

## 초등학교 교실공기질의 특징과 제어방안에 관한 연구

### Study on the Characteristics of Air quality in the Classroom of Elementary School and Its Control Methods

정지원 · 이희관

Jiwon Jeong · Heekwan Lee

인천대학교 도시환경공학부

*School of Urban and Environmental Engineering, University of Incheon*

**ABSTRACT** : The common life with modern urban residence, spending more than 80~90% of daily life in indoor environment, makes the importance of indoor air quality (IAQ) even higher. Many efforts have made to improve indoor air quality (IAQ), which requires those systematic approaches for field practice. A recent study reported that no general approach cannot be made for IAQ improvement due to the great deal of variety in different indoor environments. Those indoor spaces included in Korean IAQ regulation were classified based on their characteristics and the IAQ guideline was suggested for each group of indoor spaces.

Apart from those indoor spaces, the classroom in elementary school has different characteristics. By introducing the systematic approaches, the elementary classroom was surveyed and analyzed to understand its characteristics in due IAQ consideration. Based on the characteristics, there are several IAQ control measures suggested, including ventilation operation, dust mat installation, and white board. CO<sub>2</sub> and airborne dust were monitored and analyzed in order to evaluate the effectiveness of each control measure to IAQ. It was found that the general level of CO<sub>2</sub> concentration was managed under the IAQ guideline by applying the ventilator operation. The ventilation was also effective to the fugitive airborne particulate in elementary classroom environment.

## 1. 서론

일상 생활의 대부분을 건물의 실내 혹은 인공 환경 속에서 생활하는 현대인은 외부의 환경보다 건물 내부의 인공적인 환경에 의해 더 큰 영향을 받고 있다. 따라서 현대인의 건강과 쾌적한 실내 환경을 위한 노력이 필요하며 실내공기질에 대한 지속적인 관심과 관리가 요구되고 있다. 다양한 실내공간 중에 어린이들이 생활하는 초등학교의 실내공기질에 대한 문제를 빼놓을 수 없다. 어린이들은 아직 신체가 미성숙하고 면역력이 약하므로 실내공기질에 의한 영향이 성인의 경우보다 크다고 할 수 있다. 초등학교 교실에서의 공기질은 선행연구에서 보고된 바와 같이 그 오염 수준이 매우 심각한 상태이며 어린 학생들의 건강과 쾌적한 학습 환경을 저해하고 있는 것으로 밝혀지고 있다.<sup>1~5)</sup>

초등학교 어린이들은 등교하여 학교까지 많은 시간을 실내, 즉 교실에서 교과 수업과 다양한 활동을 위해 생활하고

있다. 이는 일반인들이 다른 실내 공간에서 생활하는 시간 못지않게 중요한 부분이며 해당 어린이들이 대부분 만 10세 내외라는 점을 고려할 때 실내공기질에 의해 받을 수 있는 영향은 상당히 심각할 수 있다. 그러나 현재 국내에서 이와 같은 교육 시설, 특히 초등학교 교실에서의 공기질 관리에 대한 연구는 찾아보기가 어려우며, 외국의 경우도 일부 국가들은 제외하고는 비슷한 실정이다.

이에 2005년 3월 교육인적자원부에서는 학교 내 실내공기질의 중요성을 인식하고 '학교보건법'을 개정하였으며 그동안 운영과정에서 나타난 일부 미비점을 보완하기 위하여 학교보건법 시행규칙을 개정하였다. 이러한 학교시설에서의 실내공기질인 체계적인 관리를 위해서는 이러한 제도 정비뿐만 아니라 학교에서 시설 이용자 및 관리자가 실내공기질을 효과적으로 관리할 수 있는 지침이 요구되고 있다.<sup>6~9)</sup>

이와 같은 이유로 어린이들이 주로 생활하고 있는 교실에서의 공기질이 보다 정확히 파악되어 학생들의 건강과 학습

†Corresponding author : E-mail : airgroup@incheon.ac.kr Tel : 032-835-8468 Fax : 032-777-8468

효과 증진에 활용이 될 수 있는 기초 자료로 활용되어야 하며 이를 바탕으로 체계적이고 효과적인 관리 방안이 마련되어 되어야 할 것이다. 학교에서 많은 시간을 생활을 하는 초·중·고등학생들은 신체가 아직 미성숙하므로 일반 성인들보다 학교 내의 실내공기질에 대하여 더 큰 영향을 받게 되며 이는 건강과 학습에 직접적인 영향을 줄 수 있다.

본 연구에서는 학교 내 교실공기질의 실태를 파악하고 그 특성을 분석하여 현재 자연환기에 의존하는 초·중·고등학교 교실 내의 실내공기질을 개선할 수 있는 효과적인 관리 방안을 제안하고자 한다. 이를 바탕으로 하여 교실 내 실내공기질 관리 방안 마련시 적용시킬 수 있는 기본적인 접근 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 초등학교 교실공기질 분석 및 특성

### 2.1. 교실공기질에 관한 연구 동향

국내에서 실내공기질에 대한 연구가 시작된 지는 10년 정도로 짧으며 최근에 들어 실내공기질에 대한 관심이 대두되면서 많은 연구가 시작되고 있다. 그러나 학교라는 장소의 특이성과 행정적인 절차 등으로 인하여 학교의 실내공기질에 대한 연구 사례는 많지 않은 실정이다.

학교의 실내공기질에 관련된 연구로는 2000년 과학전람회에서는 김순희 교사가 미세먼지, 소음, 조도를 중심으로 교실환경 개선에 대한 주제로 연구가 있다.<sup>10,11)</sup> 강원도 소재의 초등학교 2곳과 중학교 2곳에서 활동 시간과 바닥재에 따른 먼지오염도 현황을 측정하였는데 4개의 학교 중 3학교가 법정 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 2001년도에는 2년째 같은 연구를 하여 먼지의 물리 화학적 성분 및 모양을 조사하고 세균 배양을 통한 먼지 속의 미생물의 수와 종류를 조사하였다.<sup>4)</sup> 이외에도 여름철 강의실에서의 실내와 실외의 공기질 비교 연구,<sup>12)</sup> 공단 지역의 교실 분진 특성에 관한 연구<sup>1)</sup> 등이 있다.

2005년도 춘계 대기환경학회에서 발표된 '전국 일부 학교 교실의 실내공기질 평가' 연구의 자료에 의하면<sup>13)</sup> 교실 및 특별실에서 학교보건법으로 규제된 물질의 농도가 상당량 초과되었음을 알 수 있다.

