



RESEARCH ARTICLE

공동주택의 건물 기밀도와 대기 중 먼지 침입지표의 상관관계 분석

엄예슬¹ · 박보람² · 강동화^{3*}

¹서울시립대학교 대학원 건축공학과 박사과정, ²서울시립대학교 대학원 건축공학과 석사과정,

³서울시립대학교 도시과학대학 건축학부 건축공학전공 부교수, 공학박사

Correlation Analysis of Building Airtightness and Outdoor Particle Infiltration Index in Apartment Buildings

Eom, Ye-Seul¹ · Park, Bo-Ram² · Kang, Dong-Hwa^{3*}

¹Ph.D. Student, Department of Architectural Engineering, Graduate School, University of Seoul, Seoul, Korea

²M.S. Student, Department of Architectural Engineering, Graduate School, University of Seoul, Seoul, Korea

³Associate Professor, Department of Architectural Engineering, College of Urban Sciences, University of Seoul, Seoul, Korea

*Corresponding author: Kang, Dong-Hwa, Tel: +82-2-6490-2766, E-mail: dhkang@uos.ac.kr

ABSTRACT

The objective of this study is to investigate the correlation of particle infiltration and building airtightness according to the deterioration of apartment housing units. For this purpose, the blower door test and particle infiltration experiments were conducted in 6 apartment housing units. The blower door test was conducted to measure the airtightness and the leakage area of suspected particle penetration pathways. The infiltration test method was performed to estimate the size-resolved particle penetration coefficient (P), infiltration factors (F_{inf}), and outdoor particle infiltration rate ($P \times \lambda$). During the infiltration test, the indoor and outdoor pressure difference was maintained at 10Pa using the blower-door depressurization procedure. The blower door test results showed that the difference in the airtightness level of leaky and average airtight housing units was about 2.5 times. The particle infiltration test results showed that the penetration coefficient (P), infiltration factor (F_{inf}), and outdoor particle infiltration rate ($P \times \lambda$) tended to decrease as the particle diameter increases. This result means that small particle size can easily pass through the crack in the envelope of the building. According to the results of the relationship between infiltration and airtightness, it was analyzed that the indoor particle concentration of leaky housing units could be 4.34 times higher than average airtight housing units under the same outdoor particle concentration condition. The results suggest that the required amount of particle removal may differ depending on the airtightness of the building.

주요어 : 외부미세먼지 침입, 건물 기밀도, 공동주택, 블로어도어 실험, 실내공기질

Keywords: Outdoor particle infiltration, Building airtightness, Apartment building, Blower-door tests, Indoor air quality

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2021 February, 15(1): 63-74
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20210006>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: January 14, 2021

Revised: January 27, 2021

Accepted: January 28, 2021

© 2021 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

대기 중 고농도 미세먼지에 장기간 노출되면 호흡기질환 및 심혈관질환을 일으키는 것으로 알려져 있으며(Brook et al., 2010; Kim et al., 2015), 실내외 압력차에 의해 건물의 틈새를 통해 실내로 침입하여 실내공기 중 미세먼지 농도를 상승시키기도 한다(Liu and Nazaroff, 2003; Chen and Zhao, 2011). 기존연구의 결과에 따르면, 외부에서 유입된 미세먼지가 실내에서 발생한 미세먼지에 비해 건강에 더 유해하다고 알려져 있다(Ebelt et al., 2005). Ebelt et al. (2005)는 대기 및 실내 미세먼지의 성분을 분석한 결과, 대기 중 미세먼지의 주요 성분이 질산염과 연료가스의 탄소화합물로 나타나, 인체에 노출될 경우 위해도가 높은 것을 확인하였다.

실외 미세먼지는 건물 외피의 틈새와 같은 누기부위를 통해 유입된다(Thatcher et al., 2003; Chao et al., 2003). 건물이 노후화됨에 따라 건물의 기밀도가 낮아지고, 외피의 틈새가 커질 수 있다. 유사한 문제의식으로 주거 건물의 기밀성과 외부미세먼지 유입의 관계를 분석한 연구가 다수 수행되어 왔다(Chao et al., 2003; Stephens and Siegel, 2012; Choi and Kang, 2017; 2018). Stephens and Siegel (2012)은 18개 단독주택의 기밀성과 외부미세먼지 유입간의 상관관계를 분석하였으며, 단독주택의 노후화에 따라 외부미세먼지 침입량이 증가함을 결과로 제시하였다. 이러한 연구결과를 고려할 때, 실내 미세먼지 농도 저감을 위한 미세먼지 제거량 산정과 같이 실외 미세먼지의 실내침투량의 정량화가 요구되는 경우에 외부미세먼지 침입에 대한 이해 및 건물의 기밀도와 외부미세먼지의 침입과의 관계를 분석할 필요가 있다.

