

국내 아파트의 미세먼지 유입 특성

주 상 우¹⁾ · 지 준 호^{1)*}

¹⁾(주)에코픽처스

(2019년 10월 15일 투고, 2019년 12월 2일 수정, 2019년 12월 10일 게재확정)

Infiltration Characteristics of Particulate Matter at a Korean Apartment House

SangWoo Joo¹⁾ · JunHo Ji^{1)*}

¹⁾*EcoPictures Co., Ltd., Seoul, Korea*

(Received 15 Oct 2019; Revised 02 Dec 2019; Accepted 10 Dec 2019)

Abstract

Infiltration characteristics of airborne particulate matter had been investigated in real-life for about 90 days over 2 years in a Korean apartment building where a 3-person household had lived and the exclusive private area was 84.9 m². Airtightness was measured by fan depressurization, and the ACH₅₀ was 2.41 times per hour. In and outdoor particle concentrations were measured by optical particle counters. Infiltration factors and filtration efficiencies of the house, which reflect the removal of outdoor particles penetrating building envelope and the deposition inside a building, were obtained from data screened based on an empirical evaluation process. Infiltration factor of fine particles showed a range from about 42% at 0.4 m/s of wind speed to 72% at 4.2 m/s of wind speed with closed windows and doors. Filtration efficiency was like a MERV 13 grade filter with an open window outside at a balcony at low outdoor wind speed under 1 m/s. The grade decreased to MERV 11 by opening another outside window at the other balcony. Filtration efficiencies decreased as much as 29% in average at a range of 0.3~2.5 μm.

Keywords: Particulate matter, Infiltration, Filtration efficiency, Wind speed, Apartment building

* Corresponding author.
Tel : +82-2-6959-5899
E-mail : caputjun@gmail.com

1. 서론

우리나라 미세먼지(PM₁₀, 입경이 10 μm 이하인 입자) 연평균 농도는 측정이 시작된 2002년부터 2012년까지 감소 추세를 보였고 초미세먼지(PM_{2.5}, 입경이 2.5 μm 이하인 입자) 연평균 농도는 2015년부터 2017년까지 약 25~26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 비교적 일정하게 유지되는 모습을 보였다(KME, 2017). 하지만 서울의 연중 최대 초미세먼지 일평균 농도는 2015년 70, 2016년 71, 2017년 95, 2018년 99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 점차 증가하는 추세이다. 2019년에는 상반기에만 1월 14일 129, 3월 4일 117, 3월 5일 135, 3월 6일 101 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 2018년 최대 농도를 능가하였다. 사람들이 오랜 시간 주택 내에 머무르기 때문에 주택 내 미세먼지나 초미세먼지의 농도는 인체 노출의 관점에서 중요하다. 통계청의 2014년 한국인의 생활시간조사 자료를 분석한 결과에 따르면 한국 성인은 평일에 14.9 시간, 하루 중 62.1%의 시간을 자택에 머물렀다. 주말에는 주택 내에서의 활동율이 평일에 비해 높아 16.5 시간, 하루 중 68.6% 동안 체류하였다(Yoon et al., 2017).

대기 미세먼지는 창과 문이 닫힌 상태에서도 통해 실내로 유입될 수 있다(Chao et al., 2003). 대기 미세먼지의 유입 특성은 정상상태에서의 실내외 미세먼지 농도비를 이용해 침기와 입자의 침착이 고려된 유입계수로 나타낼 수 있다(Long et al., 2001). 이는 건물의 기밀성능과 연관된 침기량과 공간의 체적, 실외 미세먼지 농도와 실외 입자가 건물 외피를 통과하는 비율인 침투효율(Penetration efficiency), 실내 미세먼지 농도와 실내에서 미세먼지가 단위시간당 소실되는 정도인 침착률(Deposition rate) 간의 관계를 나타낸 물질 보존 방정식으로부터 추정할 수 있다(Nazaroff, 2004). 대기 미세먼지의 실내 유입 특성은 입자크기에 따라 달라진다. 창과 문이 닫힌 공동주택 거실에서 미세먼지 중 상대적으로 큰 입자(PM_{10-2.5}, 입경이 2.5에서 10 μm 사이인 입자)는 거의 유입되지 않으나 초미세먼지는 상당량이 유입되는 것으로 보고되었다(Joo and Ji, 2019). 국내의 경우 대기 미세먼지에 대한 연구가 주로 활발하게 이루어지고 있지만, 주택 내와 같은 주거환경에서의 심층적인 미세먼지나 초미세먼지 관련 연구는 부족한 실정이다(Bae and Kim, 2017).

