

논문

다양한 요리활동으로 배출된 실내 나노미세먼지(UFP)의 특성과 인체 노출 영향

Characterization of Indoor Ultrafine Particles from Various Cooking Activities and Their Respiratory Deposition Potential

서성민, 최원식*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

Seongmin Seo, Wonsik Choi*

Major of Environmental Atmospheric Sciences, Division of Earth and Environmental System Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2025년 7월 23일
수정일 2025년 8월 12일
채택일 2025년 8월 13일

Received 23 July 2025
Revised 12 August 2025
Accepted 13 August 2025

*Corresponding author
Tel : +82-(0)51-629-6640
E-mail : wschoi@pknu.ac.kr

Abstract Ultrafine particles (UFP) in urban environments are typically attributed to fossil-fuel combustion, with most studies focusing on roadway emissions. However, indoor emissions from cooking activities remain insufficiently characterized. This study examined indoor UFP exposure in 13 restaurants with varying cooking methods by measuring particle number concentrations (PNC) and mean particle diameter. On average, indoor PNCs were 16.1 and 7.0 times higher than those in background and adjacent outdoor areas, respectively, while mean particle diameters were smaller. Indoor PNCs often approached or exceeded levels observed on major roadways with high heavy-duty diesel traffic. Closing windows or doors increased the indoor-outdoor PNC difference by a factor of 2.6 and raised the I/O ratio similarly, highlighting the importance of adequate ventilation. A simplified respiratory deposition model estimated that 54.8% of inhaled indoor UFPs were deposited in the human respiratory tract—higher than background (45.2%) and outdoor (50.3%) levels. The alveolar deposition fraction averaged 39.4%, comparable to levels in major roadways (42.8%). These findings suggest that long-term exposure to cooking-related UFPs in poorly ventilated environments may pose significant health risks and underscore the need for further characterization of their physical and chemical properties.

Key words: Cooking emissions, Ultrafine particles, Particle number concentration, UFP exposure, Respiratory deposition

1. 서론

Ultrafine particles (UFP)는 공기역학적 직경이 100 nm 이하인 입자상 물질을 의미한다(Seinfeld and Pandis, 2016). 최근 미세먼지에 대한 관심 증가와 건강에 미치는 영향 및 배출원에 따른 배출 특성에 대한 과학적 지식의 축적에 따라 대기 중 입자상 물질의 크기 구분이 PM_{2.5} (공기역학적 직경 2.5 μm 이하)보다 작은 크기로 세분화되고 있으나, 한국에서는 아직 UFP에 대한 공식 용어가 없어 본 연구에서는 Choi and

Kim (2018)의 용어를 차용하여 나노미세먼지로 표기하고자 한다(Lee and Choi, 2023). 나노미세먼지는 도시에서는 대기 중 입자 수 농도의 90% 이상까지 차지하지만, 크기가 매우 작아 질량농도에 대한 기여도는 크지 않기 때문에(Kumar *et al.*, 2014; Harrison *et al.*, 2011; Morawska *et al.*, 2008) 이에 대한 농도를 질량농도보다는 수 농도(PNC; Particle Number Concentration)로 표현한다. 나노미세먼지는 도심지역에서는 주로 화석연료와 생물연소(biomass burning 및 cooking 등을 포함) 등의 연소과정에서 배출된다(Kumar *et*

al., 2014). 대기로부터 배출된 나노미세먼지는 결집 (coagulation), 응결 (condensation), 증발 (evaporation), 건조 침적 (dry deposition), 등의 여러 역학적 과정을 빠르게 거치기 때문에 (Choi and Paulson, 2016), 대기 중 수명이 약 1시간 정도로 매우 짧은 것으로 알려져 있다 (Choi, 2021; Capaldo and Pandis, 2001). 특히 나노미세먼지는 입자의 크기가 매우 작아, 인간이 호흡할 때 호흡기관 깊은 곳까지 침투하여 호흡기 질환, 심혈관 질환, DNA 손상, 출산장애 등의 다양한 건강의 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (HEI, 2013; Brook et al., 2010; Hoek et al., 2010; Knol et al., 2009; Møller et al., 2008; Kreyling et al., 2006; Oberdörster et al., 2005). 하지만, 나노미세먼지가 어떠한 과정을 통해 이러한 건강의 악영향을 유발하는지에 대한 세부적인 역학 관계는 아직 명확히 규명되지 않았다 (Choi and Kim, 2018; Brook et al., 2010).

도시지역에서 연료연소 배출원이 없는 실내의 나노미세먼지는 외부의 주변 도로에서 자동차 배출로 발생한 나노미세먼지의 유입이 주요한 발생원이다 (Choi, 2021; Rim et al., 2013). 그러나 요리활동으로 대표될 수 있는 연소와 생물연소가 발생하는 실내 환경에서는 적절한 환기가 이루어지지 않는다면 나노미세먼지 농도가 급격히 증가하고, 이러한 고농도가 장시간 (수 시간 이상) 지속될 수도 있다 (Choi, 2021). 현대 사회에서는 사람들이 하루의 약 87%를 실내에서 보내고 있기 때문에 (Kousa et al., 2002; Klepeis et al., 2001), 실내 대기오염물질 노출이 사람들의 건강에 중요한 악영향을 미칠 수 있다. 또한, 실내에서의 주요한 나노미세먼지 배출원은 요리활동임을 고려하면 요리 활동이 실내 대기질에 미치는 영향에 대한 충분한 연구가 필요하다. 요리활동에 의한 나노미세먼지의 배출 강도는 재료의 종류, 조리방식, 조리 온도 및 스토브의 종류 등에 따라 변동성이 매우 크다 (Kumar et al., 2013; Buonanno et al., 2009). 요리활동에 의해 배출된 나노미세먼지 농도는 외부에서 측정된 PNC보다 15배 가량 높았으며, 이는 환기를 통해 외부로 유출될 때 외부 PNC에 영향을 미칠 수 있을 뿐만 아니라 1분간 가

스 조리 시 발생하는 입자 수가 약 10분간의 흡연 또는 대형 디젤차의 1 m 주행 시 배출 입자 수와 유사하다는 보고가 있다 (Kumar et al., 2013). Buonanno et al. (2009)은 가스 스토브의 조리 온도에 차이를 두어 최대 온도 ($325 \pm 26^\circ\text{C}$)로 조리할 때 최소 온도 ($37 \pm 1^\circ\text{C}$)로 조리할 때보다 최대 PNC가 8.8배 높았고, 전기 스토브로는 최대 온도 ($246 \pm 7^\circ\text{C}$)로 조리 시, 최소 온도 ($178 \pm 10^\circ\text{C}$)보다 3.6배 높았다고 보고하였다. 또한, 이들은 지방질 식재료가 연소될 때는 배출된 입자 중 약 83%가 나노미세먼지로 구성되어 있으며, 최대 PNC는 배경 농도 대비 최대 8.7배까지 증가하였음을 제시하였다 (Buonanno et al., 2009). Xiang et al. (2021)은 주방 창문 개방, 주방 후드 및 공기청정기 사용 등의 환기 조건들이 요리활동으로 인해 배출된 나노미세먼지를 각각 70%, 35%, 그리고 53% 감소시키는 것으로 평가하였다. 그럼에도 불구하고, 이러한 국외 연구는 대부분 제어된 조건에서 수행된 실험이며, 실제 조리가 지속적으로 이루어지는 식당 내에서의 측정은 드물다. 또한, 국내에서는 실내 미세먼지 (PM_{10})와 초미세먼지 ($\text{PM}_{2.5}$)에 관한 연구가 주를 이룬다 (예를 들면, Kim, 2019; Bang et al., 2018; Lee et al., 2018; Lee, 2016; Lee and Lee, 2015). Lee (2016)는 일반 가정집의 주방 후드가 가동되지 않는 환경에서 둔가스 조리 시 (튀김), 재료가 잠길 정도의 식용유 (500 mL)를 사용하였을 때가 (최대 $350 \mu\text{g m}^{-3}$) 재료의 표면이 공기 중에 노출될 정도의 식용유 (50 mL)를 사용하였을 때보다 (최대 $180 \mu\text{g m}^{-3}$) 약 2배 높은 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 발생하였음을 보고하였다. 또한, Lee et al. (2018)은 불포화 지방을 함유하고 있는 재료 (고등어) 조리 시 $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 $3,850 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가한 반면, 포화 지방을 포함하고 있는 재료 (삼겹살) 조리 시에는 $321 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 증가하였음을 보고하였고, 이러한 결과는 불포화지방이 상온에서 액체 상태로 존재해 휘발성이 큰 특성에 기인한 것으로 제시하였다. 그러나, 요리배출에 의한 실내의 나노미세먼지 수 농도에 관한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다.

특히, 요리활동이 지속적으로 이루어지는 식당은

나노미세먼지의 지속적인 배출이 발생할 수 있는 환경이기 때문에 다양한 실내 환경 중에서도 나노미세먼지의 농도가 높을 가능성이 크지만 이에 대한 연구는 많지 않다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 조리방법을 가진 식당 내에서 유형별 특징 및 조리 환경에 따른 나노미세먼지 농도 차이를 분석하고, 외부 대기에서 나노미세먼지의 주요 배출원인 자동차 배출의 영향을 직접적으로 받는 도로에서의 농도 및 평균 크기분포 특성과 비교하였다. 또한 측정된 농도와 입자 평균 크기 결과에 기반하여 인체 호흡기관에 따른 나노미세먼지 침적량을 평가하였다.

