 2005; Hofman *et al.*, 2016). 입자 생성이 광화학 반응에 의해 주로 낮 시간대에 발생하는 특성을 고려하여 10시부터 17시 사이의 입경 증가를 분석 대상으로 설정하였으며, 이와 함께 출퇴근 시간대 교통 배출에 의한 단기적 입자 증가의 영향을 최소화하고자 하였다. 또한 하루 중 3시간 이상의 결측 또는 비정상 데이터가 존재하는 경우에는 입자 생성 여부를 신뢰성 있게 판단하기 어렵기 때문에 해당 일자를 분석에서 제외하였다(Hussein *et al.*, 2008).

응축 손실률(Condensation Sink; CS)은 황산 및 저휘발성 유기화합물과 같은 기체상 전구물질이 기존 에어로졸 입자 표면에 응축되어 제거되는 속도를 나타낸다. 본 연구에서는 Pirjola *et al.* (1999)의 계산식을 기반으로 각 입경 구간(size bin)에서의 응축 속도에 해당 입자의 수농도를 적용한 이후, 전체 입경 범위에 대하여 적분하여 응축 손실률을 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 입경별 수농도 특성

그림 1은 2018년부터 2023년까지 1~3월 동안 국내 관측 지점별 총 입자 수농도(10~500 nm)와 더불어 핵생성 모드(nucleation mode, 10~25 nm), 에이트킨 모드(Aitken mode, 25~100 nm) 및 축적 모드(accumulation mode, 100~500 nm) 에어로졸이 총 입자 수농도에서 차지하는 기여율을 나타낸 것이다. 서울의 평균 총 수농도는 $8,370 \pm 4,710 \text{ cm}^{-3}$ 로, 배경 지역인 안면도($4,435 \pm 2,013 \text{ cm}^{-3}$)와 백령도($2,362 \pm 1,243 \text{ cm}^{-3}$)에 비해 높은 수준을 보였다.

핵생성 모드의 총 입자 수농도에 대한 기여율은 서울이 18%로 안면도(12%)와 백령도(10%)보다 상대적으로 높게 나타났다. 이는 중국 베이징에서 보고된 연평균 약 28%와 중국의 해안 도시인 샤먼에서 장기 관측된 20~33%보다는 낮은 기여도이다(Li *et al.*,

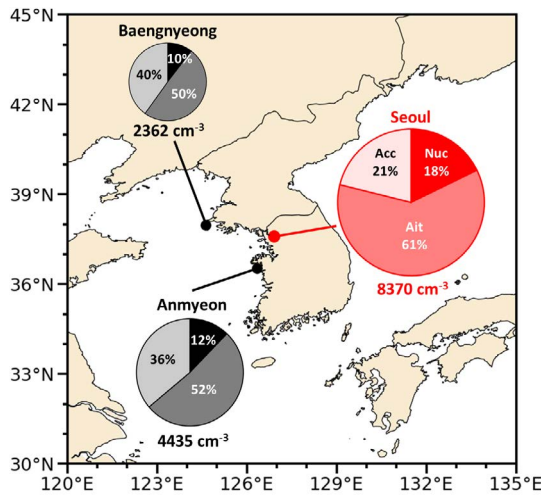


Fig. 1. Total particle number concentration and the fractions of nucleation (Nuc, dark), Aitken (Ait, medium), and accumulation (Acc, light) modes at Baengnyeong, Anmyeon, and Seoul from January to March, 2018~2023. The size of each pie chart represents the mean total particle number concentration, and the values below the pies indicate the corresponding mean values. Data for the Anmyeon station are taken from Park *et al.* (2025).

2026; Wu *et al.*, 2008). 서울을 비롯한 도심 지역에서는 배경 지역에 비해 잔존(pre-existing) 에어로졸 농도가 높아 응축 손실이 크게 작용하여 입자 생성 현상의 발생 빈도는 낮은 경향을 보인다(Bousiotis *et al.*, 2019). 그러나 도심에서는 도로 주행 차량으로부터 휘발성 유기화합물을 비롯한 전구물질이 배출됨에 따라, 입자 생성이 발생하는 경우 더 높은 입자 성장률(growth rate)과 함께 더 높은 입자 생존율(survival rate)이 나타나, 입자 생성 기원 핵생성 모드 에어로졸의 수농도가 상대적으로 높게 나타난다(Brean *et al.*, 2024). 또한, 도심 지역에서는 핵생성 모드 에어로졸이 도로 주행 차량과 같은 국지적 오염원에 의해 직접 배출되기 때문에, 결과적으로 배경 지역에 비해 더 높은 핵생성 모드 에어로졸 농도가 나타난다(Park *et al.*, 2026). 반면 축적 모드의 기여율은 서울이 21%로 배경 지역인 안면도(36%)와 백령도(40%)보다 낮게 나타났다. 이는 국지적 오염원의 영향을 받는 서울과 달리, 배경 지역에서는 장거리 이동 과정에서

대기 중 노화(aging) 및 성장한 입자의 축적 모드 기여도가 상대적으로 증가하기 때문이다(Park *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2016).

3.2 핵생성 모드 에어로졸의 감소

서울에서 관측된 총 입자 수농도의 일변화 특성을 코로나19 사회적 거리두기 시행 시기(2020~2021년)를 기준으로 이전 2년(2018~2019년)과 이후 2년(2022~2023년)으로 구분하여 그림 2(a)에 나타내었다. 총 입자 수농도는 7~10시와 19~21시에 상대적으로 높은 값을 보였으며, 이는 출퇴근 시간대 도로 주행 차량 배출 오염원 증가와 낮은 행성경계층 높이로 인해 대기 혼합이 제한되면서 에어로졸이 지표 부근에 축적되었기 때문이다(Du *et al.*, 2022; Park *et al.*, 2015). 반면, 광화학 반응에 의해 입자 생성과 성장이 활발하게 나타나는 12~15시에는 출퇴근 시간대보다 상대적으로 낮은 총 입자 수농도가 관측되었는데, 이는 본 연구가 수행된 1~3월 기간의 계절적 특성에 의한 것이다. 겨울철에는 입자 생성 현상의 관측 빈도는 높으나, 다른 계절에 비해 태양복사가 약하고 일조 시간이 짧아 광화학 반응이 제한되므로 입자 생성 및 성장 과정 강도는 상대적으로 낮게 나타난다(Park *et al.*, 2025).