특히, 국내 공동주택은 단독주택과는 달리 외부에 노출된 외피의 면적과 부위가 차이가 있고, 주로 고층건물로 지어지므로 겨울철의 경우 외부 풍속으로 인해 약 10 Pa의 이상의 높은 실내외 압력차를 가질 수 있다(Jo et al., 2007). Bang et al. (2018)은 기밀성능($ACH_{50}=1.99\sim 2.68\text{ h}^{-1}$)이 우수하더라도, 실내외 압력차가 큰 경우(9.6 Pa)에는 외피의 누기부위를 통한 실내 공기유입량이 큰 것을 확인하였다. 이처럼, 실내외 압력차가 크게 나타나기 쉬운 공동주택에서는 단독주택에서 통상적으로 측정되는 낮은 수준의 실내외 압력차(4 Pa)에서의 자연침기 조건(Walker et al., 2013)과 침입환경이 다를 것으로 판단된다.

또한, 실내외 압력차에 따라 미세먼지의 입경별 침입특성이 다르게 나타날 수 있다. 이러한 관점에서 실내외 압력차를 제어한 조건에서 입경별 미세먼지의 침입을 평가한 연구가 수행된 바 있다(Mosley et al., 2001; Liu and Nazaroff, 2003; Jeng et al., 2006). Mosley et al. (2001)는 두 개로 나누어진 실험챔버의 압력차를 변화시키면서, 0.05~5.0 μm 입자의 침입 실험을 수행하였다. 10 Pa의 압력차 조건에서 2.0 μm 의 입자의 85%가 누기부위를 통과하였지만 5.0 μm 입자의 통과율은 1% 미만으로 나타났다.

이에 따라 본 연구에서는 동일한 실내외 압력차 조건 하에서 국내 공동주택의 기밀수준에 따른 미세먼지 침입을 분석하기 위하여 블로어도어를 활용하여, 실내외 압력차가 10 Pa인 조건에서의 입경별 미세먼지 침입실험을 수행하였다. 본 연구의 목적은 공동주택 노후도와 대기 중 미세먼지의 세대 내 침입과의 상관관계를 분석하는 것이다. 이를 위하여 6개 공동주택 세대를 대상으로 세대의 기밀도를 측정하고, 미세먼지 침투계수, 침입률, 외부미세먼지 유입률과 같은 침입지표를 분석하였다.

연구 방법

공동주택 노후도에 따른 건물 기밀도와 대기 중 먼지 침입률의 상관관계의 분석을 위하여 건물 기밀도 측정실험과 외부미세먼지의 실내 침입실험을 동시에 계획하였다. 기밀수준의 차이가 클 것으로 판단되는 총 6개 공동주택 세대를 선정하였으며, 기밀도 측정결과에 따른 세대별 기밀 수준과 외부미세먼지 침입성능 지표간의 관계를 분석하였다.

대상건물

대상 건물은 준공시점을 기준으로 10년 이상 노후화된 공동주택의 6개 세대를 선정하였으며, 30년 이상된 노후 세대도 2개 세대를 포함하였다. 건물의 기밀도와 외부미세먼지의 실내 침입실험은 외부미세먼지 농도가 높은 겨울철인 12월~1월에 수행되었다. Table 1은 현장조사를 통해 취득한 실험대상 공동주택 세대의 개요를 나타낸다. 건물의 연령은 평균 21년으로, 최소 10년~최대 37년이다. 대상 세대의 평균 바닥면적은 85.2 m²이고, 바닥면적의 범위는 36~212 m²로 소형세대와 대형세대를 포함하였다. 또한, 대기 중 먼지의 침입경로와 연관된 외피의 면적(EWA/FA, WA/FA)을 조사하였다.

Table 1. Description of tested housing units

Housing Unit #	Age (year)	Floor	Floor Area (FA) (m ²)	Exterior Wall Area (EWA) (m ²)	Window Area (WA) (m ²)	EWA/FA	WA/FA	Volume (m ³)
1	10	5F	85	50	44	0.59	0.51	196
2	19	1F	212	69	52	0.32	0.24	488
3	37	1F	57	40	18	0.70	0.32	123
4	34	2F	36	18	10	0.51	0.28	83
5	12	8F	85	45	21	0.53	0.25	196
6	14	4F	36	18	7	0.51	0.20	83

기밀측정실험

대상 세대의 기밀도 측정실험을 수행하기 위하여, ISO 9972을 준용하여 블로어도어가 감압법을 수행하였다. 측정 장비는 블로어도어(Retrotec EU6101 with DM32, Retrotec, USA)를 이용하였으며, 측정오차는 ±5%이다. 측정 시 대상 공간을 단일공간으로 가정하기 위하여 실간 문은 모두 개방하였다.

측정결과를 바탕으로 기밀성능 지표인 C (Flow coefficient), n (Pressure exponent), ACH₅₀ (air change rate at 50 Pa), ELA (Effective leakage area at 4 Pa), Specific ELA (Specific effective leakage area), EqLA (Equivalent leakage area at 10 Pa)를 산정하였다. 특정 실내외 압력차 조건(10, 20, 30, 40, 50 Pa)에서의 공기유량을 측정하였으며, 실내외 압력차와 공기유량과의 관계식은 식 (1)과 같다.

$$Q = C(\Delta P)^n \quad (1)$$

여기에서, Q 는 건물외피를 통해 유입되는 유량($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)이며, C 는 공기유량계수($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-n}$), ΔP 는 실내·외 압력차(Pa), n 은 공기유동지수(-)이다.

