

## 실내외 압력 차에 따른 단창과 이중창의 틈새로 침투된 간접흡연의 입자 크기 분포 특성

김정훈\*\*\* · 이기영\*\*\*\*†

\*서울대학교 보건대학원 환경보건학과, \*\*서울의료원 의학연구소 환경건강연구실,  
\*\*\*서울대학교 보건대학원 보건환경연구소

### Characterization of Particle Size Distribution of Infiltrated Secondhand Smoke through the Gap in a Single Glazed and a Secondary Glazed Window by Indoor and Outdoor Pressure Differences

Jeonghoon Kim\*\*\* and Kiyoung Lee\*\*\*\*†

\*Department of Environmental Health Sciences, Graduate School of Public Health, Seoul National University

\*\*Department of Environmental Health Research, Seoul Medical Center

\*\*\*Institute of Health and Environment, Graduate School of Public Health, Seoul National University

#### ABSTRACT

**Objectives:** Outdoor tobacco smoke can penetrate into the indoor environment through cracks in the building envelope. This study aimed to characterize the particle size distribution of infiltrated secondhand smoke (SHS) through the gap in a single glazed and a secondary glazed window according to pressure differences in a chamber.

**Methods:** Two polyvinyl chloride sliding windows were evaluated for infiltration, one with a glazed window and the other with a secondary glazed window. Each window was mounted and sealed in a polycarbonate chamber. The air in the chamber was discharged to the outside to establish pressure differences in the chamber ( $\Delta P$ ). Outdoor smoking sources were simulated at a one-meter distance from the window side of the chamber. The particle size distribution of the infiltrated SHS was measured in the chamber using a portable aerosol spectrometer. The particle size distribution of SHS inside the chamber was normalized by the outdoor peak for fine particles.

**Results:** The particle size distribution of SHS inside the chamber was similar regardless of window type and  $\Delta P$ . It peaked at 0.2-0.3  $\mu\text{m}$ . Increases in particulate matter (PM) concentrations from SHS infiltration were higher with the glazed window than with the secondary glazed window. PM concentrations of less than 1  $\mu\text{m}$  increased as  $\Delta P$  was increased inside the chamber.

**Conclusions:** The majority of infiltrated SHS particles through window gap was 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  in size. Outdoor SHS particles infiltrated more with a glazed window than with a secondary glazed window. Particle sizes of less than 1  $\mu\text{m}$  were associated with  $\Delta P$ . These findings can be a reference for further research on the measurement of infiltrated SHS in buildings.

**Keywords:** Infiltration, particle size distribution, pressure, secondhand smoke, window

†Corresponding author: Graduate School of Public Health, Seoul National University, 1 Gwanak-ro Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea, Tel: +82-2-880-2735, Fax: +82-2-762-2888, E-mail: cleanair@snu.ac.kr

Received: 16 July 2018, Revised: 08 August 2018, Accepted: 12 August 2018

## I. 서 론

간접흡연(secondhand smoke, SHS)은 69가지의 발암물질들을 포함하여 7,000가지 이상의 화학물질의 혼합물로 구성되어있다.<sup>1)</sup> 간접흡연의 노출은 성인의 경우 뇌졸중, 코 염증, 폐암, 심혈관계 질환과 관련이 있으며 여성의 경우 생식(reproductive)에 영향을 준다고 보고되었다.<sup>2)</sup> 아이들의 경우 간접흡연의 노출은 중이염, 호흡기 증상, 유아돌연사증후군과 관련이 있었다. 간접흡연의 노출로 인한 건강 유해성이 밝혀짐에 따라 2006년 미국의 의무총감(Surgeon General)은 간접흡연 노출의 안전한 수준은 없으며 적은 양의 노출도 건강에 유해할 수 있다고 결론 냈다.<sup>3)</sup>

주거지는 간접흡연의 주요 노출 장소로 알려져 있다. 특히 공동주택의 경우 집안에서 흡연하는 사람이 없는 비흡연 가구(smoke-free home)일지라도 이웃집의 흡연으로 발생된 담배연기가 집안으로 흘러 들어가는 ‘간접흡연 침투(SHS infiltration 또는 SHS incursion)’로 인하여 거주자가 간접흡연에 노출될 수 있다.<sup>4)</sup> 미국의 경우 공동주택의 비흡연 가구 내 44.0-46.2%의 거주자가 간접흡연 침투를 경험했다고 보고된 바 있었다. 우리나라의 경우 서울시의 공동주택 내 비흡연 거주자 74.7%가 간접흡연 침투를 경험하였다.<sup>5)</sup> 이 연구에서 간접흡연 침투를 경험한 거주자 중 74.1%가 베란다나 창문을 통하여 침투한다고 응답하였다.

건물 내에서 거주자의 간접흡연 침투 경험은 아이들의 건강과 관련이 있었다. 공동주택 내 흡연자가 없는 집에서 수행한 연구에 의하면 만1-13세 아이들의 보호자가 간접흡연 침투를 경험한 빈도가 높아질수록 아이들의 지난 12개월간 천식, 알레르기비염, 아토피피부염 증상의 위험이 용량 반응적으로 증가하였다.<sup>6)</sup> 또 다른 연구에 의하면, 공동주택 내 흡연자가 없는 집에서 간접흡연 침투 경험은 청소년의 호흡기 증상과 관련이 있었다.<sup>7)</sup>

건물 내에서 침투된 간접흡연을 식별하고 정량하는 것은 거주자의 노출을 평가하는데 중요하다. 하지만 건물 내에서 간접흡연 침투를 과학적으로 측정할 수 있는 방법은 제한적이다. 거주자의 자가응답(self-report)과 같은 담배냄새의 인지를 이용하는 방법은 거주자가 실내에서 활동 중일 때만 유용하며 간접흡연이 침투되는 양에 대해 제한적인 정보를 제

공한다. 이러한 방법은 응답자의 회상오차(recall bias)나 담배냄새에 대한 개인의 민감도에 따라 차이가 있을 수 있다. 간접흡연의 환경지표 중 입자의 공기 역학적 직경이  $2.5 \mu\text{m}$  미만인  $\text{PM}_{2.5}$ 는 비특이적이며 공기 중 니코틴과 같이 특이적 지표를 이용하더라도 실내에 저 농도로 존재하며 장시간의 측정이 필요하다. 체액 내 코티닌(cotinine)과 같은 생체지표는 간접흡연의 통합적 노출을 반영하기 때문에 노출원을 파악하는 데 제한 점이 있었다.<sup>8)</sup>