일평균 총 입자 수농도는 2018~2019년($10,556 \pm 4,012 \text{ cm}^{-3}$)에 비해 2020~2021년($7,734 \pm 2,431 \text{ cm}^{-3}$)과 2022~2023년($6,871 \pm 1,882 \text{ cm}^{-3}$)에 27%와 35% 감소하였다($p < 0.001$, 그림 2(a)). 시간대별로는 2020~2021년과 2022~2023년 기간의 총 입자 수농도는 2018~2019년에 비해 도로 주행 차량 배출의 영향이 큰 시간대(7~10시, 19~21시)에 약 28~39% 감소하였으며, 광화학 반응에 의해 입자 생성이 활발한 시간대(12~15시)에서도 약 22~35% 감소하여 일평균 감소율과 유사한 수준을 보였다. 이는 차량 배출에 의한 직접 배출 에어로졸과 광화학 반응을 통해 생성된 2차 에어로졸이 모두 감소하였음을 의미하며, 전반적인 대기 환경 변화가 입자 수농도 감소에 영향을 미쳤음을 시사한다.

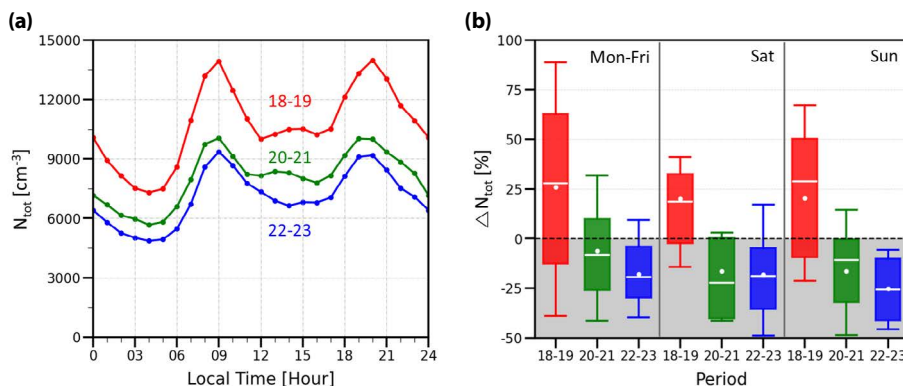


Fig. 2. (a) Diurnal variation of total particle number concentration and (b) daily mean total number concentration for week-days (Mon~Fri; left), Saturday (middle), and Sunday (right) in Seoul during 2018~2019 (red), 2020~2021 (green), and 2022~2023 (blue). Values are expressed as relative difference from the mean particle number concentration in Seoul from January to March, 2018~2023. In panel (b), the box-whisker plots indicate the 25th and 75th percentiles (boxes), 5th and 95th percentiles (whiskers), mean values (dots), and median values (horizontal lines within the boxes). The dashed horizontal line at 0% corresponds to the mean particle number concentration in Seoul during January~March 2018~2023.

도심 지역은 주중에는 출퇴근 중심, 주말에는 여가 및 외출 중심의 교통 패턴을 보이며, 이에 따라 주요 에어로졸 배출원인 도로 교통량은 요일에 따라 상이한 특성을 나타낸다(Seoul Metropolitan Government, 2024). 한편, 코로나19 기간 동안 여가 및 외출 활동이 감소한 것으로 변화가 보고되었으며(Park *et al.*, 2021b), 이러한 변화는 주말 교통량 감소에 상대적으로 더 큰 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 이에 따라 총 입자 수농도의 기간별 변화를 전체 연구 기간(2018~2023년) 평균 수농도 대비 상대 변화율로 산정하여 주중, 토요일, 그리고 일요일로 구분하여 분석하였다(그림 2(b)). 연구 기간 동안 평균 총 입자 수농도는 주중($8,607 \pm 3,466 \text{ cm}^{-3}$)이 토요일($8,142 \pm 3,055 \text{ cm}^{-3}$)과 일요일($7,867 \pm 2,938 \text{ cm}^{-3}$)보다 전반적으로 높게 나타났으나, 요일 간 차이가 유의하지는 않았다(그림 S1, $p > 0.05$). 반면 기간별 변화를 살펴보면, 2020~2021년과 2022~2023년의 총 입자 수농도는 2018~2019년에 비해 요일과 관계없이 약 42~53% 이상 감소한 것으로 나타나, 요일별 교통 패턴의 차이가 존재했음에도 불구하고 총 입자 수농도는 특정 요일에 국한되지 않고 전반적으로 감소하는 경향으로 나타났다.

선행연구에 따르면, 2018~2019년에는 평년에 비해 상대적으로 정체된 대기 조건이 보고된 바 있으며, 이에 따라 에어로졸 축적에 유리한 기상 환경이 형성되어 2020~2021년과 2022~2023년에 비해 높은 에어로졸 수농도에 기여했을 가능성이 있다(Koo *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2020). 또한, 2020~2021년 기간은 코로나19 확산에 따른 사회적 거리두기가 시행되면서 도로 주행 차량으로부터의 배출량이 감소하였고, 이는 입자 수농도 감소에 영향을 미친 것으로 사료된다(Hwang and Lee, 2022; Eleftheriadis *et al.*, 2021). 이후 사회적 거리두기 정책이 완화된 2022~2023년에도 장기적인 대기오염 저감 정책의 영향으로 도로 주행 차량으로부터의 배출이 지속적으로 감소함에 따라(Kang *et al.*, 2024), 총 입자 수농도는 2018~2019년에 비해 낮은 수준으로 유지된 것으로 보이며, 이에 대한 보다 상세한 논의는 3.3절에서 다루었다.