외국의 경우 교육 시설에서의 실내공기질에 관해서 현재 미국과 유럽의 일부 국가들에서 활발히 이루어지고 있다. 특

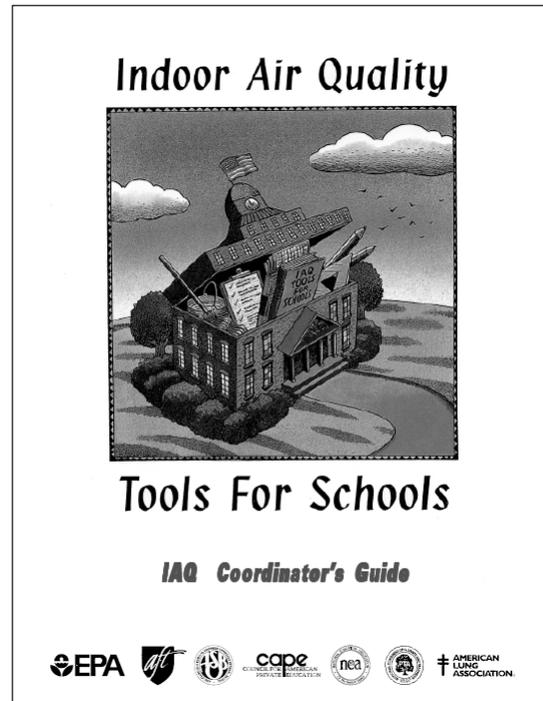


Fig. 1. Indoor Air Quality Tools For Schools made by US EPA (2000).

히 미국의 경우에는 그 간의 연구 결과를 토대로 하여 최근에 “Indoor Air Quality Tools For Schools” 라는 패키지를 개발하여 일선 교육 현장에서 활용하도록 하고 있다(Fig. 1).<sup>14)</sup> 이 패키지는 실제 교육 현장에서 일선 교사, 직원 등이 해당 교육 시설의 공기질을 간단히 점검하고 그에 상응하는 조치는 취할 수 있도록 하고 있다.<sup>14)</sup> 그 외에도 실내공기질에 따른 학생들의 학업성취도로부터 효과적인 교실공기질 관리를 위한 환기 설계에 이르는 다양한 연구가 현재에도 수행되어지고 있다.<sup>15~19)</sup>

### 2.2. 교실공기질 영향 인자에 따른 공간 분석

실내공기질은 그 공간의 특성에 의해 결정되어지며, 공간의 특성은 실내공기질에 대한 관리 방안을 마련할 때 중요한 정보를 제공한다. 예를 들면 학교 교실은 일반적인 사무실이나 주거공간과는 다른 여러 특성이 있으며 실내공기질의 특징도 다르다고 볼 수 있다.

선행연구에서 실내공기질에 영향을 주는 인자들을 구조적 특징, 기능적 특징, 이용자적 특징으로 나누어 실내공간 특성을 분석하였으며, 이러한 접근방식은 다양한 공간의 실내공기질을 효과적으로 관리방안을 제시해 줄 수 있었다. 여기서 구조적 특징이란 건축구조물(structure) 자체가 실내공기에

영향을 미치는 측면이며, 기능적 특징은 실내공간의 사용 목적에 따른 내부 구성물이 실내공기에 영향을 미치는 측면, 이용자적 특징은 재실자의 특성 및 행동 양식이 실내공기에 영향을 미치는 측면을 말한다.<sup>20~23)</sup>

### 2.2.1. 구조적 기능에 따른 분석

구조적 측면이란 건축구조물(structure) 자체가 실내공기에 영향을 미치는 측면으로 다음과 같은 인자에 대한 분석이 필요하다.

- 실내공간의 구조 및 위치
  - 실내 공간의 위치가 어디인가?
  - 외부 인자의 영향은 무엇인가?
  - 실내 공간의 구조는 어떠한가?
- 천정, 바닥재 및 내벽 마감재
  - 천장재, 바닥재, 마감재는 무엇인가?
  - 단열재로 석면을 사용하였는가?
- 냉난방 방식
  - 중앙냉난방 방식인가?
- 환기 방법
  - 자연환기 또는 강제환기 방식인가?
  - 환기량은 충분한가?

우선 초등학교 교실의 구조적 특징을 살펴보면 대체적으로 남향으로 운동장에 면하여 있으며 주 생활 공간인 교실의 크기는 국가표준설계도에 따라 9.0m×7.5m이며 학교마다 약간의 차이가 있다. 학교 구조를 보면 화장실, 급식실, 과학실이 교실 근처에 가깝게 배치되어 있어 악취나 기타 오염물질이 교실로 유입될 수 있다. 천정재는 석고보드, 바닥재는 콘크리트, 모노륨, 목재 등 다양하게 사용되어 각종 오염물질에 노출되기 쉽다. 벽면은 주로 페인트로 마감되어 있어 휘발성 유기화합물이 발생한다.

냉난방 방식은 과거에는 주로 석유, 도시가스, 목재 등 화석연료를 사용하였으나 최근에 들어 심야전기를 이용한 난방기, 전기 온풍기 및 에어컨으로 냉난방 방식이 바뀌고 있다.

강제 환기장치가 없으며 문과 창문을 열어 자연환기를 한다. 여름철에는 에어컨 등의 냉방 장치가 없거나 설치되어 있어도 잘 가동하지 않으며 주로 선풍기를 사용하고 창문을

열어둔다. 일반적인 사무실 공간과 학교의 교실이 상이한 환경인 이유는 바로 환기 방식 때문이다. 자연환기는 실내공기질을 제어하기 어려우며 외부의 소음에 노출되어 있다. 또한 냉난방시의 에너지 효율이 저하될 수 있으며 직사광선에 의한 불쾌감과 학습집중력 감소 등의 부작용을 발생시킨다. 예를 들자면 여름철 일반 교실의 경우 선풍기를 가동하고 자연환기를 위해 창문을 열게 되는데 이 경우 직사광선을 차단할 커튼을 사용할 수 없으므로 창가에 위치한 학생들은 직사광선에 노출되고 학습시에 칠판 사용이 곤란해질 수 있다. 뿐만 아니라 신축 건물이나 리모델링을 한 학교의 경우에는 에너지 절약을 위하여 단열이 잘되는 이중 유리창과 창틀을 설치하므로 문틈이나 창문 틈으로 자연통풍이 매우 적어 오염물질의 희석이 더욱 어렵다.

초등학교에서는 보통 1층 현관에서 실외화에서 실내화로 갈아 착용하는데 학교 건물의 특성상 실내와 실외의 경계가 불분명하므로 실내화 바닥에 흙먼지가 묻어 실내로 유입되는 경우가 있다. 특히 초등학생의 경우 활동성이 크기 때문에 그 정도는 더 크다고 할 수 있다.

### 2.2.2. 기능적 기능에 따른 분석

기능적 측면이란 실내공간의 사용 목적에 따라 내부 구성물이 달라지므로 이것이 실내공기에 영향을 미치는 측면을 말한다.

- 주 내부 구성물
  - 실내가 주로 무엇을 재료의 가구로 채워져 있는가?
- 화학물질 사용 여부
  - 어떤 화학물질을 사용하는가?
- 음식물 취급 여부
  - 음식물을 조리하거나 식음을 하는가?
- 화석연료 사용 여부
  - 난방이나 음식을 조리하기 위해 화석연료를 사용하는가?
- 기타
  - 실내 공간의 사용 목적으로 인하여 그 외 특이점이 있는가?