2. 방 법

2.1 측정 장소

본 연구에서는 부산광역시에서 식당의 밀집도가 높은 지역에 위치한 13곳의 식당을 대상으로 식당 내부와 외부의 나노미세먼지 농도와 입자 평균 크기를 측정하였다. 일회 측정은 배경지역(국립부경대학교 캠퍼스 내)에서 출발하여 식당가 이면도로, 식당 내부, 식당가 이면도로(대부분 사람이 통행하고 간헐적으로 차량이 통행), 배경지역 순서의 경로를 도보로 이동하면서 진행하였고, 식당 내부에서는 일반적인 식사 시간 동안 머무르며 측정을 진행하였다. 식당 외부의 이면도로와 배경지역 농도 측정은 식당 내부 측정 전과 후에 각각 수행함으로써, 식당 내에서의 측정 기간에 변화할 수 있는 외부 농도의 변동성을 고려하였다. 배경지역 내에서 이동한 경로는 차량 출입이 불가능한 인도이거나 차량 통행이 매우 제한적인 곳으로, 나노미세먼지 배출원이 없는 도심 배경농도 측정에 적합하다. 식당가 인근 외부 구역(이면도로)은 간헐적으로 이동하는 차량과 불규칙적으로 발생하는 담배 연기, 밀집되어 있는 식당으로부터의 잠재적 유출 등이 나노미세먼지 배출원으로 작용할 수 있으나, 주변 공기에 의한 희석과 대기 난류에 의한 확산 등에 의해 배출원의 직접적 영향은 짧은 시간 동안만 유지될 것으로

예상된다. 식당 내부에서는 가스 연료 연소 및 다양한 식재료와 조리법에 의한 나노미세먼지의 배출이 예상되며 환기조건(밀폐 또는 창문과 문에 의한 자연환기)에 따라 실내 나노미세먼지의 농도 변화가 예상된다.

측정은 모두 평일에 수행되었고, 측정 시간은 대부분 저녁 식사 시간(17:30~19:30)이었으며, 일부 점심 식사 시간(11:30~13:30; 총 13회 중 3회)이 포함되었다(표 1). 측정 기기는 측정자의 옆 의자 혹은 테이블 위에 위치하여 호흡이 이루어지는 위치와 유사한 높이에서 측정이 이루어질 수 있도록 하였다. 실내 측정은 일반적인 식사 시간인 약 30분 동안 수행되었다. 또한, 식당 내 측정 기간의 식당 창(문) 개폐 여부와 나노미세먼지가 발생할 수 있는 특이 활동 및 발생 시간 등을 기록하여 이후 해당 요인이 농도 변화에 미친 영향을 평가하는 데 이용하였다.

추가적으로 식당 내부의 농도와 평균 크기를 차량 배출 나노미세먼지의 특성과 비교하기 위하여 부산의 항만 인근과 울산의 산업단지 인근 도로에서 실시한 이동측정 자료를 수집하였다. 부산의 항만 인근 도로에서의 측정 자료는 Lee and Choi (2023)에서 제시한 결과를 사용하였고, 울산에서는 온산국가산업단지 인근 도로에서 Lee and Choi (2023)와 같은 방법으로 측정된 데이터를 활용하였다(personal communication). 본 연구에서는 식당 내부에서의 나노미세먼지 특성에 대한 분석을 주로 다루고 산업단지 인근 도로에서의 나노미세먼지 특성은 단순 비교자료로 활용하였기에 자세한 방법론은 제시하지 않았다. 이에 대한 자세한 측정 방법은 Lee and Choi (2023)에 제시되었다.

2.2 나노미세먼지 측정 기기 및 자료 후처리

본 연구에서는 나노미세먼지의 PNC 및 입자 평균 크기를 측정하기 위하여 DiSCmini (Testo, Germany)를 사용하였다. DiSCmini는 직경 10~700 nm 크기 입자의 PNC와 입자 평균 크기를 측정하는 확산크기분류기(fast diffusion size classifier)로 1초의 시간 해상도 자료를 제공한다. Choi *et al.* (2016)은 실제 대기조건에서 DiSCmini의 입자 평균 크기와 전통적으로 사

Table 1. Measurement date (time), main ingredients, distance from background, mean UFP number concentration and mean particle size under various cooking activity conditions.

Sites	Cooking types	Date (time)	Main ingredients	Distance from background	Mean PNC ¹ (× 10 ⁵ # cm ⁻³)	Mean size (nm)	
Background	-	Entire period	-	-	0.10 ± 0.06	49 ± 10	
Outdoor	-	Entire period	-	-	0.22 ± 0.21	41 ± 9	
In-Restaurant	Grilling	Pan-grilling-1	2024.05.29 (20:38~23:37)	pork, rice	250 m	1.86 ± 2.39	37 ± 6
		Pan-grilling-2	2024.06.04 (17:57~18:50)	pork, rice	205 m	0.65 ± 0.28	36 ± 7
	Boiling	Boiling-1	2024.06.24 (12:02~12:15)	pork, rice, soup	290 m	1.75 ± 0.61	27 ± 7
		Boiling-2	2024.06.25 (18:07~18:34)	pork, rice, soup	230 m	9.24 ± 1.36	43 ± 9
		Boiling-3	2024.07.11 (17:47~18:17)	pork, rice, soup	280 m	1.32 ± 0.22	24 ± 2
		Boiling-4	2024.07.15 (17:57~19:04)	chicken, vegetables, rice, soup	350 m	0.41 ± 0.52	27 ± 8
	Frying	Stir-frying & Deep-frying-1	2024.06.05 (17:44~18:36)	pork, beef, seafood, vegetables, soup	180 m	0.77 ± 0.36	34 ± 3
		Stir-frying & Deep-frying-2	2024.06.11 (18:14~18:49)	pork, beef, seafood, vegetables, soup	260 m	1.00 ± 0.34	54 ± 3
		Stir-frying & Deep-frying-3	2024.06.25 (12:12~12:30)	pork, beef, seafood, vegetables, egg, soup	310 m	0.30 ± 0.05	35 ± 3
		Deep-frying-1	2024.06.26 (12:04~12:36)	pork, crab	60 m	1.38 ± 2.11	43 ± 7
		Deep-frying-2	2024.06.24 (18:26~19:02)	chicken	280 m	0.77 ± 0.30	33 ± 2
	Boiling & Stir-frying	Boiling & Stir-frying-1	2024.07.03 (18:14~18:38)	pork, vegetables, soup	340 m	1.71 ± 1.36	41 ± 7
	Boiling & Stir-frying & Deep-frying	Boiling & Stir-frying & Deep-frying-1	2024.06.10 (18:00~18:00)	pork, fish cake, vegetables, rice, egg, etc.	250 m	0.50 ± 0.20	40 ± 5
		Average	-	-	-	1.54 ± 2.31	36 ± 9

¹PNC: particle number concentrations

용되는 입자 크기분포 측정 장비인 SMPS (scanning mobility particle sizer, TSI)의 평균 크기가 잘 일치함을 제시하였고, PNC는 CPC (condensation particle counter, TSI)의 측정값과 일치함을 제시하였다(Choi *et al.* (2016) SI 2.3와 2.4). DiSCmini는 직경 10~700 nm 입자의 PNC를 측정하지만, 도심지역에서 100 nm 이하의 입자가 전체 PNC의 90% 이상을 차지함을 고려하면(Choi *et al.*, 2016; Harrison *et al.*, 2011), DiSCmini로 측정된 PNC를 UFP의 PNC로 어렵더라도 무리가 없다(Choi, 2021).

측정 시 당시 현장 상황에 따라 DiSCmini에 시료흡입관(1.5 m)을 연결하여 측정하기도 하였고, 흡입관 없이 직접 공기시료가 기기로 유입되도록 설정하기도 하였다. 시료흡입관은 실리콘 튜빙으로 일부의 나노미세먼지가 흡입관을 통과하면서 벽면에 부착되는 wall-loss가 발생하는 것으로 알려져 있다(Choi *et al.*, 2016). 시료 흡입관 장착에 따른 나노미세먼지 PNC 손실량 보정을 위하여 실제 대기조건에서 Choi *et al.* (2016)과 동일한 방법으로 비교측정을 수행하여 시료 흡입관의 wall-loss를 보정하였다. Choi *et al.* (2016)은 공기시료가 흡입관을 통과하면서 PNC의 약 15%가 손실되었음을 제시하였으며, 본 연구의 측정에서도 약 13%의 PNC 손실이 발생하였기 때문에 본 결과에는 이를 보정한 측정값을 제시하였다. 그러나 한 사이클의 측정 경로(배경 - 식당 외부 - 식당 내부 - 식당 외부 - 배경)에서는 시료흡입관 유무에 대한 하나의 설정을 유지하였기 때문에 한 사이클 측정에 대한 외부와 식당 내부의 농도의 차이에는 시료흡입관의 영향이 없었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배출환경별 나노미세먼지 수 농도(PNC)와 입자 크기분포 특성

전반적인 배출환경별 나노미세먼지 PNC의 변동 특성은 한 사이클의 측정 경로 시계열에서 잘 나타난다(그림 1). 배경지역에서의 PNC는 일부 차량이동에 따

른 농도 스파이크를 제외하고는 가장 낮은 농도를 보여주었고, 배경지역을 벗어나 식당가 이면도로에 진입하면서 농도가 증가하였으며, 식당 안에서는 가장 높은 농도 수준을 나타내었다. 이후 식당을 나와 외부 이면도로에서는 농도 감소가 나타났고 배경지역으로 진입하면서 다시 최저 농도가 기록되었다. 입자의 평균 크기는 대부분의 경우에는 PNC의 변동성과 반비례하는 경향을 보였는데(그림 1), 이는 연료연소를 통해 배출되는 나노미세먼지의 크기는 가솔린 엔진의 승용차는 대략 20~60 nm, 디젤 엔진의 대형트럭은 약 20~130 nm 정도에 집중되기 때문이다(Morawska *et al.*, 2008). 배출원의 직접적 영향이 없는 지역에서는 이러한 작은 입자들이 입자역학 과정(dry deposition과 coagulation 등)을 통해 빠르게 제거되기 때문에 평균 크기가 커지는 경향을 보인다(Choi and Paulson, 2016). 그러나 일부 식당에서는 실내의 고농도 환경에서도 외부에 비해 오히려 큰 평균 입경을 기록하기도 하였는데, 이는 연료연소 과정 외에 조리 및 재료 특성에 기인하였을 가능성이 있다. 이에 대한 보다 자세한 논의는 뒤에서 제시하고자 한다.

