

논문

# 단독주택에서의 실내외 나노미세먼지(UltraFine Particles) 동시측정을 통한 실내 UFP 분포특성과 호흡기관 침적율

## Indoor and Outdoor Ultrafine Particle Number Concentrations and Deposition Fractions in the Respiratory Tract in a Single-family House near the Major Roadway

최원식\*

부경대학교 환경대기과학과

Wonsik Choi\*

Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan, Republic of Korea

접수일 2021년 2월 5일  
수정일 2021년 3월 22일  
채택일 2021년 4월 5일

Received 5 February 2021  
Revised 22 March 2021  
Accepted 5 April 2021

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

**Abstract** The particle number concentrations (PNC) and mean sizes of ultrafine particles (UFP) were measured indoors and outdoor simultaneously in a single-family house located near major roadways with heavy traffic. The mean PNC were  $1.6(\pm 10.0) \times 10^4$ ,  $2.1(\pm 4.1) \times 10^4$ , and  $0.9(\pm 0.8) \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm $^{-3}$  in ambient air, a living room adjacent to the kitchen on the 1<sup>st</sup> floor (LR1), and a bedroom on the 2<sup>nd</sup> floor (BR2), respectively. The median indoor to outdoor concentration ratios (I/O ratio) were 0.87 (LR1) and 0.68 (BR2) for the entire period, 0.69 (LR1) and 0.53 (BR2) under the conditions with all windows closed and no cooking activities, and 0.69 (LR1) and 0.81 (BR2) with windows opened on both the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> floor. The indoor PNC levels were generally influenced by ambient PNC. However, indoor emissions (i.e., cooking activities) and infiltration of outdoor PNC spikes led to high PNC spikes indoors (up to  $42.3 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm $^{-3}$  instantly) with time-lags depending on the locations. The residence times of these indoor spikes varied significantly due to different ventilation conditions. The median mean-size of UFP was 8.8% and 21.0% larger in LR1 and BR2, respectively, compared to that in ambient air. The mean total deposition fractions in the human respiratory tract calculated with ICRP (International Commission on Radiological Protection) model were 50.4% (ambient), 47.7% (LR1), and 44.4% (BR2). Of the aerosols deposited in the respiratory tract, 73.0% (ambient), 73.8% (LR1), and 74.5% (BR2) were deposited in the alveolar region, the deepest region of the respiratory tract. These findings suggest that extended efforts to monitor indoor and outdoor PNC and size distributions in the regions with a dense roadway network are needed.

**Key words:** Ultrafine particles, Indoor to outdoor ratio, Indoor particle number concentrations, Deposition fraction, Exposure to indoor UFP

### 1. 서 론

나노미세먼지(UFP; UltraFine Particles)는 지름 100 nm 이하의 대기 중 입자상 물질을 지칭한다(Seinfeld and Pandis, 2016). 도심지역에서 UFP의 주요 배출원은 도로이동오염원(자동차)의 연료연소로 알려져 있

다(Morawska *et al.*, 2008). 교통활동은 매일 발생하기 때문에 도심지역에서의 UFP 분포에 대한 연구가 선진국을 중심으로 꾸준히 이루어지고 있다(Kumar *et al.*, 2014). 최근 20여 년간 선진국을 중심으로 도심지역(주요도로를 중심으로)에서 UFP가 건강에 미치는 영향에 대한 많은 보건역학과 독성학 연구가 진행되

있고, UFP가 호흡기, 심장혈관, 심근경색 질환 외에도 DNA, 뇌, 말초신경계 손상에 이르기까지 인체에 다양한 악영향을 미친다는 연구결과가 축적되고 있으나 (Hoek *et al.*, 2010; Oberdorster *et al.*, 2005; Sioutas *et al.*, 2005), 아직 농도와 건강 반응 사이에 대한 정량적인 관계는 정립되어 있지 않다(Hoek *et al.*, 2010).

도심에서의 주요 배출원인 자동차에서 배출된 UFP는 희석, 결착 (coagulation), 침전 (dry deposition), 증발과 응결 등의 활발한 운동역학적 과정을 빠르게 겪기 때문에 (Choi and Paulson, 2016), 대기 중 수명은 한 시간 정도로 PM<sub>2.5</sub> (약 10일 이상) 등의 큰 입자상 물질보다 매우 짧다 (Capaldo and Pandis, 2001). 짧은 대기 중 수명과 연소기관의 배출강도의 다양성, 도심 구조에 의한 지상 기상환경의 변화 등에 의해 도심에서의 UFP는 시공간적으로 매우 비균질한 분포 특성을 보인다 (Choi *et al.*, 2016). 특히, 주요도로와 그 주변에서는 도심 배경보다 10배 이상의 높은 농도가 나타나기도 한다 (Choi *et al.*, 2013). Choi and Kim (2018)은 한국 도시의 도로 인근에서의 평균 UFP 수농도는 도심 배경농도보다 약 5배 높음을 제시하였다. 따라서 한국의 도심과 같이 조밀한 주요 도로망과 주거지역이 인접한 교통집약적 환경에서는 주거지역 UFP 농도가 높은 수준을 유지할 수 있다.

외부 주요 도로망 인근의 주거지역에서는 실내 배출원이 없다면 대기 중 높은 농도의 UFP가 침투 (infiltration)나 환기 (ventilation)에 의해 유입되어 실내 UFP 농도 수준에 영향을 미친다 (Rim *et al.*, 2013; Chen and Zhao, 2011). 그러나 실내에서 흡연이나 요리, 난방과 같은 연소활동이 발생하면 외기에 비해서 제한된 희석효과로 실내 UFP가 매우 높은 농도로 증가하고 환기가 적절히 이루어지지 않으면 고농도가 오랜 시간 지속될 수 있다. 주요한 실내 배출원인 요리활동을 통해서만 분당  $1.14 \times 10^{12}$ 개의 UFP가 배출되는 것으로 제시되었다 (Kumar *et al.*, 2013). 그러나 많은 실내 미세먼지에 관한 선행연구는 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub>과 같은 큰 입자의 질량 농도에 초점을 맞추었고 수농도의 대부분을 차지하는 실내 UFP에 관한 연구는 상

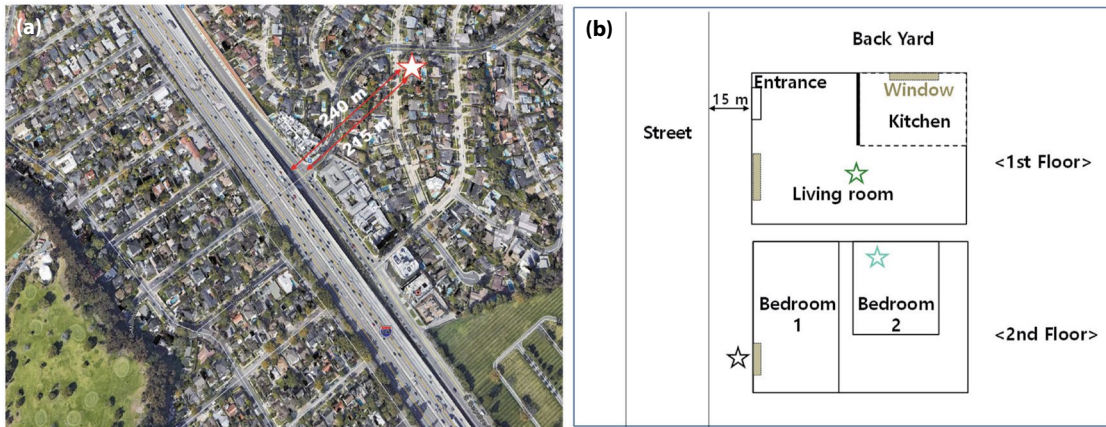
대적으로 많지 않다 (Rim *et al.*, 2013). 또한, 많은 실내 UFP 연구는 외부 UFP의 실내 침투에 초점을 두어 실내 연소활동에 의한 고농도 UFP 발생에 대한 연구는 더욱 부족하다.