학습 공간이라는 기능적 특성으로 인하여 교실 공간을 이루는 주 내부 구성물로 주로 학습용 가구인 책상, 의자, 사물함 등이 있으며 대부분 목재로 이루어져 있으므로 포름알데

**Table 1.** IAQ components to determine its characteristics

	Indoor component	Details of IAQ component
Structural aspect	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Location and type of space</li> <li>○ Building material applied</li> <li>○ Heating/ cooling system</li> <li>○ Ventilation techniques applied</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ On the third floor</li> <li>○ 9.0 m×7.5 m×3.0 m of box shape</li> <li>○ Internal building material - painted, concrete-wall, flooring, etc.</li> <li>○ Natural ventilation thru window and door</li> </ul>
Functional aspect	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ I Major indoor components</li> <li>○ Use of chemical material</li> <li>○ Food service</li> <li>○ Fuel combustion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Major components - wooden desk and chairs</li> <li>○ Use of chalk</li> <li>○ Occasionally</li> <li>○ No fossil fuel combustion</li> </ul>
Occupant aspect	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Distribution of occupant age</li> <li>○ Density of occupant</li> <li>○ Duration of indoor stay</li> <li>○ Degree of activity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 7~12 aged students</li> <li>○ High occupant density, approximately 5students/m<sup>2</sup></li> <li>○ Long duration in classroom 8:30 am ~ 2:30 pm(6 hours)</li> <li>○ High activity</li> </ul>

히드와 휘발성유기화합물이 발생하고 칠판과 분필을 사용하므로 수업의 특성에 따라 분필 가루가 다량 발생하며 화이트 보드를 사용하는 경우에도 마카펜의 용매에 휘발성유기화합물이 다량 포함되어 있다. 초등학교의 특징 중 하나인 교실 환경꾸미기 자료 및 여러 가지 재료와 각종 교육용 기자재에서도 휘발성 유기화합물이 발생한다. 요즘 교실에는 정보기가 잘 보급되어 있는데 교실에서 복사기나 레이저 프린터를 사용할 경우 일부 오존이 배출될 수 있다.

고학년 학생뿐만 아니라 1학년 학생도 학교에서 단체 급식을 하는 추세이므로 식당이 있는 학교의 경우는 식당으로 이동하여 식사를 하지만 식당이 설치되어 있지 않은 학교의 경우는 교실로 음식이 이동되어 급식이 실시된다. 그 외에도 교실 내에 쓰레기통, 재활용 분리수거 통이 한 공간에 함께 있으므로 악취나 곰팡이에 의한 피해가 발생한다. 바닥재에 따라 청소 방식이 다른데 바닥이 목재인 경우 왁스로 청소하기도 한다.

**2.2.3. 이용자적 기능에 따른 분석**

이용자적 측면이란 공간을 이용하는 재실자의 특성 및 행동 양식이 실내공기에 미치는 인자를 분석하는 것으로 학교의 경우 신체가 미성숙한 어린 학생이 주 이용자라는 점이 특이점이라고 할 수 있다.

- 나이
  - 재실자의 나이는 얼마인가?
- 재실자 밀도
  - 재실자의 밀도는 얼마인가?

- 체류시간
  - 체류 시간은 얼마인가?
- 활동 정도
  - 활동성은 어느 정도인가?
- 기타
  - 청소 방식은 어떠한가?

학교의 주 이용자는 만 6~12세의 어린이이며 재실자 밀도는 1인당 1.8 m<sup>2</sup>으로 매우 높은 편이다. 체류시간은 학년과 학교마다 차이가 있으나 보통 오전 8시 30분경에 등교하여 오후 2시 30분에 하교하므로 6시간 정도이다. 40명 내외의 학생들이 좁은 한 공간에서 장시간 생활하므로 호흡에서 발생하는 이산화탄소의 농도 및 먼지, 악취 등의 오염물질의 농도가 높을 수 밖에 없다. 초등학교의 경우 다른 실내 공간 이용자 집단과 달리 매우 활발하며 휴식 및 점심시간, 청소 시간에는 학생들의 활동이 매우 활발하므로 바닥의 먼지가 재비산되기도 한다. 어린 학생 스스로 청소를 하므로 청소가 미숙하여 오염 물질이 잘 제거되지 않는다. 위의 기준에 따라 초등학교 교실 공간을 분석하면 다음과 같이 정리할 수 있다(Table 1).

**3. 초등학교 교실공기질 측정 및 개선방안 투입**

**3.1. 실험방법**

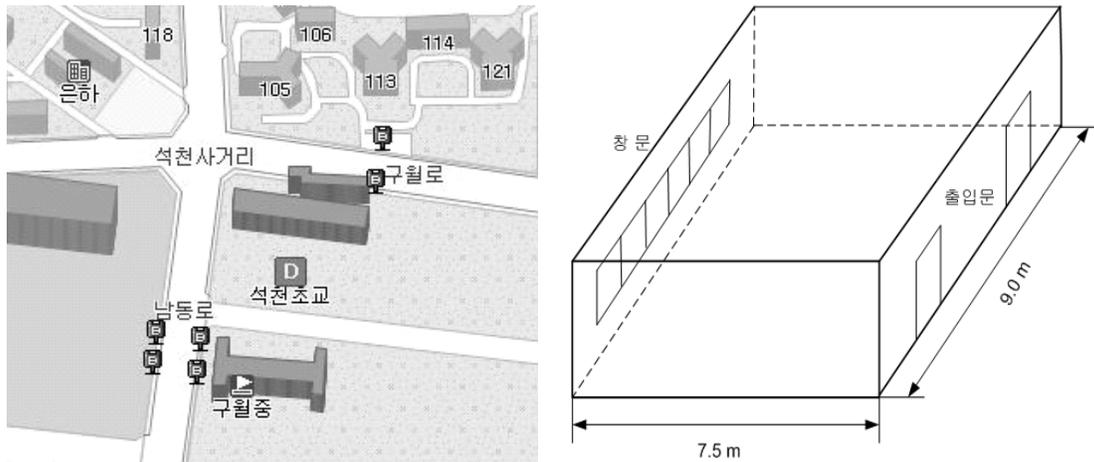


Fig. 2. Surroundings of the elementary school and outlook of the classroom tested in this study.

