

II. 학교 미세먼지 문제 이해하기

1. 학교 공간의 특수성

일반적인 건물과는 달리, 학교는 공공의 성격을 띠고, 어린이의 건강과 안전이 직결되어 있으며, 학부모 및 지역 사회의 큰 관심을 받는 장소입니다. 학교는 일반적인 실내 공간과는 다른 특수성을 가지고 있습니다.

- 성인에 비하여 신체·정신적으로 미성숙한 민감군이 좁은 공간에 모여서 생활(면적당 활동하는 학생 수가 사무실에 근무하는 사람보다 4배 많음)
- 미술실, 과학실 등 다양한 목적의 교실에서 진행되는 수업이나, 체육과 같이 외부에서 진행되는 수업 등 수업의 형태에 따라 수업 중 또는 수업 이후에 다양한 실내 오염물질이 발생
- 대부분의 학교에서 창문을 이용한 자연환기를 실시하고 있어 외부 환경영향에 취약함
- 많은 양의 난방, 환기, 냉방 장치가 설치되어 있어 유지·관리 부담이 있음
- 통학버스의 디젤 배출 문제, 등·하교 시간에 학생 및 교직원의 차량이 같은 장소에 집중
- 흡연, 난방기구 연소, 조리과 같은 실내 발생원이 없어 주변 대기오염도와 재실자의 활동 형태의 영향을 받음⁹⁾

• 학교환경 특성평가

본 사업단에서는 학교환경에 대한 특성을 평가하기 위하여, 건물 연식, 벽체 구조, 문과 창호 종류, 복도 구분 등 건물 기밀성능에 영향을 주는 요소를 포함하여, 학교 유형, 지역, 외부환경, 내부환경, 학교 건축 현황, 건물 인증 현황, 기타 사항의 7개 범주와 43개 세부 유형으로 구성된 학교건물 성능 데이터베이스를 구축하였습니다.

일반적으로 건물 연식이 증가함에 따라 기밀 성능이 떨어질 가능성이 높다고 예상해 볼 수 있습니다. 학교알리미 사이트에 공시된 학교(12,196개교)를 기준으로 설립연도를 분석한 결과, 약 67.8%(8,272개교)가 1990년 이전에 지어진 것으로 확인되었습니다. 이와 관련하여, 노후한 학교건물은 외기 미세먼지가 내부로 들어오기에 더 취약할 것으로 예상되었습니다.

9) 손윤석. (2020). 국내 초등학교내 입자상 물질 및 영향 요인. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(2), 153-170.

[표 11] 학교건물성능 데이터베이스 분류 기준

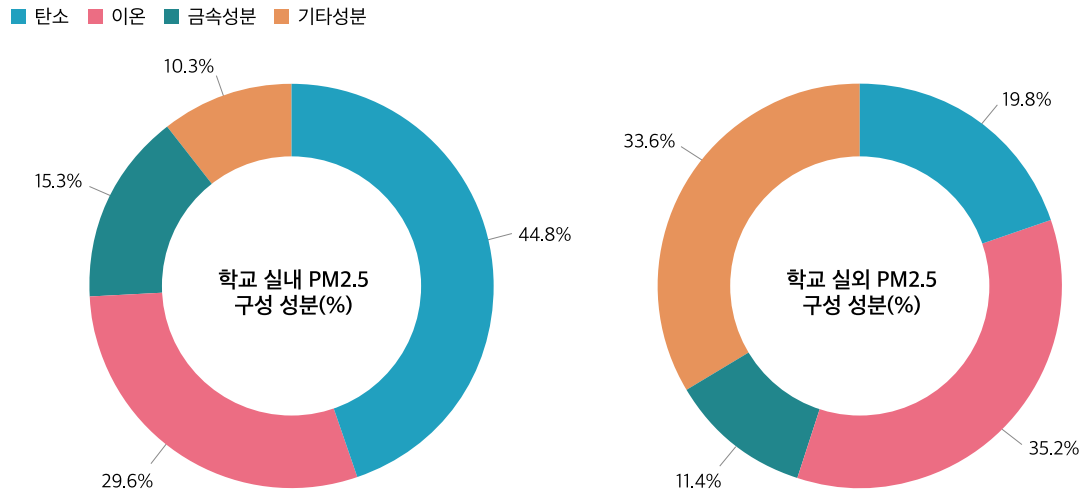
유형별	세부 분류		
학교유형	1.1 학교명	1.2 학교유형	1.3 건물용도
지역	2.1 주소		
외부환경	3.1 인근지역 (500m이내)	3.2 인접도로 폭(인도포함)	3.3 해발고도(m)
	3.4 기상관측소 위치(km)	3.5 지붕(마감재)	3.6 외벽(벽/안)
	3.7 바닥(마감재)		
내부환경	4.1 공조(열원)방식	4.2 환기장치	4.3 건물현관 위치
	4.4 건물 주출입문	4.5 계단실과 복도 구분	4.6 교실/체육관 위치
	4.7 교실/체육관 문(사양)	4.8 교실/체육관 창호(사양)	4.9 천장(마감재)
	4.10 교실/체육관 복도	4.11 공기청정기	4.12 실내화 착용 여부
학교 건축현황	5.1 신축/증축/개축	5.2 년도(신축/증개축)	5.3 대지면적(m ²)
	5.4 연면적(m ²)	5.5 전체 층수(지하/지상)	5.6 전체 건물 배치 형태
	5.7 해당건물층수(지하/지상)	5.8 교실 단위면적(m ²)	5.9 교실 단위평면(도면)
	5.10 교실단위평면(수용인원)	5.11 체육관 단위면적(m ²)	5.12 체육관 단위평면(도면)
	5.13 체육관단위평면(수용인원)		
건물 인증현황	6.1 녹색건축 인증	6.2 건축물에너지 효율등급	6.3 에너지절약계획서(EPI점수)
	6.4 기타 인증(ZEB)		
기타사항	7.1 도서 확보	7.2 해당 교육지원청	7.3 시설 담당자 연락처