공기유량계수(C)는 틈새의 특성에 따라 값이 다르며, 일반적으로 건물 틈새에서의 공기유동지수(n)는 0.5에서 1.0사이의 값을 갖는다. 유입되는 공기가 난류일 때 0.5에 가까우며, 층류일 때 1.0에 가까운 값으로 나타난다.

ACH_{50} 는 식 (2)를 통해 산출되었다. 또한, 실내외 압력차가 4 pa인 조건에서의 누기면적인 유효누기면적(ELA)은 미국의 LBNL (Lawrence Berkeley National Lab)에서 제안한 개념으로 식 (3)를 통하여 산출할 수 있다. 이때, specific ELA를 사용하여, 세대의 규모에 따른 유효누기면적을 비교하였다. specific ELA는 ELA를 바닥면적으로 나눈 값으로 정의된다. EqLA는 실내외 압력차가 10 Pa일 때의 누기면적을 의미하며, 캐나다의 NRC (National Research Council)에서 제안된 개념이다(식 (4)).

$$ACH_{50} = \frac{Q_{50}}{V} \quad (2)$$

$$ELA = C \Delta P_r^{n-1/2} \sqrt{\frac{\rho}{2}} \quad (3)$$

$$EqLA = \frac{Q_{\Delta P}}{0.61} \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot \Delta P}} \quad (4)$$

여기서, ACH_{50} 은 50 Pa에서의 공기교환율(h^{-1}), Q_{50} 은 50 Pa에서의 유량($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), V 는 대상 세대의 부피(m^3)이다. ELA는 실내외 압력차가 4 Pa일 때의 유효누기면적(cm^2), P_r 는 기준압력차(4 Pa), ρ 는 공기의 밀도(1.2 kg/m^3), EqLA는 실내외 압력차가 10 Pa일때의 상당누기면적(cm^2), ΔP 는 실내외 압력차(10 Pa)이다.

외부미세먼지 침입실험

대기 중 미세먼지의 침입 성능지표를 추정하기 위하여, 대상 세대의 기밀도 측정실험과 동시에 외부미세먼지 침입실험을 수행하였다. 외부미세먼지 침입실험은 블로어도어 감압법 (Choi and Kang, 2017)을 활용하였다.

외부미세먼지 침입실험은 다음과 같은 절차로 수행되었다. 먼저, 환기를 통해 외부미세먼지를 실내로 유입시킨 후, 창문을 닫고 실내 미세먼지 발생 및 재부유가 없는 조건에서 블로어도어를 가동한다. 실내외 압력차 조건을 10 Pa로 일정하게 유지한 후, 실내 미세먼지 농도의 자연 감쇄율을 측정한다. 이때, 대기 중에서 유입된 미세먼지가 실내에 완전혼합(fully-mixed)된 이후의 실내 미세먼지 농도를 취득하기 위하여, 세대별 실내외 압력차 조건(10 Pa)에서 1회 환기 시간인 시간상수(time constant)이후 20분 동안 측정된 실내외 미세먼지 농도 값을 취득하였다.

실내외 미세먼지 개수농도의 측정은 광산란법의 연속측정계인 TSI9306 (Optical Particle Counter (OPC), TSI, USA)을 사용하였다. 본 실험에서 사용된 OPC는 6개 입경범위(0.3-0.5, 0.5-1.0, 1.0-3.0, 3.0-5.0, 5.0-10.0, >10.0 μm)의 개수농도 측정이 가능하다. 실내외 미세먼지 개수농도의 측정은 세대의 중앙(1지점)과 세대 내에서 접근 가능한 에어컨 실외기의 위쪽에 설치(1지점)하여 수행되었으며, 측정 간격은 1분으로 하였다. 또한, 건물 외피를 통한 외부미세먼지의 침입만을 침입실험에 반영하기 위하여, 주방 후드와 화장실의 배기구 및 배수구 등을 기밀 테이프를 활용하여 밀봉하였다.

미세먼지 침입 성능지표

세대별 기밀 수준과 외부미세먼지 침입성능 지표간의 관계를 분석하기 위하여, 1) 침투계수(penetration coefficient, P), 2) 침입률(infiltration factor, F_{inf}), 3) 외부미세먼지의 유입률(outdoor particle infiltration rate, $P \times \lambda$)을 외부미세먼지의 공동주택 세대내로의 침입성능 지표로 사용하였다.

침투계수(P)는 외부미세먼지가 외피를 통해 실내로 유입되는 비율을 나타내는 무차원 계수이다. 실내 미세먼지의 발생과 재부유가 없는 것으로 가정하여, 질량보존방정식(식 (5))을 기반으로 시간에 따른 실내·외 미세먼지의 농도 결과를 활용하여 침투계수를 추정하였다. 침투계수의 추정을 위해 침착률(deposition loss rate, k)을 동시에 추정하였다. 침입률(F_{inf})은 외부미세먼지가 실내로 유입되어 부유하는 비율을 의미한다. 실내 미세먼지 농도가 정상상태에 도달할 때, 실내 미세먼지 농도는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 침입률(F_{inf})은 식 (7)과 같이 정상상태 구간에서의 실내외 미세먼지 농도비로 산출할 수 있다. 외부미세먼지의 유입률($P \times \lambda$)은 실내로 유입되는 외부미세먼지의 유입량을 입경별로 분석하기 위하여, 외부미세먼지 농도(C_o)가 일정한 것으로 가정하여, 각 세대의 입경별 침투계수(P)와 공기교환율(λ)을 곱하여 산출한 지표이다.