본 연구는 인천광역시 남동구에 위치한 일반적인 초등학교 교실에서 수행되었다. 교실은 학교 건물 4층의 도로 방향 교실들의 중앙에 위치해 있으며 정남향으로 운동장에 면해 위치해 있다. 학교의 주변에는 아파트 단지과 아파트 건축공사가 있으며 운동장 건너에는 중학교가 있고 학교의 서쪽과 옆면과 뒷면에 6차선 도로가 접해있어 출퇴근 시간에는 교통량이 아주 많은 편이다. 교실과 가까운 도로와의 거리는 약 50 m이다. 학교 건물은 1980년에 준공되었으며 교실과 복도의 바닥과 벽은 콘크리트로 되어 있고 벽은 페인트로 마감되어 있다. 교실은 박스 형태로 가로 길이는 7 m, 세로 길이는 8.55 m, 높이는 3.2 m 이다. 실험이 수행된 교실에는 여교사 1명과 만 10세의 남학생 19명, 여학생 17명으로 36명이 수업에 참여하고 있다.

실험은 기체상 물질인 CO<sub>2</sub>와 입자상 물질인 미세먼지의 농도를 온습도와 함께 측정하였다. 먼지측정 기기인 GT-331은 광산란 방식의 질량 농도계로 빛을 입자에 조사하여 산란된 빛의 양은 질량 농도에 비례하게 되는 원리를

Table 2. Description of airborne dust monitor

Model	GT-331	
Principle	Light scattering	
Sample	PM <sub>1</sub> , PM <sub>2.5</sub> , PM <sub>7</sub> , PM <sub>10</sub>	
Range	0 ~ 5000 µg/m <sup>3</sup>	

Table 3. Description of CO<sub>2</sub> meter

Model	Model 8762	
Principle	Non-Dispersive Infrared	
Sample	CO <sub>2</sub> , CO	
Range	0 ~ 5000 ppm	

이용하는 방법으로 먼지의 농도를 측정하였다(Table 2). CO, CO<sub>2</sub>는 비분선적외선법을 응용한 측정기(Model 8762, TSI)를 이용하여 측정하였다(Table 3).

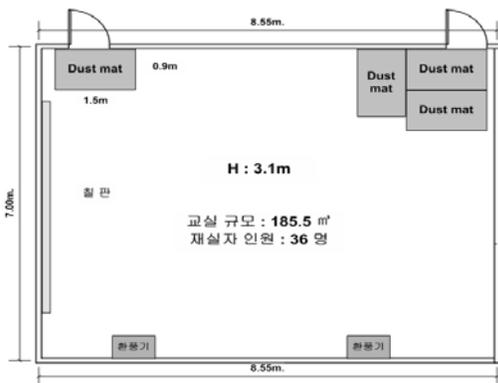
### 3.2. 교실공기질 개선방안 검토

3주 동안 자연 상태의 교실의 실내공기질을 측정하여 신뢰할만한 기초 측정값을 얻은 후, 교실공기질 개선이 기대되어지는 3가지 방안을 투입하여 실험을 하였다(Fig. 3). 아래 제시한 3가지 방안들은 실내공간의 구조적, 기능적, 이용목적 특성을 고려하여 저렴한 비용과 적은 노력으로 교실공기질 개선을 기대할 수 있는 방안이다(Table 4).<sup>24~31)</sup>

각각 2주일씩 실험 측정을 하여 신뢰할 수 있는 데이터를 얻은 후에 다른 방안을 실행하는 방식으로 연구하였으며 결과를 분석하여 앞서 수행한 교실공기질의 기초 측정을 기준으로 개선된 정도를 비교하는 방식을 취하였다. 이는 개선방안 실행 전과 후를 객관적으로 비교하기 위함이며 그 결과로 제안된 개선 방안을 검토할 수 있었다.

**Table 4.** Improvement strategies for classroom indoor air quality

Aspect	IAQ controls	Expected result
Structural aspect	Ventilation operation	Increased ventilation – Reduced concentration of indoor air pollution
Functional aspect	White board use	Reduced dust generation from chalk use
Occupant aspect	Dust mat installation	Reduced dust influx by occupants in and out

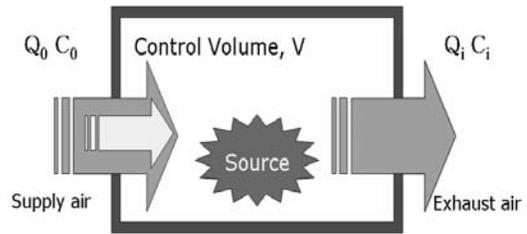


**Fig. 3.** Schematic diagram of the classroom used in this study.

### 3.2.1. 환풍기 가동시

일반적인 사무실 공간과 학교의 교실 환경이 상이한 것은 환기 방식 때문이다. 우리나라 대부분의 교실은 창문과 문을 개폐하여 자연환기 방식을 이용하고 있다. 그러나 자연환기 방식은 실내공기질을 제어하기 어려우며 외부의 소음 및 대기오염 물질의 영향을 받을 수 있다.<sup>22)</sup> 또한 냉난방시의 에너지 효율이 저하될 수 있으며 직사광선에 의한 불쾌감과 학습집중력 감소 등의 부작용을 발생시킨다. 뿐만 아니라 신축 건물이나 리모델링을 한 학교의 경우에는 에너지 절약을 위하여 단열이 잘되는 이중 유리창과 창틀을 설치하므로 문틈이나 창문 틈으로 자연통풍이 매우 적어 오염 물질의 희석이 더욱 어렵다.

겨울철에는 난방을 해야 하는데 아직도 많은 학교에서 석유나 가스 등의 화석 연료를 사용하여 난방을 한다. 본 연구를 수행한 초등학교도 도시가스 난로를 사용하며 매 쉬는 시간마다 환기를 시키고 있으나 난방기기에서 발생하는 일산화탄소와 이산화탄소의 발생량에는 환기량이 부족하다. 교실에 환풍기를 설치하여 가동하면 실내공간으로 유입되는 공기의 양  $Q_0$ 와 유출량  $Q_i$ 의 양이 증가하며 실내의 오염농도  $C$ 가 감소하게 된다(Fig. 4). 따라서 이러한 자연환기 방식을

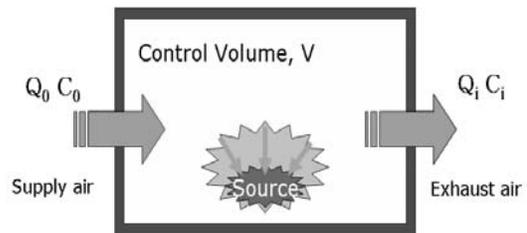


**Fig. 4.** Material balance of pollutant with ventilation.

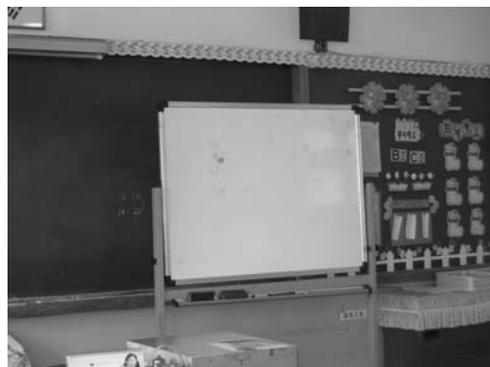
환풍기를 이용한 강제환기 방식으로 바꾸면 교실 내 환기량이 증가되어 교실공기질의 개선을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 필요환기량 이상 용량의 환풍기 2대를 교실의 앞쪽 창문과 뒤쪽 창문 위쪽에 각각 설치하였으며 24시간 가동하였다.