본 사업단에서 Blower-door 측정법을 이용해 경기도 내 22개 학교 교실, 체육관 기밀성능 비교측정 실험을 실행했습니다. Blower-door 측정법은 주방과 화장실의 배기구, 콘센트를 모두 밀봉한 상태에서 건물에 바람을 불어 넣어 실내외 압력차를 이용하여 건물의 기밀 성능을 측정하는 방법입니다.

실험 결과, 예상한 것과는 달리 건물연령과 기밀성능 간에는 큰 상관관계가 없었으며, 이는 2011부터 2015년까지 실시한 노후학교 창호 개선사업으로 창호의 기밀성능이 향상되었기 때문으로 판단했습니다. **교실 출입문의 기밀 상태 불량 및 천장 마감 불량 등 유지보수 문제가 기밀성능에 더 큰 영향을 주는 것으로 분석했습니다.**

• 학교 미세먼지 구성 성분(학교 실내외 화학성분 특성 조사)

본 사업단의 연구 결과에 따르면, 국내 학교(경기도 12개교, 전북 3개교 등 총 27개교)의 실내외 PM_{2.5} 성분 농도를 분석한 결과, 학교 실내의 PM_{2.5} 구성 성분은 탄소(44.8%), 이온(29.6%), 금속성분(15.3%), 기타성분(10.3%) 순으로 확인되었으며, 학교 외부의 PM_{2.5} 구성 성분은 이온(35.2%), 기타성분(33.6%), 탄소(19.8%), 금속성분(11.4%) 순으로 확인되었습니다.

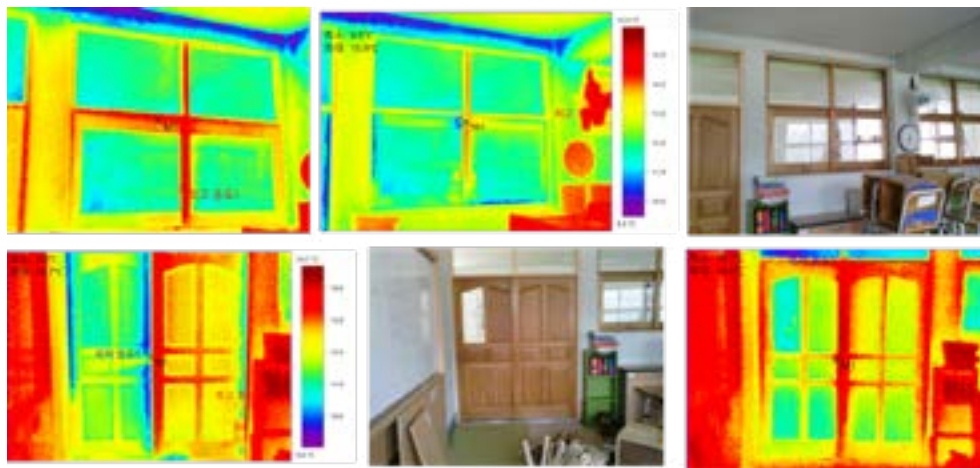


<그림 16> 학교 실내외 PM_{2.5} 구성 성분 분석 결과

• 침기/환기 특성 규명

건물의 실내는 환기, 침기 등에 의해 외부와 끊임없이 공기가 교환됩니다. 여기서 미세먼지는 건물의 외피나 창호의 틈새, 개구부를 통해 실내로 들어오며, 실내가 받는 미세먼지 영향은 먼지가 어떻게 들어오느냐에 따라 달라집니다¹⁰⁾.