그림 3은 입자 수농도의 입경분포와 핵생성 모드, 에이트킨 모드 및 축적 모드 수농도의 기간별(2018~2019년, 2020~2021년 및 2022~2023년) 변화를 나타낸다. 각 기간의 평균 입경분포로부터 산출된 최빈직경은 2018~2019년(32.2 nm)에 비해 2020~2021년(37.6 nm)과 2022~2023년(35.6 nm)에서 상대적으로

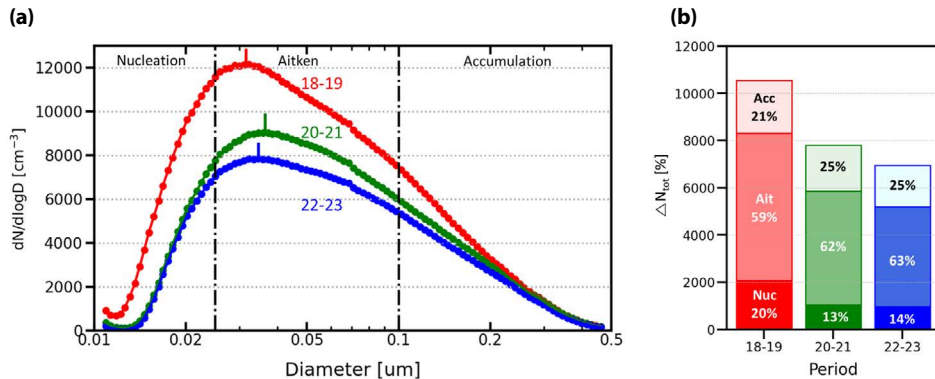


Fig. 3. (a) Mean particle number size distributions with modal diameters and (b) fraction of nucleation mode (Nuc), Aitken mode (Ait), and accumulation mode (Acc) for 2018~2019 (red), 2020~2021 (green), and 2022~2023 (blue).

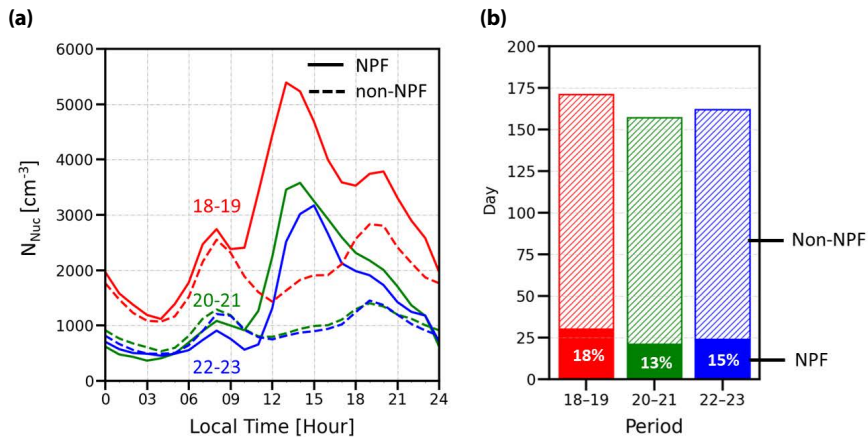


Fig. 4. (a) Diurnal variation of number concentration of nucleation mode particles on NPF event days (solid line) and non-NPF event days (dashed line). (b) NPF (filled bars) and non-NPF (hatched bars) event days from January to March of 2018~2019 (red), 2020~2021 (green), and 2022~2023 (blue).

큰 값을 보였으며, 이는 작은 입자의 상대적 기여가 감소하고 큰 입자의 비중이 증가했음을 나타낸다(그림 3(a)). 특히, 핵생성 모드의 입자 수농도는 2018~2019년($2,070 \pm 906 \text{ cm}^{-3}$)에 비해 2020~2021년($1,034 \pm 401 \text{ cm}^{-3}$) 및 2022~2023년($948 \pm 365 \text{ cm}^{-3}$)에서 각각 약 50%와 54% 감소하여 다른 입경대에 비해 뚜렷한 감소를 보였다(그림 3(b)). 이는 도심에서 핵생성 모드 에어로졸이 도로 교통 배출 및 관련 전구물질로부터 주로 생성된다는 점을 고려하면, 2020~2021년과 2022~2023년의 도로 교통 배출 저감의 영향이 핵

생성 모드에 뚜렷하게 작용했기 때문으로 사료된다(Eleftheriadis *et al.*, 2021).

핵생성 모드 에어로졸의 수농도는 입자 생성 현상의 관측 여부와 관계없이, 2018~2019년에 비해 2020~2021년과 2022~2023년 기간에서 낮게 나타났다(그림 4(a)). 하지만, 모든 기간에서 입자 생성 현상이 관측된 날($1,911 \pm 1,261 \text{ cm}^{-3}$)은 관측되지 않은 날($1,248 \pm 570 \text{ cm}^{-3}$)에 비해 핵생성 모드 에어로졸의 수농도가 높게 나타났다($p < 0.001$). 일변화 패턴을 비교하면, 입자 생성 현상이 관측된 날과 관측되지

얇은 날 모두에서 0~9시까지의 핵생성 모드 입자 수 농도가 유사한 수준을 보였다. 그러나 입자 생성 현상이 관측된 날은 관측되지 않은 날과 달리 태양 일사가 증가하며 광화학 반응에 의해 입자 생성이 활발해지는 9~10시 이후에 핵생성 모드 에어로졸의 수 농도가 뚜렷하게 증가하여 12~15시에 하루 중 최대값을 나타냈다. 이는 도심의 핵생성 모드 에어로졸 형성에 도로 주행 차량의 직접 배출뿐만 아니라, 기체상 전구물질의 광화학 반응에 따른 입자 생성도 관여함을 시사한다(Brean *et al.*, 2024; Kulmala *et al.*, 2004).