### 3.2.2. 화이트보드 사용시

대부분의 교실에서는 수업시간에 칠판과 분필을 사용하는데 수업 시간 중에 판서량이 많을 경우 분필 가루가 다량 발생하므로 교실공기질 오염에 큰 요인으로 판단된다. 근래 교실 환경 개선을 위하여 칠판을 화이트보드나 물분필을 사용하는 칠판을 도입하기도 한다(Fig. 6). 칠판 대신 화이트보드를 사용할 경우, 분필로 인한 먼지가 발생하지 않으므로



**Fig. 5.** Material balance of pollutant with the white board for reduced dust generation.



**Fig. 6.** White board used in classroom.

실내 오염물질 발생량  $S$ 가 감소하므로 실내공기오염농도  $C$ 가 저감된다(Fig. 5). 본 실험에서는 화이트보드 사용이 교실공기질 개선에 얼마나 효과가 있는지 검증하고자 하였다.

### 3.2.3. 먼지제거매트 설치시

선행 연구에 따르면 교실 먼지는 밖에서 유입되는 흙먼지가 많으며 입자가 큰 흙먼지가 학생들의 활동으로 부수어져 크기가 작은 입자를 생성하고, 이것이 다시 재비산하는 것으로 알려져 있다. 교실 출입구에 백화점이나 건물 입구에서 사용하는 먼지제거매트를 설치하여 외부에서 들어오는 흙먼지를 최대한 제거함으로써 오염발생원을 줄이도록 하. 교실의 출입구에 실내 오염물질 발생량  $S$ 가 감소하므로 실내공기오염농도  $C$ 가 저감된다(Fig. 7).

이러한 배경으로 먼지제거매트를 출입문에 설치하여 학생들의 활동으로 들어오는 오염물질 유입량을 감소시켜 교실 내 먼지농도의 저감을 기대할 수 있다. 또한 먼지제거매트는 신발 바닥에 묻은 오염 물질을 제거하므로 긴 거리를 사용할수록 더 큰 오염물질 제거 효과를 기대할 수 있다(Fig. 8).



Fig. 7. Material balance of pollutant with dust mat.



Fig. 8. Photo of dust mat installed into classroom entrance.

## 4. 연구 결과 및 분석

### 4.1. 기초 측정 연구 결과 및 분석

아래 그림은 학생들이 등교하여 교실 내에서 하루 종일 지내는 시간동안에 실내공기질을 24시간 연속 측정한 결과이다(Fig. 9). 미세먼지의 농도그래프 변화를 살펴보면 평상시 수업이 시작하기 전(9:00 AM)에는 등교하는 학생들과 자율 학습 활동을 활발히 하는 학생들에 의해 먼지 농도가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 수업 시에는 잠시 감소하는 경향을 보였다. 휴식시간과 점심시간 그리고 청소 시간에는 먼지농도가 다시 급격히 증가하였으며 종례 후 학생들이 하교(14:40 PM)하여 교실이 비면 다시 먼지 농도가 급격히 감소하였다. 이처럼 급격한 먼지 농도의 변화는 외부에서 오염물질 유입이나 내부에서의 발생보다는 기존의 오염물질이 학생들의 활동으로 인하여 비산되고 침전되는 것으로 설명될 수 있다.<sup>22~23)</sup>

CO<sub>2</sub>농도 그래프를 살펴보면 학생들이 등교한 이후 지속적으로 농도가 높아지다가 특별실 수업으로 교실을 비운 11시를 기점으로 점차 낮아지다가 하교(14:40) 후 농도가 더욱 낮아져 배경수준이 되었다. CO<sub>2</sub>의 발생 원인으로는 난방을 하지 않았으므로 재실자의 호흡으로 추정된다. CO<sub>2</sub> 농도 변화는 미세먼지 농도 변화와는 달리 학생들의 활동과의 관계가 적으며 재실자의 유무로 설명될 수 있는 발생원과 환기와의 상관성이 높다는 것을 알 수 있다.

아래의 그래프는 입자 크기별로 PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, TSP의 농도를 측정 한 자료이다(Fig. 10). 등교 시간 이후 하교까지 높은 오염농도를 유지하고 있으며 특히 초대먼지인 PM<sub>10</sub> 이상

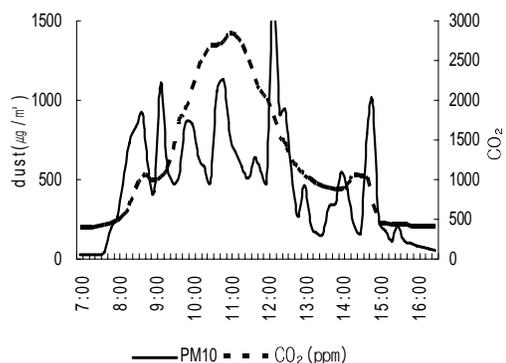


Fig. 9. Baseline measurement of CO<sub>2</sub> and dust with any control measure.

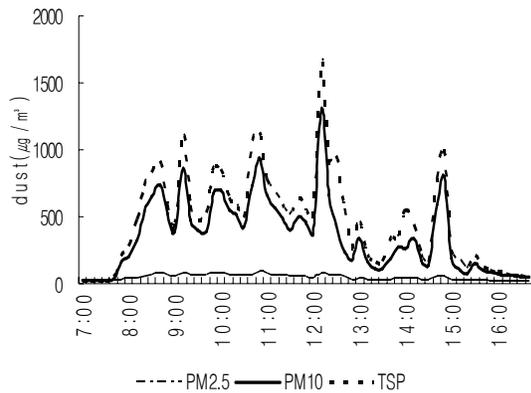


Fig. 10. Airborne particle size distribution in classroom as the base line.

의 입자들은  $PM_{2.5}$  이하의 입자보다 학생들의 활동에 따라 농도의 증감 폭이 크고 수업시간인 9:00부터 12:00까지  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 농도 수치를 보였다.

측정된 오염 물질 농도의 평균값을 구하여 보면 수업시간 (9:00~12:00) 동안  $PM_{10}$ 의 농도는 평균의 기준치의 5배 이상이며  $CO_2$ 도 2배 이상의 높은 값을 유지하고 있다. 현재 학교보건법에서는 미세먼지 농도를  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하,  $CO_2$ 의 농도는 1000 ppm로 하여 교실 내 유지기준을 정하고 있는 것을 준하여 볼 때 학교 내 실내공기질 개선은 매우 시급한 문제이다.