전 세계적으로 도심에 거주하는 인구의 비율은 현재 55%에서 2050년 68%로 증가할 것으로 예상되며, 한국과 같은 고소득 국가의 도심 인구 비율은 약 82%까지 차지한다 (UN, 2019). 또한 평균적으로 한국에서 사람들이 하루 중 실내에서 약 80% 이상의 시간을 소비하는 것을 고려하면 (Choi and Ko, 2013), 도심지역에서 UFP에의 노출량 평가를 위해서는 다양한 도심과 주거 환경에 대하여 외부 UFP 농도와 함께 실내 농도 분포 특성을 정량적으로 평가하는 것이 요구된다 (예를 들면, 외기 UFP의 실내 침투율과 실내 배출 영향 등). 도심지역 UFP의 주요 배출원이 자동차와 같은 교통활동인 점과 한국과 같은 도로네트워크가 조밀한 도심지역에서의 대기 중 UFP 농도가 도심 배경지역보다 매우 높기 때문에 높은 농도의 UFP가 주거지에 유입될 수 있다는 점, 사람들이 실내에서 가장 많은 시간을 보낸다는 점, 요리활동과 같은 강한 실내 배출원이 존재한다는 점, 마지막으로 UFP의 인체에 미치는 독성이 보다 큰 입자들보다 강할 수 있다는 점에서 도시의 대기 뿐만 아니라 실내 UFP 농도의 분포에 대한 연구가 필요하다. 그러나 아직까지 한국에서는 실내 UFP 농도 분포에 대한 연구가 미미한 실정이다. 이에 본 연구에서는 비록 한국환경은 아니지만 실제 일상생활이 이루어지는 주거건물 (단독주택) 실내와 주변 대기의 UFP 농도 변화를 비교하여 실내 UFP 농도 분포 특성을 분석함으로써 한국에서의 실내 UFP 수농도 분포 특성을 연구하기 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

## 2. 방 법

### 2.1 측정지역과 측정기간

본 측정은 미국 캘리포니아 로스엔젤리스의 서쪽 도심에 위치한 단독주택을 대상으로 수행되었다. 대



**Fig. 1.** (a) Map of measurement site (red star represents the sampling house and red arrows denote distances from the highway (240 m) and adjacent arterial roadway (215 m)) and (b) schematic of indoor environments and locations of instruments (black star denotes outside, green star indoor on the 1<sup>st</sup> floor, and cyan star indoor on the 2<sup>nd</sup> floor). Street in (b) is small (no lane) and very quiet (with minimal traffic).

상 주거건물은 미국에서 가장 교통량이 많은 고속도로 중 하나인 I-405에서 약 240 m, I-405 고속도로에 바로 인접한 주요도로인 Sepulveda Blvd.에서 약 215 m 떨어진 곳에 위치하고 있는 단독 주택이다(그림 1). 대상 건물 주변은 단독주택 단지로서 두 개의 주요도로 외의 UFP 배출원은 존재하지 않는 환경이다(그림 1a). 측정 대상 주택은 2층 구조로 1층에는 거실과 부엌이 위치하고 2층에는 침실로 구성되어 있다. UFP 수농도는 건물의 내부와 외부를 포함하여 총 3곳에서 동시에 24시간 연속 측정되었다. 총 3대의 측정기기는 2층 높이의 주택 외부와 건물의 2층 안쪽 침실, 1층 부엌에 인접한 거실에 설치되었다. 부엌과 거실은 가림막 없이 개방되어 있는 형태(그림 1b, 1층의 아래 점선)로 부엌에서 요리활동이 발생할 때, 그 영향을 직접적으로 받을 수 있는 위치이지만 일층 현관과 부엌 사이는 이층으로 통하는 계단이 설치되어 막혀 있는 구조이다(그림 1b, 1층의 왼쪽 점선).

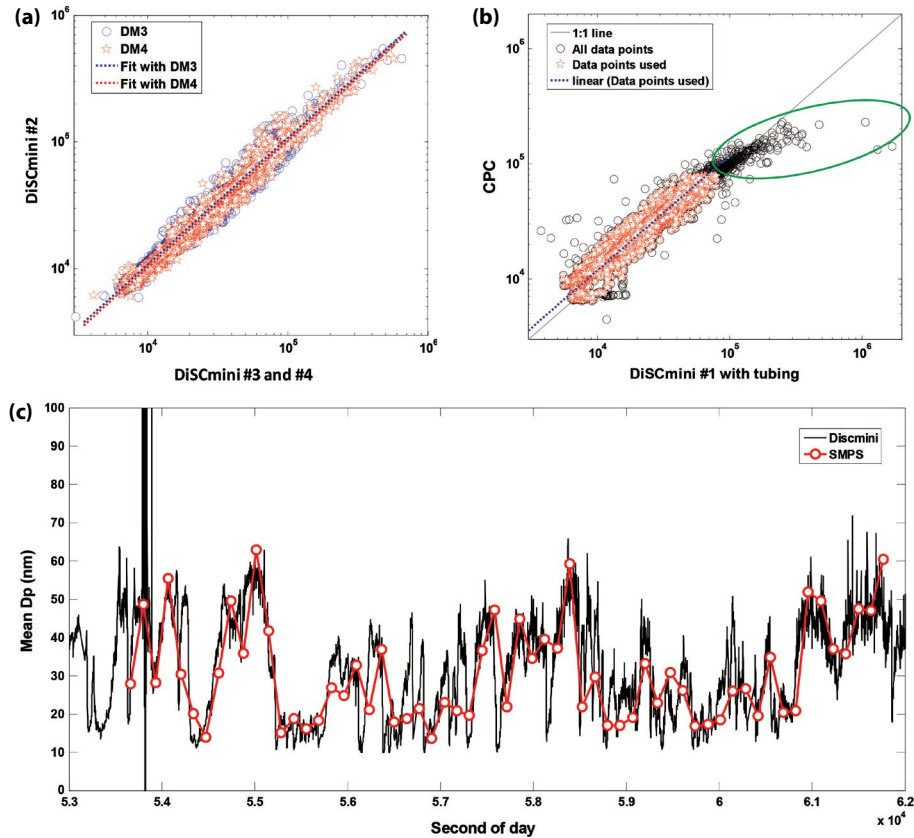
측정은 2013년 4월 9일~11일 총 3일간 수행되었다. 측정은 거주인의 실제 정상적인 생활이 이루어지는 환경에서 진행되어 일반 가정집 실내의 UFP 농도 수준을 반영할 수 있도록 하였다. 거주인은 비흡연자로 실내 흡연활동은 없었다. 측정기간에는 거주인이 생

활을 하면서 창문 개폐와 오븐 작동(요리활동) 시간을 기록하여 본 연구에서는 창문 개폐와 요리활동 여부에 대한 효과를 평가하였다. 거주인의 자발적인 기록에 의존하였기 때문에 모든 실내환경의 변화가 기록되었다고 볼 수는 없지만 거주인의 기록과 농도의 변화를 통해 의미 있는 결과를 도출할 수 있었다.

측정지역은 해안에서 약 7.3 km 떨어진 곳으로 연중 해륙풍의 영향을 강하게 받는 지역이다. 연중 낮에는 2~4 m/s 정도의 서풍계열의 바람이 우세하고 밤에는 <1 m/s의 매우 약한 북동풍계열의 바람이 우세한 기상조건이 상당히 균일한 지역이다(Choi *et al.*, 2013, 2012). 따라서 측정기간의 낮에는 주요도로로부터 풍하 측에 위치하고 밤에는 주요도로의 풍상 측에 위치하여 도로의 영향이 최소화하는 특성을 가진다. 측정지역의 측정기간인 4월 온도는 최저 13°C, 최고 20°C로 온화한 기후로 별도의 에어컨디셔너나 난방기의 사용이 이루어지지 않았다. 또한 측정기간에 강우는 발생하지 않았고 평년과 유사한 기상조건이었다.

## 2.2 UFP 수농도 측정기기

본 연구에서는 UFP의 수농도를 측정하기 위해 DiSCmini ultrafine particle counter (Matter Aerosol

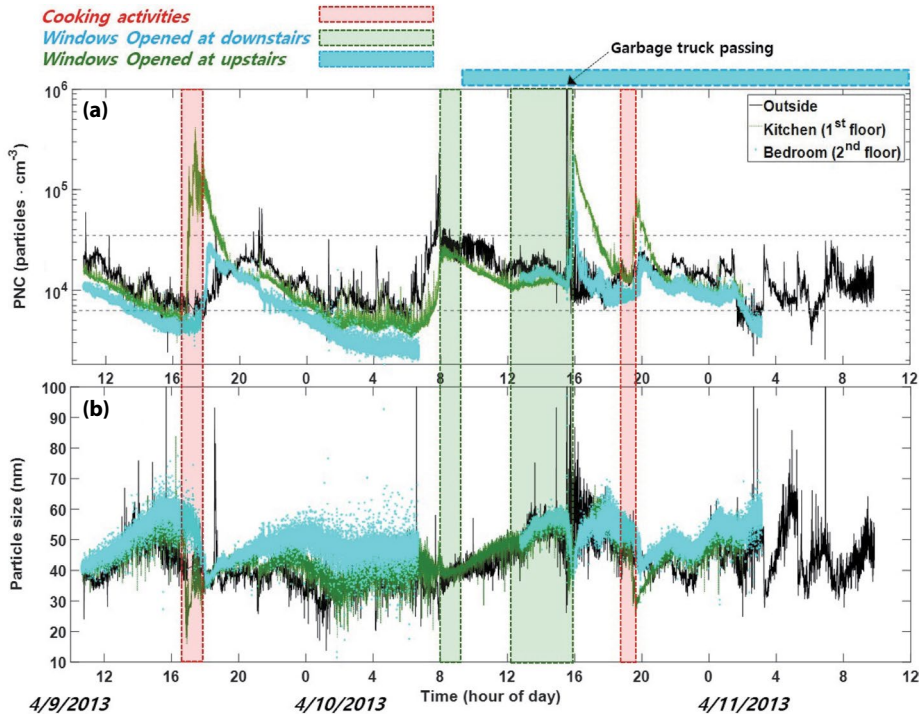


**Fig. 2.** Intercomparison results between DiSCmini vs. CPC and SMPS. (a) 1:1 comparison of readings between three DiSCmini (1 sec data), (b) comparisons of CPC values with DiSCmini's, (c) comparison of the mean particle sizes measured with DiSCmini vs. SMPS. All figures are taken from Choi *et al.* (2016)'s supplementary information Figs. S4~S6.