전체 측정 기간 나노미세먼지 배출원이 없는 부산 도심 배경지역의 PNC는 제한적인 차량통행에 의해 일시적 농도 스파이크가 관측되기는 하였으나 $0.24 \sim 3.50 \times 10^4$ particles cm^{-3} 범위를 보였다(평균 $0.96 \pm 0.56 \times 10^4$ particles cm^{-3}). 식당가 주변 외부에서의 PNC는 $0.29 \sim 15.3 \times 10^4$ particles cm^{-3} 의 범위를 기록하여 배경지역의 농도보다 평균 2.3배 높았다(평균 $2.20 \pm 2.08 \times 10^4$ particles cm^{-3} ; 표 1). 이러한 PNC의 차이는 식당가 이면도로에서의 간헐적인 차량 통행, 불규칙적 담배 연기에의 노출, 개방된 식당으로부터의 나노미세먼지 유출 등의 영향으로 발생한 것으로 판단된다. 식당 내부에서의 PNC는 $1.07 \sim 202 \times 10^4$ particles cm^{-3} 의 범위를 보였고, 평균 $15.4 \pm 23.1 \times 10^4$ particles cm^{-3} 로 도심 배경지역과 식당가 외부의 이면도로에서보다 각각 16.1배와 7.0배 높았고 변동성도 매우 컸다(표 1). 식당 내부는 지속적인 요리활동으로 인한 나노미세먼지 배출이 발생하며, 대기 난류에 의

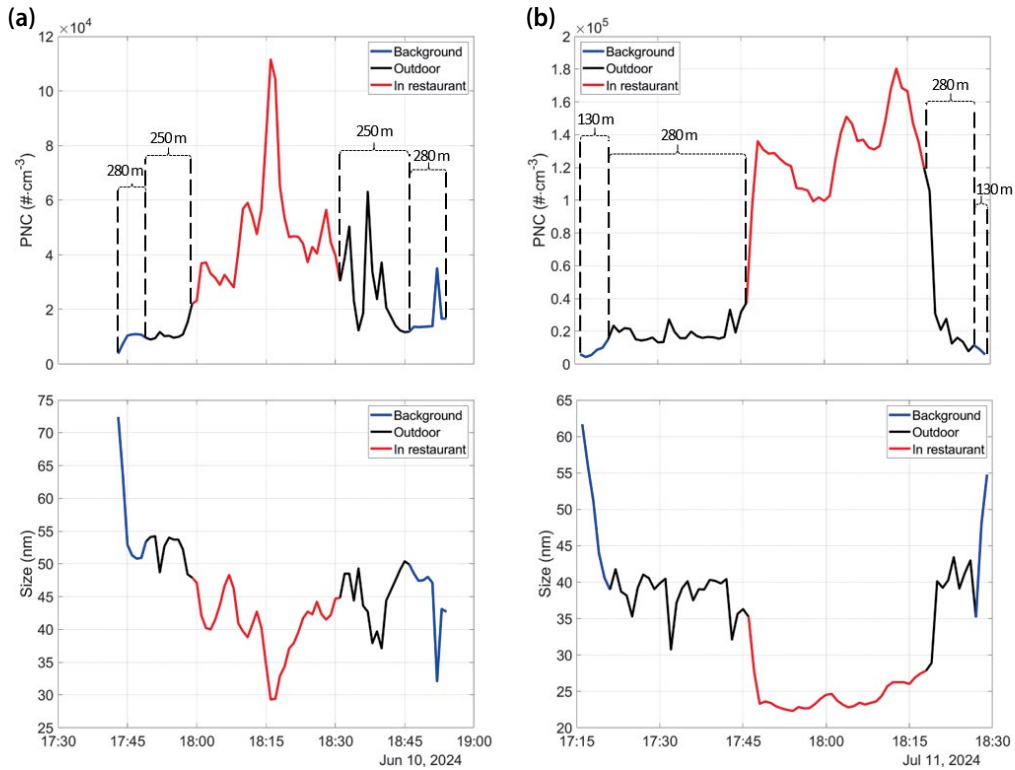


Fig. 1. Examples of time series of particle number concentration (PNC) and mean particle size during one monitoring cycle. The blue line represents background area, the black line represents outdoor restaurant environments, and the red line indicates indoor (in-restaurant) environments. (a) Time series obtained on June 10, 2024 (the restaurant is located ~250 m northeast from the background area); (b) on July 11, 2024 (the restaurant is located ~280 m north from the background area).

한 희석과 확산이 외부에 비해 제한되는 한정된 공간의 환경이므로 배출된 나노미세먼지의 축적이 이러한 두드러진 농도의 증가를 야기한 것으로 보이며, 도시 배경농도와와의 차이는 선행 연구 결과(약 15배; Kumar *et al.*, 2013)와도 유사한 수준이었다.

3.2 조리 특성 및 내부 환경별 실내

나노미세먼지 PNC와 입자 크기분포 특성

모든 측정 대상 식당 내에서의 나노미세먼지 PNC는 정도의 차이는 있으나 식당 외부의 이면도로보다 높은 일관적인 특징을 보였다(그림 2). 식당 내부와 외부에서의 PNC 비율(Indoor/Outdoor (I/O) ratio)은 평균 7.2(±7.3)를 나타내었다(표 2). 고온에서의 지방과 단백질 연소는 높은 나노미세먼지 PNC 배출 강도를

가지는 배출원임을 고려하면(Buonanno *et al.*, 2009), 구이(grilling)가 주요 요리 방식이거나 튀김(frying)이 주요 요리 방식인 식당에서 가장 높은 나노미세먼지 농도를 기록할 것이라고 예상하였으나, 실제 측정 농도는 조리과정 중 토치를 이용하는 DF-1 식당과 BSF-1 식당에서도 유사한 수준을 보였고, 특히 boiling이 주 요리 방식인 식당의 한 곳에서 측정 대상 식당 중에서 가장 높은 농도를 기록하였다(표 1; 그림 2). 이러한 차이는 식당 내에서의 PNC가 조리법에 따른 배출 강도 외에도 환기 환경과 내부 공간의 부피 같은 다양한 환경적 요소에 영향을 받기 때문인 것으로 보인다. 실제로 PNC의 I/O 비율은 문과 창문이 닫힌 식당에서 높은 경향을 나타내었고, B-2 식당을 제외하면 내부 공간의 부피가 클 때 I/O ratio가 작아지

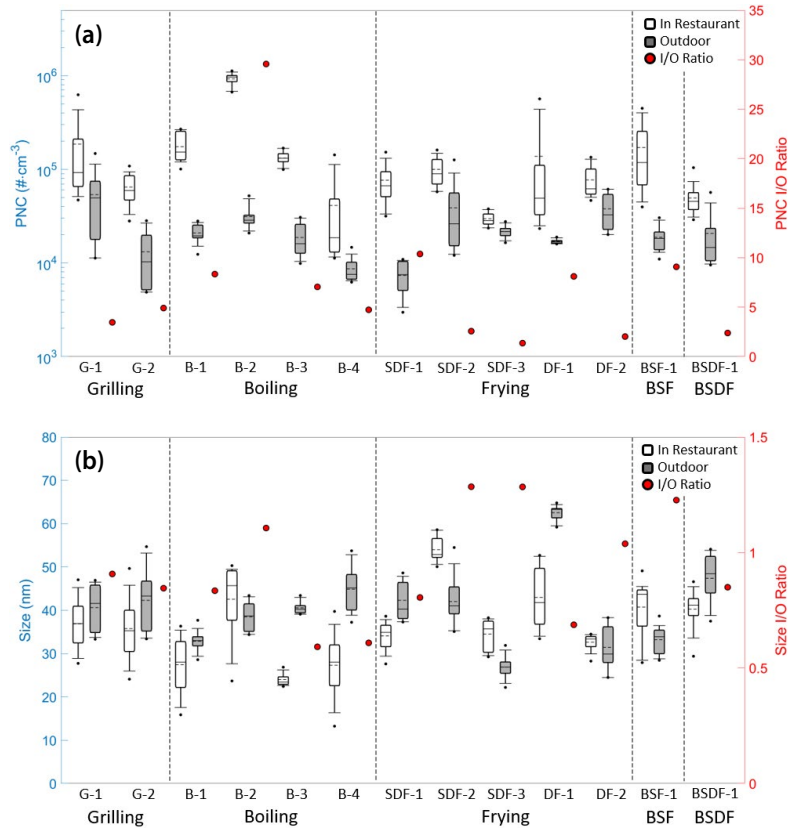


Fig. 2. Box plots of (a) particle number concentration (PNC) and (b) mean particle diameter measured indoors (white boxes) and outdoor (gray boxes) across cooking types. Red dots indicate indoor-to-outdoor (I/O) ratios.

는 경향성을 보였다(표 2).