입자 생성 현상이 관측된 날은 전체 관측일 415일 중 총 75일(15%)이었다(그림 4(b)). 기간별로 보면, 입자 생성 현상의 발생 빈도(전체 관측일 대비 입자 생성 관측일)는 2018~2019년 18%에서 2020~2021년 13%로 감소하였으며, 2022~2023년에는 15%로 증가하였으나 여전히 2018~2019년에 비해 낮게 나타났다. 2018~2019년은 평년에 비해 정체된 대기 조건으로 인해 잔존 에어로졸(pre-existing aerosol)의 농도가 상대적으로 높게 나타났으며(Shin *et al.*, 2021; Koo *et al.*, 2020), 이에 따라 응축 손실은 2018~2019년($34.9 \times 10^{-3} \pm 11.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)이 2020~2021년($29.5 \times 10^{-3} \pm 9.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)과 2022~2023년($26.3 \times 10^{-3} \pm 8.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)에 비해 높게 나타났다(표 1). 반면, 입자 생성 초기 단계에서 핵생성을 유도하는 주요 전구물질인 SO_2 의 농도는 2020년 이후 크게 감소하여 2018~2019년 $4.9 \pm 1.4 \text{ ppb}$ 에서 2020~2021년 $3.2 \pm 0.7 \text{ ppb}$, 2022~2023년 $3.0 \pm 0.9 \text{ ppb}$ 로 유의하게 낮아졌다. 또한 같은 기간 질산 형성을 통해 입자 생성 및 성장에 기여하는 전구물질인 NO_2 농도 역시 2018~2019년 $36.4 \pm 20.5 \text{ ppb}$ 에서 2020~2021년 $28.0 \pm 15.1 \text{ ppb}$, 2022~2023년 $29.7 \pm 17.5 \text{ ppb}$ 로 유의하게 감소하였다(그림 5(a)). 이에 따라 2020~2021년과 2022~2023년 기간에는 2018~2019년에 비해 응축 손실이 낮았음에도 불구하고, SO_2 와 NO_2 농도의 감소에 따른 황산 및 질산 생성 저하로 인해 입자 생성 및 성장 과정이 제한되었을 가능성이 있다(Park, 2023; Kanawade *et al.*, 2022).

Table 1. Daily mean condensation sink (CS) and concentration of SO_2 from January to March of 2018~2019, 2020~2021, and 2022~2023.

	2018~2019	2020~2021	2022~2023
CS [$\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$]	34.9 ± 11.2	29.5 ± 9.2	26.3 ± 8.0
SO_2 [ppb]	4.9 ± 1.4	3.2 ± 0.7	3.0 ± 0.9

3.3 입자 수농도 감소의 잠재적 원인

연구 기간 동안 나타난 총 입자 수농도 및 핵생성 모드 입자의 감소 경향은 기상조건의 변화와 함께 도로 주행 차량으로부터의 배출 저감이 복합적으로 작용한 결과로 사료된다. 서울의 평균 풍속은 2018~2019년($1.95 \pm 1.09 \text{ m s}^{-1}$)에 비해 2020~2021년($2.41 \pm 1.26 \text{ m s}^{-1}$)과 2022~2023년($2.39 \pm 1.14 \text{ m s}^{-1}$)에서 유의하게 높게 나타났다($p < 0.05$). 그림 S2에 제시된 바와 같이, 지상 풍속이 증가함에 따라 핵생성 모드 에어로졸 수농도는 감소하는 경향을 보였으며, 평균 풍속이 1 m s^{-1} 이하인 날에는 약 $1,834 \text{ cm}^{-3}$ 의 높은 수농도를 보인 반면, 4 m s^{-1} 이상인 날에는 약 800 cm^{-3} 수준으로 감소하였다. 이는 풍속 증가에 따른 대기 혼합 및 확산과 함께 전구물질의 희석 및 공기 체류시간 감소가 총 입자 수농도 및 핵생성 모드 입자의 농도 감소에 영향을 미쳤을 가능성을 나타낸다.

NO_2 는 도심 지역에서 도로 주행 차량 배출의 지표(proxy)로 활용되며, 교통 배출이 지배적인 환경에서는 핵생성 모드 입자를 포함한 초미세 입자 농도와 함께 변화하는 특성을 보인다(Beckerman *et al.*, 2008). 본 연구에서도 NO_2 농도는 2018~2019년에 비해 2020~2021년과 2022~2023년에 각각 약 23%와 18% 감소하였으며(그림 5(a)), 서울 25개 구의 도시 대기측정망에서도 각각 약 12%와 19% 감소하여 일관된 경향을 보였다.

이와 같은 NO_2 농도의 감소는 도로 교통량 감소와 더불어 장기적인 배출 저감 정책의 영향을 반영한 것으로 해석될 수 있다. 2020~2021년에는 코로나19 확산에 따른 사회적 거리두기와 이동 제한으로 도로 교통량이 2018~2019년 대비 약 6% 감소하였으며, 이후

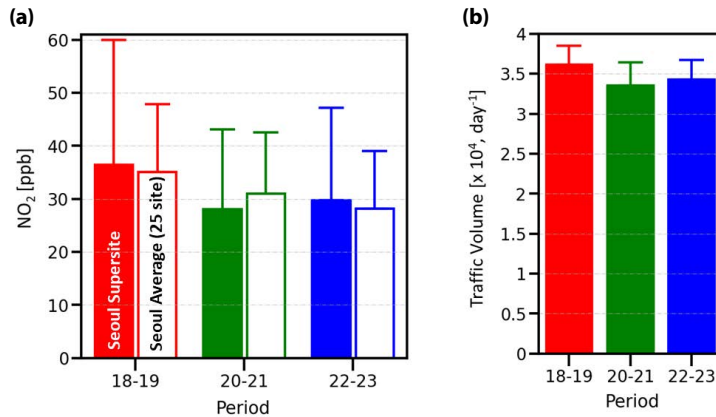


Fig. 5. (a) Daily mean NO₂ concentrations at Seoul Supersite (Seoul Metropolitan Air Quality Research Center) and the mean across 25 urban air monitoring stations in Seoul from Airkorea. (b) Daily total traffic volume of all traffic monitoring sites in Seoul. The data are shown for January to March of 2018~2019 (red), 2020~2021 (green), and 2022~2023 (blue). Error bars represent the standard deviation of daily mean NO₂ concentrations and daily total traffic volume for each period.