AG)를 사용하였다(Bau *et al.*, 2015). DiSCmini는 높은 시간해상도(1초)의 확산 크기분류기(fast diffusion size classifier)로 20~700 nm 크기 입자의 전체 수농도와 평균크기를 측정한다. DiSCmini가 측정하는 입자의 최대크기는 700 nm이지만 도심지역에서 100 nm 이하의 입자가 전체 수농도의 90% 이상을 차지함을 고려하면(Harrison *et al.*, 2011) 측정된 수농도를 UFP의 수농도로 어렵더라도 무리가 없으며, 실제 평균 입자의 크기는 60 nm 이하였다. 또한, 측정 가능한 가장 작은 크기의 입자가 20 nm임을 고려하면 DiSCmini가 측정된 수농도는 오히려 하한(lower limit)이라고 볼 수 있다. Choi *et al.* (2016)은 본 측정에서 사용한 기기를 포함한 총 4대의 DiSCmini와 전통적인 수농도 측

정기기인 CPC (condensation particle counter, TSI Model 3007)를 측정지역과 유사한 기상환경을 가지는 여러 곳에서 비교측정을 수행하였다. 그 결과 매우 높은 선형성을 보였고( $R^2 > 0.9$ ), 선형성이 시간과 장소에 따라 일정하게 유지되어 실제 대기 중에서 수농도 측정에 DiSCmini가 적합함을 제시하였다. 또한 전통적으로 에어로졸의 크기분포 측정에 사용되는 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer, TSI Model 3080)와 비교측정을 수행하여 두 기기의 평균 입자 크기가 일치함을 제시하였다(Choi *et al.*, 2016). DiSCmini의 성능 평가에 대한 보다 자세한 사항은 Choi *et al.* (2016)에 기술되어 있고 참고를 위해 그림 2에 Choi *et al.* (2016)의 보조자료에 제시한 비교 결과를





**Fig. 3.** Time-series of (a) particle number concentrations (PNC) and (b) mean particle sizes. Black solid line shows PNC at outside of the house, green dotted line PNC at kitchen in the 1<sup>st</sup> floor, and sky-blue line PNC in bedroom in the 2<sup>nd</sup> floor. Red rectangle represents the period when oven was turned on, green rectangle the periods when a window was opened at downstairs, and sky-blue rectangle the period when a window was opened at upstairs. (a) Upper gray horizontal dashed line shows the mean daytime PNC near the house in 2004 (Zhu *et al.*, 2006) and lower dashed line shows the median daytime PNC in the area of the house in 2011 (Choi *et al.*, 2013).

제시한다.

본 연구에서는 Choi *et al.* (2016)에서 수행한 비교측정 결과에 근거하여 제시한 각 DiSCmini의 보정계수를 사용하여 수농도는 CPC에 상응하게, 평균크기는 SMPS 평균크기에 상응하도록 보정한 후 실내외 수농도와 크기 비교에 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 시계열 변동(Time-series)

그림 1에 측정기간 각 측정위치에서의 UFP 수농도(PNC; Particle Number Concentration)와 평균크기의 시계열 변동을 나타내었고 시간대별 내부 환경의 변

화를 함께 표시하였다. 요리활동이 발생했던 기간은 빨간색 음영으로, 1층 창문이 열렸던 기간은 초록색 음영으로, 2층 창문이 열렸던 기간은 그림 위에 하늘색 사각형으로 표시하여 시계열과 실내 환경을 함께 살펴보았다.

측정기간 외부의 UFP 수농도는 약 6,000 particles·cm<sup>-3</sup>에서 20,000 particles·cm<sup>-3</sup> 사이에서 변화하였으며 출근시간대에 교통량 증가에 의한 농도 증가와 밤시간 교통량 감소와 풍향의 변화(풍하측 위치)로 인한 농도 감소를 나타내었다(그림 3a). 이는 도심지역에서 전반적으로 나타나는 일변동과 유사하다. 외부 농도의 변화 범위 상한은 2004년 같은 지역에서 고속도로의 영향을 직접 받는 지역의 낮시간 평균 농도와 유사하였고(Zhu *et al.*, 2006) 하한은 2011년 측정지역

인근의 주택가에서 낮시간 동안 측정된 중위값 농도와 유사한 수준을 나타내었다(Choi *et al.*, 2013). 또한 간헐적인 농도의 급증(spike)이 나타났는데(4월 10일 8시와 19시), 이는 주택 옆의 작은 도로로 지나간 쓰레기 수거 트럭(거주자 기록)과 같은 고배출 차량에 의한 효과로 보인다. 실제로 거주자가 기록한 쓰레기 수거 트럭이 지나갔을 때는 농도가 순간적으로  $3 \times 10^6$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup> 이상으로 치솟았으며 이는 외기의 중간값 농도의 100배에 달한다. 고배출 차량에 의해 발생한 외기 농도의 급증은 열린 창문을 통해 실내로 유입됨을 시계열 변동에서 보인다(4월 10일 16시). 흥미로운 사건은 외부의 고농도 UFP 유입이 발생한 직후 일층의 거실 창문이 닫혔다는 것이다. 이에 일층 거실의 농도는 고농도가 상대적으로 장시간 유지된 반면 창문이 열린 이층 침실에서는 농도가 빠르게 감소하였다.

실내의 UFP 수농도는 전반적으로는 외부 UFP 농도보다 낮은 농도를 보였으며 주택의 가장 안쪽에 위치한 2층 침실에서의 농도가 가장 낮았다. 그러나 실내 UFP 시계열 변동이 외부 농도의 시계열 흐름과 같은 변동성을 나타내어 실내 UFP 수농도가 외부의 농도 수준에 따라 변화함을 보여주었다(그림 3a). 실내의 수농도가 외기의 농도 변화를 따르지 않았던 기간은 두 번 발생하였으며 모두 실내에서 요리활동이 발생했던 기간이었다(4월 9일 16:30과 4월 10일 19:30). 이는 실내 UFP 수농도의 주요배출원이 요리활동과 같은 실내 연료연소임을 보여준다.

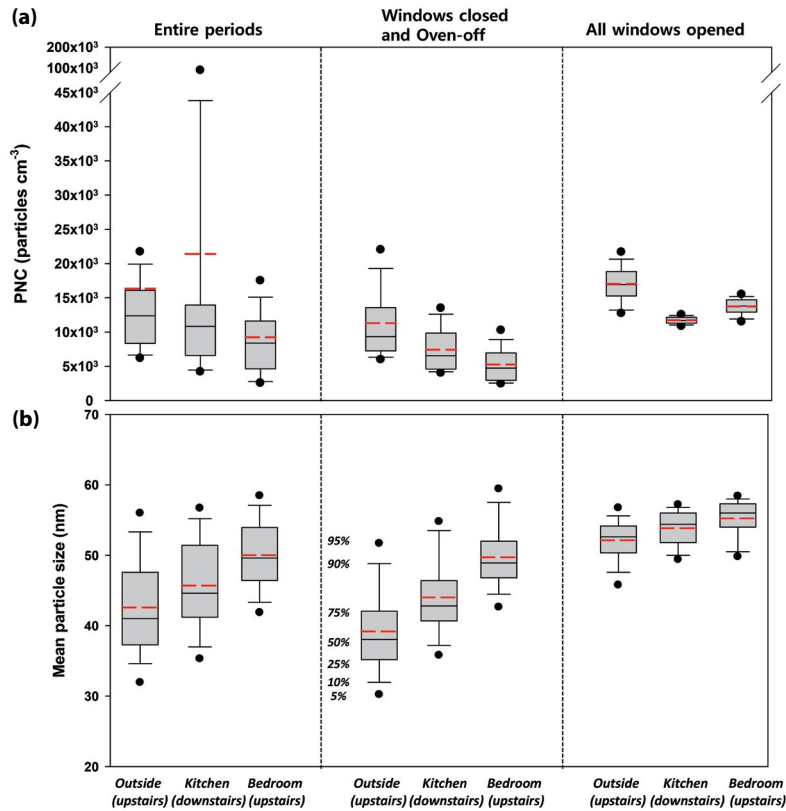
입자의 평균크기는 30~60 nm 사이에서 변화하였다(그림 3b). 지름 50~60 nm는 측정도시에서의 도심 배경농도의 크기분포와 유사하다(Choi *et al.*, 2012). 전반적인 평균크기 시계열의 특징은 수농도가 높아질 때 평균크기는 작아지며 수농도가 감소하면 평균크기는 증가한다는 것이다. 이는 고농도의 수농도는 주로 매우 작은 크기의 입자 수에 의해 결정이 된다는 것을 보여준다. 고농도의 수농도가 발생할 때 평균크기가 급격히 작아진다는 것은 건강의 영향에도 큰 의미를 가진다. 지름이 30 nm인 입자는 호흡기관의 가장 깊

숙한 영역인 폐포 영역에 약 43%의 비율로 침적되며 이 침적 비율은 지름이 60 nm인 입자의 경우 약 26%까지 감소한다(Choi and Kim, 2018; Oberdorster *et al.*, 2005). UFP가 고농도일수록 크기가 감소한다는 것은 더 많은 나노미세먼지가 더 높은 비율로 인체의 가장 깊은 호흡기영역에 침적될 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이에 대한 자세한 논의는 뒤에서 다룬다.