Boiling 카테고리인 세 곳의 식당(그림 2; B-1, B-2, B-3)은 국물요리가 주 요리인 식당으로 비교적 높은 PNC를 기록하였고 I/O ratio 또한 컸다. 국물요리가 주 요리인 식당은 손님 유무와 관계 없이 국물을 지속적으로 끓이는 조리 특성을 가지며, 가스 스토브 사용 및 조리과정에서 나노미세먼지의 배출이 지속적으로 발생한다(Buonanno *et al.*, 2009). 창문과 문이 모두 닫혀 있던 당시 상황에 따라 식당 내부의 공간이 상대적으로 넓음에도 평균적인 PNC가 높고, 상자그림(Box plot)에서 농도 변동성 또한 다른 식당들보다 작았다(그림 2). 그러나, B-2 식당에서는 측정이 진행된 좌석의 인접한 우측에 다수의 전기 솥밥 조리기가

운용되고 있었기 때문에 연료연소보다는 솥밥 조리기 구에서 배출되는 수증기로 인하여 실제보다 더 높은 PNC가 기록되었을 가능성이 있다(그림 3a).

DF-1과 BSF-1 두 식당에서는 주방과 맞닿아 있는 바 테이블에서 측정이 수행되었으며, 조리과정에서 부탄가스 연료의 토치가 사용되었고 식당의 내부 공간이 작은 특이 사항이 있었다(그림 3b, 그림 3c, 표 2). 또한, 바 테이블의 특성상 조리 위치와 인접해 있어, 조리과정에서 나노미세먼지 배출이 발생할 때 포착이 상대적으로 용이한 환경이었다. 실제 측정 중 토치를 이용하여 조리를 진행하였을 때, 순간적으로 1.0×10⁶ particles cm⁻³를 초과하는 PNC의 스파이크가 기록되기도 하였다(1분 평균 PNC 최댓값은 DF-1과 BSF-1

Table 2. Indoor environmental characteristics of restaurants during measurements.

Cooking types		Floor	Area (m ²)*	Door or windows	I/O Ratios	
					PNC ¹	Mean size
Grilling	G-1	2F	160.72	Opened	3.47	0.91
	G-2	1F	73.33	Opened	4.91	0.85
Boiling	B-1	1F	119.00	Closed	8.34	0.83
	B-2	1F	100.79	Closed	29.56	1.11
	B-3	1F	121.82	Closed	7.05	0.59
	B-4	1F	< 66.06	Closed	4.74	0.61
Frying	SDF-1	2F	66.06	Closed	10.38	0.81
	SDF-2	1F	143.86	Opened	2.58	1.29
	SDF-3	2F	131.33	Closed	1.37	1.28
	DF-1	1F	44.35	Closed	8.11	0.69
	DF-2	1F	63.42	Closed	2.04	1.04
Boiling & Stir-frying	BSF-2	1F	> 44.35	Closed	9.08	1.23
Boiling & Stir-frying & Deep-frying	BSDF-1	1F	85.12	Opened	2.39	0.85
Average (1 σ)			100.9 (37.3)		7.2 (7.3)	0.93 (0.24)

¹PNC: particle number concentrations

*The floor area of each restaurant was obtained from the Comprehensive Real Estate Report on Land and Buildings (<https://kras.go.kr/mainView.do>). For restaurants lacking specific area information, the area was estimated by comparison with adjacent units of similar size.

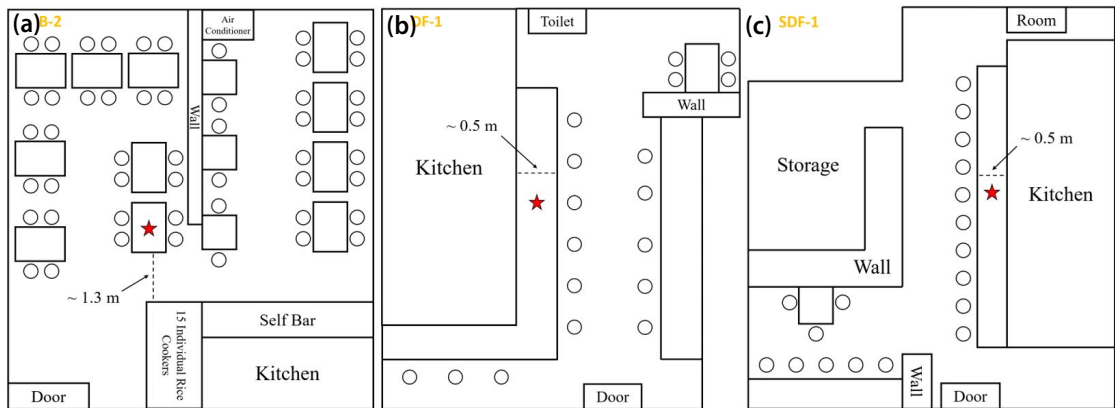


Fig. 3. Indoor layout illustrations of restaurants. (a) Restaurant B-2, (b) Restaurant DF-1, and (c) Restaurant SDF-1. The red star indicates the measurement location, and the dashed line represents the distance from the cooking place.

식당에서 각각 9.9×10^5 particles cm^{-3} 와 5.3×10^5 particles cm^{-3} . 이러한 특성으로 인하여 타 식당에 비하여 평균 PNC는 유사하지만 농도 분포 범위가 크고 극값은 상대적으로 큰 경향을 나타내었다. 또한, 협소한

실내 공간으로 인하여 배출된 나노미세먼지가 실내에 더 많이 축적되었기 때문에 I/O 비율이 높았던 것으로 보인다(표 2; 그림 2).

구이(grilling) 카테고리의 식당 중 G-1 식당은 조리

중 발생하는 연기를 흡입하는 후드가 각 테이블별로 설치된 것이 아니라 천장에 다수 설치되어 있는 구조로 되어 있으며, 테이블마다 후드가 설치된 G-2 식당보다 높은 PNC가 기록되었다. 그러나, 측정 당시의 외기 농도가 G-2 측정 기간보다 더 높았고, 두 식당 모두 창문이 완전 개방되어 있어서 외기의 영향을 직접적으로 받을 수 있는 환경이었기 때문에 I/O ratio는 G-2 식당(4.91)이 G-1(3.47)보다 더 큰 특성을 보였다. 그럼에도 불구하고 평균 실내 농도와 외기 농도의 차이(ΔPNC)는 G-1 식당이 $1.32 \times 10^5 \text{ particles cm}^{-3}$ 로 테이블마다 후드가 설치된 G-2 식당의 $5.16 \times 10^4 \text{ particles cm}^{-3}$ 보다 2배 이상 높았다. 그러나 본 연구의 샘플 수가 제한적이기 때문에 후드의 위치에 따른 PNC의 차이에 대한 명확한 결론을 위해서는 다양한 식당에 대한 추가적인 측정이 필요하다.

Stir-frying & deep-frying (SDF) 카테고리 식당에서의 농도는 SDF-2 식당에서 가장 높았지만 I/O ratio가 작아 외부 농도의 유입이 높은 실내 농도에 일부 영향을 주었을 것으로 보인다. SDF-1 식당은 내부 공간이 작고 출입문이 닫힌 환경이었으며 I/O ratio는 10.38을 보여 이러한 내부 환경이 높은 PNC에 기여한 것으로 판단된다. SDF-3 식당은 내부 면적이 넓었으며, 측정 당시 식당 이용자가 제한적이어서(11 테이블 중 2 테이블에 각각 1명) 요리활동이 지속되지 않았던 이유로 내부 PNC가 상대적으로 작았던 것으로 보인다.

Deep-frying (DF) 카테고리 식당 DF-1, 2의 평균 PNC는 $1.06 \times 10^5 \text{ particles cm}^{-3}$ 로, stir-frying과 deep-frying이 동시에 이루어지는 SDF-1, 2, 3의 평균 PNC $7.64 \times 10^4 \text{ particles cm}^{-3}$ 보다 38% 높았다. 실내 농도와 외기 농도의 차이도 각각 평균 $8.00 \times 10^4 \text{ particles cm}^{-3}$ 와 $4.61 \times 10^4 \text{ particles cm}^{-3}$ 로 DF 조리방법에서 더 높은 경향을 보였다. 이러한 결과는 deep-frying이 stir-frying보다 질량농도에 기반한 입자 배출이 적다고 보고한 선행 연구(Tang *et al.*, 2024)와 대비되는데, 이는 질량농도가 입자의 크기에 강하게 영향을 받아(Seinfeld and Pandis, 2016) 수 농도와 선형적인 관계가 아니기 때문인 것으로 보이며, 뒤에서 자세히 논의

한 것처럼 SDF에서 상대적으로 더 큰 입자가 배출되었기 때문에 질량농도는 다른 경향을 나타내었을 가능성도 있다. 또한, DF-1의 내부 공간이 측정 대상 중 가장 협소하였고, 앞서 언급한 것처럼 측정 기간 제한적인 요리활동으로 인한 SDF-3에서의 낮은 농도도 영향을 주었을 것으로 보인다.

BSDF-1 식당은 요리에 따라 다양한 조리방법(boiling, stir-frying, deep-frying)을 모두 사용하는 곳으로 측정 기간 초반에만 다양한 조리활동이 짧게 진행되었고, 이후에는 조리활동이 이루어지지 않았다. 이와 함께, 출입문이 개방되어 있었기 때문에 외부와의 환기가 비교적 잘 발생하는 환경이었다. 이러한 요인들로 인하여 비교적 낮은 PNC ($4.95 \pm 1.99 \times 10^4 \text{ particles cm}^{-3}$)가 기록된 것으로 보인다.