사회적 거리두기가 완화된 2022~2023년에도 재택근무 확산 및 통근 패턴 변화와 같은 구조적 요인으로 인해 교통량이 약 5% 감소된 수준에 머물렀다(그림 5(b); Lee *et al.*, 2024; Hwang and Lee, 2022). 또한, 디젤 차량 규제 정책과 전기차와 같은 무공해 차량의 보급 확대에 따른 차량 구성의 변화 역시 배출 저감에 기여했을 가능성이 있다(Park *et al.*, 2024; Choi *et al.*, 2021). 도심에서 핵생성 모드 에어로졸이 도로 교통 배출 및 관련 전구물질로부터 주로 생성된다는 점을 고려할 때(Li *et al.*, 2023; Eleftheriadis *et al.*, 2021), 이와 같은 배출 저감이 사회적 거리두기 조치 이후인 2022~2023년에도 핵생성 모드 수농도가 코로나19 사회적 거리두기 기간(2020~2021년)과 비교하여 유의한 증가 없이 유지되는 데 기여한 것으로 사료된다.

이에 따라, 핵생성 모드 에어로졸의 총 입자 수농도 대비 기여율은 2018~2019년 20%에서 2020~2021년 13%, 2022~2023년 14%로 감소하였다(그림 3b). 반면, 같은 기간 동안 에이트킨 모드와 축적 모드의 입자 수농도 감소율은 각각 12~23%에 그쳐 총 입자 수농도에서의 기여율은 오히려 증가하였다. 이러한 결과는 배출 저감 및 기상학적 요인이 입자 수농도에 미치는 영향이 입경에 따른 차이를 보이며, 특히 핵

생성 모드에서 더 뚜렷하게 반응하는 비선형적 특징을 시사한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 서울에 위치한 수도권 대기환경연구소의 최근 6년(2018~2023년) 관측자료를 활용하여, 코로나19 사회적 거리두기 시행 시기(2020~2021년)를 전후한 기간의 입경별 수농도의 변화를 핵생성 모드를 중심으로 분석하였다. 연구 기간 동안 서울의 총 입자 수농도는 $8,370 \pm 4,710 \text{ cm}^{-3}$ 로 배경 지역(안면도, 백령도)보다 높았으며, 핵생성 모드 에어로졸의 총 입자 수농도에 대한 기여율(18%) 또한 배경 지역보다 높게 나타났다. 이는 도로 주행 차량으로부터 기인한 핵생성 모드 에어로졸의 직접 배출과 기체상 전구물질로부터의 입자 생성 현상의 영향을 반영한다.

일평균 총 입자 수농도는 2018~2019년($10,556 \pm 4,012 \text{ cm}^{-3}$)에 비해 2020~2021년($7,734 \pm 2,431 \text{ cm}^{-3}$)과 2022~2023년($6,871 \pm 1,882 \text{ cm}^{-3}$)에 유의하게 감소하였다. 특히, 핵생성 모드의 입자 수농도는 2018~

2019년 ($2,070 \pm 906 \text{ cm}^{-3}$)에 비해 2020~2021년 ($1,034 \pm 401 \text{ cm}^{-3}$)과 2022~2023년 ($948 \pm 365 \text{ cm}^{-3}$)에서 각각 약 50%와 54% 감소하였다. 또한, 같은 기간 입자 생성 현상의 발생 빈도는 2020~2021년 13%, 2022~2023년에는 15%로 나타나 2018~2019년(18%)에 비해 낮게 나타났다.

코로나19 확산에 따른 사회적 거리두기와 이동 제한의 영향으로 2020~2021년 도로 교통량이 감소하였으며, 이후 재택근무 확산과 통근 패턴 변화 등 이동 형태의 구조적 변화로 인해 2022~2023년에도 교통량은 2018~2019년 수준으로 회복되지 않았다. 이와 더불어 장기적인 배출 저감 및 제어 정책은 도로 주행 차량에서 직접 배출되는 핵생성 모드 에어로졸뿐 아니라 NO_2 와 같은 입자 생성 전구물질의 배출 감소에도 기여한 것으로 보인다. NO_2 감소는 입자 성장에 기여하는 응축성 물질의 공급을 저해하여 입자 생성의 발생 빈도와 핵생성 모드 에어로졸의 수농도를 감소시킨 것으로 사료된다. 이에 따라 총 입자 수농도에 대한 핵생성 모드의 기여율은 2018~2019년 20%에서 2020~2021년 13%, 2022~2023년에는 14%로 낮아졌으며, 이는 에이트킨 모드와 축적 모드의 상대적 기여율이 증가한 것과 대조적인 경향을 나타낸다.

본 연구에서는 코로나19 확산에 따른 사회적 거리두기 시행 시기에 극초미세먼지의 입자 수농도가 유의하게 감소하였음을 정량적으로 확인하였으며, 이후 사회적 거리두기 완화 이후에도 총 입자 수농도가 코로나19 이전 수준으로 회복되지 않고 거리두기 시행 시기와 비교하여 유의한 차이 없이 유지됨을 확인하였다. 그러나 이러한 감소는 주로 핵생성 모드 입자를 중심으로 나타났으며, 질량 농도에 크게 기여하고 대기 중 체류시간이 길어 시정에 가장 큰 영향을 미치는 축적 모드 입자는 상대적으로 감소 폭이 제한적으로 나타났다. 이에 따라 향후 대기질 개선을 위해서는 축적 모드 입자를 포함한 다양한 입경 범위를 고려한 지속적인 배출 저감 노력이 필요하며, 특히 2차 생성에 관여하는 전구물질의 관리가 중요할 수 있음을 시사한다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원에서 주최한 제4회 대학(원)생 미세먼지연구아이디어공모전으로 수행되었습니다(NIER-2025-04-02-007).