본 연구에서는 국내 많은 가구가 거주하는 유형인 아파트이고, 가장 많은 가구가 거주하는 면적대에 해당하는 전용면적 84.9 m²의 아파트의 미세먼지 유입 특성을 조사하였다. 먼저 건물 기밀성능을 확인하기 위해 발코니 창호와 거실 방문의 개폐에 따른 주택의 공기누설율인 ACH₅₀을 측정하였다. 실증 측정은 2년에 걸쳐 90일 간 진행되었다. 측정기간 동안 주택에는 재실자 3명이 거주하였고, 미세먼지와 초미세먼지 농도 및 입자크기분포를 측정했다. 미세먼지 유입 특성은 측정 기간 중 실내외 미세먼지 농도와 외부 풍속이 안정한 구간의 데이터를 추출하여 분석했다. 바깥 미세먼지가 실내로 유입되는 특성을 분석하기 위해 입자 크기에 따른 입경별 실내외 농도비를 분석했고, 바깥 미세먼지가 실내로 유입되는 과정에서 필터가 장착되었다고 가정하여 입자 제거성능에 해당하는 필터성능등급을 추정하였다.

2. 실험 방법 및 연구 장비

2.1 공동주택의 침기량 측정

공동주택에서 발코니 창호와 거실 방문의 개폐조건에 따른 기밀성능을 측정하였다. 해당 세대는 20층 아파트의 꼭대기 층이었으며, 높이는 지상으로부터 약 50 m, 체적은 202.08 m³이었다. 주택의 기밀성능은 블로어 도어(Minneapolis Blower Door™ System with DG-700, TEC, USA)를 현관에 설치해서 ACH₅₀(Air changes per hour at 50 pascals)을 감압법으로 구하였다(ASTM, 2010). 실내외 압력차는 압력계(DG-700, TEC, USA)로 측정하였다. 각 연구 장비의 위치는 그림 1에 표시하였다.

ASTM 규격에 해당하는 조건 외에도 발코니 창호와 거실 방문의 개폐조건이 다른 5가지 경우의 침기량을 측정하였다. 조건 A는 발코니 창호와 거실 방문 모두 닫은 경우이고, 조건 B는 주방 발코니 외벽 창문(그림 1의 I) 열어 둔 조건이다. 조건 C는 거실 발코니 외벽 창문(그림 1의 IV)을 열어 둔 조건이고, 조건 D는 양쪽 발코니 외벽 창문(그림 1의 I과 IV)을 열어 둔 경우, 조건 E는 양쪽 발코니를 거실과 구분 짓는 창호(그림 1의 II와 III)를 열어 둔 조건이다. 모든 조건에서 거실 외 방들의 창과 문은 닫혀 있었다. 발코니 창호는 주방 발코니 내부만 여닫이

문이었고, 거실 내부와 거실 및 주방 발코니 외부는 옆으로 밀어서 창을 개폐하는 형식의 창인 미서기 단창이었다. B나 C, D와 같이 발코니 외부 창호를 열 때는 거주자들이 평소 생활하던 대로 미서기 창의 한 면을 1/3만큼 열어 두었다. E와 같이 발코니 내부 창호를 열 때는 활짝 열었다. 각 개폐조건에의 기밀성능은 실내외의 압력차를 10~50 Pa 범위에서 10 Pa 단위로 변경하면서 풍량을 측정 후, 계산하여 추정하였다(ASTM, 2010).

2.2 실증 측정에 의한 미세먼지 유입 특성 분석

실증 측정이 이루어진 대상 아파트는 국내의 가장 많은 가구가 거주하는 유형에 속한다. 2016년 통계청 자료에 따르면 일반가구의 49%가 아파트에 거주하며, 아파트 연면적을 아홉 구간으로 나눠 조사했을 때 60~85 m²에 속하는 아파트가 42%로 가장 많았다(Statistics Korea, 2016). 경기도 용인시에 위치한 해당 주택은 2004년 준공하여 15년이 지났고, 3명이 거주하며, 기본 전용면적이 84.9 m²이다(Joo and Ji, 2019). 주택의 구조는 그림 1에 나타나 있다.