간접흡연에 포함된 입자의 물리적 특성은 입자 크기 분포(particle size distribution)로 나타낼 수 있다. 실내에서 갓 배출된 간접흡연 입자의 크기 범위는 0.02에서  $2 \mu\text{m}$ 이며 질량 중앙직경(mass median diameter)은  $0.2 \mu\text{m}$ 이었다.<sup>9)</sup> 하지만 실외에서 건물 외피(building envelope)의 틈새를 통하여 실내로 침투한 간접흡연의 입자 크기 분포에 대한 정보는 알려져 있지 않았다. 실외 대기입자가 건물 외피의 틈새로 유입되는 비율인 침입계수(penetration coefficient 또는 penetration factor)는 입자의 직경이 0.1-1  $\mu\text{m}$  인 경우 1에 가까웠다.<sup>10)</sup> 이러한 결과는 0.1-1  $\mu\text{m}$  크기의 간접흡연 입자가 건물 외피의 틈새로 침투될 수 있음을 보여준다.

실외의 입자가 실내로 침투하는 것은 실-내외 압력차( $\Delta P$ )에 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 창호를 장착한 챔버에  $\Delta P$ 를 발생시켜 간접흡연이 침투되는 현상을 모사하였다. 이 연구의 목적은 챔버의  $\Delta P$ 에 따른 단창과 이중창의 틈새로 침투하는 간접흡연의 입자 크기 분포를 평가하여 건물 내에서 간접흡연 침투로 인한 거주자의 노출을 측정할 수 있는 기초정보를 마련하고자 하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 창호를 장착한 챔버

창호는 일반적인 건물에 주로 사용되는 polyvinyl chloride (PVC) 프레임으로 구성된 슬라이딩 창호를 이용하였다. PVC 창호 중 단창(a glazed window)과 이중창(a secondary glazed window)을 제작하였다. 두 창호의 프레임 크기는  $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ 이었고 프레임의 폭은 단창인 경우 11.5 cm, 이중창인 경우 23 cm이었다. 유리 틀(sash)의 크기는  $30 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$ 이었다. 외풍을 차단하기 위한 목적으로 유리 틀에는 창호의

프레임과 접하는 부위에 모헤어(mohair)가 있었고 창호 프레임의 하단 중간지점에는 풍지판(filling piece)이 설치되어 있었다.

다섯 면으로 구성된 polycarbonate (PC) 패널의 한 면에 단창 또는 이중창을 장착하여 육면체의 챔버를 제작하였다. 창호의 종류에 따라 프레임의 폭은 차이가 있었지만 단창과 이중창이 결합된 부위를 제외한 챔버의 체적은  $60.5\text{ cm} \times 60.5\text{ cm} \times 36.5\text{ cm}$ 가 되도록 결합하였다. 창호의 잠금 장치(crescent)가 있는 부분은 챔버의 내부를 향하도록 장착하였다. PC 패널과 창호의 결합부위는 실리콘으로 밀봉하여 창호를 닫았을 때 오직 창호의 틈새로만 기류가 흐를 수 있도록 하였다. 창호가 장착된 반대편 PC 패널의 가운데 지점에 직경이 약 1 cm인 구멍을 내고, 튜브를 이용하여 실외에 설치된 진공펌프(vacuum pump)와 연결하여 챔버 내 음압(negative pressure)을 형성할 수 있도록 하였다.

건물의 기밀도(airtightness)를 측정할 때 사용되는 상당누기면적(equivalent or effective leakage area,  $A_L$ )을 이용하면 실험에 사용된 창호의 특성을 평가할 수 있다.<sup>11)</sup>  $A_L$ 은 건물 내 모든 틈새나 개구부의 침기량을 누출 계수( $C_d$ )와 결합하여 면적으로 환산한 것으로써  $A_L$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.<sup>12)</sup>

$$A_L = 10000Q_r \frac{\sqrt{\rho/2\Delta P_r}}{C_d} \quad (1)$$

여기서,

$A_L$ =equivalent or effective air leakage area,  $\text{cm}^2$

$Q_r$ =airflow rate through the unit at  $\Delta P_r$ ,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,

$\rho$ =air density,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\Delta P_r$ =reference pressure differences, Pa

$C_d$ =discharge coefficient for the leakage openings (dimensionless)

단창과 이중창의  $A_L$ 을 산출하기 위하여  $\Delta P_r$ 는 4 Pa로 하였고  $C_d$ 는 모서리가 날카로운 직사각형 개구부에 적합한 0.6<sup>12)</sup>을 적용하였다.

## 2. 실험 방법 및 조건

2018년 5월 27일과 6월 3일 총 2일동안 서울대학교 보건대학원 건물의 실외 옥상에서 실험하였다. 이 건물은 지상 6층으로 구성되어 있으며 주 도로와 거

리가 떨어져 있었다. 실험하는 동안 비가 오거나 황사 발생은 없었다. 옥상에는 건물 내 공기가 배출되는 환풍구가 있었기 때문에 배출로 인한 기류와 대기 입자의 농도에 영향을 받지 않도록 약 10 m 이상의 거리가 떨어진 곳에 챔버를 설치하였다. 옥상 중 벽이 있는 구석부위에 챔버를 설치하고 챔버에서 약 1.5 m 거리의 둘레에 높이가 1.2 m인 패널을 설치하여 바람의 영향을 최소화하도록 하였다. 이 실험 구역에서 챔버는 바닥으로부터 약 0.5 m 높이의 선반 위에 설치하였다.

이 연구의 실험 도식도를 Fig. 1에 나타내었다. 흡연 인형을 이용하여 실외 흡연을 모사하였다. 흡연 인형은 기존 연구에서 사용된 바 있었다.<sup>13)</sup> 흡연 인형에 연결되는 담배 위치를 기준으로 창호로부터 거리가 1 m이면서 창호의 가운데 높이 지점인 곳에 인형을 위치시켰다. 인형의 입 부위에 담배(MEVIUS SKYBLUE, JT International) 1개비를 연결 후 불을 붙였고 인형에 연결된 고무펌프를 반복적으로 움켜쥐어 흡기와 호기를 통하여 흡연을 하였다. 인형의 1회 흡기량은 약 30 mL이었다.<sup>13)</sup> 실외 흡연 시 2초 간격으로 인형의 고무펌프를 움켜쥐는 것을 반복하였다.