### 3.2 실내와 외부 대기의 수농도(PNC; Particle Number Concentration) 분포

#### 3.2.1 실내와 외부의 수농도 분포

전체 측정기간 중간값 PNC는 외부 공기(ambient air)가  $1.24 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>로 가장 높았고 1층 부엌과 인접한 거실에서  $1.08 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>로 그 뒤를 이었으며, 외부로부터 가장 깊은 2층의 침실에서  $0.84 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>로 가장 낮았다(그림 4a). 이는 앞 절의 시계열 변동에서 논의한 것처럼 실내 UFP 농도가 전반적으로는 외부 대기로부터의 유입에 영향을 받음을 제시한다. 그러나 평균농도는 1층 거실에서  $2.14 (\pm 4.94) \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>를 기록하여 외부 대기에서의 평균농도  $1.63 (\pm 10.31) \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>보다 높았으며 상위 90% 농도 역시  $4.38 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>로  $1.99 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>인 외부 대기보다 높았다. 이는 두 가지 원인에 기인하였다. 첫째는 1층 거실에 인접한 부엌에서의 요리활동에 의한 실내 배출이며, 둘째는 외부 대기에서의 고농도 UFP spike에 의한 실내 유입이다. 이러한 원인들은 모두 사건이 발생했을 경우 상대적으로 단기간에 영향을 주는 것으로 보인다. 이는 외부 대기에서의 전체 측정기간 PNC 표준편차가  $10.31 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>로 매우 큰 변동성을 보인 반면, 1층 거실에서의 PNC 표준편차는  $4.09 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>로 외부 대기의 변동성보다 작았으며 상위 75% 농도 역시 외부의  $1.61 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>보다 낮은  $1.39 \times 10^4$  particles  $\cdot$  cm<sup>-3</sup>를 기록한 것에서 유추할 수 있다(표 1). 다만 어떠한 원인에 의해 실내농도가 급격히 증가하였을 경우 환기가 이루어지지 않으면, 외부 공기에서의 농도 spike가



**Fig. 4.** Box plots of PNC for three distinct condition periods: entire period (left panel), windows-closed and no cooking activities (middle), and windows in both the first and second floor opened and no cooking activities (right). Red horizontal broken lines denote the mean concentrations.

나타났을 때에는 달리 실내 고농도가 장시간 유지될 수 있음을 앞 절의 시계열 변동에서 논의하였다.

실내의 배출원이 없고 외부로부터의 즉각적인 고농도 유입이 제한된 조건(windows-closed and oven-off)과 창문을 통한 외기와의 교환이 이루어진 조건(Windows opened and oven-off)에서의 실내 농도 분포는 외부 농도 대비 차이를 나타내었다(그림 4a). 예상처럼 창문이 닫힌 조건에서는 외부, 1층 거실, 2층 침실 순으로 농도가 감소하는 분포가 명확하게 나타났고, 창문이 열린 조건에서는 1층 거실과 2층 침실의 농도가 유사하게 유지되었고 외기 농도와의 차이가 줄어들었다. 이는 실내 배출이 없는 경우에는 외기에서의 유입이 실내 UFP 농도의 주요 결정 인자임을 제시한다. 또한 2층 침실에서 외기와의 농도 비율인 실내외

농도비(Indoor/Outdoor ratio, I/O ratio)는 창문이 닫혀 있는 조건에서는 평균과 중간값이 각각 0.48과 0.47인 반면, 창문이 열린 조건에서는 0.82로 크게 증가한 것 역시 이를 뒷받침한다(표 1). 일층 거실에서는 창문이 닫힌 조건과 열린 조건에서의 평균 I/O ratio가 0.68에서 0.71로 조금 증가하였으나 I/O ratio 중간값은 0.69로 변화가 없었다. 그 이유는 외기에서 UFP 농도 측정이 2층에서 이루어졌기 때문일 가능성과 주택이 목재건물로 되어 있고 일층의 경우 외부와 공기교환이 이루어지는 창문 이외의 틈새 공간이 넓어 침투효율(infiltration efficiency)이 높았을 가능성이 있다. 그러나 수집된 자료만으로는 이에 대한 명확한 이유를 알 수 없다.

앞 절의 시계열 변동에서 제시한 것처럼 수농도가

**Table 1.** Statistical summary of observed PNC in three locations (outside, kitchen, and bedroom) for the entire monitoring period, under conditions of windows closed and oven-off, and under conditions of all windows opened and oven-off (1 sec. data point).

PNC ( $\times 10^4$ particles $\cdot$ cm $^{-3}$ ) and I/O ratio		Entire period (N = 114,328)			Windows closed/Oven-off (N = 55,975)			Windows opened/Oven-off (N = 9,073)		
		Amb. <sup>a</sup>	Kit. <sup>b</sup>	Bed	Amb.	Kit.	Bed	Amb.	Kit.	Bed
Mean (1 $\sigma$ )	PNC	1.63 (10.03)	2.14 (4.09)	0.92 (0.81)	1.13 (0.57)	0.74 (0.33)	0.53 (0.25)	1.70 (0.27)	1.17 (0.06)	1.38 (0.12)
	I/O ratio <sup>c</sup>	-	2.09	0.76	-	0.68	0.48	-	0.71	0.82
Median	PNC	1.24	1.08	0.94	0.98	0.68	0.47	1.69	1.16	1.37
	I/O ratio <sup>c</sup>	-	0.74	0.61	-	0.69	0.47	-	0.69	0.82
Lower 25%	PNC	0.83	0.66	0.46	0.73	0.46	0.30	1.53	1.13	1.29
Upper 25%	PNC	1.61	1.39	1.16	1.36	0.99	0.70	1.88	1.21	1.47
Upper 10%	PNC	1.99	4.38	1.51	1.93	1.26	0.89	2.06	1.24	1.52

<sup>a</sup>Amb. denotes ambient air outside

<sup>b</sup>Kit. denotes kitchen on the 1<sup>st</sup> floor

<sup>c</sup>I/O ratio is the mean of I/O ratios for each pair of data points (not the ratio of the mean PNCs).

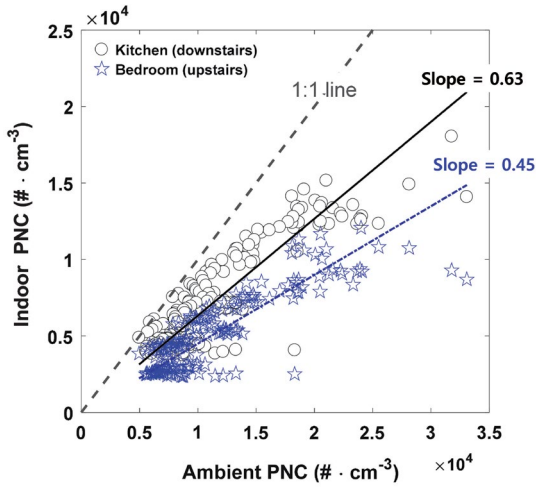
증가하면 평균 입자의 크기가 감소하는 경향은 실내외 농도와 평균크기 분포에도 나타난다(그림 4b). 창문이 닫혀 있고 요리활동이 없는 환경에서 외부 대기 중의 평균 UFP 크기는 39.2( $\pm 6.4$ ) nm였으나 실내에서는 1층 거실에서 44.0( $\pm 5.6$ ) nm, 2층 침실에서는 49.7( $\pm 4.8$ ) nm였다. 이러한 현상의 원인은 두 가지로 생각할 수 있다. 첫째는 UFP가 외부에서 실내로 유입될 때, 보다 작은 크기의 입자의 침투효율이 큰 입자보다 낮을 수 있다. Zhu *et al.* (2005)은 측정지역과 동일한 고속도로에 인접한 주거건물에서 실내와 외부의 에어로졸 크기분포를 비교하여 20 nm 이상의 에어로졸에 대해서는 크기가 작을수록 I/O ratio가 감소함을 제시하였고, McAuley *et al.* (2010) 또한 미국 북부지역의 고속도로에 인접한 주택에서의 측정결과, 20 nm에서 가장 작은 I/O ratio (~0.2)를 제시하였다. 둘째로는 실내로 유입된 나노미세먼지가 급격한 역학과정을 거치면서 제거되었을 가능성이 있다. 크기가 작은 입자는 확산속도가 크기 때문에 침전(dry deposition)과 결착(coagulation)이 빠르게 진행된다(Choi and Paulson, 2016; Seinfeld and Pandis, 2016). 이로 인해 UFP의 대기 중 수명은 PM<sub>2.5</sub> (지름 2.5  $\mu$ m 이하의 입자상물질)

보다 매우 짧다(약 수 시간 이내) (Choi and Paulson, 2016; Kumar *et al.*, 2010). 실내에는 가구들과 내벽 등의 넓은 surface가 존재하여 침전이 대기 중보다 효율적으로 발생할 수 있다. 모든 창문이 열린 조건에서 외부 대기의 UFP 수농도가 모든 창문이 닫힌 조건보다 높음에도 크기가 더 큰 것은 측정 시간과 날씨가 달라 입자상물질의 특성이 다르기 때문이다. 그러나 모든 창문이 열린 조건에서는 외부 대기와 실내 공기에서의 평균크기 차이가 크지 않아 외부 공기의 침투효율(infiltration efficiency)이 매우 높았음을 알 수 있다. 평균크기가 인체에 침적되는 영향에 대해서는 마지막 절에서 상세히 다룬다.