주택 내 미세먼지 농도는 2018년 9월 초부터 11월 말까지와 2019년 4월 초부터 5월 말까지, 약 90일 동안 거주자들의 실생활 중에 OPC (Model 11A, Grimm, Germany)를 이용하여 1분 단위로 측정하였다. 실험에 사용한 OPC들은 실험 전에 구입처에서 교차보정을 실시하였다. OPC들의 위치는 그림 1에 나타났다. 실내측정 OPC는 주방에 식탁에 앉았을 때의 호흡기 위치인 약 1.3 m 높이에서 샘플링이 이루어지게끔 설치했다. 바깥의 미세먼지 농도는 OPC를 주방 발코니에 설치하여 외벽 창문을 열고 측정했다. 해당 위치의 측정값이 바깥에서의 측정값과 같은 것은 사전에 확인했다. 초미세먼지 유입 특성 분석에 쓰인 1시간 단위의 대기 미세먼지 농도는 대상 주택에서 동서남북으로 반경 약 7 km 이내에 위치한 한국환경공단 관측소들 다섯 곳(기흥, 김량장동, 동탄, 영통동, 중부대로)의 건조 질량농도를 관측소간 비교하고, 농도변화를 살펴 지역의 전반적인 추세에 어긋나는 추세가 없는지를 확인한 후 평균하여 사용하였다. 외부 풍속값은 실외온도의 출처인 기상청 측정소의 자료를 이용했다. 미세먼지의 입경별 제거

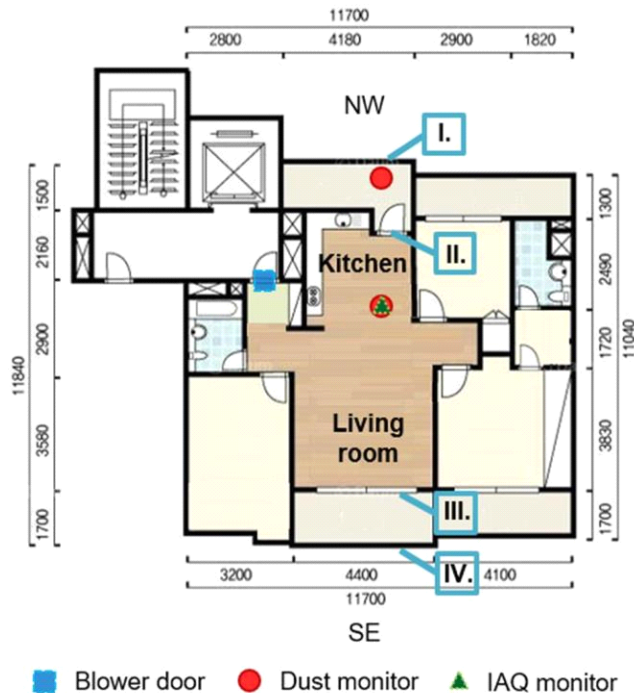


Fig. 1. A layout of the apartment house and the arrangement of research devices.

효율은 2018년 9월, 11월과 2019년 4월 초에 주방 발코니의 OPC로 직접 측정된 실외 미세먼지 자료를 이용하여 산출했다.

시험이 이루어진 주택으로의 대기 미세먼지의 유입 특성은 유입계수로 나타났다. 침기로 인한 실내외 공기교환만 일어나는 공간에서 실내 입자농도가 정상상태에 도달하였을 때의 실내외 입자 농도비는 식 1과 같이 실외 입자의 실내에 대한 영향과 실내 침착이 동시에 고려된 유입계수(Infiltration factor, I)로 표현할 수 있다(Long et al., 2001; Nazaroff, 2004). C_i 는 실내 입자농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_o 는 실외 입자농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), Q_L 는 침기(누기) 유량(m^3/h), P 는 실외 입자가 건물 외피를 거치며 실내로 유입되는 비율로 무차원인 침투효율(Penetration efficiency, -)이다. β 는 미세먼지가 단위시간당 실내에서 소실되는 정도를 나타낸 침착률(Deposition rate, h)이며, V 는 공간의 체적(m^3)이다.