본 사업단에서는 Blower-door 측정법을 이용하여 52개 교실의 기밀성능을 측정하였습니다. 50 Pa 조건에서 기밀 성능은 평균 23.3 h^{-1} ($6.42 \sim 46.84 \text{ h}^{-1}$)으로 확인되었습니다. 한국건축친환경설비학회에서 제시하는 건축물의 기밀 성능 기준이 5.0 h^{-1} 이하인 것을 고려했을 때, 대부분 학교의 기밀성능이 우수하지 않다고 볼 수 있습니다.



<그림 18> 내부 구성요소의 유속 측정 및 열화상 카메라 분석 결과

또한, 재실 인원 증가에 따라 이산화탄소 농도와 침기량이 증가하는 것으로 나타나, 다수의 학생이 재실하고 있는 수업 시간 중 외기의 침입량이 증가하고 이에 따른 미세먼지 유입 증가가 우려되는 상황입니다.

• 외기영향 요소 추적

대기 중의 미세먼지는 건물 틈새 또는 창호를 통해 실내로 유입되는데, 침기량과 환기유형(자연환기, 기계환기)에 따라 실내로 유입되는 정도가 달라집니다. 또한 외부 미세먼지의 실내 전달은 미세먼지 크기에 따라 매우 다르게 나타납니다. 크기가 $1\mu\text{m}$ 보다 작은 극초미세먼지는 주로 외부 공기의 의도하지 않은 실내 유입으로 인해 전달되고, $2.5 \sim 10\mu\text{m}$ 의 미세먼지는 학생활동에 의해 재비산 혹은 생성됩니다. 결과적으로 $\text{PM}_{1.0}$ 은 외부 농도에 비하여 실내에서 농도가 낮으며, PM_{10} 은 실내에서 생성되는 경우가 많아 외부 농도에 비하여 실내에서 농도가 높고, $\text{PM}_{2.5}$ 는 두 항목의 중간 정도 경향을 보입니다.

10) Liu, D. L., & Nazaroff, W. W. (2001). Modeling pollutant penetration across building envelopes. Atmospheric Environment, 35(26), 4451-4462.

[표 12] 환경 변화에 따른 실내 미세먼지 농도 영향

구분	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM _{1.0}
청정기 가동	매우 민감하게 감소		큰 영향없음
창문개방	외기에 의해 유입		다소 영향
학생활동 (수업)	큰 영향없음		활동량에 비례
학생활동 (쉬는시간)	침기량 증가에 따라 작게 증가		활동량 증가에 따라 매우 민감하고 크게 증가
외기 농도	주로 외기농도보다 낮음 외기농도에 영향 받음		주로 외기농도보다 높음
유추 정보	침입효과		학생활동에 의해 재비산/생성

실내·외 농도의 관계는 국내 연구에서 제시한 실내·외 농도비(Indoor/Outdoor ratio)를 이용하여 확인할 수 있습니다¹¹⁾.

$$I/O \text{ ratio} = \frac{\text{실내 미세먼지 농도}(C_{in})}{\text{실외 미세먼지 농도}(C_{out})}$$

I/O ratio = 1 : 실내·외 농도가 서로 균질하다는 것을 의미

I/O ratio < 1 : 실외 농도가 더 높아, 실내로 미세먼지가 유입될 수 있음

I/O ratio > 1 : 실내농도가 더 높고, 실내에 미세먼지 발생원의 영향이 있음

I/O ratio가 1에 가까울수록, 실내·외 농도가 서로 비슷하다는 것을 의미합니다. 만약 I/O ratio가 1보다 낮으면 실외 농도가 더 높고 실내로 미세먼지가 유입될 수 있다는 것을 의미하며, 반대로 I/O ratio가 1보다 높으면 실내농도가 더 높고, 실내에 미세먼지 발생원의 영향이 있음을 의미합니다.

실내 재실인원의 활동, 계절, 건물용도, 주변 환경 등을 고려하여, PM₁₀와 PM_{2.5}의 I/O ratio를 비교한 결과, PM₁₀의 I/O ratio가 PM_{2.5}보다 높았습니다. 이를 해석하자면, PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 외부에서 내부로 유입될 수 있으나, **PM₁₀은 PM_{2.5}에 비하여 상대적으로 내부 활동에 의해 발생한다고 볼 수 있습니다.** PM₁₀의 I/O ratio가 학생들의 활동이 많은 학교에서 1을 초과함을 고려하면 **실내 PM₁₀은 실내 활동에 따른 공기 중 재비산에 따라 많이 발생한다고 볼 수 있습니다.**

11) 강지원. (2020). 실내 외 농도 비 (I/O ratio) 에 기반한 주변환경과 실내 미세먼지 농도분포 특성: 선행연구 리뷰와 여름철 부산과 평택 초등학교에서의 측정 결과를 중심으로. 대한원격탐사학회지, 36(6), 1691-1710.