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = P \cdot \lambda \cdot C_o(t) - (\lambda + k) \cdot C_i(t) \quad (5)$$

$$C_i(t) = \frac{P \cdot \lambda \cdot C_o}{\lambda + k} \quad (6)$$

$$F_{inf} = \frac{C_{i,ss}}{C_{o,ss}} = \frac{P \cdot \lambda}{\lambda + k} \quad (7)$$

여기에서, C_i 는 실내 미세먼지 개수농도(counts/ m^3), t는 시간(h), P는 침투계수(-), λ 는 실내외 압력차가 10 Pa일 때의 공기교환율(h^{-1}), C_o 는 실외미세먼지 개수농도(counts/ m^3), k는 침착률(h^{-1})이다. $C_{i,ss}$ 는 정상상태에서의 실내 미세먼지 농도, F_{inf} 은 침입률(-)이다.

연구결과

세대별 기밀성능

Table 2는 6개의 측정세대의 기밀성능 실험 결과를 나타낸다. 공기유량계수(C)는 틈새의 특성에 따라 값이 다르며, 공기유동지수(n)은 일반적인 건물의 틈새에서 0.5에서 1.0 사이의 값을 갖는다. 6개 세대에서의 n 값은 0.590에서 0.691의 범위 값으로 산출되어 일반적인 건물의 틈새에서 나타나는 값(0.6~0.7)으로 산출되었으므로 적합한 결과로 판단된다.

ACH₅₀은 3.11~12.39 h⁻¹로 넓은 범위로 나타났으며, 이는 국내 공동주택의 ACH₅₀를 조사한 기존연구의 결과(신축: 1.85 h⁻¹, 노후: 12.9 h⁻¹; Kwon et al., 2010)와 유사하다. ELA는 130.72 cm²에서 435.35 cm²의 값으로 나타났으며, 이는 실내외 압력 차가 4 Pa인 조건에서 세대별로 외부미세먼지의 유입경로가 되는 누기면적에 따라 유입되는 미세먼지의 양이 달라질 수 있음을 의미한다. EqLA는 246.67~834.75 cm²의 값의 범위로 나타났다. 이는 Chen et al. (2012)의 공동주택 측정연구에서 기밀한 세대(ACH₅₀: 1.59~6.47 h⁻¹)와 느슨한 세대(ACH₅₀: 7.77~27.16 h⁻¹)의 EqLA 측정결과(기밀한 세대:121.2~341.5 cm²; 느슨한 세대:276.3~1098.1 cm²)와 유사하게 나타났다. 이러한 결과는 기밀수준에 따라 세대별 누기면적의 차이가 크게 나타남을 보여준다. 또한, 대상 세대의 규모로 인한 ELA 차이를 분석에서 제한하고자, 바닥면적을 고려한 유효누기면적 결과(ELA/FA)는 가장 느슨한 세대(#3)가 0.07로 가장 높게 나타났으며, 기밀성능이 보통인 세대(#1, 2, 5)에서는 0.02로 나타났다.

Table 2. Description of tested housing units

Housing Unit #	C (m ³ ·h ⁻¹ ·Pa ⁻ⁿ)	n	ELA (m ²)	ELA/FA	ELA/EWA	EqLA (m ²)	ACH ₅₀ (h ⁻¹)
1	49.11	0.654	130.72	0.02	0.03	246.67	3.11
2	159.63	0.671	435.35	0.02	0.06	834.75	4.04
3	136.02	0.691	381.39	0.07	0.10	744.81	12.39
4	58.31	0.601	144.32	0.04	0.08	259.53	7.50
5	70.82	0.663	191.01	0.02	0.04	363.58	4.15
6	81.94	0.590	199.74	0.06	0.11	355.58	9.80

외부미세먼지 침입실험 결과

Table 3과 Figure 1은 실내외 압력차를 10 Pa로 일정하게 유지한 조건에서 수행한 6개 세대의 외부미세먼지 침입실험의 결과를 나타낸다. 공기교환율(λ), 입경별 침투계수(P)와 침착률(k), 침입률(F_{inf}), 외부미세먼지의 유입률(P \times λ)을 분석한 결과는 다음과 같다.

실내외 압력차가 10 Pa인 조건에서의 평균 공기교환율(λ)은 2.88 \pm 0.53 h⁻¹로 나타났다. P_{0.3-0.5}는 0.87 \pm 0.30, P_{0.5-1.0}는 0.76 \pm 0.33, P_{1.0-3.0}는 0.73 \pm 0.28, P_{3.0-5.0}는 0.81 \pm 0.11, P_{5.0-10.0}는 0.74 \pm 0.19, P_{>10.0}는 0.51 \pm 0.23로 나타났다. 전체 입경범위에 대한 평균 침투계수는 0.74

로 나타났으며, 이러한 결과는 실내외 압력차가 10 Pa일 때, 실외 미세먼지 74%가 외피를 통해 유입될 수 있음을 의미한다. 또한, Figure 1에서 입자의 크기가 작은 경우, 침투계수(P)가 크게 나타났다. 이는 기존 연구(Long et al., 2001; Mosley et al., 2001; Tran et al., 2017)에서 도출한 결과와 동일한 경향으로 0.3~0.5 μm 의 작은 입경의 미세먼지의 침투계수가 높아 큰 입경의 미세먼지보다 외피를 수월하게 통과하여, 실내로 유입되는 비율이 높은 것을 의미한다. 10.0 μm 보다 큰 입자의 침투계수가 작게 나타났는데, 이는 큰 입자가 틈새에서 차단(interception)되거나 충돌(impaction), 중력침강(gravitational settling)하여 손실되기 때문에 작은 침투계수 값을 나타내는 것으로 판단된다.