$$I = \frac{C_i}{C_o} = \frac{Q_L P}{\beta V + Q_L} \quad (1)$$

공동주택에서의 미세먼지 유입 특성을 확인하기 위해 실증 측정 데이터로부터 실내외 농도비를 분석하였다. 실내외 농도비로부터 유입계수를 추정하기 위해서는 실증 데이터가 다음과 같은 조건을 만족해야 한다. 첫째로 실내외 환경이 변화가 없는 안정한 구간이어야 한다. 실제 환경에서의 측정 데이터를 사용하기 때문에 다양한 변수들이 일정하게 유지되는 시점을 찾기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 90일 측정 결과를 분석하여 구간의 다양한 변수의 값이 거의 변하지 않는 준정상상태 시점의 데이터를 추출하였다. 먼저 실외 미세먼지 농도와 실내농도가 안정되어 일정하게 유지되는 시점의 데이터를 찾았다. 안정된 시점 전후로 외부 풍속이 일정한지를 확인하였고, 각각의 평균 외기 풍속이 일정한 조건을 선택하여 풍속의 편차를 함께 나타냈다. 두 번째로 주택 내 미세먼지 농도가 재실자 활동에 영향을 받지 않았는지를 작성한 에피소드 기록지에 근거하여 확인했다. 에피소드 기록지에는 사람의 출입, 실내 창호의 개폐와 자연환기, 조리, 청소, 취침, 후드와 화장실 팬의 사용 등을 분 단위로 기록했기 때문에 실내외 입자의 농도 데이터와 기록지를 확인하면 재실자 활동 영향을 확인할 수 있다. 세 번째로 실외

초미세먼지 농도 측정값이 정확한지 확인하였다. OPC로 직접 측정된 대기 미세먼지 농도와 추세를 환경공단 관측소의 초미세먼지 농도와 비교하였다. 주변 관측소의 초미세먼지 농도값은 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 조건이면서, 주변 다섯 군데 관측소의 값이 거의 같은 데이터만을 사용하였다. 실증 측정하는 과정에서 기상 측정소와 실내에서 외기가 유입되는 자연환기 조건에서 실측한 초미세먼지 농도가 같은 조건의 데이터만을 추출하여 사용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 공동주택의 창과 문 개폐조건에 따른 침기량(ACH₅₀) 특성

측정 대상 건물의 기밀성능을 구하기 위해 공기 누설율로 ACH₅₀을 측정하였다. ACH₅₀은 50 Pa의 실내외 압력차에서 측정 공간의 체적만큼의 침기 또는 누기량이 한 시간 동안 몇 번 교환되었는가를 표현한 것이다. ASTM E779-10 “Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization”의 규격에 따라 감압법으로 측정된 해당 주택의 ACH₅₀은 2.41 회/h였다. 주택의 위치는 지상 20층 아파트의 20층이었고 건물 높이는 약 50 m였다. 실증 측정 기간 중 기상청에서 얻은 해당 지역의 외기 온도와 실내 실측 온도의 차는 2.0 °C를 넘지 않았다. 따라서 건물 높이와 실내외 온도차의 곱이 연돌 효과가 크지 않다고 여겨지는 200 m·°C 이내를 만족하였다. 대상주택의 ACH₅₀은 3.0 이하로 에너지절약 건물 수준이었다. 한국건축친환경설비학회에서 제시한 건축물의 기밀성능 기준에 따르면 국내 공동주택의 기밀성능은 1.8~4.5 회/h이며, 평균 3.08 회/h이다(KIAEBS, 2013). 2010~2014년에 지어진 국내 공동주택 단위세대의 기밀성능을 조사하여 발표한 연구에 따르면 ACH₅₀은 전체적으로 1.12~4.81 회/h였으며 평균 2.59 회/h의 결과를 보였다(Jo, 2015). 2012년 입주 전 신축 공동주택 3개 동의 기밀성능을 조사한 연구에 따르면 ACH₅₀의 평균은 3.51 회/h였으며, 각 동의 기밀성능은 각각 4.37, 3.82, 2.75 회/h였다(Yoon, 2013).

ASTM의 기준 조건 이외에 발코니 창호와 거실 방문의 개폐에 따라 건물의 기밀성능이 얼마나 변

하는지 확인해보았다. 창문과 방문의 개폐조건에 따른 ACH₅₀은 표 1에 표시하였다. 조건에 따라 주택의 ACH₅₀은 2.35~3.37 회/h 사이의 값을 보였다. 발코니 창호의 개폐 조건에 따라 ACH₅₀은 0.19에서 1.02 회/h까지 차이가 발생하였다. 거실 방문의 기밀성능에 대한 영향은 상대적으로 작았다. 거실로 연결된 방문이 모두 열린 ASTM 조건에 비해 방문이 모두 닫힌 A 조건의 ACH₅₀은 0.06 회/h 낮았다.