챔버의 창호 틈새로 입자가 침투할 수 있도록 창호를 모두 닫고 실험을 하였다. 진공펌프에 200 L/min 유량계(Dwyer Instrument, Michigan City, IN, USA)를 연결하여  $\Delta P$ 가 단창의 경우 2, 4 Pa, 이중창의 경우 2, 4, 10 Pa가 되도록 조절하였다. 단창의 경우 진공펌프의 유량 한계를 벗어나서 10 Pa 조건에서는 실험하지 못했다. 챔버의  $\Delta P$ 를 측정하기 위하여 챔버의 천정 가운데 지점에 구멍을 뚫어 미세 차압계(Model: 5815, TSI, Shoreview, MN, USA)를 설치하였다. 실험 시 실내에 침투된 입자가 잘 혼합될 수 있도록 작은 팬을 설치하여 가동하였다.

각 실험 별 약 10분의 시간이 소요되었다. 실내의 측정기기가 모두 작동중인 상태에서 실내 특정 조건의  $\Delta P$ 가 될 때 비흡연 상태로 5분 동안 유지 후 30초 동안 흡연을 하고 다시 비흡연 상태로 5분 동안 유지하였다. 흡연 직후 담뱃불은 물에 적셔서 껐다. 창호 종류 및 압력 조건에 따라 10회 반복 측정하여 총 50회의 실험을 하였다.

## 3. 입자 및 기상 측정

입자는 챔버의 실외와 실내에서 측정하였다. 챔버

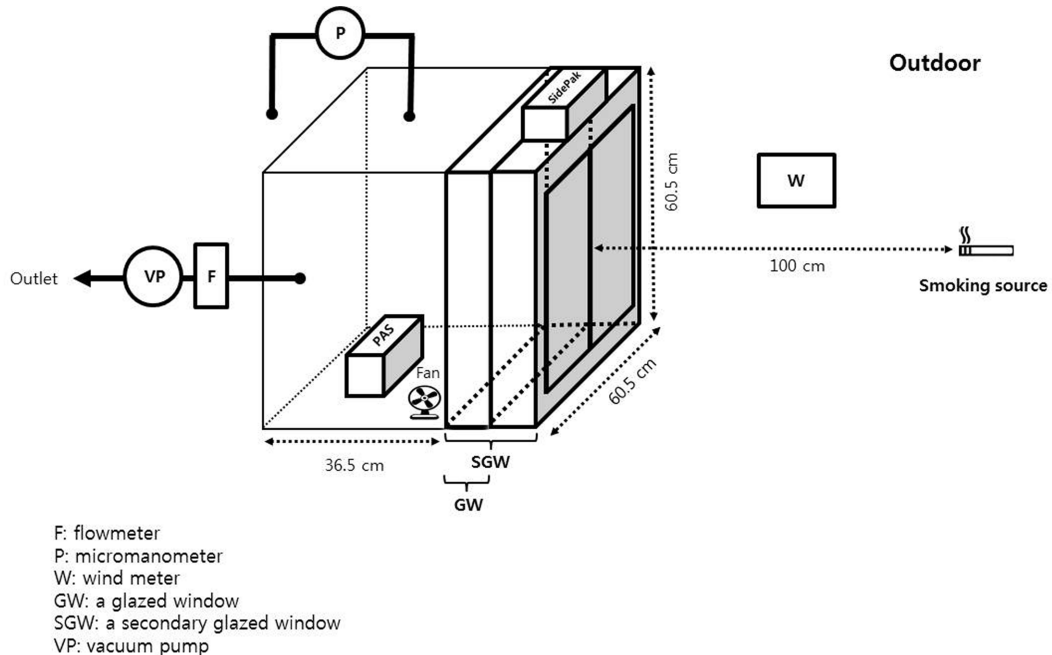


Fig. 1. Experimental schematic diagram for smoking sources and measurement of infiltrated secondhand smoke particles inside the chamber.

외부 상단에 실시간 에어로졸 측정기인 SidePak (Model AM510, TSI, USA)을 설치하여 실시간  $PM_{2.5}$  농도를 측정하였다. 직경이  $2.5 \mu m$  보다 큰 입자를 제거하도록  $PM_{2.5}$  임팩터를 SidePak에 장착하고 실험 시작 전 헤파(high efficiency particulate air)필터를 이용하여 영점보정을 하였다. 측정기간 동안 SidePak의 유량은  $1.7 L/min$ 을 유지하였고 농도의 기록 간격은 6초로 설정하였다. SidePak은 광산란식 방법으로 입자의 질량농도를 측정하기 때문에 측정값은 입자의 크기와 굴절률에 영향을 받는다. 따라서 측정값에 중량방법(gravimetric method)으로 산출된 간접흡연 입자에 적합한 보정계수인 0.295를 적용하였다.<sup>14)</sup>

챔버 내 중간 지점에 31-channel ( $0.22-32 \mu m$ )의 분해능을 가진 portable aerosol spectrometer (PAS, Model 1.109, Grimm, Germany)를 설치하여 창호 틈새로 침투된 간접흡연의 입자 크기 분포를 측정하였다. PAS는 수 농도의 경우 최저  $0.25-0.28 \mu m$ , 질량 농도의 경우 최저  $0.22-0.25 \mu m$  범위의 입자 농도를 측정할 수 있으며 동시에  $PM_{2.5}$  농도도 측정할 수 있었다. PAS에 기록된 질량 농도는 기기 내부의

필터에 포집된 입자의 무게를 이용하여 보정하였다.

챔버와 흡연 인형 사이의 중간 지점에 풍속기 (Kestrel, Model 4500, Nielsen-Kellerman, USA)를 설치하였다. 풍속기는 실외의 풍속과 더불어 온도와 상대습도를 동시에 측정하였다. 풍속기에서 측정되는 값의 기록간격은 10초로 설정하였다.