6개 세대에서의 전체 입경범위에 대한 침착률(k)은 $1.74 \pm 0.99 \text{ h}^{-1}$ 로 나타났으며, 입자의 크기가 커짐에 따라 침착률도 커지는 것으로 나타났다(Figure 1). 입경별 침입률은 $F_{0.3-0.5, \text{inf}}$ 는 0.68 ± 0.16 , $F_{0.5-1.0, \text{inf}}$ 는 0.60 ± 0.25 , $F_{1.0-3.0, \text{inf}}$ 는 0.50 ± 0.19 , $F_{3.0-5.0, \text{inf}}$ 는 0.46 ± 0.14 , $F_{5.0-10.0, \text{inf}}$ 는 0.30 ± 0.10 , $F_{10.0, \text{inf}}$ 는 0.22 ± 0.10 로 나타났다. 본 연구에서 산출된 침입률은 입경이 커질수록 침입률이 작아지는 경향을 보였으며, 주거 건물에서의 입경별 침입률을 분석한 기존연구의 결과(Orch et al., 2014)와 유사하다. 유입률($P \times \lambda$)은 $P_{0.3-0.5} \times \lambda$ 는 $2.41 \pm 1.95 \text{ h}^{-1}$, $P_{0.5-1.0} \times \lambda$ 는 $2.23 \pm 1.87 \text{ h}^{-1}$, $P_{1.0-3.0} \times \lambda$ 는 $2.01 \pm 1.49 \text{ h}^{-1}$, $P_{3.0-5.0} \times \lambda$ 는 $2.15 \pm 1.60 \text{ h}^{-1}$, $P_{5.0-10.0} \times \lambda$ 는 $1.92 \pm 1.63 \text{ h}^{-1}$, $P_{>10.0} \times \lambda$ 는 $1.44 \pm 1.28 \text{ h}^{-1}$ 로 나타났다. 입경별 침투계수에 특성과 동일하게 입자의 크기가 커짐에 따라 외부미세먼지 유입률은 작은 값을 갖는 것으로 나타났으며, 세대별로 외부미세먼지 유입률의 차이가 크게 나타났다.

공동주택 기밀수준 별 미세먼지 침입지표

Figure 2는 측정세대의 기밀수준에 따른 외부미세먼지 침입지표(침투계수, 침입률, 외부미세먼지 유입률)를 분석한 결과를 나타낸다. 측정세대의 ACH₅₀ 결과에 따라, 기밀성능이 보통인 세대(#1, 2, 5)와 느슨한 세대(#3, 4, 6)로 구분하였다.

Figure 2(a)에서 기밀수준 별 침투계수를 분석한 결과, 입자크기에 따라 기밀수준별 침투계수의 차이가 나타났다. 큰 입경($dp > 10.0 \mu\text{m}$)에서 보통세대와 느슨한 세대의 침투계수는 각각 평균 0.60, 0.42로 나타났다. 작은 입경($dp < 1.0 \sim 3.0 \mu\text{m}$)에서, 느슨한 세대의 침투계수는 1에 가까운 값을 갖는 것으로 나타났으나, 보통세대는 약 0.63으로 나타났다. 이는 작은 입경범위에서 기밀수준에 따라 침투계수의 차이가 크게 나타나는 것으로 분석된다.

Figure 2(b)와 같이, 기밀수준별 침입률을 분석한 결과, 모든 입경범위에서 느슨한 세대의 침입률이 보통세대보다 크게 나타났다. 느슨한 세대와 보통세대의 입경별 침입률의 평균이 각각 0.56, 0.35로 나타났다. 이러한 결과는 느슨한 세대에서 대기 중 미세먼지에 대한 실내농도가 보통수준의 기밀 세대보다 최대 1.6배 클 것임을 의미한다. 또한, 실내외 압력차가 10 Pa인 조건에서 외부미세먼지의 실내 유입경로인 누기부위의 면적에 따라 세대별 미세먼지 침입률이 달라질 수 있음을 의미한다. 느슨한 세대에서 작은 입경($dp < 1.0 \mu\text{m}$)의 침입률은 평균 0.80으로 나타났다. 이는 실내 발생원이 없는 경우를 가정할 때, 실외 미세먼지 농도의 80% 수준에서 실내 미세먼지 농도가 결정될 수 있음을 의미한다.