### 3. 2. 2 실내외 농도비(Indoor/Outdoor ratio)와 선행연구 결과와의 비교

표 1의 평균 I/O ratio와 중간값 I/O ratio는 실내 배출이 없는 환경에서는 유사하였으나 전체 기간을 대상으로 하였을 때는 큰 차이를 나타내었다(2.09 vs. 0.74). 평균 I/O ratio가 매우 높은 원인은 실내 배출로 인한 급격한 실내농도 증가와 외부에서 일시적인 spike 농도가 실내로 유입된 뒤에 창문이 닫혀 외부 대





**Fig. 5.** Scatter plot of Indoor PNC vs. ambient PNC (outdoor) and linear fits (black solid line: kitchen on 1<sup>st</sup> floor; blue broken line: bedroom on 2<sup>nd</sup> floor). Black circles denote data measured in living room (adjacent to kitchen) and blue stars in bedroom on 2<sup>nd</sup> floor.

기의 농도가 감소하였음에도 실내에서 고농도가 오랜 시간 지속된 영향이 컸기 때문이다. 또한 해당 기간 전체의 평균 농도 또는 중간값 농도를 이용한 I/O ratio(표 1의 평균 또는 중간값을 이용한 계산)와 짧은 time-span의 자료쌍(a pair of indoor and outdoor data)으로 획득한 I/O ratios의 평균이나 중간값 사이에 큰 차이를 나타낸다(예, 표 1의 전체기간 평균 농도를 이용한 I/O ratio = 2.14/1.63 = 1.31 vs. 2.09). 이외에도 외기와 실내농도의 1:1 산포도에서 선형 회귀법(linear fitting)을 이용하여 구한 기울기로 I/O ratio를 결정할 수 있다(그림 5). 창문이 닫히고 요리활동이 없던 기간에 선형 회귀분석을 통해 획득한 I/O ratio는 1층 거실과 2층 침실에서 모두 표 1에 제시한 값보다 작은 0.63 (vs. 0.68)과 0.45 (vs. 0.48)을 기록하였다. 세 가지 방법을 이용한 I/O ratio가 다르며, 때에 따라서는 매우 큰 차이를 보이기도 하기 때문에 I/O ratio를 제시할 때는 목적에 가장 적합한 time-span을 이용하여 산출하고 이를 명확하게 제시할 필요가 있다.

한국에서의 실내외 UFP 수농도 동시측정을 통한 비교연구는 아직 부족하지만 선진국을 중심으로 이에

**Table 2.** Summary of indoor/outdoor ratios of particle number concentrations reported in previous studies.

Site	Indoor PNC ( $\times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ )	Outdoor PNC ( $\times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ )	I/O ratio	Notes	Sampling year	References
West Los Angeles, CA (USA)	0.97	1.75	0.6~0.9 (70~100 nm) 0.1~0.4 (10~20 nm)	Under infiltration conditions from 4 empty apartments (mean values for PNC)	2003	Zhu et al. (2005)
Buffalo, NY (USA)	1.3	4.6	0.29 <sup>a</sup>	Averaged mean PNC from 5 homes	2006	McAuley et al. (2010)
Somerville, MA (USA)	0.52	0.59	0.95	Averaged median values obtained from 18 homes	2010	Fuller et al. (2013)
Basel, Geneva, Lugano (Switzerland)	0.78	1.02	0.78	Median values obtained from 80 homes	2011~2012	Meier et al. (2015)
Leipzig (Germany)	0.34	0.49	0.65	Median values from 40 non-smoking homes	2016~2017	Zhao et al. (2020)

<sup>a</sup>Ratio calculated with the overall median values of indoor and outdoor PNC.

대한 선행연구가 꾸준히 진행된 바 있다. 본 연구결과와 비교하기 위해 선택한 선행연구에서 제시한 실내외 수농도와 I/O ratio는 매우 큰 분포를 나타낸다 (0.29~0.95; 표 2). 이는 측정지의 주변환경, 건물구조와 재질, 실내구조와 실내에서의 측정위치, 기상조건 및 환기방식 등의 다양한 요인에 기인한 것으로 보인다. 선행연구에서의 외부 대기 중 중간값 수농도는  $0.49\sim 4.6 \times 10^4$  particles·cm<sup>-3</sup>의 범위를 보여 본 연구기간의 중간값인  $1.24 \times 10^4$  particles·cm<sup>-3</sup>와 유사한 수준을 보였다. 실내 평균 중간값 농도는 선행연구에서  $0.34\sim 1.30 \times 10^4$  particles·cm<sup>-3</sup>의 범위가 제시되었는데 본 연구의 실내농도 중간값은  $1.08 \times 10^4$  particles·cm<sup>-3</sup> (1층 거실) 및  $0.94 \times 10^4$  particles·cm<sup>-3</sup> (2층 침실)로 선행연구의 농도범위 안에 포함된다. 중간값 I/O ratio는 본 연구에서는 1층 거실에서 0.74, 2층 침실에서 0.61을 기록하였는데 이는 미국 마이애미주 (0.95)와 뉴욕주 (0.29)를 제외한 지역의 주택에서의 수치와 유사한 값이다. 선행연구 결과와 본 연구결과의 비교를 토대로 주택에서 UFP 수농도의 I/O ratio는 대략 0.5~0.8 정도를 나타낼 것으로 추측된다. 그러나

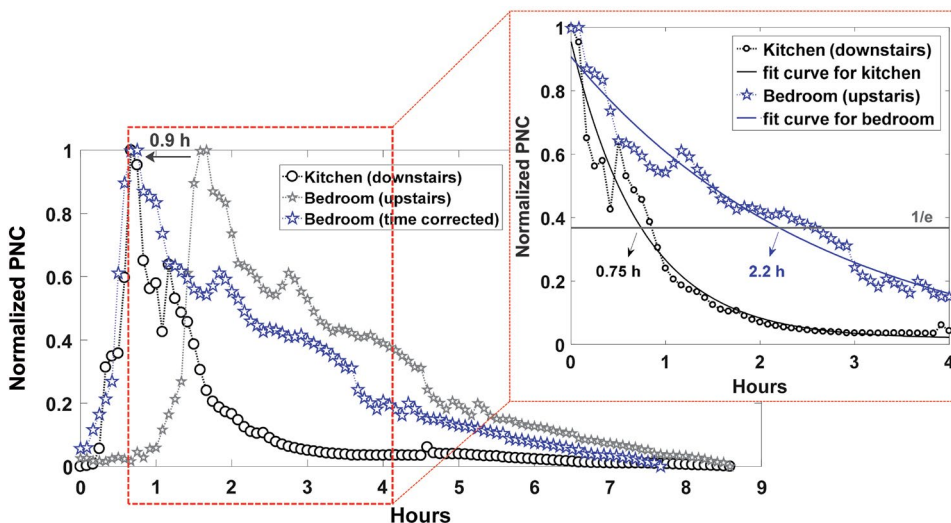
I/O ratio는 계절의 영향과 실내 배출원의 강도 및 종류 등 많은 요소들에 의해 영향을 받으며 본 연구와 선행연구들은 주로 저층의 주택을 대상으로 하였기 때문에 계절별 기상조건이 상이하고 고층 아파트가 많은 한국의 환경에서의 추가적인 연구가 요구된다. 본 논문에서는 한국 측정자료의 부족으로 한국에서의 결과비교는 수행하지 못하였다.

### 3.3 실내 배출과 외기의 고농도 유입에 의한 실내 UFP 체류시간 (Residence time of indoor PNC during emission/infiltration events)

본 절에서는 요리활동을 통한 실내 배출과 외부 고농도 spike의 실내 유입에 의한 실내 고농도 발생기간의 수농도 변화 특성을 실내 체류시간의 관점에서 토의하고자 한다.

#### 3.3.1 사례 I: 요리활동에 의한 실내 배출

4월 9일 16:30경에 요리활동이 기록되었고 부엌과 인접한 1층 거실에서 순간 최대농도  $42.3 \times 10^4$  particles·cm<sup>-3</sup>의 고농도가 발생하였다. 요리활동이 이루



**Fig. 6.** Temporal variations of normalized PNC during cooking activity. Circles represent 5-min. average PNC in living room adjacent to kitchen, gray stars in bedroom on 2<sup>nd</sup> floor, and blue stars time-adjusted PNC variations in bedroom. Insert is a decay plot of time-lag adjusted normalized PNC with time starting at peak concentration. Black and blue solid lines represent exponential fits in living room and bedroom, respectively.