#### 4. 측정값 분석

각 실험마다 실외의 흡연 시점을 기준으로 실외 흡연 시작 전과 흡연 시작 후로 구분하였다. 실시간 실외  $PM_{2.5}$  농도에서 실외 흡연 시작 전 1분 이내에 측정된 최소값 1개와 최소값 직전 농도값 2개를 이용하여 평균을 산출하고 '실외 비흡연시 실외  $PM_{2.5}$  농도( $C_{ns}$ )'로 정의하였다. 흡연 시작 후 1분 이내에 측정된 최대값 1개를 선정하여 '실외 흡연시 실외 최대  $PM_{2.5}$  농도( $C_s$ )'로 정의하였다. 실외 흡연시 실외 최대  $PM_{2.5}$  농도와 실외 비흡연시 실외  $PM_{2.5}$  농도의 차( $C_s - C_{ns}$ )를 '실외 흡연으로 인한 실외  $PM_{2.5}$  의 피크 농도( $C_{s\_peak}$ )'로 정의하였다. 피크 농도가  $35 \mu g/m^3$  이상인 경우 실외 흡연으로 인하여 실외  $PM_{2.5}$  의 피크가 발생한 것으로 정의하였다. 비슷한 기준

을 기존 연구에서 사용한 바 있었다.<sup>15)</sup>

간접흡연 입자의 크기 분포와 실외 대기 입자의 침입계수를 고려할 때 챔버의 창호 틈새를 통하여 주로 0.2 µm의 입자가 침투될 것으로 예상되었다. 따라서 실외 흡연시작 후 PAS의 측정값 중 입자크기가 0.25-0.28 µm인 수 농도를 이용하여 10% 이상 증가되는 지점을 기준으로 간접흡연 침투 전과 후로 구분하였다. 간접흡연 침투 전 1분 이내에 측정된 입자크기가 0.25-0.28 µm인 수 농도의 최소값 1개와 그 직전에 측정된 농도값 2개(즉, 3개의 측정값)가 기록된 동일한 시간대의 실내 PM<sub>2.5</sub>, 입자 크기 별 수 농도, 입자 크기 별 질량 농도의 측정값을 이용하여 평균을 산출하고 '실내 배경 농도'로 정의하였다. 간접흡연 침투 후 2분 이내에 측정된 입자크기가 0.25-0.28 µm인 수 농도의 최대값 1개가 기록된 동일한 시간대의 실내 PM<sub>2.5</sub>, 입자 크기 별 수 농도, 입자 크기 별 질량 농도의 측정값을 이용하여 '실내 증가된 농도'로 정의하였다. 입자크기가 0.25-0.28 µm인 수 농도의 최대값을 선정하는 방법은 1) 실시간 수 농도의 측정치가 증가하다가 1회 이상 감소 되더라도 다음 측정치의 농도가 감소 전보다 더 증가한 경우에는 계속 증가하는 것으로 정의하였고, 2) 수 농도의 측정치가 1회 이상 감소하거나 감소 이후 증가가 되더라도 이전 측정치의 최대값 보다 낮은 경우에 이전 측정치를 최대값으로 정의하였다. '실내 증가된 농도'와 '실내 배경 농도'의 차를 이용하여 실외 간접흡연 침투로 인한 PM<sub>2.5</sub>, 입자 크기 별 수 농도( $\Delta C_{inf\_num}$ ), 입자 크기 별 질량 농도( $\Delta C_{inf\_mass}$ )의 증가량을 산출하였다. PAS는 크기가 32 µm인 입자까지 측정할 수 있지만 이 연구에서는 크기가 2.5 µm 미만인 입자의 농도를 이용하여 분석하였다. 실내 입자 농도의 증가량은 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도에 영향을 받기 때문에 실내 PM<sub>2.5</sub>, 입자 크기 별 수 농도, 입자 크기 별 질량 농도에 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도로 나누어( $C_{s\_peak}$ ) 표준화하였다. 풍속기의 경우 실외 흡연 직후 1분 동안 측정된 값을 이용하여 각 실험 별 평균 실외 풍속, 온도, 상대습도를 산출하였다.

실외 비흡연시 실외 PM<sub>2.5</sub> 농도, 실외 흡연시 실외 최대 PM<sub>2.5</sub> 농도, 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도는 대수정규분포를 하였기 때문에 기하평균(geometric mean)과 기하표준편차(geometric

standard deviation, GSD)로 나타내었다. Paired t-test를 이용하여 로그(log)로 변환한 실외 비흡연시 실외 PM<sub>2.5</sub> 농도와 실외 흡연시 실외 최대 PM<sub>2.5</sub> 농도의 차이를 비교하였다. 스피어만 상관계수(Spearman's coefficient)를 이용하여 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 증가량과 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도와의 관계를 평가하였다. 기술통계(descriptive statistics)를 이용하여 챔버의 창호 종류와  $\Delta P$ 에 따른 실내 입자 농도의 증가량을 나타내었다. SAS 9.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 통계분석을 하였고 유의수준(p-value)은 0.05이었다.

### III. 결 과

#### 1. 창호의 상당누기면적

이 연구에서 챔버와 창호 프레임이 연결된 부위는 밀봉되었기 때문에 공기의 누설 지점은 창문 틀과 창호 프레임 사이, 그리고 창호의 잠금 장치가 있는 가운데 부위로 생각할 수 있었다.  $\Delta P$ 가 4 Pa인 조건에서 흡입 유량은 단창의 경우 125 L/min, 이중창의 경우 110 L/min이었다. 식 (1)을 이용했을 때  $A_L$ 은 단창의 경우 13.5 cm<sup>2</sup>이었고 이중창의 경우 11.9 cm<sup>2</sup>이었다.

#### 2. 흡연으로 인한 실외와 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 관계

이틀간 총 50회 실험하는 동안 실외 실험 구역의 평균 풍속은 0.1±0.2 m/s이었다. 실외 실험 구역의 평균 온도는 27.2±1.7°C이었고 평균 상대습도는 34.4±6.0%이었다. 실외 비흡연시 실외 PM<sub>2.5</sub> 농도의 기하평균은 12.8 µg/m<sup>3</sup> (GSD=1.4)이었고 실외 흡연시 실외 최대 PM<sub>2.5</sub> 농도의 기하평균은 254.1 µg/m<sup>3</sup> (GSD=1.7)이었다. 실외 비흡연시 실외 PM<sub>2.5</sub> 농도와 흡연시 실외 최대 PM<sub>2.5</sub> 농도는 통계적으로 유의한 차이가 있었다(p<0.001).