Table 3. Outdoor particle infiltration results of tested housing units

Unit No.	Index	Particle Diameter (μm)					
		0.3-0.5	0.5-1.0	1.0-3.0	3.0-5.0	5.0-10.0	> 10.0
1	λ (h^{-1})	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
	k (h^{-1})	0.09	0.05	0.20	1.38	3.87	1.97
	P (-)	0.41	0.17	0.22	0.63	0.63	0.18
	F_{inf} (-)	0.38	0.16	0.18	0.28	0.14	0.07
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	0.46	0.19	0.25	0.71	0.72	0.21
2	λ (h^{-1})	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45	1.45
	k (h^{-1})	0.01	0.16	1.05	1.07	1.69	1.48
	P (-)	0.62	0.57	0.65	0.82	0.71	0.48
	F_{inf} (-)	0.61	0.51	0.38	0.47	0.33	0.24
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	0.89	0.82	0.94	1.18	1.03	0.69
3	λ (h^{-1})	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30
	k (h^{-1})	1.45	0.62	0.44	2.10	6.30	5.09
	P (-)	1.06	0.93	0.71	0.92	0.96	0.68
	F_{inf} (-)	0.83	0.83	0.65	0.66	0.44	0.35
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	5.61	4.94	3.74	4.90	5.10	3.63
4	λ (h^{-1})	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
	k (h^{-1})	0.89	1.20	1.55	1.29	3.58	6.20
	P (-)	1.01	1.04	0.99	0.79	0.69	0.79
	F_{inf} (-)	0.77	0.73	0.64	0.54	0.30	0.25
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	2.84	2.94	2.80	2.22	1.93	2.22
5	λ (h^{-1})	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82	2.82
	k (h^{-1})	0.68	0.55	0.64	1.82	2.63	3.20
	P (-)	1.20	0.93	0.91	0.93	0.95	0.61
	F_{inf} (-)	0.71	0.60	0.55	0.33	0.26	0.15
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	1.20	0.93	0.91	0.93	0.95	0.61
6	λ (h^{-1})	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75	3.75
	k (h^{-1})	0.83	0.81	2.02	2.47	1.92	1.20
	P (-)	0.92	0.94	0.92	0.79	0.47	0.34
	F_{inf} (-)	0.75	0.78	0.60	0.48	0.31	0.26
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	3.44	3.54	3.44	2.97	1.77	1.28
Average \pm Standard Deviation	λ (h^{-1})	2.88 ± 1.53	2.88 ± 1.53	2.88 ± 1.53	2.88 ± 1.53	2.88 ± 1.53	2.88 ± 1.53
	k (h^{-1})	0.66 ± 0.54	0.57 ± 0.42	0.98 ± 0.70	1.69 ± 0.54	3.33 ± 1.69	3.19 ± 2.05
	P (-)	0.87 ± 0.30	0.76 ± 0.33	0.73 ± 0.28	0.81 ± 0.11	0.74 ± 0.19	0.51 ± 0.23
	F_{inf} (-)	0.68 ± 0.16	0.60 ± 0.25	0.50 ± 0.19	0.46 ± 0.14	0.30 ± 0.10	0.22 ± 0.10
	$P \times \lambda$ (h^{-1})	2.41 ± 1.95	2.23 ± 1.87	2.01 ± 1.49	2.15 ± 1.60	1.92 ± 1.63	1.44 ± 1.28