출입문이나 창문의 개폐에 따른 환기 환경의 변화가 실내 UFP PNC에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 창(문)의 개폐 여부에 따른 PNC와 평균 크기를 비교하였다. 출입문과 창문이 닫혀 있던 조건의 모든 식당(9곳)에서 실내와 외부의 평균 PNC 차이($\Delta PNC = [UFP]_{indoor} - [UFP]_{outdoor}$)는 $1.76 \pm 2.74 \times 10^5 \text{ particles cm}^{-3}$ 였던 반면, 문이나 창문이 열려 있던 조건의 식당(4곳)에서는 평균 $0.69 \pm 0.45 \times 10^5 \text{ particles cm}^{-3}$ 로 약 61% 낮은 농도를 보였다(그림 4a). PNC의 평균 I/O ratio도 창(문)이 닫혀 환기가 제한된 조건(9.0)에서 자연환기가 이루어진 식당(3.3)에서보다 2.7배 높았다. 이러한 결과는 환기가 제한된 조건에서는 실내에 요리배출에 의한 나노미세먼지의 축적이 보다 효과적으로 발생함을 제시한다. 입자의 크기는 창(문)이 닫힌 제한된 환기 조건에서는 외부 대기의 UFP 평균 크기 대비 9% 감소하였던 반면($\Delta D_p/D_{p(outdoor)}$), 창(문)이 열려 있어 자연환기가 발생한 조건에서는 3% 감소하였고, 크기에 대한 I/O ratio 역시 자연환기가 제한된 조건에서는 0.91로, 창(문)이 열려 있던 조건(0.97)보다 더 작은 값을 보여주어, 요리배출로 발생한 작은 입자의 축적이 발생했음을 제시한다(그림 5b). 입자의 크기가 작을수록 호흡기관 깊숙이 침투하여 침적되는 경향이 있어(Oberdörster *et al.*, 2005), 노출 위험성이

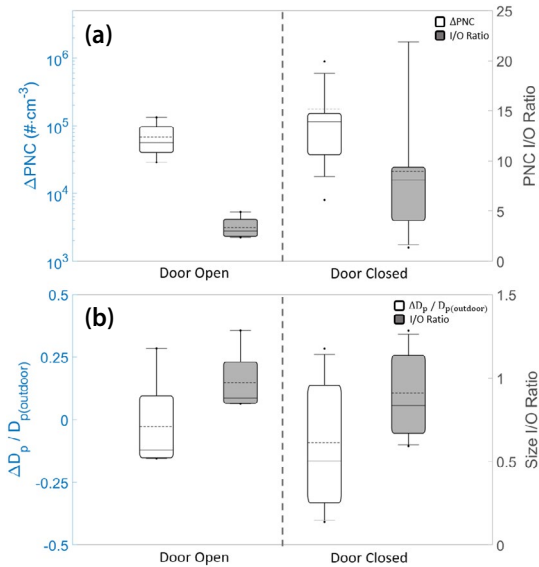


Fig. 4. Box plots of (a) net particle number concentration (ΔPNC) and (b) relative change in mean particle diameter ($\Delta D_p / D_{p(outdoor)}$) under two ventilation conditions: door/windows-opened vs. closed. $\Delta PNC (= PNC_{indoor} - PNC_{outdoor})$ and $\Delta D_p (= D_p(indoor) - D_p(outdoor))$ represent the differences in PNC and mean particle diameter, respectively, between outdoor and indoor environments. Dashed horizontal line denotes the mean value.

증가할 수 있으며 이에 대한 추가적인 논의는 아래 절에 제시하였다.

연료연소를 통해 배출되는 입자는 크기가 매우 작기 때문에 배출원의 영향을 받는 곳에서의 PNC와 평균 입경은 역의 상관성을 보이는 경향이 있다(Choi, 2021; Kittelson, 1998). 본 연구에서 평균 입자 크기의 I/O ratio는 일부 식당을 제외하고는 모두 1보다 작아 외부에 비하여 식당 내부의 입자의 크기가 작은 경향을 보였다(평균 0.93 ± 0.24 ; 표 2). 특히 문이 닫힌 환경에서의 평균 입자 크기는 34 nm로 문이 열린 환경에서의 평균 입자 크기인 42 nm보다 약 18% 작았으며(그림 4b), 이는 실내 나노미세먼지가 주로 요리배출(연료연소 + 생물연소)의 영향을 강하게 받았음을 제시한다.

그러나, 일부 식당에서는 입자 크기의 증가가 PNC의 증가와 함께 나타나는 특성을 보였다(그림 2의

B-2, SDF-2, SDF-3, DF-2, BSF-1). B-2 식당에서는 관측된 높은 PNC가 인접한 다수의 소형 전기발열에서 배출되는 증기의 영향을 받았을 것으로 추정되기 때문에 수증기의 응결로 발생하는 상대적으로 큰 입자의 배출에 영향을 받았을 것으로 보인다. Stir-frying과 deep-frying이 동시에 이루어지는 식당(SDF) 세 곳 중 두 곳에서 외부보다 큰 입자의 배출이 이루어진 것은 조리방식에 기인하였을 가능성도 있다. 예를 들면, 강한 파도와 파도의 깨짐이 해염의 물리적 배출을 강화하는 것과 유사하게(Ackerman *et al.*, 2023) 기름을 이용한 볶음 요리를 위한 지속적인 조리기구(웍)의 과격한 움직임이 유증기와 같은 큰 입자의 배출을 강화시킬 수 있을 것으로 추정할 수 있다. 그러나 조리방식에 따른 배출 입자의 크기분포 특성에 대한 연구가 많지 않아 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

3.3 식당 실내와 도로배출 나노미세먼지 분포 특성 비교

도심에서는 도로에서 자동차의 연료연소를 통한 배출이 주요한 나노미세먼지의 배출원으로 알려져 있다(Kumar *et al.*, 2014). 본 절에서는 식당에서 연료연소와 조리과정을 통해서 배출되는 나노미세먼지와 도로에서 배출되는 나노미세먼지의 PNC 수준과 평균 크기의 분포 특성을 비교함으로써 두 배출원의 유사성과 차이점을 살펴보고자 한다. 평균 크기는 위에서 논의한 인체 호흡기관에의 침적률에 중요한 요소이기 때문에 PNC와 평균 크기의 분포 경향성을 살펴보는 것은 건강에 미치는 영향 평가에 의미가 있다.

이를 위하여 다양한 교통량과 차량조성을 가지는 실제 도로에서 이동측정을 통하여 수집한 PNC와 평균크기를 비교자료로 사용하였다. 부산에서는 선행 연구인 Lee and Choi (2023)에서 획득한 항구 인근의 두 경로에 대한 이동측정 자료를 사용하였다. 한 경로는 감만 부두와 인접한 대형 교차로를 지나는 경로로 항만 활동과 물류 수송을 위한 대형트럭의 교통량이 많은 경로(B-SD)이며, 다른 한 경로는 주거지역으로 둘러싸여 가솔린 승용차의 통행량이 우세한 경로

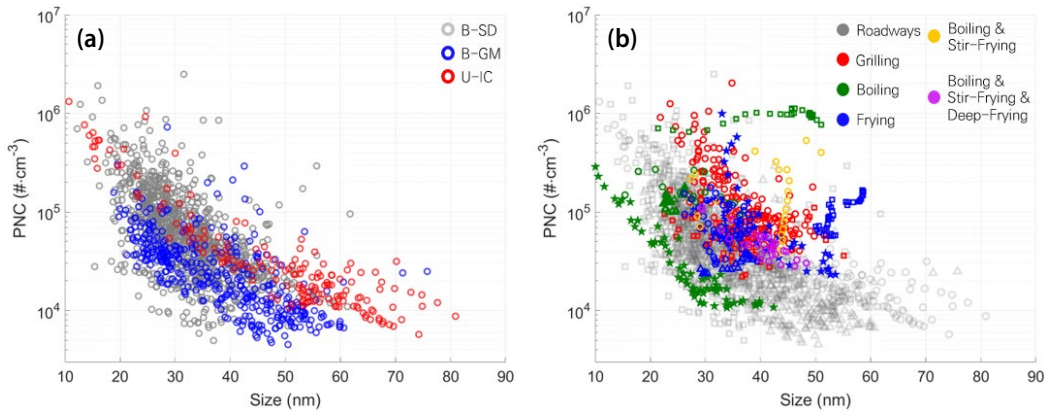


Fig. 5. Scatter plots of PNC versus mean particle diameter measured in various environments. (a) Mobile measurements data obtained along three roadway routes in Busan (B-GM and B-SD) and Ulsan (U-IC). (b) Indoor data under different cooking activities, overlaid on the roadway data (light gray circles) for comparison. Marker colors indicate cooking type, while different symbols represent individual measurement sites.

(B-GM)이다(Lee and Choi, 2023). 울산 이동측정 자료는 Lee and Choi (2023)와 동일한 방법을 사용하여 화학, 제련, 기계공장 등의 산업단지 주변의 경로(U-IC)에서 획득하였으며, Busan-SD와 유사하게 대형트럭의 교통량이 많은 도로를 포함하고 있다(not published).

경로 B-SD와 U-IC는 모두 대형트럭의 통행량이 많은 도로를 포함하고 있어 PNC와 평균 크기 사이의 산포가 유사한 경향성을 나타내었으나, B-GM 경로는 승용차가 우세한 교통 조성으로 인하여 PNC 대비 평균 크기가 작은 산포를 보였다(그림 5a). 이는 디젤엔진을 사용하는 대형트럭에서의 배출 입자의 크기가 가솔린엔진의 승용차 배출입자보다 크다는 선행 연구결과와 일치한다(Choi and Kim, 2018; Morawska *et al.*, 2008). B-SD와 B-GM에서의 평균 PNC는 각각 $9.76 \pm 15.90 \times 10^4$ 와 $3.50 \pm 5.01 \times 10^4$ particles cm⁻³였고, 평균 크기는 각각 32 ± 8 와 38 ± 11 nm였다. U-IC에서의 평균 PNC와 크기는 $8.50 \pm 17.97 \times 10^4$ particles cm⁻³와 49 ± 16 nm였다.