어졌을 때 모든 창문은 닫혀 있는 환경이어서 1층 거실에서의 실내 고농도는 약 3시간 동안 지속되었다(그림 6). 거실에서 최대농도가 발생한 후 0.9시간 이후 2층의 침실에서 농도 증가가 관측되었고 2층 침실에서의 고농도가 이전의 농도 수준으로 감소하기까지는 약 4시간 이상 소요되어 더 오랜 시간 체류하였다(그림 6). 실내 UFP 수농도의 감소속도는 지수함수(exponentially)의 형태를 잘 따랐기 때문에(식 1과 2) 실내공기 중 체류시간을 최고농도로부터  $1/e$ 배가 되기까지의 전통적인 개념을 적용하면 1층 거실에서의 체류시간은 0.75시간, 2층 침실에서는 2.2시간으로 평가되었다(그림 6의 삽입그림). 체류시간은 침전속도와 환기속도 합 역수로 표현할 수 있기 때문에 침전과 환기를 포함한 전체 실내 제거속도는 1층 거실과 2층 침실에서 각각  $1.328 \text{ h}^{-1}$ 와  $0.372 \text{ h}^{-1}$ 로 평가할 수 있다. 이는 그림 5에서 제시한 1층 거실과 2층 침실에서의 I/O ratio의 차이와도 일치한다(여기서 환기속도는 침투효율로 대체될 수 있다). 침실과 거실에서의 침전속도가 유사하다고 가정한다면 이러한 차이는 환기속도 또는 침투효율에 기인하였다고 볼 수 있다. 모든 창문이 닫힌 조건에서는 1층 거실이 현관문, 넓은 창문, 부엌과 뒷마당으로 통하는 창문형태의 넓은 문 등 외부와의 공기 교환이 활발한 조건을 가지고 있다.

$$PNC(\text{normalized}) = 0.94e^{-1.328 \cdot t} + 0.02$$

$$(1\text{층 거실: } R^2 = 0.968) \quad (1)$$

$$PNC(\text{normalized}) = 0.96e^{-0.372 \cdot t} - 0.06$$

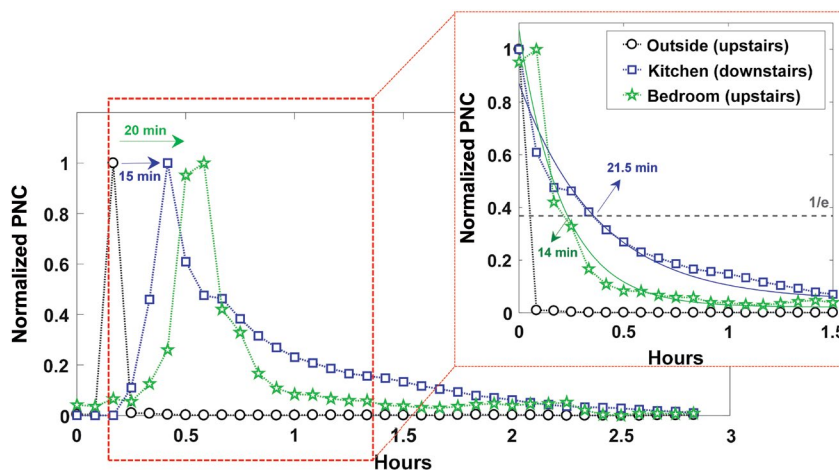
$$(2\text{층 침실: } R^2 = 0.979) \quad (2)$$

### 3.3.2 사례 II: 외부 고농도의 침투로 인한 실내

#### 고농도 사건(Infiltration of outside plume)

4월 10일 16:00경에 주택 외부에서 쓰레기 수거 트럭으로 추정되는 UFP 고배출 차량의 활동이 기록되었고 외부 대기 중 순간 최대농도가  $3.6 \times 10^6 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-3}$ 까지 치솟는 사건이 발생하였다(그림 3). 이 사건은 약 3분 정도 지속되었고 그후 빠르게 사건발생 전의 농도인  $1.2 \times 10^4 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-3}$ 까지 감소하였다. 사건 발생기간 1층과 2층의 창문은 모두 개방된 환경이었고 약 15분과 20분 뒤에 각각 1층 거실과 2층 침실에서의 농도가 급격히 증가하였다. 이 사례의 흥미로운 점은 1층 거실의 농도가 증가한 이후 1층 창문이 닫혀 외부 spike 고농도의 실내 유입 후 환기가 제한적으로 이루어진 것이다. 반면 2층 창문은 여전히 개방되어 있었다.

본 사건으로부터 두 가지 흥미로운 사실을 알 수 있었다. 첫째, 외부 고농도 발생으로부터 실내 고농도 출현 사이에 시간지연이 있다는 점이다(그림 7). 지연시



**Fig. 7.** Same as Fig. 6 except during the event of ambient-spike infiltration into indoor. Black circles represent 5-min. average normalized PNC outdoor, blue squares in living room adjacent to kitchen, green stars in bedroom on 2<sup>nd</sup> floor.

간은 도로로부터 주택까지 이동시간(15 m)와 실내로의 침투시간을 모두 포함한다. 앞절에서 I/O ratio를 산출할 때 time-span에 따라 달라질 수 있음을 언급하였는데 짧은 time-span을 적용할 경우, 이러한 시간지연은 I/O ratio를 결정하는 데 영향을 줄 수도 있다(고농도 발생기간 이상의 time-span을 적용할 경우는 영향이 없다). 예를 들면, 5분 평균을 사용하여 본 고농도 발생 직후 100분간의 1층 거실과 2층 침실에 대한 평균 I/O ratio는 각각 11.4와 2.3이다. 그러나 지연시간을 조정하여 실제 외부 농도에 대응하는 실내농도에 대한 I/O ratio를 적용한다면 I/O ratio는 10.4와 1.9로 나타난다. I/O ratio는 침투계수(penetration factor)와 침전속도(deposition rate)를 산출하기 위한 질량균형식을 풀기 위해 사용될 수 있는데, 이때 외부와 실내의 시간지연의 조정이 필요함이 제시된 바 있다(Zhu *et al.*, 2005).

둘째, 3분 정도의 매우 짧은 기간의 외부 고농도 스파이크의 유입도 실내에 유입된 이후 외부와의 환기가 제한되면 더 오랜 시간 지속될 수 있다는 점이다. 본 사건의 경우 2층 침실에서의 체류시간(14분)이 1층 거실(21.5분)보다 짧았다. 2층 침실이 거실보다 도로와의 거리가 멀고 외부와 기기 설치 침실 사이에 또 다른 침실이 존재하지만 창문이 열려 있던 조건인 반면, 1층 거실은 창문이 닫혀 있어 환기효율이 떨어졌기 때문으로 보인다. 본 사건에 대한 침전과 환기를 포함한 전체 실내 제거속도는 1층 거실에서  $2.64 \text{ h}^{-1}$ (식 3), 2층 침실에서  $4.78 \text{ h}^{-1}$ (식 4)이었다(그림 7).

$$PNC(\text{normalized}) = 0.824e^{-2.638 \cdot t} + 0.04$$

(1층 거실:  $R^2 = 0.962$ ) (3)

$$PNC(\text{normalized}) = 1.05e^{-4.784 \cdot t} + 0.02$$

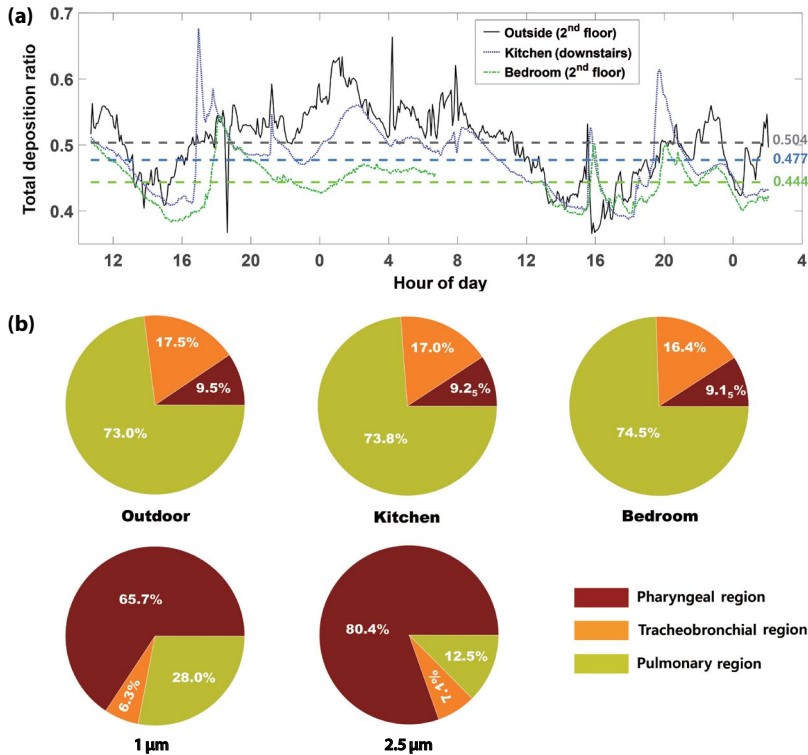
(2층 침실:  $R^2 = 0.938$ ) (4)

### 3. 4 Deposition ratios of inhaled particles

외부 대기보다 실내 UFP의 평균크기는 전반적으로 큰 경향을 보였다(그림 4). 이 결과는 Meier *et al.* (2015)의 결과와 일치하며 20 nm 정도의 작은 입자가 보다

큰 입자들보다 침투효율이 낮다는 Zhu *et al.* (2005)와 McAuley *et al.* (2010)의 결과와도 일관성이 있다. 이러한 입자크기의 차이는 인체에서의 침적율 차이를 야기하며(Choi and Kim, 2018; Oberdorster *et al.*, 2005), 따라서 실내 UFP 노출에 의한 건강의 영향을 평가하는 데 중요한 지표로 활용될 수 있다. Kumar *et al.* (2014)은 호흡기관(인두영역+기관기관지+폐포)에 침적되는 정도는 UFP의 수가 지배함을 언급하였고, 평균 크기분포를 반영함으로써 호흡기관 침적율을 영국 캐임브리지에서는 0.66인 반면 인도 델리에서는 0.41로 산정하였다. 이는 흡입한 에어로졸의 66%와 41%가 인체 호흡기관에 침적됨을 의미한다.