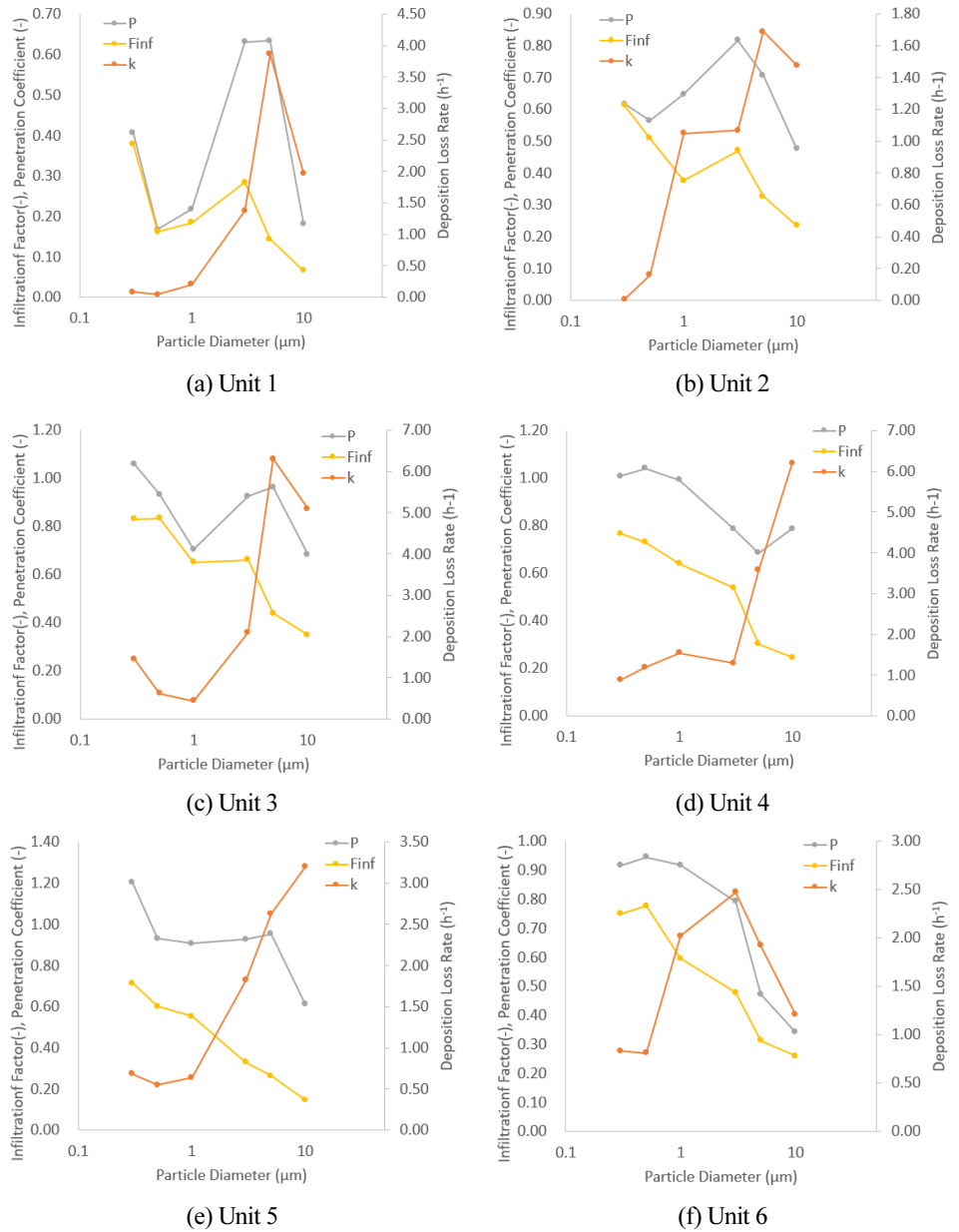
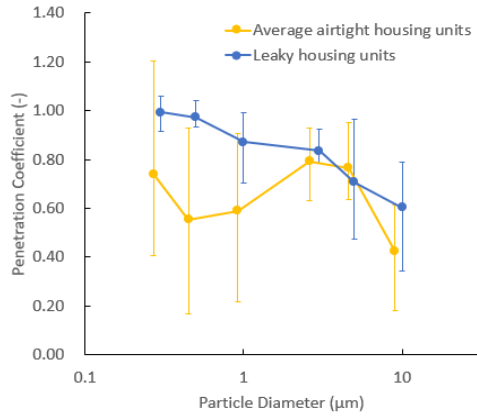
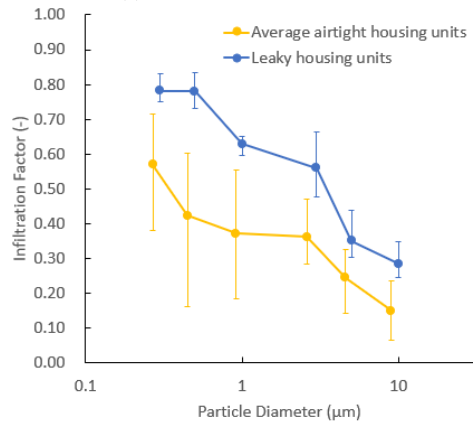


Figure 1. Outdoor particle infiltration results of tested housing units

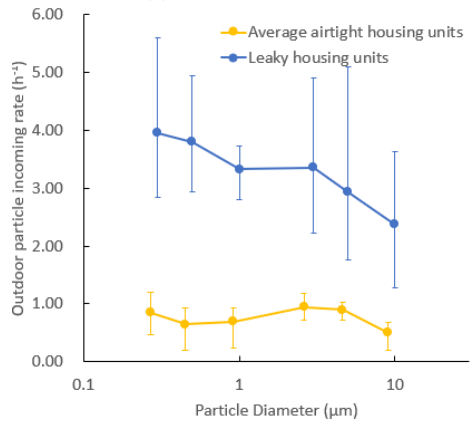
Figure 2(c)에서 기밀수준별 외부미세먼지 유입량($P \times \lambda$)을 분석한 결과, 외부미세먼지 유입량은 공기교환율에 영향을 받으므로, 보통세대와 느슨한 세대에서의 유입량의 차이가 크게 나타났다. 느슨한 세대와 보통세대의 직경별 외부미세먼지 유입량의 평균은 각각 3.30 h^{-1} , 0.76 h^{-1} 으로 나타났다. 이러한 결과는 외부미세먼지 농도가 동일한 경우, 느슨한 세대의 실외 미세먼지의 실내 유입량이 보통수준의 기밀 세대보다 약 4.34배 높을 수 있음을 의미한다. 이와 같은 결과는 공동주택 기밀성과 실외 미세먼지의 실내유입량 간의 강한 상관관계가 있음을 보여주며, 실외 미세먼지의 실내 유입을 해결하기 위한 공기정화장치의 용량 산정, 건물 외피의 기밀화를 통한 미세먼지 노출 감소량 예측 등에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Penetration coefficient



(b) Infiltration factor



(c) outdoor particle incoming rate

Figure 2. Description of tested housing units

결론

본 연구에서는 공동주택 노후도에 따른 대기 중 미세먼지의 세대 내 침입을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 6개 공동주택 세대를 대상으로 세대의 기밀도를 측정하고 미세먼지 침입 계수, 침입률, 외부미세먼지유입률과 같은 미세먼지 침입지표를 분석하였다.