Grilling 카테고리(그림 2의 G-1, G-2)에서의 PNC는 각각 $18.61 \pm 23.94 \times 10^4$ 와 $6.48 \pm 2.80 \times 10^4$ particles cm⁻³로 대형트럭의 통행량이 많은 도로에서의 평균 농도와 유사하거나 더 높았고, PNC와 평균 크기 사이

의 산포도는 도로에서 보다는 PNC 대비 평균 크기가 더 큰 경향성을 보였다(그림 5b). 이는 테이블 위에서 단백질과 지방의 연소를 발생시키는 조리과정과 숯과 기름의 접촉에 의한 유증기와 숯의 잔재물 비산에 기인한 상대적으로 큰 입자의 배출이 발생한 것이 원인 중 하나인 것으로 보인다.

Boiling과 frying이 주 요리 방식인 식당에서는 PNC와 평균 크기 사이에 큰 산포를 나타내었다. Boiling이 주 요리 방식인 식당에서 한 곳은 앞서 언급했듯이 밥솥에서 배출된 증기로 인하여 PNC 대비 큰 평균 입자 크기를 보였지만, 다른 한 곳은 PNC 대비 도로배출보다 더 작은 입자가 배출된 곳도 있었다. Frying이 주 요리 방식인 식당에서는 도로에서와 유사한 산포를 보인 곳도 있었으나, 한 곳에서는 아마도 조리활동(격렬한 wok 움직임에 의한 유증기와 같은 큰 입자의 배출)으로 인해 도로배출에 비해 PNC 대비 큰 평균 입자 크기가 나타난 것으로 추정된다. 다른 종류의 식당들은 대형트럭의 교통량이 많은 도로배출과 유사한 산포를 나타내어, 일반적으로는 요리배출에 의한 나노미세먼지는 디젤엔진의 대형트럭 배출이 우세한 도로에서와 유사한 크기의 입자를 배출하는 것으로 판단된다.

3.4 평균 입자 크기에 따른 나노미세먼지 노출도 평가

Kumar *et al.* (2014)에 따르면 호흡기관에 침적되는 정도는 100 nm 이하의 나노미세먼지의 수(number)가 지배적이다. 또한, 나노미세먼지가 호흡기를 통해 흡입되면 그 크기에 따라 호흡기관의 다양한 부위에 침적이 되어 산화 스트레스와 염증 반응을 유발함으로써 건강에 심각한 악영향을 미치는 것으로 알려졌다(Choi and Kim, 2018; Oberdörster *et al.*, 2005). 따라서 본 절에서는 나노미세먼지의 입경에 따른 호흡기관별 침적률을 바탕으로 요리활동에 의한 인체의 UFP 노출도를 평가하였다.

나노미세먼지의 입경에 따른 호흡기관별 침적률을 산출하기 위하여, ICRP (International Commission on Radiological Protection) 모델을 사용하였다(ICRP, 1994; 그림 6). 이 모델은 호흡기관을 상부 호흡기관(Head Airways, HA), 기관 및 기관지 영역(Tracheobronchial region, TB), 그리고 폐포 영역(Alveolar region, AL)으로 구분하여 입자상 물질의 크기에 따른 해당 기관별 침적률을 산출한다(ICRP, 1994).

코를 통한 호흡으로 흡입된 수 nm보다 작은 입자와 수 μm 보다 큰 입자의 대부분은 각각 확산과 impaction에 의해 비인두 등의 상부 호흡기관에 침적

되는 경향이 있다(Oberdörster *et al.*, 2005; 그림 6). 이는 매우 작은 입자는 브라운 운동에 의한 확산 속도가 빠르고, 큰 입자는 관성에 의해 호흡관 내의 공기의 흐름에서 벗어나 호흡기관 표면에 침적되기 쉽기 때문이다(Seinfeld and Pandis, 2016). 그 중간 크기의 입자들은 중간 호흡기관인 TB 영역에 도달하고, 그중 10 nm 이하의 입자들이 확산에 의해 TB 영역에 침적되는 경향이 커진다. 그 외의 입자들은 공기 흐름을 따라 호흡기관의 최심부인 AL 영역까지 도달하며, AL 영역에 침적되는 입자들은 UFP 크기 범위인 수십 nm에서 가장 우세하다. AL 영역에 침적된 입자들은 상부 호흡기관에 침적된 입자보다 체외로 배출되기 어렵기 때문에 건강에 더 해로운 것으로 알려져 있다(Choi and Kim, 2018).

본 연구에서는 측정 환경별로 측정된 평균 입자 크기를 ICRP 모델에 적용하여 각 호흡기관별 침적률(DR)을 산출하였다. 각 호흡기관별 나노미세먼지 침적량은 성인 평균 호흡량과 호흡 속도 및 측정 환경별 평균 PNC를 사용하여 산출하였다(식 1).

$$DA \text{ (Particles min}^{-1}\text{)} = PNC \cdot TV \cdot RR \cdot DR \quad (1)$$

여기서 DA 는 분당 침적량, PNC 는 평균 입자 수 농도(Particles cm^{-3}), TV 는 성인 평균 일회 호흡량(cm^3)

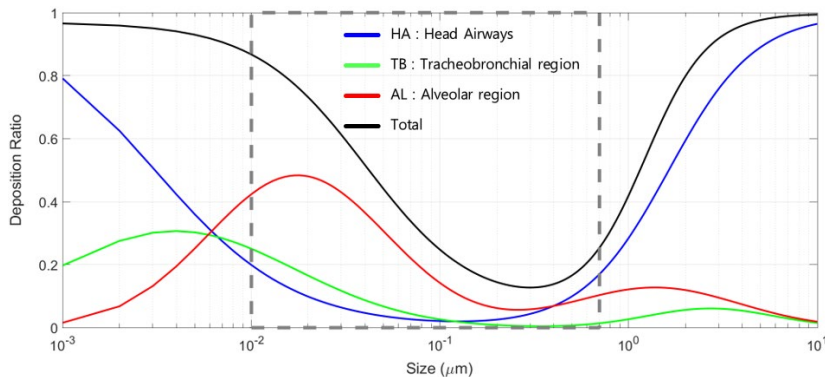


Fig. 6. Size resolved deposition ratios of particles in three regions of the human respiratory tracks under nasal breathing conditions, calculated using the ICRP (International Commission on Radiological Protection) Model (ICRP, 1994) (reproduced from Oberdörster *et al.* (2005)). Blue, green, and red lines represent deposition ratios in the head airways (HA; pharyngeal region), tracheobronchial (TB), and alveolar (AL) regions, respectively. The black line indicates the total deposition ratio (HA + TB + AL). The dashed rectangle highlights the size range measured by DiSCmini (10~700 nm).

breath⁻¹), RR은 성인 평균 분당 호흡수(breaths min⁻¹), 그리고 DR은 ICRP 모델로 산출한 호흡기관별 침적률이다. 여기서 사용된 성인의 평균 1회 호흡량은 500 cm³ breath⁻¹로 설정하였으며(Reid *et al.*, 2023; Pleil *et al.*, 2022; Choi *et al.*, 2019; Kang, 2002), 평균 분당 호흡수는 선행 연구들의 12~20와 10~25 breaths min⁻¹ (Choi *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2013)의 평균값인 17 breaths min⁻¹로 설정하였다. 그러나, 일회 호흡량은 성인이 되는 과정에서 서서히 증가하는 경향을 보이고 성인이 된 이후에는 감소하지 않고, 호흡 시간을 조절하여 일정한 호흡량을 유지하는 것으로 알려져 있다(Sharma and Goodwin, 2006). 또한 Choi *et al.* (2019)은 건강한 성인의 경우 체중당 약 7mL의 호흡량을 가진다고 보고하였으며, 이는 호흡량이 나이보다는 체중에 따라 결정됨을 시사한다. 따라서 체중이 다양한 집단에 대해서는 그에 따라 분석 결과도 비례적으로 증감할 수 있다. 또한, 입자 노출에 더 민감할 수 있는 미성년에 대해서는 호흡량과 호흡수가 성장에 따라 변화하기 때문에 보다 상세하고 정교한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

측정 기간 배출원이 없는 배경지역에서 산출한 호흡기관의 평균 총 침적률(DR)은 45.2%인 반면, 식당 주변 외부에서는 50.3%였고 요리활동이 이루어지는 식당 실내에서는 54.8%로 도시 배경지역 대비 식당 주변 외부와 실내에서의 침적률은 각각 10%와 21% 높았다. 또한, 다양한 요리활동이 지속적으로 발생하는 실내에서의 호흡기관 내 분당 총 침적량(DA)의 중위값은 조리 특성과 내부 환경에 따라 0.10~3.74 × 10⁹ particles min⁻¹로 분포하여 도로배출(세 경로 중위값 평균 1.50 × 10⁸ particles min⁻¹)의 0.7~24.9배의 분포를 보였으며, 배경지역(3.39 × 10⁷ particles min⁻¹)에 비해서는 3.0~110.2배까지 높았다(그림 7a). 대부분의 식당 실내와 도로에서 평균 총 침적량이 중위값보다 명확하게 큰 분포 특성을 보였는데(그림 7a), 이는 도로와 유사하게 식당의 실내에서도 잦은 스파이크성의 분당 침적량이 발생하였음을 제시한다.