References

- Beckerman, B., Jerrett, M., Brook, J.R., Verma, D.K., Arain, M.A., Finkelstein, M.M. (2008) Correlation of nitrogen dioxide with other traffic pollutants near a major expressway, *Atmospheric Environment*, 42(2), 275-290. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.09.042>
- Bousiotis, D., Dall'Osto, M., Beddows, D.C.S., Pope, F.D., Harrison, R.M. (2019) Analysis of new particle formation (NPF) events at nearby rural, urban background and urban roadside sites, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(8), 5679-5694. <https://doi.org/10.5194/acp-19-5679-2019>
- Brean, J., Rowell, A., Beddows, D.C.S., Weinhold, K., Mettke, P., Merkel, M., Tuch, T., Rissanen, M., Maso, M.D., Kumar, A., Barua, S., Iyer, S., Karppinen, A., Wiedensohler, A., Shi, Z., Harrison, R.M. (2024) Road Traffic Emissions Lead to Much Enhanced New Particle Formation through Increased Growth Rates, *Environmental Science & Technology*, 58(24), 10664-10674. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10526>
- Choi, H., Koo, Y. (2021) Effectiveness of battery electric vehicle promotion on particulate matter emissions reduction, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93, 102758. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102758>
- Du, W., Wang, W., Liu, R., Wang, Y., Zhang, Y., Zhao, J., Dada, L., Xie, C., Wang, Q., Xu, W., Zhou, W., Zhang, F., Li, Z., Fu, P., Li, J., Kangasluoma, J., Wang, Z., Ge, M., Kulmala, M., Sun, Y. (2022) Insights into vertical differences of particle number size distributions in winter in Beijing, China, *Science of The Total Environment*, 802, 149695. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149695>
- Eleftheriadis, K., Gini, M.I., Diapouli, E., Vratolis, S., Vasilatou, V., Fetfatzis, P., Manousakas, M.I. (2021) Aerosol microphysics and chemistry reveal the COVID19 lockdown impact on urban air quality, *Scientific Reports*, 11(1), 14477. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93650-6>

- Hofman, J., Staelens, J., Cordell, R., Stroobants, C., Zikova, N., Hama, S.M.L., Wyche, K.P., Kos, G.P.A., Van Der Zee, S., Smallbone, K.L., Weijers, E.P., Monks, P.S., Roekens, E. (2016) Ultrafine particles in four European urban environments: Results from a new continuous long-term monitoring network, *Atmospheric Environment*, 136, 68-81. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.010>
- Hogrefe, O., Lala, G.G., Frank, B.P., Schwab, J.J., Demerjian, K.L. (2006) Field Evaluation of a TSI Model 3034 Scanning Mobility Particle Sizer in New York City: Winter 2004 Intensive Campaign, *Aerosol Science and Technology*, 40(10), 753-762. <https://doi.org/10.1080/02786820600721846>
- Hussein, T., Puustinen, A., Aalto, P.P., Mäkelä, J.M., Hameri, K., Kulmala, M. (2004) Urban aerosol number size distributions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 4(2), 391-411. <https://doi.org/10.5194/acp-4-391-2004>
- Hussein, T., Martikainen, J., Junninen, H., Sogacheva, L., Wagner, R., Maso, M.D., Riipinen, I., Aalto, P.P., Kulmala, M. (2008) Observation of regional new particle formation in the urban atmosphere, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 60(4), 509-521. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2008.00365.x>
- Hwang, H., Lee, J.Y. (2022) Impacts of COVID-19 on Air Quality through Traffic Reduction, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031718>
- Kanawade, V.P., Sebastian, M., Dasari, P. (2022) Reduction in Anthropogenic Emissions Suppressed New Particle Formation and Growth: Insights From the COVID-19 Lockdown, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(2), e2021JD035392. <https://doi.org/10.1029/2021JD035392>
- Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) The impacts of COVID-19, meteorology, and emission control policies on PM_{2.5} drops in Northeast Asia, *Scientific Reports*, 10(1), 22112. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79088-2>
- Kang, Y.-H., Kim, E., Jung, S., Park, J., Son, C., Kim, S. (2024) Analyzing The Main Drivers of Observed PM_{2.5} Concentrations in South Korea during the 1st to 5th Seasonal Particulate Matter Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 40(4), 407-426. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2024.40.4.407>
- Kerminen, V.-M., Chen, X., Vakkari, V., Petaja, T., Kulmala, M., Bianchi, F. (2018) Atmospheric new particle formation and growth: Review of field observations, *Environmental Research Letters*, 13(10), 103003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadf3c>
- Kim, Y., Kim, S.-W., Yoon, S.-C., Park, J.-S., Lim, J.-H., Hong, J., Lim, H.-C., Ryu, J., Lee, C.-K., Heo, B.-H. (2016) Characteristics of formation and growth of atmospheric nanoparticles observed at four regional background sites in Korea, *Atmospheric Research*, 168, 80-91. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.08.020>
- Kim, J., Park, J., Hu, H., Crippa, M., Guizzardi, D., Chatani, S., Kurokawa, J., Morikawa, T., Yeo, S., Jin, H., Woo, J.-H. (2023a) Long-term historical trends in air pollutant emissions in South Korea (2000~2018), *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s44273-023-00013-w>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kang, Y.-H., Kim, H.C., Kim, S. (2023b) Role of vertical advection and diffusion in long-range PM_{2.5} transport in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 320, 120997. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120997>
- Koo, J.-H., Kim, J., Lee, Y.G., Park, S.S., Lee, S., Chong, H., Cho, Y., Kim, J., Choi, K., Lee, T. (2020) The implication of the air quality pattern in South Korea after the COVID-19 outbreak, *Scientific Reports*, 10(1), 22462. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80429-4>
- Kulmala, M., Vehkamäki, H., Petäjä, T., Dal Maso, M., Lauri, A., Kerminen, V.-M., Birmili, W., McMurry, P.H. (2004) Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: A review of observations, *Journal of Aerosol Science*, 35(2), 143-176. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2003.10.003>
- Lee, S., Kim, J., Cho, K. (2024) Temporal dynamics of public transportation ridership in Seoul before, during, and after COVID-19 from urban resilience perspective, *Scientific Reports*, 14(1), 8981. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59323-w>
- Li, L., Li, M., Fan, X., Lin, Z., Hou, A., Wu, X., Zhang, S., Yin, L., Xu, L., Chen, J. (2026) Trends and source contributions of particle number size distribution over 2020~2024 in coastal city of Southeast China, *Npj Clean Air*, 2(1), 25. <https://doi.org/10.1038/s44407-026-00069-2>
- Li, Q.-Q., Guo, Y.-T., Yang, J.-Y., Liang, C.-S. (2023) Review on main sources and impacts of urban ultrafine particles: Traffic emissions, nucleation, and climate modulation, *Atmospheric Environment: X*, 19, 100221. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100221>
- Maso, M.D., Kulmala, M., Riipinen, I., Wagner, R., Hussein, T., Aalto, P.P., Lehtinen, K.E. (2005) Formation and growth