3.2. 실증 측정에 의한 실내 초미세먼지의 유입 특성

외부 풍속에 따른 초미세먼지의 유입 특성은 실증 측정 데이터로부터 추출된 실내외 농도비로 분석하였다. 장기간 관측한 자료들 가운데서 2.2절에 제시된 기준들을 만족하는 자료들을 추출하여 분석에 활용하였다. 초미세먼지의 유입 특성은 대기 미세먼지의 입경 분포에 따라 다르게 나타날 수 있다 (Wallace, 1996). 초미세먼지 입자 중 상대적으로 큰 직경 1~2.5 μm 입자는 1 μm 이하 입경의 입자보다 제거효율이 높기 때문에 일상적인 크기분포와 달리 미세먼지 주의보나 초미세먼지 주의보 시기는 초미세먼지 농도의 차이로 분석하는 것이 적절하지 않다. 따라서 일상적인 입자 크기분포에 해당하는 데이터만을 사용하였다. 특히, 황사와 같은 조건에서는 미세먼지는 물론이고 초미세먼지의 실외 대비 실내 농도가 상대적으로 낮는데, 이것은 초미세먼지

중 황사의 영향을 받아 농도가 높아진 1~2.5 μm 입자가 실내로 유입하는 과정에서 상대적으로 높은 비율로 제거되기 때문이다(Joo and Ji, 2019).

그림 2는 실증 측정 데이터로부터 초미세먼지 실내외 농도비를 1시간 평균값으로 나타낸 것이다. ‘○’로 나타낸 일부 창문이 열린 경우 실내외 농도비는 60~110%에 분포하였다. 실내외 농도비의 편차가 나타난 이유는 실증 측정 조건에서 대기 초미세먼지 농도가 증가 추세였거나 감소 추세였던 경우, 창문을 닫고 있다가 연 직후의 데이터 등이 있다. 제실자 활동이 포함된 데이터로 고농도 조리에 의한 이상 조건은 제외하였다. 창문이 일부라도 열린 경우 실내외 농도는 대개 비슷한 수준이었다. 외부 초미세먼지가 창틈이나 문틈을 거치지 않고 대부분이 열린 창문 사이로 쉽게 들어오기 때문이다. 그림 2에서 ‘+’로 나타낸 창문과 현관문을 닫은 경우에는 실내외 농도비가 상대적으로 낮았다. 이 조건은 발코니 창호와 거실로 연결된 방문이 모두 닫힌 표 1에서 A 조건에 해당되는 경우이다. 창문이 닫혀 있기 때문에, 바깥 공기의 유입량이 작고 대기의 먼지가 창틈과 문틈을 통해 실내에 유입되는 과정에서 일부가 제거되기 때문이다. 외기의 풍속이 낮은 1 m/s 이하인 경우 실내외 농도비는 약 40% 정도까지 감소하였고, 3 m/s 이상으로 외기 풍속이 높으면 약 70%까지 증가하였다. 1시간 평균 데이터의 편차 원

Table 1. Air change rate at 50 Pa of an apartment house and the test conditions.

	ACH ₅₀ (1/h)	Doors in livingroom	Kitchen balcony		Livingroom balcony	
			I. Outer	II. Inner	III. Inner	IV. Outer
ASTM	2.41	O	X	X	X	X
A	2.35	X	X	X	X	X
B	2.54	X	O	X	X	X
C	2.67	X	X	X	X	O
D	2.85	X	O	X	X	O
E	3.37	X	X	O	O	X

* O means open and X is close.

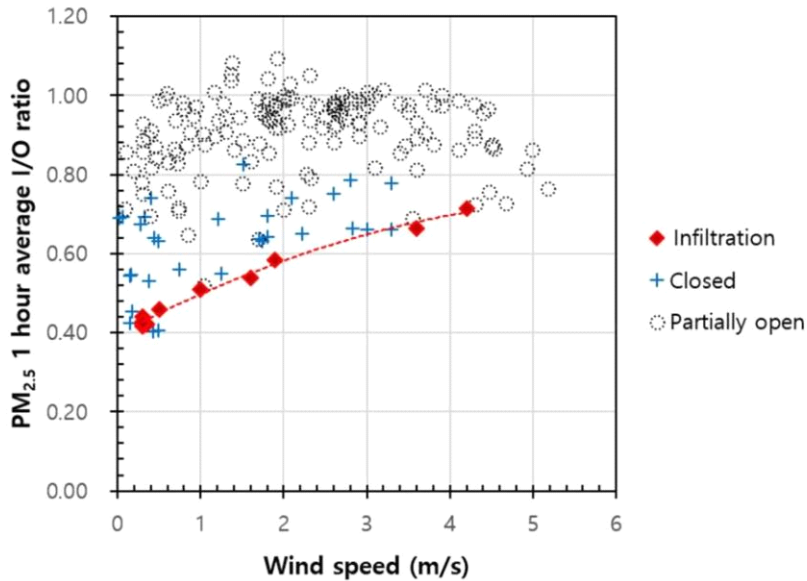


Figure. 2. Unscreened indoor to outdoor ratio and screened empirical infiltration factor of fine particle at an apartment house corresponding to the wind speed change.