호흡기관별 입자 수의 침적 분포는 모든 환경에서

가장 깊은 호흡기관인 폐포 영역에 집중되는 경향을 보였다(그림 7b). 호흡기관에 침적된 나노미세먼지의 약 60~75%는 폐포 영역에, 16~24%는 기관 및 기관지 영역에, 나머지 9~16%는 상부 기도 영역에 침적되는 경향을 나타내었다. 이는 도시지역에서 입자 수 농도는 직경 100 nm 이하인 UFP에 집중되어 있으며(Kumar *et al.*, 2014; Morawska *et al.*, 2008), 수 농도 기반 평균 크기가 심폐 영역까지 도달하여 침적되기 쉬운 확산 특성에 기인한다(Oberdörster *et al.*, 2005). UFP의 농도가 높으면 평균 크기가 작아지는 경향이 있으며(그림 5), 입자의 크기가 작을수록 심폐 영역에 침적되는 비율이 증가하기 때문에(그림 6), 이러한 침적 특성은 심혈관계 및 전신 염증 반응과 같은 건강에 악영향을 미칠 수 있는 가능성을 시사한다(Choi and Kim, 2018).

코 호흡을 통해 흡입한 총 입자 수 대비 개별 호흡기관에 침적된 상대적 침적비율은 환경에 따라 큰 변동성을 나타내었다. 배경지역에서 호흡기관에 침적되지 않은 입자 수의 비율이 평균 54.8%로 가장 높은 수준인 반면(아마도 호흡을 통한 재배출), 도로에서는 이 비율이 평균 35.7%로 상대적으로 적었고, grilling 43.0%, boiling 35.7%, frying 47.6%, 기타 49.8% 순으로 나타났다(그림 7c). 폐포(AL) 영역에 침적되는 비율은 배경지역이 33.3%로 가장 낮은 수준이었고, 도로에서는 평균 42.8%로 가장 높은 수준을 보였으며, 식당 내에서는 grilling 평균 40.4%, boiling 42.7%, frying 37.8%, 기타 36.5%로 변동성이 컸다.

실내에서 총 침적량과 각 호흡기관별 침적량이 모두 큰 변동성을 보인 것은 조리방법뿐만 아니라 실내 크기, 밀폐 여부, 조리 장소와 테이블 사이의 거리 등 다양한 요소가 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 전반적으로 도시에서 가장 중요한 나노미세먼지 발생원이 밀집한 도로에서와 유사하거나 더 높은 호흡기관 침적량이 산출되었고, 배경지역의 침적량에 비해 1~2 자리수(1~2 order) 이상 높은 수준을 보였다는 점에서 향후 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 사료된다.

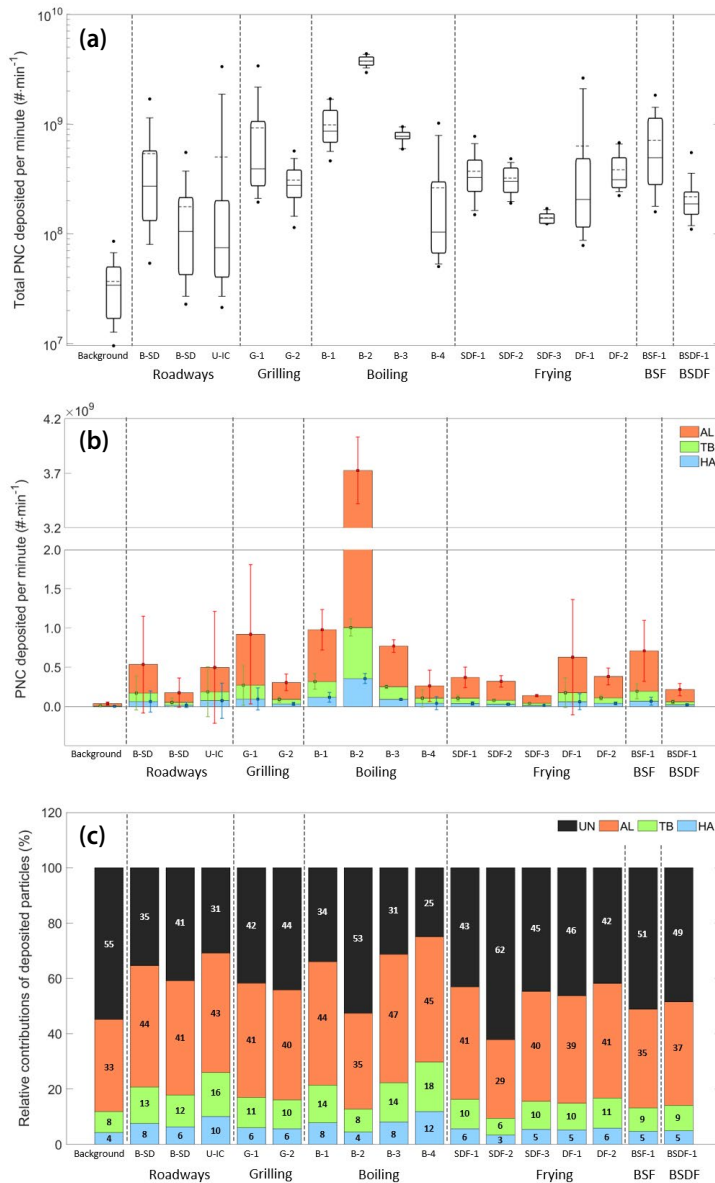


Fig. 7. (a) Total number of particles deposited per minute in the human respiratory tract under various environmental conditions. (b) Deposition rates of particle number in three respiratory regions. Vertical bars indicate the standard deviations. (c) Relative contributions of deposited particles in three respiratory regions, along with the undepleted fraction (UN, shown in black), across different environments.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 조리 유형을 가진 식당에서 나노미세먼지(UFP; ultrafine particles)의 수 농도

(PNC)와 평균 입자 크기를 측정함으로써 요리활동이 지속되는 실내에서의 나노미세먼지 분포 특성을 조사하고, 이를 도시의 주요 배출원인 도로와 배출원의 직접적 영향이 미미한 배경지역에서의 특성과 비교하였

다. 또한, 평균 입자 크기를 기반으로 일반적인 성인의 코 호흡을 통해 흡입된 나노미세먼지의 호흡기별 침적량 산출을 통해 요리활동으로 인해 배출된 나노미세먼지의 실내 노출도를 평가하였다.

전반적인 나노미세먼지의 PNC 수준은 배경지역, 외부 이면도로, 식당 내부 순으로 증가하는 뚜렷한 경향을 나타내었으며, 평균 입자 직경은 역의 경향성을 보였다. 실내의 나노미세먼지 PNC는 배경지역과 식당가 외부 이면도로보다 각각 평균 16.1배와 7.0배 높은 수준이었다. 식당 내부와 외부 이면도로의 PNC 비율인 I/O 비율은 평균 7.2(± 7.3)인 반면, 평균 입자 크기의 I/O ratio는 0.93(± 0.24)로 낮아 요리활동으로 인한 작은 크기의 입자 배출이 실내 농도에 직접적인 영향을 주었음을 제시한다.

실내의 PNC는 조리 특성뿐만 아니라 환기 특성과 내부 공간 크기 및 조리위치와 테이블 간의 간격 등의 실내 환경에도 영향을 받았다. 창(문)이 닫힌 조건에서의 농도가 창(문)이 열려 있어 자연환기가 이루어지는 조건에서보다 실내 농도와 외부 농도의 차이(Δ PNC)가 2.6배 컸고, I/O ratio 역시 2.7배 높아, 요리활동으로 배출되는 나노미세먼지의 실내 농도를 낮추기 위한 환기의 중요성을 시사한다.

전반적으로 요리활동으로 배출되는 나노미세먼지의 실내 농도와 평균 크기의 분포는 대형 디젤트럭의 교통량이 많은 도로에서와 유사한 분포를 보였지만, Grilling과 같이 고온에서 단백질과 지방이 연소되는 조리 환경에서는 디젤트럭 교통량이 많은 도로에서 관측된 농도와 유사하거나 더 높은 수준이었던 반면, 입자의 평균 크기는 PNC 대비 더 큰 경향성을 나타내었다. 또한, Boiling과 frying의 조리방식은 PNC와 평균 크기 사이에 큰 산포 특성을 보였다.

요리활동이 지속적으로 이루어지는 실내에서의 나노미세먼지 침적률은 평균 54.8%로, 도심 배경지역(45.2%)과 식당가 주변 외부(50.3%)보다 높았으며, 이는 실내 배출 입자의 작은 크기에 기인하였다. 또한, 나노미세먼지의 분당 총 침적량(침적속도)은 도로와 배경지역의 평균값 대비 각각 최대 24.9배와 110배까

지도 증가한 사례가 있었다. 특히 코 호흡을 통해 흡입한 총 입자 수 대비 가장 깊은 호흡기관인 폐포(AL) 영역에서의 침적률은 평균 39.4%로 배경지역의 33.3%에 비해 높았고, 이는 도로에서의 평균 비율인 42.8%와 유사한 수준이었다. 이러한 결과는 요리활동으로 인한 나노미세먼지 배출이 장시간 실내 조리활동에 종사하는 사람들의 건강에 악영향을 미칠 수 있으며, 추가적인 건강 위해성 평가가 필요함을 시사한다.