실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도는 모두 35 µg/m<sup>3</sup> 이상이였기 때문에 모든 실험 자료를 이용하여 분석하였다. 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도는 238.9 µg/m<sup>3</sup> (GSD=1.7)이었다. 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가량의 기하평균은 29.1 µg/m<sup>3</sup> (GSD=1.5)이었다. 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도와 실내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 증가량은 통계적으로 유의한 양의 상관관계가 있었다(r=0.42, p=0.003).

### 3. 침투된 입자 농도 증가량의 크기 분포

대체적으로 크기가 1  $\mu\text{m}$ 인 입자를 기준으로 입자의 크기가 작아질수록 실외 흡연으로 인한 실외  $\text{PM}_{2.5}$ 의 피크 농도로 표준화한 수 농도와 질량 농도의 증가량이 증가하는 경향을 보였다(Table 1). 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 수 농도의 증가량은  $2.4 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3 \text{ \#}/\text{L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 이들 중 0.25-0.28  $\mu\text{m}$ 의 수 농도 증가량이 가장 높았다. 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 질량 농도의 증가량은  $6.9 \times 10^{-2} \pm 3.5 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 이들 중 0.22-0.25  $\mu\text{m}$ 의 질량 농도 증가량이 가장 높았다. 2.5  $\mu\text{m}$  미만 입자 중 1  $\mu\text{m}$  미만과 0.5  $\mu\text{m}$  미만 입자가 차지하는 비율은 수 농도 증가량의 경우 각각 100.0%와 97.8%이었고 질량 농도 증가량의 경우 각각 96.9%와 87.6%이었다. 2.5  $\mu\text{m}$  미만 입자 중 0.25-0.28  $\mu\text{m}$ 의 수 농도 증가량이 차지하는 비율은 35.9%, 0.22-0.25  $\mu\text{m}$ 의 질량 농도 증가량이 차지하는 비율은 21.1%이었다.

창호 종류와  $\Delta P$ 에 따른 실외 흡연으로 인한 실외

$\text{PM}_{2.5}$ 의 피크 농도로 표준화한 입자 크기 별 수 농도와 질량 농도의 증가량을 Fig. 2에 나타내었다.  $\Delta P$ 가 2 Pa와 4 Pa인 조건의 자료를 이용해서 분석했을 때 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 수 농도의 증가량은 단창의 경우  $2.7 \times 10^3 \pm 1.4 \times 10^3 \text{ \#}/\text{L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 이중창의 경우  $1.7 \times 10^3 \pm 6.3 \times 10^2 \text{ \#}/\text{L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 질량 농도의 증가량은 단창의 경우  $7.7 \times 10^{-2} \pm 4.0 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고 이중창의 경우  $4.8 \times 10^{-2} \pm 1.8 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 입자 크기 별 수 농도와 질량 농도의 증가량은 단창이 이중창보다 대체적으로 더 높았다.

챔버에 단창을 장착하여 측정된 자료에서  $\Delta P$ 가 2 Pa와 4 Pa일때 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 수 농도의 증가량은 각각  $2.0 \times 10^3 \pm 7.2 \times 10^2 \text{ \#}/\text{L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $3.4 \times 10^3 \pm 1.6 \times 10^3 \text{ \#}/\text{L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 질량 농도의 증가량은 각각  $5.8 \times 10^{-2} \pm 2.2 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $9.6 \times 10^{-2} \pm 4.5 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 챔버에 이중창을 장착하여 측정된 자료에서  $\Delta P$ 가 2, 4, 10 Pa인 경우

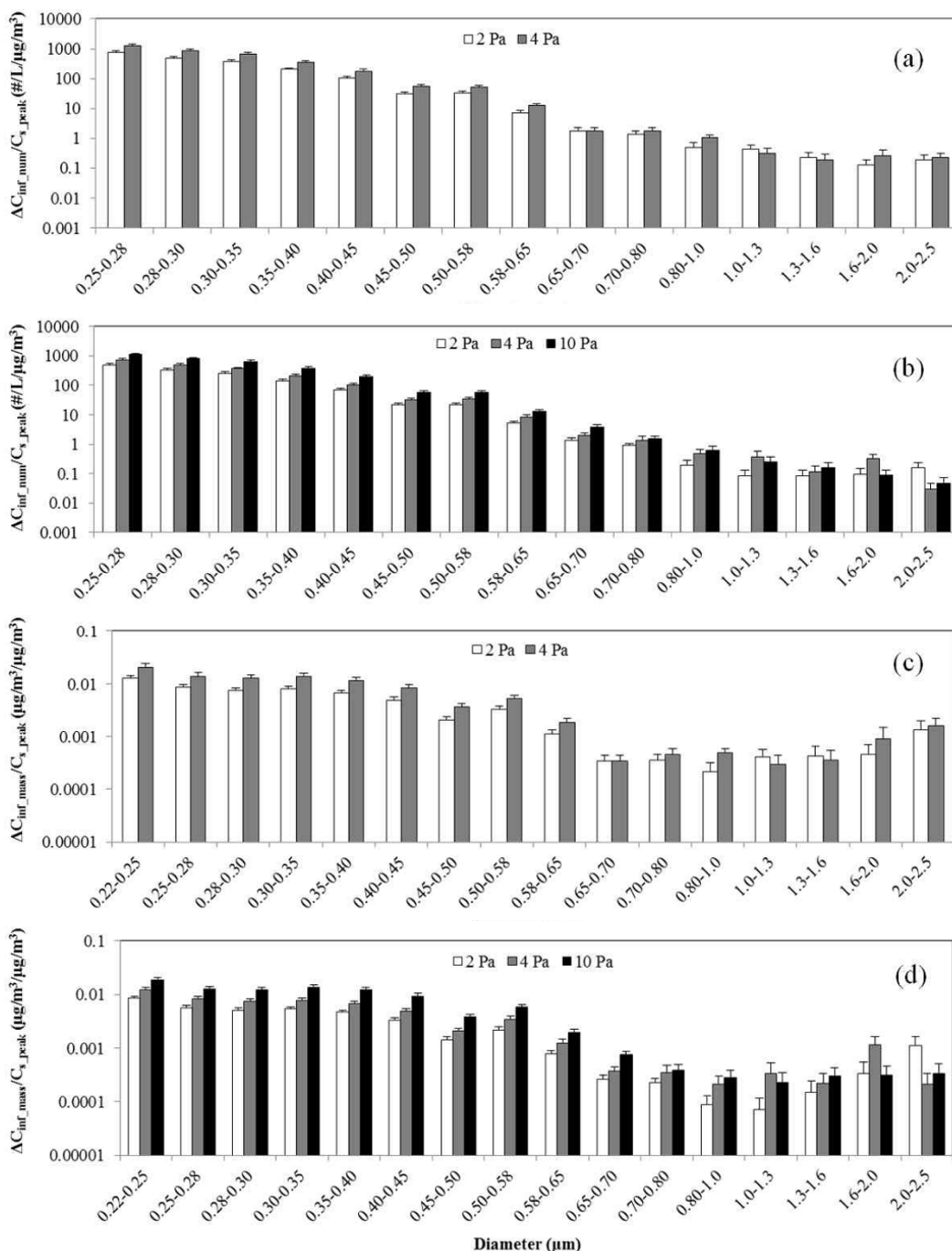
**Table 1.** Means and proportion of infiltrated number and mass concentrations normalized by outdoor  $\text{PM}_{2.5}$  peak in 50 experiments