인은 실내의 농도와 실외 풍속이 시간에 따라 변화하는 영향이 나타났고, 일부 재실자 활동이 포함되었기 때문이다. 그림 2에서 ‘◆’ 데이터를 추세선으로 나타낸 것은 실내의 초미세먼지 농도와 외기 바람속도가 일정하고, 재실자 활동이 없는 정상상태의 안정된 상태의 데이터만을 추출하여 분석한 결과이다. 초미세먼지 실내외 농도비는 바람이 거의 없는 0.3 m/s 조건에서 약 42%였고 4.2 m/s의 풍속에서 72%까지 증가하였다.

주택 내 발코니 창호의 개폐조건에 따른 입경별 미세먼지 제거효율을 그림 3에 나타냈다. 주방 발코니 외벽의 창문만 열고 다른 창문이 모두 닫힌 조건 B(표 1 참조)와 주방 발코니 외벽의 창문과 거실 발코니의 외벽 창문이 열린 조건 D(표 1 참조)의 데이터를 추출하여 분석하였다. 입자의 크기별 실내외 농도비는 실외와 실내의 미세먼지와 초미세먼지 농도, 외부 풍속이 모두 안정되어 일정하게 유지되는 구간의 평균값을 사용했다. 풍속은 B가 0.29 ± 0.31 , D가 0.23 ± 0.17 m/s, 실내외 온도차는 B가 11.37 ± 0.03 , D가 11.07 ± 0.14 °C였다. 풍속은 0 m/s에 가까웠으나 해당 주택이 20층에 위치해 있고 실내외 온도가 11도 정도 차이가 있었기 때문에 일부 연돌 효과의 영

향이 포함될 수 있을 것으로 추정된다(Malik, 1978). 상대적으로 기밀 성능이 낮은 조건 D의 경우는 거실과 주방쪽 내외부의 창호 4개를 모두 닫은 조건 A의 외부 풍속이 센 경우와 비슷할 것으로 추정된다. 이와 같이 모든 변수를 제어하여 데이터를 취득하기 어려운 것은 실증연구의 한계이므로, 향후 많은 시간의 실증 데이터를 확보할 수 있는 추가 연구가 필요하다.

공기역학적으로 표현된 필터효율과 비교하기 위해서, OPC로 측정된 결과의 입경을 광학 등가 공기역학적으로 표시하였다. 보통 광학적으로 측정되는 입자는 구형이며 밀도가 1 g/cm^3 라고 가정된다. 실제 대기입자의 밀도가 대개 1 g/cm^3 보다 크므로 광학 등가 공기역학경에서 크기분포는 광학 등가 입경보다 더욱 큰 입자영역에 나타나게 된다(Hinds, 1998; Ji, 2018). 본 논문에서는 대기입자의 밀도를 1.6 g/cm^3 으로 가정하였다(Ji and Bae, 2013). 미세먼지가 창틈과 문틈을 통과하면서 제거된 효과를 필터 등급인 American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers (ASHRAE) dust spot efficiency rating과 비교해 보았다(Fisk et al., 2002). 주택의 입경별 제거효율은 일반적인 필터의 효율곡선과 유사하

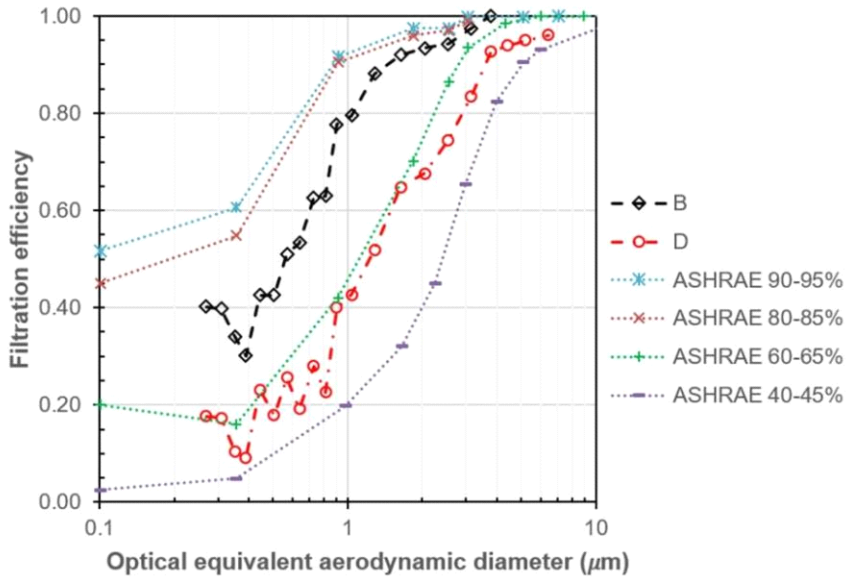


Figure. 3. Filtration efficiencies of an apartment house by particle sizes in different indoor opening conditions under low outdoor wind speeds (< 1 m/s).