초등학교 교실은 일반적인 실내공간에 비하여 어린 학생들이 사용하는 공간이므로 재실자의 활동성이 매우 크다는 특징을 가지고 있다. 앞 장에서 이야기한 것과 같이 재실자의 활동에 따라 실내공기 오염농도의 편차가 상당한 것을 알 수 있다. 교실 내에서 학생들의 활동 정도에 따라 먼지의 오염농도를 입자별로 분석해보면 배경(등교전)농도의 경우 12시간 이상 빈교실인 상태였으므로  $PM_{2.5}$  이하의 미세먼지가 90%를 차지하며  $PM_{10}$  이상은 측정되지 않았다. 그러나 학생들이 등교한 후 수업시간 및 활동량이 많은 휴식시간, 점심 시간에는 상대적으로  $PM_{2.5}$ 의 비율이 10% 이하로 감소하고  $PM_{10}$  이상의 조대먼지의 비율이 15% 이상으로 증가한다. 앞에서의 연구결과와 연계하여 분석해보면  $PM_{2.5}$  이하의 먼지의 발생량이 감소한 것이 아니라 상대적으로  $PM_{10}$  이상의 먼지가 다량으로 발생함을 의미한다.

## 4.2. 실험결과 및 분석

### 4.2.1. 환풍기 가동시

교실 내의 공기질을 저감하기 위한 구조적 측면의 고려로

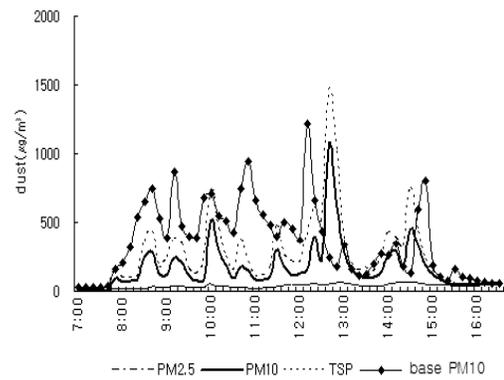


Fig. 11. Airborne particle size distribution in classroom with ventilation.

환풍기 가동을 들 수 있다. 환풍기를 가동하였을 때 측정된 교실내의 공기질 자료를 보면 활동 시각이 약간 다르기는 하지만 기초상태와 마찬가지로 학생들의 활동에 따라 먼지의 농도가 증가, 감소함을 볼 수 있다. 또한 기초 상태에 비하여 전반적으로 농도가 낮아졌다(Fig. 11).

특히  $PM_{10}$ 을 비교해 보면 수업시간 보다는 먼지오염 농도가 높았던 휴식시간에 더 많은 비율로 저감된 것을 보아 환풍기 가동으로 인한 강제환기가 부유먼지의 저감에 효과가 크다고 볼 수 있다.  $CO_2$ 의 일변화 그래프에서 기초 상태를 보면  $CO_2$ 의 농도는 먼지 농도 변화와는 달리 아동의 활동 특성보다는 오염발생원(아동의 호흡)의 유무 및 환기(환풍기 가동, 출입문 개방)와의 상관성이 높다고 판단할 수 있다. 그리고 환풍기(풍량  $12 \text{ m}^3/\text{min}$ ) 2대를 가동하여 강제환기 실험이 수행된 교실에서  $CO_2$ 의 농도는 학교보건법 기준인 1000 ppm 이하로 저감되었다.

환풍기를 가동하였을 경우 일평균값으로는  $PM_{2.5}$ 의 경우  $22.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$ 은  $84.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , TSP의 농도는  $120.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 수업시간 중에는  $PM_{2.5}$ 는  $25.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $PM_{10}$ 은  $172.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , TSP의 경우는  $274.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 이는  $PM_{10}$ 을 기준으로 기초 상태의 평균 농도보다 70%나 저감된 결과이다. 또한  $CO_2$ 의 경우도 일평균은 556 ppm, 수업 평균은 820 ppm으로 나타나 기초 상태의 수업 시간 중 평균 농도에 비하여 38%의 낮은 농도임을 알 수 있다. 위 결과들을 종합해보면 환풍기는 먼지 및  $CO_2$  등 오염 물질 저감에 효과가 크다고 말할 수 있다.

환풍기 가동시 활동별 먼지의 구성 변화를 살펴보면 배경(등교전)농도의 경우 기초 측정시와 다른 농도 비율을 볼 수 있다.  $PM_{2.5}$ 의 비율이 약 50% 정도로 기초농도 측정시보다

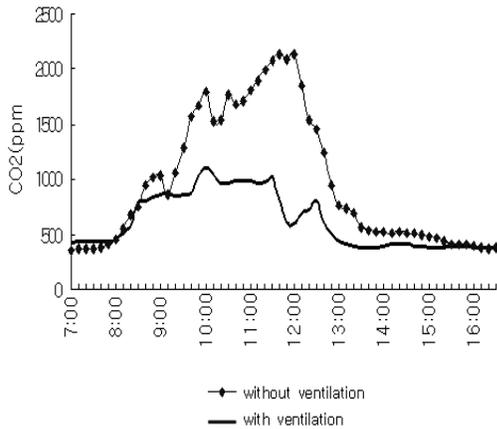


Fig. 12. Effect of ventilation on CO<sub>2</sub> concentration.

40% 나 감소하였고 상대적으로 PM<sub>10</sub>의 비율은 증가하였다. 이는 PM<sub>10</sub> 이하의 미세먼지가 환풍기로 인하여 상당량 제거되었으며 환풍기의 기류로 인하여 PM<sub>2.5</sub> 이하의 미세먼지가 부유하였다고 추정해볼 수 있다.

#### 4.2.2. 화이트보드 사용시

기존의 교실에서는 일반적으로 칠판을 사용하였는데, 분필가루가 먼지 농도 구성에 미치는 영향을 알아보기 위해 칠판 대신 화이트보드만을 이용하여 교실내의 공기질을 측정하여 결과를 나타내었다(Fig. 13). 기초 상태와 마찬가지로 학생들의 활동에 따라 먼지의 농도가 증가, 감소함을 볼 수 있으나 가시적으로는 기초 상태에 비하여 크게 농도가 낮아졌다고 보기 어렵다.

화이트보드 사용시 먼지와 CO<sub>2</sub>의 수업 시간 중 평균 농도

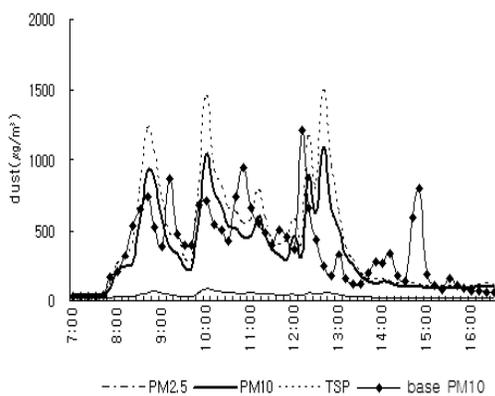


Fig. 13. Airborne particle size distribution in classroom with white board.