본 연구에서 UFP의 평균크기에 대한 호흡기관에의 침적율은 ICRP model(ICRP, 1994)을 이용하여 계산하였다. 측정기간 외부 대기와 실내에서 측정된 평균 호흡기관 침적율은 5분 평균자료 기준으로 외부 대기에서 0.504, 1층 거실에서 0.477, 2층 침실에서는 0.444로 산정되어, 외부 대기에 비해 2층 침실에서의 침적율이 약 10% 정도 낮았다(그림 8a). 그러나 보다 중요한 변수는 호흡기관의 부분별 침적율이 될 수 있다. 그 이유는 상부 호흡기관에 비해 인체에 보다 깊숙한 하부 호흡기관에 침적될 경우 체내배출에 보다 오랜 시간이 걸리며 장시간 영향을 줄 수 있기 때문이다. 본 연구에서 계산한 침적율은 상부 호흡기관(인두영역, pharyngeal region)의 경우 실내외 모두 전체 침적율의 9% 초반인 반면, 중간 호흡기관(기관기관지영역, tracheobronchial)에서의 침적율은 외부 대기에서 전체 침적율의 17.5%, 1층 거실에서 17.0%, 2층 침실에서는 16.4%를 보였다. 가장 중요할 것으로 판단되는 하부 호흡기관(폐포영역, alveolar)은 외부 대기에서 전체 침적율의 73.0%, 1층 거실에서 73.8%, 2층 침실에서 74.5%를 보였다(그림 8b). 이는 외부 대기, 1층 거실, 2층 침실에서 흡입한 전체 UFP 수의 각각 35.4%, 33.5%, 30.9%가 인체 호흡기관의 가장 깊숙한 영역인 폐포영역에 침적됨을 의미한다. 비교를 위해 1  $\mu\text{m}$ 의 입자가 상부, 중간, 하부 호흡기관에 침적되는 비율이 각각 28.5%, 2.7%, 12.2%이며, 2.5  $\mu\text{m}$  입자는



**Fig. 8.** (a) Time-series of total deposition fractions of inhaled PNC in human respiratory tract in ambient air (black), in living room on 1<sup>st</sup> floor (blue), and in bedroom on 2<sup>nd</sup> floor (green). Horizontal dashed lines represent the mean values. (b) Fractions of the total deposition ratio for upper (pharyngeal-), middle (tracheobronchial-), and deeper (alveoli-region) respiratory tract.

각각 69%, 6.1%, 10.8%이다. 따라서, 인체 호흡기관에 침적되는 1  $\mu\text{m}$ 와 2.5  $\mu\text{m}$  입자는 대부분 상부 호흡기관에 집중되어 있다.

전체 수농도의 대부분을 UFP가 차지하고 있으며 이들이 중간과 하부 호흡기관에 침적되는 비율이 1  $\mu\text{m}$ 와 2.5  $\mu\text{m}$ 에 비해 월등히 높다는 사실은 우리가 대기 중과 실내에서의 UFP 수농도 분포에 지속적인 관심을 기울여야 함을 제시한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 2층 단독주택의 실내 2곳(1층의 부엌과 인접한 거실과 2층의 외부와 접촉이 최소화된 침실)과 외부 대기에서 나노미세먼지(UFP; UltraFine Par-

ticles)의 수농도와 평균크기의 동시측정을 통해 실내외 UFP의 시공간적 분포 특성을 파악하고 인체 호흡기관에서의 침적율을 평가하였다. 실내 UFP 수농도(PNC; Particle Number Concentrations)는 전반적으로 외부 대기의 PNC 시계열 변동과 유사한 경향성을 보여 외부 대기의 PNC 실내 유입이 실내 PNC를 결정하는 주요한 인자인 것으로 보인다. 그러나 요리활동이 발생했을 때 부엌과 인접한 거실에서는 순간 최대농도  $42.3 \times 10^4 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-3}$ 의 고농도가 나타났다. 요리활동에 의한 고농도 PNC는 시간지연(0.9시간)을 두고 2층 침실의 PNC 농도증가를 야기하였다(순간 최대농도  $3.0 \times 10^4 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-3}$ ). 요리활동이 발생했을 때 모든 창문이 닫혀 환기가 제한되었으며 이로 인해 긴 실내 PNC 체류시간(최고농도의 1/e로 감소하는 시간)이 관측되었다(1층 거실: 0.75시간, 2층 침



실: 2.2시간). 또 다른 실내 고농도 유발 원인은 외부의 고농도 spike의 실내유입이었다. 외부 고농도 spike의 실내유입 후, 2층 창문만이 열려 있는 환경이었음에도 체류시간은 1층과 2층에서 0.36시간과 0.23시간으로 상당히 짧아졌다. 이러한 결과는 도심에서 UFP의 주요 배출원이 교통에 의한 도로배출임을 고려하면 큰 도로와 인접한 주택에서는 평소에는 창문을 닫아 외부 고농도 UFP의 유입을 차단하고 요리활동과 같은 실내연소가 발생할 때는 환기가 원활이 이루어지는 환경을 조성해서 UFP의 체류시간을 최소화해야 함을 제시한다.

UFP의 평균크기는 외부에 비해 실내에서 증가하는 경향을 나타내었다(중간값 평균크기: 외부 41.0 nm vs. 1층 거실 44.6 nm vs. 2층 침실 49.6 nm). 평균크기의 차이는 외부에서 실내로의 유입 효율이 20 nm 정도의 작은 입자가 큰 입자에 비해 낮기 때문이며 실내에서 작은 입자들이 침전(deposition)과 결집(coagulation)과 같은 역화과정을 통해 추가적으로 제거되었을 가능성도 있다. 그러나 이러한 과정들에 대한 정량적인 기여도 분석은 본 측정에서 획득한 자료의 한계로 인해 제한된다. 이러한 크기의 차이는 인체 호흡기관에서의 침적율에 영향을 줄 수 있다. 흡입한 UFP 수의 호흡기관 전체 침적율(deposition ratio)은 외부 대기(50.4%)가 실내(1층 거실 47.7%, 2층 침실 44.4%)보다 높지만, 전체 침적된 에어로졸 중 인체 호흡기관에서 가장 깊숙한 폐포영역에 침적한 비율은 실내(2층 침실 74.5%, 1층 거실 73.8%)가 외부 대기(73.0%)보다 높았다. 크기가 2.5  $\mu\text{m}$ 인 입자는 전체 호흡기관 침적율은 85.8%로 UFP보다 높지만 전체 침적된 입자의 80.4%가 상부 호흡기관인 인두영역(pharyngeal)에 집중된 반면 폐포영역에는 12.5%만이 침적된다. 이는 전체 호흡기관에 침적된 UFP의 폐포영역 침적비율인 73~75%와 비교된다.