게 나타났다. 주방 발코니 외벽 창문이 열린 B 조건에서 입자 제거효율은 ASHRAE 80~85%와 ASHRAE 60~65% 필터 사이의 성능 정도로 추정된다. 거실과 주방 발코니 양쪽 외벽 창문이 모두 열린 D 조건은 ASHRAE 40~45%와 ASHRAE 60~65% 필터 사이로 추정된다. B 조건의 제거효율은 D 조건보다 0.3~2.5 μm 입경에서 평균 29% 높았다. 발코니 외벽 창문을 열면 침기량과 대기 미세먼지의 침투효율이 커지기 때문으로 생각된다. 다만 B 조건의 효율은 발코니 건물 외벽 창문 중 한 쪽만이 열린 상태이기 때문에

외부 풍향에 의해 편차가 발생할 것으로 생각된다.

Minimum Efficiency Reporting Value (MERV) 필터 등급과 주택의 미세먼지 제거효율을 비교해 보았다. MERV는 설치 초기의 최소 필터효율을 나타낸다. OPC 12개 채널을 크게 0.3~1.0 μm (E1), 1.0~3.0 μm (E2), 3.0~10.0 μm (E3), 3개 그룹으로 나눠 각 그룹의 평균 필터효율을 제시한다(ASHRAE, 2007). 실내 개폐조건에 따른 E1, E2, E3 영역에서의 제거효율 값을 표 2에 나타냈다. MERV를 이전의 필터등급인 ASHRAE Dust Spot Efficiency Rating과 비교하면

Table 2. Filtration efficiency compared to minimum efficiency reporting value (MERV).

Indoor opening condition	B			D		
	E1 (0.3~1 μm)	E2 (1~3 μm)	E3 (3~10 μm)	E1 (0.3~1 μm)	E2 (1~3 μm)	E3 (3~10 μm)
Filtration Efficiency	56%	93%	100%	25%	68%	90%
MERV	13	13	13	11	11	11

ASHRAE 70~75% 이상 제거효율의 필터가 MERV 13등급 이상으로 추정되고, 60~65% 아래 효율의 필터는 MERV 12등급 이하로 추정할 수 있다. 조건 B는 MERV 13등급의 성능을 보였으며, 조건 D는 MERV 11등급 성능이었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 국내에서 가장 많은 가구가 거주하는 크기인 전용면적 84.9 m²이며 재실자가 3명인 아파트의 미세먼지 유입 특성을 파악하였다. 먼저 바깥의 미세먼지가 실내로 유입되는 건물의 특성인 기밀 특성을 분석하였다. 대상 주택의 ASTM 규격 기밀성능은 감압법으로 측정된 결과 ACH₅₀이 2.41 회/h였다. 발코니 창호와 거실 방문의 개폐에 따른 주택의 공기 누설율을 측정하였다.

본 측정은 재실자 3명이 실제 거주하는 조건에서 이루어졌다. 2년에 걸쳐 90일 간 주택 내 미세먼지와 초미세먼지 및 입자크기분포를 측정하였다. 미세먼지 유입 특성은 측정 기간 중 실내외 미세먼지 농도와 외부 풍속이 안정한 구간이면서 재실자의 활동이 없는 기간의 데이터를 추출하여 분석하였다. 창과 문이 잘 닫힌 공동주택의 초미세먼지 유입계수는 바깥에 바람이 거의 없는 0.5 m/s 이하에서 약 40%이었고, 바람이 4.2 m/s로 세지면서 72%까지 증가했다.

마지막으로 바깥 미세먼지가 실내로 유입되는 특성으로 입자 크기에 따른 입경별 실내외 농도비를 분석하였고, 바깥 미세먼지가 실내로 유입되는 과정에서 필터를 통과한다고 가정하여 입자제거성능에 해당하는 필터성능등급을 추정하였다. 주방 발코니 외벽 창문이 열리고 외부 유속이 0.5 m/s 이하일 때의 입자 제거효율은 MERV 13등급 필터와 유사했다. 거실 발코니와 주방 발코니 외벽 창문이 모두 열린 경우 입자 제거효율은 MERV 11등급 수준으로 낮아졌으며, OPC의 0.3~2.5 μm 크기의 입자를 측정하는 13개 채널에서 19~40%까지, 평균 29%의 차이를 보였다.