다만 본 연구 대상의 수가 조리방법별로 많지 않고, 측정 기간이 짧은 제한성을 가지고 있어 전체를 대표한다고 보기는 어렵다. 그러나, 본 연구의 결과는 식당 내 나노미세먼지의 지속적인 모니터링의 필요성을 제시한다. 향후 연구에서는 다양한 조리 및 실내 환경에서의 장기적인 나노미세먼지 측정을 통해 대표성을 확보하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 일부 식당에서는 수증기나 유증기 같이 상대적으로 인체 유해성이 적을 것으로 예상되는 입자들의 영향도 컸을 것으로 사료되어, 나노미세먼지의 성분 측정도 병행된다면 인체 노출도 및 건강에 미치는 영향에 대한 보다 과학적인 평가가 이루어질 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립부경대학교 자율창의학술연구비(2023. 9.~2025. 8.)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ackerman, K.L., Nugent, A.D., Taing, C. (2023) Mechanisms controlling giant sea salt aerosol size distributions along a tropical orographic coastline, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 13735-13753. <https://doi.org/10.5194/acp-23-13735-2023>
- Bang, J., Jo, S., Sung, M. (2018) Analysis of infiltration of outdoor particulate matter into apartment buildings, *Journal*

- of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, 34(1), 61-68. https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2018.34.1.61
- Brook, R.D., Rajagopalan, S., Pope, C.A., Brook, J.R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A.V., Holguin, F., Hong, Y., Luepker, R.V., Mittleman, M.A., Peters, A., Siscovick, D., Smith, S.C., Whitsett, L., Kaufman, J.D. (2010) Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association, *Circulation*, 121(21), 2331-2378. <https://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8bece1>
- Buonanno, G., Morawska, L., Stabile, L. (2009) Particle emission factors during cooking activities, *Atmospheric Environment*, 43(20), 3235-3242. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.044>
- Capaldo, K., Pandis, S. (2001) Lifetimes of ultrafine diesel aerosol, Report for the University of Minnesota and the coordinating research council under the E-43 project diesel aerosol sampling methodology, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, U.S.A.
- Choi, S., Kang, J., You, W. (2019) Analysis on the Results of Measured Concentration of the Combustion Gases Considering Respiration Characteristics in Gasoline Pool Fire, *Fire Science and Engineering*, 33(4), 83-88, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.4.083>
- Choi, W. (2021) Indoor and Outdoor Ultrafine Particle Number Concentrations and Deposition Fractions in the Respiratory Tract in a Single-family House near the Major Roadway, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 276-291, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.276>
- Choi, W., Kim, J. (2018) Characteristics of ultrafine particles in urban areas observed worldwide and in Korea: Sources and emissions, spatial and temporal distributions, and health effects, *Atmosphere*, 28(3), 337-355, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.14191/Atmos.2018.28.3.337>
- Choi, W., Paulson, S.E. (2016) Closing the ultrafine particle number concentration budget at the road-to-ambient scale: implications for particle dynamics, *Aerosol Science and Technology*, 50, 448-461. <https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1155104>
- Choi, W., Ranasinghe, D., Bunavage, K., DeShazo, J.R., We, L., Seguel, R., Winer, A.M., Paulson, S.E. (2016) The effects of the built environment, traffic patterns, and micro-meteorology on street level ultrafine particle concentrations at a block scale: Results from multiple urban sites, *Science of The Total Environment*, 553, 474-485. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.083>
- Harrison, R.M., Beddows, D.C.S., Dall'Osto, M. (2011) PMF analysis of wide-range particle size spectra collected on a major highway, *Environmental Science & Technology*, 45(13), 5522-5528. <https://doi.org/10.1021/es2006622>
- Health Effects Institute (HEI) (2013) Understanding the Health Effects of Ambient Ultrafine Particles, Health Effects Institute Perspectives 3, Health Effects Institute, Boston, MA, U.S.A. <https://www.healtheffects.org/publication/understanding-health-effects-ambient-ultrafine-particles>
- Hoek, G., Boogaard, H., Knol, A., de Hartog, J., Slottje, P., Ayres, J.G., Borm, P., Brunekreef, B., Donaldson, K., Forastiere, F., Houtink, S., Kreyling, W.G., Nemery, B., Pekkanen, J., Stone, V., Wichmann, H.-E., van der Sluijs, J. (2010) Concentration response functions for ultrafine particles and all-cause mortality and hospital admissions: Results of a European expert panel elicitation, *Environmental Science and Technology*, 44(1), 476-482. <https://doi.org/10.1021/es9021393>
- International Commission on Radiological Protection (ICRP) (1994) Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection. International Commission on Radiological Protection Publication 66, Annals of the ICRP, 24(1-3), Pergamon Press, Oxford, U.K. <https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%2066>
- Kang, J. (2002) Respiratory physiology for inhalation sedation, *Journal of The Korean Dental Society of Anesthesiology*, 2(1), 7-14. <https://doi.org/10.17245/jkdsa.2002.2.1.7>
- Kim, M. (2019) Harmful environment of fine dust, *Korea Society of Environmental Administration*, 25(2), 37-42, (in Korean with English abstract).
- Kittelson, D.B. (1998) Engines and nanoparticles: a review, *Journal of Aerosol Science*, 29(5/6), 575-588. [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(97\)10037-4](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(97)10037-4)
- Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P. (2001) The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 11(3), 231-252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Knol, A.B., de Hartog, J.J., Boogaard, H., Slottje, P., van der Sluijs, J.P., Lebrecht, E., Cassee, F.R., Wardekker, A., Ayres, J.G., Borm, P.J., Brunekreef, B., Donaldson, K., Forastiere, F., Holgate, S.T., Kreyling, W.G., Nemery, B., Pekkanen, J., Stone, V., Wichmann, H.-E., Hoek, G. (2009) Expert elicitation on ultrafine particles: likelihood of health effects and causal pathways, *Particle and Fibre Toxicology*

- cology, 6(19). <https://doi.org/10.1186/1743-8977-6-19>
- Kousa, A., Kukkonen, J., Karppinen, A., Aarnio, P., Koskentalom T. (2002) A model for evaluating the population exposure to ambient air pollution in an urban area, *Atmospheric Environment*, 36, 2109-2119. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00228-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00228-5)
- Kreyling, W.G., Semmler-Behnke, M., Moller, W. (2006) Health implications of nanoparticles, *Journal of Nanoparticle Research*, 8(5), 543-562. <https://doi.org/10.1007/s11051-005-9068-z>
- Kumar, P., Morawska, L., Birmili, W., Paasonen, P., Hu, M., Kulmala, M., Harrison, R.M., Norford, L., Britter, R. (2014) Ultrafine particles in cities, *Environment International*, 66, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.01.013>
- Kumar, P., Pirjola, L., Ketzler, M., Harrison, R.M. (2013) Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources - A review, *Atmospheric Environment*, 67, 252-277. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.011>
- Lee, M., Jeong, M., Kang, M. (2018) Characteristics and management of particulate matter (PM_{2.5}) emission on cooking condition, *Journal of the Convergence on Culture Technology*, 4(1), 325-329, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.1.325>
- Lee, S., Lee, J. (2015) Visualization of the comparison between airborne dust concentration data of indoor rooms on a building model, *Journal of the Korean Housing Association*, 26(4), 55-62, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.6107/JKHA.2015.26.4.055>
- Lee, T., Choi, W. (2023) Characteristics of Spatial Distributions of Ultrafine Particles and PM_{2.5} on the Roadways around Busan North Port: Effects of Traffic Composition and Local Meteorology, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 39(6), 947-967, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2023.39.6.947>
- Lee, Y. (2016) Management of indoor air quality in apartment housing - Characteristics and control measures of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5}) generated from cooking in apartment housing, *Air Cleaning Technology*, 29(1), 19-31.
- Møller, P., Folkmann, J.K., Forchhammer, L., Bräuner, E.V., Danielsen, P.H., Risom, L., Loft, S. (2008) Air pollution, oxidative damage to DNA, and carcinogenesis, *Cancer Letters*, 266, 84-97. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2008.02.030>
- Morawska, L., Ristovski, Z., Jayaratne, E.R., Keogh, D.U., Ling, X. (2008) Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure, *Atmospheric Environment*, 42(35), 8113-8138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.050>
- 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>
- Pleil, J.D., Wallace, M.A.G., Davis, M.D., Matty, C.M. (2022) The physics of human breathing: flow, timing, volume, and pressure parameters for normal, on-demand, and ventilator respiration, *Journal of Breath Research*, 15(4). <https://doi.org/10.1088/1752-7163/ac2589>
- Reid, S., Toro, F., Ashurst, J.V. (2023) *Physiology*, Tidal Volume, StatPearls Publishing, U.S.A. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK482502/>
- Rim, D., Wallace, L.A., Persily, A.K. (2013) Indoor ultrafine particles of outdoor origin: importance of window opening area and fan operation condition, *Environmental Science and Technology*, 47, 1922-1929. <https://doi.org/10.1021/es303613e>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change 3rd ed.*, Wiley, Hoboken, NJ, U.S.A.
- Sharma, G., Goodwin, J. (2006) Effect of aging on respiratory system physiology and immunology, *Clinical Interventions in Aging*, 1(3), 253-260. <https://doi.org/10.2147/cia.2006.1.3.253>
- Tang, R., Sahu, R., Su, Y., Milsom, A., Mishra, A., Berkemeier, T., Pfrang, C. (2024) Impact of cooking methods on indoor air quality: A comparative study of particulate matter (PM) and volatile organic compound (VOC) emissions, *Indoor Air*, 2024, 6355613. <https://doi.org/10.1155/2024/6355613>
- Xiang, J., Hao, J., Austin, E., Shirai, J., Seto, E. (2021) Characterization of cooking-related ultrafine particles in a US residence and impacts of various intervention strategies, *Science of The Total Environment*, 798, 149236. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149236>
- Yuan, G., Drost, N.A., McIvor, R.A. (2013) Respiratory rate and breathing pattern, *McMaster University Medical Journal (MUMJ)*, 10(1), 23-25.

Authors Information

서성민 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공 석사과정 학생) (men3387@pukyong.ac.kr)

최원식 (국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공 교수) (wschoi@pknu.ac.kr)