Diameter ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta C_{\text{inf\_num}}/C_{\text{s\_peak}}$ ( $\text{\#}/\text{L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ )		$\Delta C_{\text{inf\_mass}}/C_{\text{s\_peak}}$ ( $\mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	
	Mean $\pm$ SD	Proportion (%) <sup>*</sup>	Mean $\pm$ SD	Proportion (%) <sup>†</sup>
0.22-0.25	NA	-	$1.4 \times 10^{-2} \pm 7.7 \times 10^{-3}$	21.1
0.25-0.28	$8.6 \times 10^2 \pm 4.5 \times 10^2$	35.9	$9.8 \times 10^{-3} \pm 5.2 \times 10^{-3}$	14.4
0.28-0.30	$6.0 \times 10^2 \pm 3.1 \times 10^2$	24.9	$8.9 \times 10^{-3} \pm 4.7 \times 10^{-3}$	13.0
0.30-0.35	$4.6 \times 10^2 \pm 2.4 \times 10^2$	19.2	$9.7 \times 10^{-3} \pm 5.1 \times 10^{-3}$	14.1
0.35-0.40	$2.6 \times 10^2 \pm 1.4 \times 10^2$	10.8	$8.4 \times 10^{-3} \pm 4.5 \times 10^{-3}$	12.2
0.40-0.45	$1.3 \times 10^2 \pm 7.6 \times 10^1$	5.4	$6.1 \times 10^{-3} \pm 3.6 \times 10^{-3}$	8.9
0.45-0.50	$4.0 \times 10^1 \pm 2.3 \times 10^1$	1.7	$2.6 \times 10^{-3} \pm 1.5 \times 10^{-3}$	3.8
0.50-0.58	$3.9 \times 10^1 \pm 2.2 \times 10^1$	1.6	$4.0 \times 10^{-3} \pm 2.3 \times 10^{-3}$	5.8
0.58-0.65	$9.3 \times 10^0 \pm 5.9 \times 10^0$	0.4	$1.4 \times 10^{-3} \pm 8.8 \times 10^{-4}$	2.0
0.65-0.70	$2.1 \times 10^0 \pm 1.8 \times 10^0$	0.1	$4.1 \times 10^{-4} \pm 3.4 \times 10^{-4}$	0.6
0.70-0.80	$1.4 \times 10^0 \pm 1.2 \times 10^0$	0.1	$3.6 \times 10^{-4} \pm 3.1 \times 10^{-4}$	0.5
0.80-1.0	$5.7 \times 10^{-1} \pm 7.0 \times 10^{-1}$	0.0	$2.6 \times 10^{-4} \pm 3.1 \times 10^{-4}$	0.4
1.0-1.3	$2.9 \times 10^{-1} \pm 4.7 \times 10^{-1}$	0.0	$2.7 \times 10^{-4} \pm 4.3 \times 10^{-4}$	0.4
1.3-1.6	$1.5 \times 10^{-1} \pm 2.6 \times 10^{-1}$	0.0	$2.9 \times 10^{-4} \pm 4.8 \times 10^{-4}$	0.4
1.6-2.0	$1.8 \times 10^{-1} \pm 3.2 \times 10^{-1}$	0.0	$6.3 \times 10^{-4} \pm 1.1 \times 10^{-3}$	0.9
2.0-2.5	$1.3 \times 10^{-1} \pm 2.1 \times 10^{-1}$	0.0	$9.1 \times 10^{-4} \pm 1.5 \times 10^{-3}$	1.3
Total	$2.4 \times 10^3 \pm 1.3 \times 10^3$	100.0	$6.9 \times 10^{-2} \pm 3.5 \times 10^{-2}$	100.0

SD: standard deviation, NA: not available

<sup>\*</sup>Proportion of infiltrated number concentrations in particle size between 0.25-2.5  $\mu\text{m}$

<sup>†</sup>Proportion of infiltrated mass concentrations in particle size between 0.22-2.5  $\mu\text{m}$



**Fig. 2.** Particle size distributions of infiltrated number and mass concentrations normalized by outdoor PM<sub>2.5</sub> peak by window type and pressure differences. (a) Infiltrated number concentrations with a glazed window, (b) infiltrated number concentrations with a secondary glazed window, (c) infiltrated mass concentrations with a glazed window, and (d) infiltrated mass concentrations with a secondary glazed window. Error bars represent upper 95% confidence interval.