- of fresh atmospheric aerosols: Eight years of aerosol size distribution data from SMEAR II, Hyytiälä, Finland, *Boreal Environment Research*, 10(5), 323-336.
- Oberdörster, G., Oberdörster, E., Oberdörster, J. (2005) Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles, *Environmental Health Perspectives*, 113(7), 823-839. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>
- Park, D., Tarui, N. (2024) The Effect of Diesel Vehicle Regulation on Air Quality in Seoul: Evidence from Seoul's Low Emission Zone, *Sustainability*, 16(21). <https://doi.org/10.3390/su16219573>
- Park, D.H. (2023) Trend analysis of new particle formation and subsequent growth: A regional and global perspective (Doctoral dissertation, Seoul National University).
- Park, D.-H., Kim, J.E., Park, J.-S., Choi, J.-S., Kim, S.-W. (2023) Impacts of the COVID-19 lockdown in China on new particle formation and particle number size distribution in three regional background sites in Asian continental outflow, *Science of The Total Environment*, 858, 159904. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159904>
- Park, D.-H., Laj, P., Andrews, E., Rose, C., Benedetti, A., Kulmala, M., Zabala, I., Ahlberg, E., Alastuey, A., Asmi, E., Bath, O., Chan, T., Choi, J.-S., Collaud Coen, M., Conil, S., Martins Dos Santos, S., Eleftheriadis, K., Fiebig, M., Gini, M.I., Hallar, A.G., Hyvarinen, A.-P., Järvi, L., Kalivitis, N., Keywood, M.D., Kim, J.E., Kim, S., Kontkanen, J., Kouvarakis, G., Kristensson, A., Kuang, C., Lee, M., Lihavainen, H., Lin, Y., Lunder, C., Matsuki, A., Mayol-Bracero, O.L., Merkel, M., Mihalopoulos, N., Myhre, C.L., Park, J.-S., Park, M., Park, R.J., Petaja, T., Putaud, J.-P., Scherwin, A., Sellegri, K., Swietlicki, E., Tuch, T., Tunved, P., Vakkari, V., Villani, P., Vratolis, S., Weinhold, K., Wiedensohler, A., Yoon, Y.J., Yum, S.S., Zdimal, V., Ogren, J.A., Kim, S.-W. (2026) Decrease in Nucleated Particles and Cloud Condensation Nuclei Observed across a Range of Environments, *Environmental Science & Technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c18035>
- Park, E., Han, J., Yoo, H.J., Yang, S.H., Kim, S., Kim, Y.A., Won, D., Kim, M.H., Kim, S.W. (2025) Seasonal Characteristics in Aerosol Number Size Distribution and New Particle Formation (NPF) Observed at Anmyeondo Global Atmosphere Watch (GAW) Station from 2005 to 2024, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 41(3), 502-514. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2025.41.3.502>
- Park, H., Jeong, S., Koo, J.-H., Sim, S., Bae, Y., Kim, Y., Park, C., Bang, J. (2020) Lessons from COVID-19 and Seoul: Effects of Reduced Human Activity from Social Distancing on Urban CO₂ Concentration and Air Quality, *Aerosol and Air Quality Research*, 21(1), 200376. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.07.0376>
- Park, J.-U., Kim, H.-J., Choi, J., Park, J.-S., Heo, J., Kim, S.-W. (2021a). Observation of aerosol size distribution and new particle formation under different air masses arriving at the northwesternmost South Korean island in the Yellow Sea, *Atmospheric Research*, 255, 105537. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105537>
- Park, K.-H., Kim, A.-R., Yang, M.-A., Lim, S.-J., Park, J.-H. (2021b) Impact of the COVID-19 pandemic on the lifestyle, mental health, and quality of life of adults in South Korea, *PLOS ONE*, 16(2), e0247970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247970>
- Park, M., Yum, S.S., Kim, J.H. (2015) Characteristics of submicron aerosol number size distribution and new particle formation events measured in Seoul, Korea, during 2004~2012. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 51(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13143-014-0055-0>
- Pirjola, L., Kulmala, M., Wilck, M., Bischoff, A., Stratmann, F., Otto, E. (1999) Formation of Sulphuric Acid Aerosols and Cloud Condensation Nuclei: an Expression For Significant Nucleation and Model Comparison, *Journal of Aerosol Science*, 30(8), 1079-1094. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(98\)00776-9](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(98)00776-9)
- Ramanathan, V., Crutzen, P.J., Kiehl, J.T., Rosenfeld, D. (2001) Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle, *Science*, 294(5549), 2119-2124. <https://doi.org/10.1126/science.1064034>
- Seoul Metropolitan Government (2024) 2023 Seoul Traffic Volume Survey Data. https://topis.seoul.go.kr/refRoom/openRefRoom_2.do
- Shin, U., Park, S.-H., Park, J.-S., Koo, J.-H., Yoo, C., Kim, S., Lee, J. (2021) Predictability of PM_{2.5} in Seoul based on atmospheric blocking forecasts using the NCEP global forecast system, *Atmospheric Environment*, 246, 118141. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118141>
- Tang, L., Feng, Z., Shang, D., Zeng, L., Wu, Z., Wang, H., Chen, S., Li, X., Zeng, L., Hu, J., Hu, M. (2025) Ongoing uncoordinated anthropogenic emission abatement promotes atmospheric new particle growth in a Chinese megacity, *Nature Communications*, 16(1), 6720. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-62011-6>
- Twomey, S. (1974) Pollution and the planetary albedo, *Atmospheric Environment* (1967), 8(12), 1251-1256. [https://doi.org/10.1016/0048-9522\(74\)90001-1](https://doi.org/10.1016/0048-9522(74)90001-1)