를 살펴보면 PM<sub>2.5</sub>는 42.1 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>10</sub>은 492.7 µg/m<sup>3</sup>, TSP의 경우 621.9 µg/m<sup>3</sup>로 기초 상태의 먼지 농도와 비교하여 PM<sub>2.5</sub>에서 30%가 저감되었을 뿐이며 그 외 크기 입자들은 10% 정도의 저감효과를 보였다. 이는 초등학교 수업의 특성상 교실수업 교구 개선의 일환으로 컴퓨터, 멀티비전 등을 사용하는 수업이 보편화되어 분필가루가 많이 발생하지 않는 것을 원인으로 추정할 수 있다.

#### 4.2.3. 먼지제거매트 설치시

선행 연구를 통하여, 교실에서의 먼지 발생 원인이 학생들의 신발에 묻어오는 흙먼지라는 점을 고려하여 이용자적 측면의 저감방안으로 먼지제거매트 설치를 선정하였으며 먼지제거매트를 설치하였을 때 전반적으로 먼지가 감소하는 경향을 나타내고 있다(Fig. 14).

먼지제거매트를 설치하여 사용할 경우 수업 시간 중 미세먼지의 평균 농도를 살펴보면 PM<sub>2.5</sub>는 35.5 µg/m<sup>3</sup>, PM<sub>10</sub>은 337.4 µg/m<sup>3</sup>, TSP의 경우 461.6 µg/m<sup>3</sup>로 기초 상태의 먼지 농도와 비교하여 30~40%의 저감효과를 보였다. 학생들의 신발 바닥에 묻어오는 입자들은 주도 조대입자들이나 교실 내에서 다시 부스러져 미세입자가 되므로 이를 제거하는 먼지제거매트는 미세먼지 농도저감에 효과가 있는 것으로 판단된다.

먼지의 오염농도를 활동별로 분석해보면 배경(등교전)농도의 경우 기초 상태와 마찬가지로 PM<sub>10</sub> 이하의 미세먼지가 90%를 차지하고 TSP가 측정되지 않았다. 학생들이 등교한 후 수업시간 및 활동량이 많은 휴식시간, 점심시간에는 상대적으로 PM<sub>2.5</sub>의 비율이 10% 이하로 감소하고 PM<sub>10</sub> 이상의

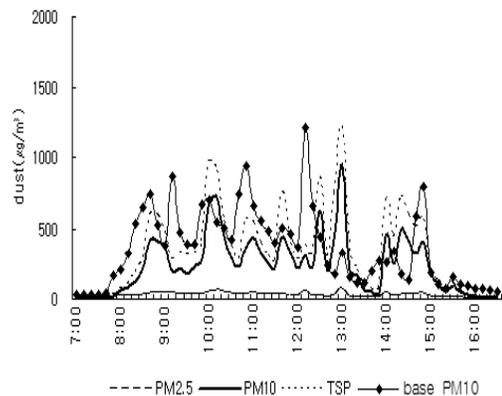


Fig. 14. Airborne particle size distribution in classroom with dust mat.

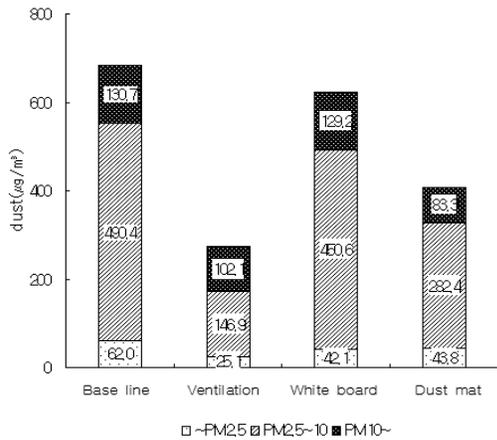


Fig. 15. Effect of IAQ control measure to airborne particle.

조대먼지의 비율이 15% 정도로 증가하였다.

#### 4.2.4. 개선 방안 효과 비교 분석

수업 시간 중 조건에 따른 입경별 총부유먼지 농도를 나타낸 그래프를 보면 환풍기 가동시 PM<sub>10</sub> 이상의 조대먼지보다 주로 PM<sub>10</sub> 이하의 미세먼지가 제거되었음을 알 수 있다(Fig. 15). 먼지제거매트를 설치한 경우를 살펴보면 기초 측정에서는 PM<sub>10</sub> 이상 입자의 농도가 130.7 µg/m<sup>3</sup>이었으나 먼지제거매트 설치 후 36% 감소된 83.3 µg/m<sup>3</sup>을 나타내었다.

환풍기는 교실 내 대기 중에 부유하는 작은 입자를 저감하는 효과를 가지고 있으며, 매트트는 전반적으로 먼지농도를 저감시키지만 큰 입자를 더 많이 저감시키는 것을 뚜렷하게 알 수 있다. 오염물질 발생량을 비교해 보면 환풍기 가동시 미세먼지 저감에 탁월한 효과가 있었으며 가스상 오염물질인 CO<sub>2</sub>도 76%나 저감할 수 있었다. 환풍기가 PM<sub>10</sub> 이하의 미세 입자에 효과가 있는데 비하여 먼지제거매트는 조대입자 제거에 효과가 있으며 화이트보드는 초등학교 수업의 특성상 10% 내외의 효과밖에 거두지 못하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 학교 내의 실내공기질 개선 및 관리 방안을 모색하기 위하여 실내공기질의 실태와 교실 공간의 특성을 파악하고자 하였다. 수도권의 한 초등학교 교실에서 연구가 수행되었으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 일반적인 교실 환경에서 온도, 습도, 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, TSP), CO<sub>2</sub>의 농도를 24시간 연속으로 측정하고 분석한 결과, 미세먼지의 경우 등교 전에는 매우 낮은 수치를 보였으나 학생들이 등교 후 수업시간, 휴식시간, 점심시간에 활발한 활동을 보임에 따라 급격하게 농도가 증가하고 감소하는 경향을 보였으며 농도 수준도 매우 높았다. 이처럼 급격한 먼지 농도의 변화는 외부에서 오염물질 유입이나 내부에서의 발생보다는 기존의 오염물질이 학생들의 활동으로 인하여 비산되고 침강하는 것으로 설명할 수 있다. CO<sub>2</sub> 농도 변화는 미세먼지 농도 변화와는 달리 학생들의 활동과의 관계가 적으며 발생원과 환기와의 상관성이 높았다.

2. 실내공기질은 그 공간의 특성에 의해 결정되어지므로 공간의 특성을 분석한 결과, 건축구조물(structure) 자체가 실내공기에 영향을 미치는 구조적 측면, 실내공간의 사용 목적에 따른 내부 구성물에 대한 기능적 측면, 재실자의 특성 및 행동 양식에 대한 이용자적 측면으로 나눌 수 있었다. 이를 기준으로 실내 공간 특성을 분석하였으며, 이러한 접근 방식은 다양한 공간의 실내공기질을 효과적으로 관리방안을 제시할 수 있다.