본 연구가 미국의 단독주택을 측정대상으로 하였고 측정기간이 한정되어 한국과 같이 계절별 기상이 다른 조건에서 일반화하기 어려운 한계는 인정된다. 그러나 도심 대기 중 UFP는 차량배출이 주요한 배출원

이기 때문에 도심별 외부 농도의 수준은 다양한 요인으로 인하여 국가별뿐만 아니라 국가 내의 도시와 도시 내의 도심특성에 따라서도 큰 차이가 나타난다(Choi *et al.*, 2016, 2013; Kumar *et al.*, 2014). 따라서 UFP의 실외 특성을 반영할 수 있는 일반화를 위해 한국 도심에서 다양한 계절에 따른 UFP 농도와 크기분포의 지속적인 측정이 요구된다. 또한, 3일의 측정기간은 거주 가족의 생활패턴이 주중에는 날마다 크게 달라지지 않을 것이라 판단되어 주중의 대표성을 가질 것으로 예상된다(예로, 교통량과 차량조성과 같이 일생활 패턴을 반영하는 항목은 주중의 경우 계절과 같은 시간적 변화에 상대적으로 덜 민감하다; NIER, 2018). 그러나 한국과 같이 계절별 기상조건이 매우 다른 환경에서는 계절별 대기 중 농도와 주택 실내와의 상호작용이 달라질 수 있고 보일러 난방과 같은 추가적인 실내 배출원이 존재하여 계절별 실내외 측정에 따른 실내 배출원의 다양성과 배출 강도 특성 규명 등에 관한 추가연구가 요구된다. 본 연구가 미국의 단독주택을 측정대상으로 하였으나 한국 단독주택은 2019년 기준 전체 주택 중 21.6%를 차지하고 있고 그 중 73.3%가 20년 이상 연령 건물로 구성되어 있기 때문에(Statistics Korea, 2020) 본 연구결과를 한국 단독주택에서의 실내 UFP 분포특성 연구의 비교자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다. 한국의 도시는 도로망이 매우 조밀하고 주요도로와 주택가의 거리가 가깝기 때문에 활발한 실내외 UFP 수농도 분포 특성 규명 연구가 요구되며, 특히 한국은 아파트와 같은 고층 건물의 주거형태가 2019년 기준 전체의 62.3%를 차지하고 비율이 점차 증가하고 있기 때문에(Statistics Korea, 2020) 주택의 높이에 따른 실내 UFP 노출에 대한 연구도 필요하다. 또한, 인체 호흡기관에 침적된 UFP 수 중에 75%가 가장 깊은 폐포영역에 집중된다는 점에서 지속적인 UFP 수농도와 크기분포에 대한 모니터링 역시 요구된다. UFP 수농도는  $\text{PM}_{2.5}$ 와 같은 질량농도와는 발생원과 대기 중 거동이 다르기 때문에  $\text{PM}_{2.5}$  저감 정책이 UFP 수농도의 감소를 이끌지 않을 것이라는 연구결과가 발표된 바 있다(Jesus *et*

al., 2019). 따라서 한국에서도 PM<sub>2.5</sub> 저감 정책과는 독립적인 정책이 필요하고 한국의 주거형태와 도심특성을 반영한 기초자료 확보가 요구된다.

## 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비 (2019. 9~2021. 8)의 지원으로 수행되었습니다. 측정에는 캘리포니아대학 로스앤젤레스 캠퍼스 (UCLA)의 Suzanne Paulson 교수 그룹의 측정기기 (DiSCmini)를 사용하였으며, 기기 사용 허락에 감사드립니다. 측정 단독 주택 거주 가족의 측정장소 제공과 실내환경 기록에 감사드립니다.

## References

- Bau, S., Zimmermann, B., Payet, R., Witschger, O. (2015) A laboratory study of the performance of the handheld diffusion size classifier (DiSCmini) for various aerosols in the 15-400 nm range, *Environmental Science: Processes & Impacts*, Advance Article. <https://doi.org/10.1039/C4EM00491D>
- 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.
- Chen, C., Zhao, B. (2011) Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor, *Atmospheric Environment*, 45, 275-288.
- Choi, W., He, M., Barbesant, V., Kozawa, K.H., Mara, S., Winer, A.M., Paulson, S.E. (2012) Prevalence of wide area impacts downwind freeways under pre-sunrise stable atmospheric conditions, *Atmospheric Environment*, 62, 318-327.
- Choi, W., Hu, S.S., He, M., Kozawa, K.H., Mara, S., Winer, A.M., Paulson, S.E. (2013) Neighborhood-scale air quality impacts of emissions from motor vehicles and aircraft, *Atmospheric Environment*, 80, 310-321.
- Choi, W., Kim, J.-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, 337-355, (in Korean with English abstract).
- 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.
- Choi, W., Ranasinghe, D., Bunavage, K., DeShazo, J.R., Wu, L., Seguel, R., Winer, A.M., Paulson, S.E. (2016) The effects of the built environment, traffic patterns, and micrometeorology on street level ultrafine particle concentrations at a block scale: Results from multiple urban sites, *Science of the Total Environment*, 553, 474-485.
- Choi, Y.J., Ko, K.J. (2013) A study on Seoul citizens' perception and management behavior of indoor air quality in homes, *The Seoul Studies*, 14, 131-144, (in Korean with English abstract).
- Dall'Osto, M., Beddows, D.C.S., Asmi, A., Poulain, L., Hao, L., Freney, E., Allan, J.D., Canagaratna, M., Crippa, M., Bianchi, F., de Leeuw, G., Eriksson, A., Swietlicki, E., Hansson, H.C., Henzing, J.S., Granier, C., Zemann, K., Laj, P., Onasch, T., Prevot, A., Putaud, J.P., Sellegri, K., Vidal, M., Virtanen, A., Simo, R., Worsnop, D., O'Dowd, C., Kulmala, M., Harrison, R.M. (2018) Novel insights on new particle formation derived from a pan-European observing system, *Scientific Reports*, 8, 1482-1491.
- Fuller, C.H., Brugge, D., Williams, P.L., Mittleman, M.A., Lane, K., Durant, J.L., Spengler, J.D. (2013) Indoor and outdoor measurements of particle number concentration in near-highway homes, *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 23, 506-512.
- 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, 5522-5528.
- Hoek, G., Boogaard, H., Knol, A., De Hartog, J., Slottje, P., Ayres, J.G., Borm, P., Brunekreef, B., Donaldson, K., Forastiere, F., Holgate, 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 & Technology*, 44, 476-482.
- ICRP (1994) ICRP publication 66: human respiratory tract model for radiological protection, A report of a task group of International Commission on Radiological Protection.
- Jesus, A.L. (2019) Ultrafine particles and PM<sub>2.5</sub> in the air of cities around the world: Are they representative of each

- other?, *Environmental International*, 129, 118-135.
- 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.
- Kumar, P., Pirjola, L., Ketzel, M., Harrison, R.M. (2013) Nanoparticle emissions from 11 non-vehicle exhaust sources - A review, *Atmospheric Environment*, 67, 252-277.
- Kumar, P., Robins, A., Vardoulakis, S., Britter, R. (2010) A review of the characteristics of nanoparticles in the urban atmosphere and the prospects for developing regulatory controls, *Atmospheric Environment*, 44, 5035-5052.
- McAuley, T.R., Fisher, R., Zhou, X., Jaques, P.A., Ferro, A.R. (2010) Relationships of outdoor and indoor ultrafine particles at residences downwind of a major international border crossing in Buffalo, NY, *Indoor Air*, 20, 298-308.
- Meier, R., Eeftens, M., Phuleria, H.C., Ineichen, A., Corradi, E., Davey, M., Fierz, M., Ducret-Stich, R.E., Aguilera, I., Schindler, C., Rochat, T., Probst-Hensch, N., Tsi, M.-Y., Kunzli, N. (2015) Differences in indoor versus outdoor concentrations of ultrafine particles, PM<sub>2.5</sub>, PMabsorbance and NO<sub>2</sub> in Swiss homes, *Journal of Exposure and Environmental Epidemiology*, 25, 499-505.
- 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, 8113-8138.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Construction of highly resolved air pollutants emission inventory of air pollution forecast regions (I), Report, No. 11-148523-003441-01, Incheon, (in Korean).
- Oberdorster, G., Oberdorster, E., Oberdorster, J. (2005) Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles, *Environmental Health Perspectives*, 113, 823-839.
- 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.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Sioutas, C., Delfino, R.J., Singh, M. (2005) Exposure assessment for atmospheric ultrafine particles (UFPs) and implications in epidemiologic research, *Environmental Health Perspectives*, 113(8), 947-955.
- Statistics Korea (2020) Population Housing Survey Results in 2019, Press Release. [http://www.kostat.go.kr/portal/korea/kor\\_nw/1/1/index.board?bmode=read&aSeq=384690](http://www.kostat.go.kr/portal/korea/kor_nw/1/1/index.board?bmode=read&aSeq=384690) (accessed on Mar. 9, 2020).
- United Nations (UN) (2019) *World Urbanization Prospects 2018*, Department of Economic and Social Affairs, New York.
- Weber, R., McMurry, P.H., Mauldin, L., Tanner, D.J., Eisele, F.L., Brechtel, F.J., Kreidenweis, S.M., Kok, G.L., Schillawski, R.D., Baumgardner, D. (1998) A study of new particle formation and growth involving biogenic and trace gas species measured during ACE 1, *Journal of Geophysical Research D*, 103, 16385-16396.
- Zhao, J., Birmili, W., Wehner, B., Daniels, A., Weinhold, A.D., Wang, L., Merkel, M., Kecorius, S., Tuch, T., Franck, U., Hussein, T., Wiedensohler, A. (2020) Particle mass concentrations and number size distributions in 40 homes in Germany: indoor-to-outdoor relationships, diurnal and seasonal variation, *Aerosol and Air Quality Research*, 20, 576-589.
- Zhu, Y.F., Hinds, W.C., Krudysz, M., Kuhn, T., Froines, J., Sioutas, C. (2005) Penetration of freeway ultrafine particles into indoor environments, *Journal of Aerosol Science*, 36, 303-322.
- Zhu, Y.F., Kuhn, T., Mayo, P., Hinds, W.C. (2006) Comparison of daytime and nighttime concentration profiles and size distributions of ultrafine particles near a major highway, *Environmental Science & Technology*, 40(8), 2531-2536.

## Authors Information

최원식 (부경대학교 환경대기과학과 조교수)