doi.org/10.1016/0004-6981(74)90004-3

- Wu, Z., Hu, M., Lin, P., Liu, S., Wehner, B., Wiedensohler, A. (2008) Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China, *Atmospheric Environment*, 42(34), 7967-7980. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.06.022>
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2022) Long-term trends and affecting factors in the concentrations of criteria air pollutants in South Korea, *Journal of Environmental Management*, 317, 115458. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115458>
- Zhu, Y., Hinds, W.C., Kim, S., Sioutas, C. (2002) Concentration and Size Distribution of Ultrafine Particles Near a Major Highway, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 52(9), 1032-1042. <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470842>

Authors Information

- 박은호 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(peh0508@snu.ac.kr)
- 강경식 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구사)
(kskang0677@korea.kr)
- 최유진 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(yjchoi0112@korea.kr)
- 신수현 (국립환경과학원 대기환경연구과 연구원)
(ssh755@korea.kr)
- 황우진 (서울대학교 지구환경과학부 박사과정)
(woohi2000@snu.ac.kr)
- 서지훈 (전남대학교 환경에너지공학과 조교수)
(jihoonseo@jnu.ac.kr)
- 김만해 (서울대학교 지구환경과학부 선임연구원)
(manhae@snu.ac.kr)
- 김상우 (서울대학교 지구환경과학부 교수)
(sangwookim@snu.ac.kr)

Supplementary Materials

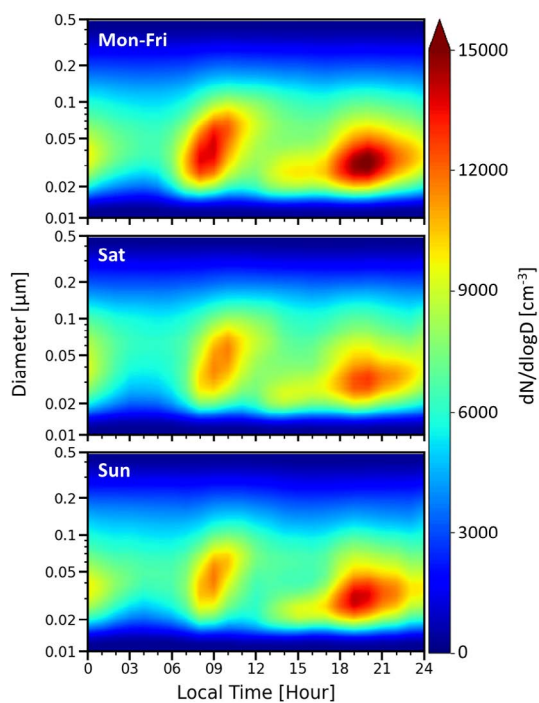


Fig. S1. Diurnal variations of particle number concentration in Seoul on weekdays (Mon~Fri), Saturdays (Sat), and Sundays (Sun) from January to March, 2018~2023.

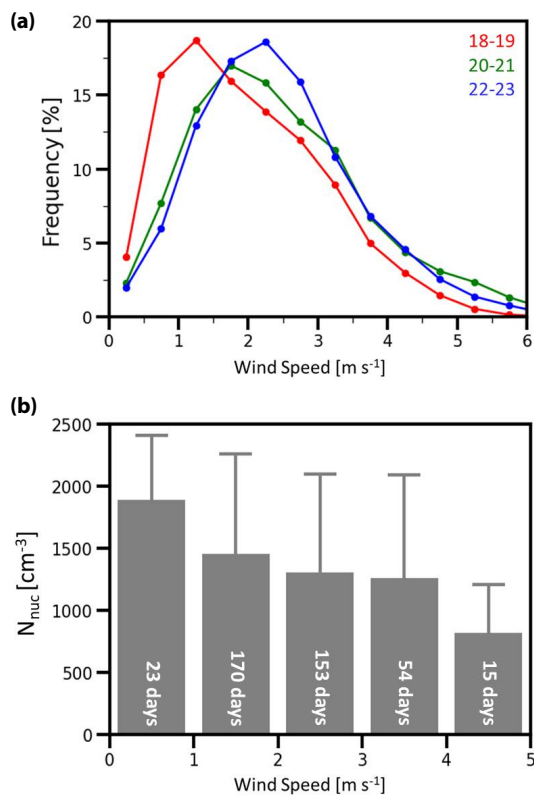


Fig. S2. (a) Frequency distributions of 10 m hourly wind speed measured at the Seoul station for 2018~2019 (red), 2020~2021 (green), and 2022~2023 (blue). (b) Nucleation mode aerosol number concentration as a function of daily mean wind speed, with the number of days in each wind speed bin. Error bars represent one standard deviation