평균 ACH_{50} 과 Specific ELA가 느슨한 세대의 경우 각각 $9.90 h^{-1}$, 0.05, 보통세대의 경우 $3.77 h^{-1}$, 0.02로 기밀 수준의 차이가 약 2.5 배 나타났다. 침투계수와 침입률, 외부미세먼지 유입률은 미세먼지의 입경이 커질수록 작아지는 경향이 나타났으며, 이는 작은 입경의 미세먼지가 건물 외피의 틈새를 통해 수월하게 통과할 수 있음을 시사한다. 기밀 수준에 따른 외부미세먼지 침입지표를 분석한 결과, 외부미세먼지 농도가 동일한 조건에서 느슨한 세대의 미세먼지 실내 유입량이 보통세대보다 4.34배 크므로 느슨한 세대의 실내 미세먼지 농도가 높게 나타날 수 있는 것으로 분석되었다.

본 연구의 결과는 건물의 기밀성능에 따라 미세먼지 제거요구량이 다를 수 있음을 시사하며, 외부미세먼지 침입에 의한 실내 미세먼지 제거부하의 산정 등 정량적 기반의 다양한 미세먼지 제거방안 도출에 활용될 수 있다.

후기

이 논문은 2017년도 서울시립대학교 교내학술연구비에 의하여 지원되었음.

References

1. Bang, J.I., Jo, S.M., Sung, M.K. (2018). Analysis of Infiltration of Outdoor Particulate Matter into Apartment Buildings. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, 34(1), 61-68.
2. 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. Jr., Whitsel, 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.
3. Chao, C.Y.H., Wan, M.P., Cheng, C.K. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences. *Atmospheric Environment*, 37, 4233-4241.
4. 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.
5. Chen, S., Levine, M.D., Li, H., Yowargana, P., Xie, L. (2012). Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use. *Energy and Building*, 51, 157-164.
6. Choi, D.H., Kang, D.H. (2017). Infiltration of Ambient PM_{2.5} through Building Envelope in Apartment Housing Units in Korea. *Aerosol and Air Quality Research*, 17, 598-607.
7. Choi, D.H., Kang, D.H. (2018). Indoor/Outdoor Relationships of Airborne Particles under Controlled Pressure Difference across the Building Envelope in Korean Multifamily Apartments. *Sustainability*, 10, 4074.

8. Ebelt, S.T., Wilson, W.E., Brauer, M. (2005). Exposure to Ambient and Nonambient Components of Particulate Matter: A Comparison of Health Effects. *Epidemiology*, 16(3), 396-405.
9. Jeng, C.-J., Kindzierski, W.B., Smith, D.W. (2006). Particle penetration through rectangular-shaped cracks. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5, 111-119.
10. Jo, J.-H., Lim, J.-H., Song, S.-Y., Yeo, M.-S., Kim, K.-W. (2007). Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings. *Building and Environment*, 42(1), 263-277.
11. Kim, K.-H., Kabir, E., Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136-143.
12. Kwon, O.H., Kim, J.H., Kim, M.H., Seok, Y.J., Jeong, J.W. (2010). Case Study of Residential Building Air Tightness in Korea based on Blower Door Test Approach. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 26(7), 303-310.
13. Liu, D., Nazaroff, W.W. (2003). Particle penetration through building cracks. *Aerosol Sci. Technol*, 37, 565-573.
14. Long, C.M., Suh, H.H., Catalano, P.J., Koutrakis, P. (2001). Using time-and size-resolved particle data to quantify indoor penetration and deposition behavior. *Environmental Science and Technology*, 35, 2089-2099.
15. Mosley, R.B., Greenwell, D.J., Sparks, L.E., Guo, Z., Tucker, W.G., Fortmann, R., Whitfield, C. (2001). Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Science and Technology*, 34, 127-136.
16. Orch, Z.E., Stephens, B., Waring, M.S. (2014). Predictions and determinants of size-resolved particle infiltration factors in single-family homes in the U.S. *Building and Environment*, 74, 106-118.
17. Stephens, B., Siegel, J.A. (2012). Penetration of ambient submicron particles into single-family residences and associations with building characteristics. *Indoor Air*, 22, 501-513.
18. Thatcher, T.L., Lunden, M.M., Revzan, K.L., Sextro, R.G., Brown, N.J. (2003). A concentration rebound method for measuring particle penetration and deposition in the indoor environment. *Aerosol Science and Technology*, 37, 847-864.
19. Tran, D.T., Alleman, L.Y., Coddeville, P., Galloo, J.C. (2017). Indoor particle dynamics in schools: Determination of air exchange rate, size-resolved particle deposition rate and penetration factor in real-life conditions. *Indoor and Built Environment*, 26(10), 1335-1350.
20. Walker, I.S., Sherman, M.H., Joh, J., Chan, W.R. (2013). Applying Large Datasets to Developing a Better Understanding of Air Leakage Measurement in Homes. *International Journal of Ventilation*, 11(4), 323-338.