본 연구는 국내 대표 크기의 아파트에 대한 연구로 다른 크기의 아파트 단독주택 등 기밀 특성이 다른 주택에서는 다른 특성이 나타날 수 있다. 실내 초미세먼지 농도 특성은 주택의 종류, 구조, 건축시기 등에

따라 달라지는 주택의 기밀 특성에 따라 달라질 수 있다. 기밀도가 상대적으로 낮을 것으로 추정되는 오래된 단독 주택이나 기밀도가 높은 신축 공동주택 등의 미세먼지 유입 특성 등에 대해서도 추가 연구가 필요하다고 생각한다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부)의 재원으로 한국연구재단-미세먼지국가전략프로젝트사업(과제번호:2017M3D8A1091924)의 지원을 받아 수행함.

References

- Abt, E., Suh, H. H., Catalano, P., & Koutrakis, P. (2000). Relative contribution of outdoor and indoor particle sources to indoor concentrations, *Environmental Science & Technology*, 34(17), 3579-3587.
- ASHRAE (2007). Standard 52.2-2007. Method of testing general ventilation air cleaning devices for removal efficiency by particle size, in. *American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Inc. Atlanta*.
- ASTM (2010). E779-10. Standard test method for determining air leakage rate by fan pressurization, *Philadelphia: American Society of Testing and Materials*.
- Bae, G. N., & Kim, J.B. (2017). Research trend on behavior and control of indoor aerosols, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 16(2), 99-112.
- Chao, C. Y., Wan, M. P., & Cheng, E. C. (2003). Penetration coefficient and deposition rate as a function of particle size in non-smoking naturally ventilated residences, *Atmospheric Environment*, 37(30), 4233-4241.
- Fisk, W.J., Faulkner, D., Palomen, Jo, & Seppamen, O. (2002) Performance and cost of particle air filtration technologies, *Indoor Air*, 12(4), 223-234.
- Hinds, W. C. (1998). *Aerosol Technology : Properties,*

- behavior, and measurement of airborne particles, *John Wiley and Sons Inc, Second Edition*.
- Ji, J. H. (2018). Size distributions of suspended fine particles during cleaning in an office, *Particle and Aerosol Research*, 14(2), 25-33.
- Ji, J. H., & Bae, G. N. (2013). Estimation of mass size distribution of atmospheric aerosols using real-time aerosol measuring instruments, *Particle and Aerosol Research*, 9(2), 39-50.
- Jo, J. H. (2015). Airtightness data of Korean apartment buildings, *Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, 9(3), 40-48.
- Joo, S. W., & Ji, J. H. (2019). Characteristics of indoor particulate matter concentrations by size at an apartment house during dusty-day, *Particle and Aerosol Research*, 15(1), 37-44.
- KIAEBS (2013). KIAEBS C-1. Building Airtightness Criteria, *Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*.
- KME (2018). Annual report of air quality in Korea 2017, *Korean Ministry of Environment*.
- Long, C. M., Suh, H. H., Catalano, P. J., & Koutrakis, P. (2001). Using time-and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior, *Environmental Science & Technology*, 35(10), 2089-2099.
- Malik, N. (1978). Field studies of dependence of air infiltration on outside temperature and wind, *Energy and Buildings*, 1(3), 281-292.
- Nazaroff, W. W. (2004). Indoor particle dynamics, *Indoor Air*, 14(Suppl.7), 175-183.
- Statistics Korea (2016). Population and Housing Census of 2016 <Registered Census Method Results>.
- Wallace, L. (1996). Indoor particles: a review, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 46(2), 98-126.
- Yee, S. W., Lee, B. H., Back, J. M., Kang, D. H., Yeo, M. S., & Kim, K. W. (2017). A research on analytic method of determining penetration factor and deposition rate for predicting indoor particle concentration, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 33(11), 35-42.
- Yoon, H., Shuai, J. F., Kim T., Seo J., Jung D., Ryu, H., & Yang W. (2017). Microenvironmental time-activity patterns of weekday and weekend on Korean adults, *Journal of Odor and Indoor Environment*, 16(2), 182-186.
- Yoon, J. O. (2013). Field measurement of infiltration in new apartments using de-pressurization method, *KIEAE Journal*, 13(3), 27-32.