2.5  $\mu\text{m}$  미만 총 수 농도의 증가량은 각각  $1.4 \times 10^3 \pm 4.0 \times 10^2 \text{ \#L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $2.0 \times 10^3 \pm 6.9 \times 10^2 \text{ \#L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $3.3 \times 10^3 \pm 1.1 \times 10^3 \text{ \#L}/\mu\text{g}/\text{m}^3$  이었고 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 질량 농도의 증가량은 각각  $3.9 \times 10^2 \pm 1.1 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5.7 \times 10^2 \pm 2.1 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $9.3 \times 10^2 \pm 3.1 \times 10^2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\mu\text{g}/\text{m}^3$  이었다. 수 농도와 질량 농도의 증가량은 입자 크기 중 1  $\mu\text{m}$  미만인 경우  $\Delta P$ 가 높아질수록 증가하였다. 하지만 수 농도와 질량 농도의 증가량은 1  $\mu\text{m}$  이상인 경우 대체적으로  $\Delta P$ 와 관련이 없었다.

#### IV. 고 찰

실외에서 챔버의 창호 틈새로 침투한 간접흡연 입자 중 크기가 1  $\mu\text{m}$  미만인 입자가 대부분 침투하였고 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  크기에서 피크를 보였다. 침투된 간접흡연의 입자는 기존에 알려진 실내 간접흡연의 입자 크기 분포와 비슷하였다. 실내 갓 배출된 간접흡연 입자의 크기 분포는 단일 모드(single mode)이었고 간접흡연의 입자 수 중앙직경(counter median diameter)은 0.1-0.27  $\mu\text{m}$ , 질량 중앙직경은 0.2-0.5  $\mu\text{m}$ 이었다.<sup>16)</sup> 실외 대기 입자 중 0.1-1  $\mu\text{m}$  크기의 입자가 대부분 건물 내로 침투되기 때문에<sup>10)</sup> 본 연구에서 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  크기의 간접흡연 입자가 가장 많이 침투된 것으로 생각된다. 따라서 다양한 입자 발생원이 있는 실내환경에서 침투된 간접흡연을 평가하기 위해서 0.2-0.3  $\mu\text{m}$  크기의 입자를 활용할 필요가 있다.

실외 간접흡연 입자의 침투는 챔버의 창호 종류와 관련이 있었다. 창호 종류에 따라 입자 크기 분포는 비슷하였지만 이중창이 단창 보다 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 수 농도와 총 질량 농도 증가량이 동일하게 38% 더 낮았다. 두 창호간 실외 간접흡연 입자의 침투 수준이 차이가 나는 원인은 창호간  $A_L$ 이 달랐기 때문인 것으로 생각된다.  $A_L$ 은 이중창이 단창보다 12% 더 작았다. 이러한 결과는 건물 외벽에 단창보다 이중창을 설치하는 것이 간접흡연 입자의 침투를 줄이는데 더 효과적일 수 있다는 것을 보여준다.

실외 간접흡연 입자의 침투는 챔버의  $\Delta P$ 와 관련이 있었다. 챔버에 단창을 장착하여 측정된 자료에서  $\Delta P$ 가 2 Pa보다 4 Pa가 될 때 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 수 농도와 총 질량 농도의 증가량은 동일하게 1.7배

더 높았다. 챔버에 이중창을 장착하여 측정된 자료에서  $\Delta P$ 가 2 Pa보다 4 Pa와 10 Pa가 될 때 2.5  $\mu\text{m}$  미만의 총 수 농도와 총 질량 농도의 증가량은 동일하게 각각 1.4와 2.4배 더 높았다. 건물 내  $\Delta P$ 는 실내·외 온도 차에 영향을 받기 때문에<sup>17)</sup> 이러한 차이가 큰 여름철이나 겨울철에 창호 틈새를 통하여 실외 간접흡연이 침투될 가능성이 높을 것으로 생각된다. 따라서 실외 간접흡연 침투로 인한 노출로부터 거주자를 보호하기 위하여 창호와 같이 틈새가 있는 건물 외벽 주변에서의 금연이 필요할 것이다.

이 연구는 챔버에  $\Delta P$ 를 발생시켜 실외 흡연으로 발생된 간접흡연 입자를 창호 틈새로 침투하도록 하였다. 국내에서 주로 사용되는 PVC 슬라이드 창호를 이용하여  $\Delta P$ 가 2, 4, 10 Pa인 조건에서 실험을 하였다. 건물의 틈새를 모사하여 입자의 침입계수를 평가한 기존 연구에서  $\Delta P$ 가 2~10 Pa인 조건에서 실험한 바 있었다.<sup>18,19)</sup> 미국 내 여러 지역의 일반적인 기후 조건에서는 주거지의  $\Delta P$ 가 -2 Pa이었고, 실외가 0°C에 가까운 경우 -5 Pa, 0°C 미만인 경우 -10 Pa로 보고되었다.<sup>18)</sup> 국내 한 주상복합 아파트의 모든 층에서 실측한 결과에 의하면  $\Delta P$ 는 여름철의 경우 약 -10~10 Pa, 겨울철의 경우 약 -15~15 Pa의 범위를 가진다고 보고된 바 있었다.<sup>20)</sup> 따라서 이 연구에서 실험한 조건은 거주지 내의  $\Delta P$ 와 비슷한 조건이었을 것으로 생각된다.

이 연구는 실외 흡연으로 인하여 창호 틈새로 침투된 간접흡연 입자의 크기 분포를 실험적으로 평가하였다. 일반적인 건물에 사용되는 PVC 슬라이딩 창호 두 종류와 건물에서 발생할 수 있는  $\Delta P$  조건에서 실험을 하였다. 하지만 이 연구는 몇 가지 제한 점이 있었다. 챔버의 창호와 1 m 떨어진 지점에서 흡연을 하여 실외에서 실내환경으로 간접흡연이 침투되는 현상을 모사하였다. 이러한 실험적 환경은 실제 환경을 반영하기에는 제한적일 수 있다. 하지만 이 연구는 제어된 환경에서 수행되었기 때문에 실험 조건에 따른 침투된 간접흡연의 입자 농도 수준과 크기 분포에 대한 정확한 정보를 제공할 수 있었다. 또 다른 제한 점은 실외에서 실험을 했기 때문에 풍향·풍속과 같은 대기조건으로 인하여 챔버 내  $\Delta P$ 와 실외에서 발생한 간접흡연 입자의 거동과 농도에 영향 줄 수 있었다. 실험하는 동안 챔버 주변에 바람막이용 패널을 설치하여 가능한 한 바람의



영향을 최소화 하려고 하였다. 각 실험마다 흡연으로 발생된 실외 입자 농도의 변이가 있었지만 실외 입자 농도의 증가량에 실외 흡연으로 인한 실외 PM<sub>2.5</sub>의 피크 농도로 표준화하였기 때문에 실외 입자 농도의 변이에 따른 영향은 적었을 것이다.