3. 학교 내의 실내공기질을 관리하기 위하여 세 가지 측면에서 개선방법을 제안하였다. 구조적 측면으로는 환풍기를 가동하여 강제환기를 하는 방법으로 수업시간 중 PM<sub>10</sub>농도가 70% 저감되었으며, CO<sub>2</sub>의 경우도 평소의 38% 수준의 낮은 농도로 개선된 결과를 얻었다. 기능적 측면에서의 개선 방안으로는 칠판 대신 화이트보드를 사용하는 방법인데 칠판 필기를 많이 하지 않는 초등학교 수업의 특성상 10% 내외의 농도가 저감되었다. 이용자적 측면의 방법은 교실 출입구에 먼지제거매트를 설치하는 것으로 기초상태의 비교하여 PM<sub>10</sub>의 경우 40%의 먼지가 저감되었다. 특히 환풍기를 가동할 경우 인체에 영향을 주는 PM<sub>2.5</sub>~PM<sub>10</sub>의 미세먼지 저감에 큰 효과가 있었으며 가스상 오염물질인 CO<sub>2</sub>에도 효과가 상당하여 학교 내에 실내공기질 관리에 좋은 방안으로 제안할 수 있다.

4. 앞서 실내 공간의 특수성을 구조적, 기능적, 이용자적 측면에서 검토하였으며 이를 바탕으로 학교의 효과적인 실내공기질 관리를 위한 관리 지침을 다음과 같이 제안할 수 있다.

첫째, 학교를 건축할 때 구조적인 측면을 고려하여야 한다. 바닥재와 마감재는 오염 물질이 적게 발생하는 것으로 시공하고 사용 전에 Bake-out을 실시하는 것이 필요하다. 특히 현재 교실들은 자연환기를 하고 있으나 환풍기 등을 이용하여 강제환기 시설을 설치 가동하여야 하며 화석연료를 사용하는 냉난방 방식도 개선하여야 한다.

두 번째로는 학교 기능으로 인한 내부 구성물의 선택할 시에 책상, 걸상, 환경미화용품 등을 친환경소재로 구입하고 사용 전 환기하여야 한다. 복사기 등의 사무기기도 환기가 잘 되는 곳이 설치하고 그 외 학습물품을 보관할 때도 환기에 유의한다.

세 번째로는 학교 관리를 위한 전문적인 인적자원 지원이 필요하다. 어린 학생들은 청소 상태가 미비하므로 일반 사무실이나 외국의 학교와 마찬가지로 청소담당자가 필요하며 이와 별도로 학교공기질을 전문적으로 관리할 환경위생 관리자를 체계적으로 교육하여야 한다.

마지막으로 가이드라인 개발 및 교육으로 학교의 환경위생 관리자뿐만 아니라 교실에서 재실하여 생활하는 교사와 학생들이 쉽게 활용할 수 있는 매뉴얼을 개발하고 교육하는 것이다. 재실자 스스로 학교공기질 개선 방법을 이해하고 시행한다면 상당한 효과가 있을 것으로 기대된다.

## KSEE

## 참고문헌

- 김기선, “교실 내 분진 특성에 관한 연구”, 대구카톨릭대학교 석사학위논문(2001).
- 대기환경연구회, “대기환경개론”, 동화기술, pp. 333~334(2003).
- Richard W. Boubel and other, “*Fundamentals of Air Pollution*”, Academic Press(1994).
- 김순희, “교실 먼지의 물리화학적 성상과 미생물 수에 미치는 청소방법 및 바닥재의 영향”, 제47회 전국과학전람회(2001).
- 조영일 등, “환경공학”, 동화기술(1998).
- 산업보건 위생연구실, “실내공기질 평가”, 노동부(2002).
- 정지연 등, “고층 상업 빌딩 소재 사무실의 실내환경질 평가”, 한국산업안전연구원(2002)
- 박성규, 정진도, 김성후, “대기환경관리”, 동화기술(2003).
- J.D. Spengler, J. M Samet and J. F. McCarthy, “*Indoor Air Quality Handbook*”, McGraw-Hill(2001).
- 김순희, “교실 환경 개선에 관한 연구”, 제47회 전국과학전람회(2000).
- 양원호 등, “발생원에 따른 일부 학교 교실의 실내공기질 평가 사례 연구”, 한국환경과학회(2005).
- 윤관용, “여름철 강의실에서의 실내외 공기질 관계에 관한 연구”, 서원대학교 석사학위논문(2000).
- 손종렬, 노영근, 손부순, “국내 일부학교 건물의 실내공기질 평가”, 환경보건학회지(2006).
- U.S. EPA, “*Indoor Air Quality Tools For Schools*”, (2000).
- Dagmar Schmidt Etkin and Carlton Vogt, “*Indoor Air Quality in Schools*”(1996).
- Lisa Hescong, “*Daylighting and Human Pen Formance*”, ASHRAE(2002.6).
- 송지한, “열차풍을 고려한 지하철 내 공기질 예측모델 개발에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문(2004).
- 강영, “공동주택의 자연환기량 평가에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문(2000).
- 류재홍, “지하철 내의 CO<sub>2</sub> 측정을 통한 적정 환기량 산정에 관한 연구”, 서울시립대학교 석사학위논문(1997).
- 이희관, 정지원, 송지한, 김신도, “초등학교 교실에서의 실내공기질 관리 지침”, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집(2005).
- Heekwan Lee, Jiwon Jeong, Shin-Do Kim, Jeong-Joo Lee, “*Practical Approaches for the IAQ Management in Elementary School Classrooms*”, A&WMA's 99th Annual Conference & Exhibition(2006).
- 정지원, 이희관, “초등학교 교실에서 학생활동에 따른 먼지농도 구성 변화”, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, pp. 253~254(2004).
- 정지원, 이희관, “초등학교 교실내의 실내공기질 개선에 관한 연구”, 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집, pp. 172~173(2005).
- 김윤신, “실내공기질 관리방안에 관한 연구”, 환경부(1999).
- 김신도 등, “실내공기질 관리지침서 개발에 관한 연구”, 환경부(2005).
- 김강석 등, “실내공기오염에 대한 국민의식 조사와 정책방안 연구”, 한국환경정책평가연구원(2001).
- 김신도 등, “다중이용시설 자동 측정망 구축을 위한 조사 연구 사업”, 환경부(2005).
- 환경부 등, “실내공기질 관리 기본 계획”, 관계 8개 부처(2004)
- 환경부, “다중이용시설 등의 실내공기질관리법” 7조(2004).

---

30. 김윤신 등, “학교보건 및 교내환경위생 개선방안에 관한 연구”,  
정책연구과제보고서(2000).

31. 신동천, “학교 실내공기오염 및 개선방안”, 한국학교보건협회지  
(2000).