PAS가 측정할 수 있는 가장 작은 입자 크기는 약 0.2 μm이었기 때문에 이보다 더 작은 입자의 크기 분포를 평가할 수 없었다. 기존 연구에서 간접흡연 입자의 크기는 0.02-2 μm라고 보고된 바 있었다.<sup>9)</sup> 실외의 흡연으로 발생된 간접흡연 입자는 다양한 요인에 의해 간헐적으로 짧은 시간 동안 실내로 침투될 가능성이 높다. 간접흡연 입자가 실내에 침투했을 경우 빠른 시간 내에 실내 공기와 희석되어 배경농도 수준으로 될 수 있다는 것을 고려할 때 상대적으로 짧은 시간에 입자 크기 분포를 측정할 수 있는 PAS를 이용하는 것이 적절했을 것이다.

## V. 결 론

이 연구는 창호 틈새를 통하여 실외 간접흡연 입자가 실내환경으로 침투하는 현상을 모사하여 침투된 간접흡연 입자의 크기 분포를 평가하였다. 침투된 간접흡연 입자는 주로 크기가 1 μm 미만인 입자였고 이들 중 크기가 0.2-0.3 μm인 입자가 가장 많이 침투하였다. 실외 간접흡연 입자의 침투 수준은 단창이 이중창 보다 더 높았다. 실외 간접흡연 입자의 침투는 입자 크기 중 1 μm 미만인 입자가 ΔP와 관련이 있었다. 이 연구의 결과는 건물 내 간접흡연 침투를 식별 및 정량화하기 위한 기초정보로 활용될 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었다(NRF-2017R1A2B4006468).

## References

1. U.S. Department of Health and Human Services. A Report of the Surgeon General: How Tobacco Smoke Causes Disease: The Biology and Behavioral Basis for Smoking-Attributable Disease. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Office of the Surgeon General; 2010.
2. U.S. Department of Health and Human Services. The Health Consequences of Smoking-50 Years of Progress: A Report of the Surgeon General. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and Health; 2014.
3. U.S. Department of Health and Human Services. The Health Consequences of Involuntary Exposure to Tobacco Smoke: A Report of the Surgeon General. U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, Coordinating Center for Health Promotion, National Center for Chronic Disease Prevention and Health Promotion, Office on Smoking and Health; 2006.
4. King B, Travers M, Cummings K, Mahoney M, Hyland A. Secondhand smoke transfer in multiunit housing. *Nicotine Tob Res.* 2010; 12(11): 1133-1141.
5. Kim J, Lee K, Kim K. Factors associated with secondhand smoke incursion into the homes of non-smoking residents in a multi-unit housing complex: a cross-sectional study in Seoul, Korea. *BMC Public Health.* 2017; 17(1): 739.
6. Kim J, Lee E, Lee K, Kim K. Relationships Between Secondhand Smoke Incursion and Wheeze, Rhinitis, and Eczema Symptoms in Children Living in Homes Without Smokers in Multi-Unit Housing. *Nicotine Tob Res.* 2018; nty027.
7. Leung LT, Ho SY, Wang MP, Lo WS, Lam TH. Exposure to secondhand smoke from neighbours and respiratory symptoms in never-smoking adolescents in Hong Kong: a cross-sectional study. *BMJ Open.* 2015; 5(11): e008607.
8. Kim J, Lee K. Characterization of urinary cotinine in non-smoking residents in smoke-free homes in the Korean National Environmental Health Survey (KoNEHS). *BMC Public Health.* 2016; 16(1): 538.
9. Klepeis NE, Apte MG, Gundel LA, Sextro RG, Nazaroff WW. Determining size-specific emission factors for environmental tobacco smoke particles. *Aerosol Sci Technol.* 2003; 37(10): 780-790.
10. Chen C, Zhao B. Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and penetration factor. *Atmos Environ.* 2011; 45(2): 275-288.
11. Liu D-L, Nazaroff WW. Particle penetration through windows. *Proceedings Indoor Air.* 2002.

12. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Ventilation and Infiltration, Ch. 16. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta, GA; 2001: 26.12.
13. Hwang J, Lee K. Determination of outdoor tobacco smoke exposure by distance from a smoking source. *Nicotine Tob Res.* 2014; 16(4): 478-484.
14. Lee K, Pieper N, Repace J, Troutman A. Differential impacts of smoke-free laws on indoor air quality. *J Environ Health.* 2008; 70(8): 24.
15. Cho H, Lee K. A new assessment method of outdoor tobacco smoke (OTS) exposure. *Atmos Environ.* 2014; 87: 41-46.
16. Nazaroff WW, Klepeis NE. Environmental tobacco smoke particles. In: Morawska L, Salthammer T. editors. Indoor Environment-airborne particles and settled dust, Weinheim: Wiley-VCH; 2003. P. 245-274.
17. Fabian MP, Lee SK, Underhill LJ, Vermeer K, Adamkiewicz G, Levy JI. Modeling Environmental Tobacco Smoke (ETS) Infiltration in Low-Income Multifamily Housing before and after Building Energy Retrofits. *Int J Environ Res Public Health.* 2016; 13(3).
18. Mosley R, Greenwell D, Sparks L, Guo Z, Tucker W, Fortmann R, et al. Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Sci Technol.* 2001; 34(1): 127-136.
19. Liu D-L, Nazaroff WW. Particle penetration through building cracks. *Aerosol Sci Technol.* 2003; 37(7): 565-573.
20. Lee K-H, Kim S-M, Park Y-H, Moon J-S, Sohn J-Y. A Study on the Air Tightness Performance and Stack Effect Characteristics in High-Rise Apartments. *Korean J Arch Inst Korea.* 2005; 21(12): 279-286.