

초 · 중 · 고등학교의 이산화탄소 농도 및 환기량 평가

최영태* · 허정* · 박진현* · 김은채* · 류현수* · 김동준* ·
조만수* · 이재관** · 이종대*** · 양원호*†

*대구가톨릭대학교 산업보건학과, **인제대학교 부산백병원 직업환경의학과, 환경산업의학연구소,
***순천향대학교 환경보건학과

Evaluation of Carbon Dioxide Concentrations and Ventilation Rates in Elementary, Middle, and High Schools

Youngtae Choe*, Jung Heo*, Jinhyeon Park*, Eunhae Kim*, Hyoensu Ryu*, Dong Jun Kim*,
Mansu Cho*, Chaekwan Lee**, Jongdae Lee***, and Wonho Yang*†

*Department of Occupational Health, Daegu Catholic University

**Department of Occupational and Environmental Medicine,

Busan Paik Hospital & Institute of Environmental and Occupational Medicine, Inje University

***Department of Environmental Health Science, SoonChunHyang University

ABSTRACT

Objectives: Much attention has been paid to indoor air quality. Ventilation within schools is important because of indoor air quality and its effect on health and learning performance. In this study, we evaluated the carbon dioxide (CO₂) concentrations and ventilation rates in schools.

Methods: This study measured the concentration of CO₂ in elementary, middle, and high school classrooms over six months. The seasons during the study were summer, fall, and winter. Sensor-based monitoring was used and the basic characteristics of the classroom were investigated. The body surface area of the students was used to calculate the CO₂ generation rate, and the air change per hour (ACH) was evaluated using mass balance modeling.

Results: The average CO₂ concentration measured in most schools exceeded 1000 ppm. The ventilation rates varied from season to season. Compared to the recommended ventilation rate of 4.9 ACH, the roughly 3 ACH calculated in this study indicates that most schools possessed insufficient ventilation.

Conclusions: The concentration of CO₂ in school classrooms could be an indicator of indoor air quality and can affect students' learning ability. In this study, CO₂ concentrations exceeding the standard indicate a lack of ventilation along with problems with indoor air quality. Therefore, appropriate improvements are needed to overcome these problems.

Key words: School, classroom, carbon dioxide, ventilation rate, air change per hour

I. 서론

공기오염물질로 인한 건강영향을 고려할 때 사람

들은 실내환경에서 대부분의 시간을 보내기 때문에
노출평가 측면에서 실내공기질의 중요성이 증가하고
있다. 주요 실내 오염물질로는 이산화탄소(CO₂), 일

†Corresponding author: Department of Occupational Health, Daegu Catholic University, Hayang-ro 13-13, Hayang-eup, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 38430, Rep. of Korea, Tel: +82-53-850-3739, E-mail: whyang@cu.ac.kr

Received: 27 May 2020, Revised: 15 June 2020, Accepted: 18 June 2020

산화탄소, 이산화질소, 아황산가스, 오존, 미세먼지, 중금속, 석면, 휘발성 유기화합물, 라돈 등이 있다.¹⁾ 실내공기는 한 공간 내에서 오염된 공기가 환기되지 않게 되면 오염된 공기가 내부순환하게 되면서 오염도가 누적되므로 실외 대기오염보다 더 큰 문제를 유발할 수 있다.²⁾ 특히 사무실이나 주택, 학교 교실과 같이 동일한 장소의 실내에서 오랜 시간을 보내는 경우 실내공기질이 더욱 중요하다고 할 수 있다.

실내공기질에 노출되는 인구 중에서 보건학적으로 중요한 집단으로 어린이와 청소년을 들 수 있다. 어린이와 청소년은 성인과 달리 단위 체중 당 호흡량이 높으며, 신장이 낮아 공기보다 무거운 오염물질에 노출될 위험이 더 높다.³⁾ 실내공기의 오염에 따른 영향은 실내 거주자들에게 당장 직접적인 생명을 위협할 정도는 아닐지라도 장기적으로 본다면 건강에 악영향을 미칠 수 있다.⁴⁾ 국내 10대의 학생들은 하루 중 대부분의 시간을 주택과 학교 내에서 생활하기에 학교 교실에서 공기오염물질에 노출될 가능성이 높다고 할 수 있다.⁵⁾ 이런 중요성 때문에 학교의 실내공기질 관리를 위하여 공기청정기 설치가 전국에서 시행되고 있다.

실내공기질의 중요성이 부각되면서 공기청정기를 설치하고 교내의 공기질을 쾌적하게 유지하려는 데에 집중하고 있다. 하지만 공기청정기는 주로 미세먼지 제어에 초점을 두고 있으며, CO₂를 제어하는 기능이 현재 없는 실정이다. 따라서 공기청정기로는 실내 CO₂ 농도를 제어할 수 없어 학교 교실의 CO₂는 적절히 관리되지 못하고 있는 실정이다. CO₂는 ‘학교보건법’에서 관리하는 12개 실내오염물질 중 하나이며 교실 내의 농도 기준은 1,000 ppm으로 설정되어 있다.⁶⁾

일반적으로 학교 시설에는 쾌적한 교실 환경을 위해 냉·난방 시설이 구비되어 있는데 여름과 겨울 같은 계절의 경우 냉·난방 시설을 이용하게 된다. 냉·난방 시설을 이용할 경우 실내의 적정온도 유지를 위해서 창문을 통한 환기가 줄어들 수 있다. 창문을 닫은 밀폐상태가 되면 CO₂ 농도는 2배 이상의 농도로 상승할 수 있으며,⁷⁾ 겨울철에는 온도 유지를 위해 창문을 닫게 되어 CO₂ 농도가 높게 측정될 수 있다.⁸⁾ 환기가 부족한 교실은 CO₂ 농도가 2,000 ppm 이상, 겨울철에는 4,000 ppm을 초과하는 농도까지 이르게 되며 학생들의 주의집중력을 방해하고, 학습

능력을 저하시키게 될 수 있다.⁹⁾ 또한, 학교 교실에서 CO₂ 농도가 1,000 ppm이 증가하였을 때 학생들의 결석률이 10~20% 증가하였다.¹⁰⁾

본 연구는 초·중·고등학교 교실에서 실내공기질 및 환기의 지표인 CO₂ 농도를 장기간 측정하여 계절에 따른 환기량을 산출하였고, 재실 학생 수를 고려하여 적정 환기량을 제시하였다. 그리고 최근 미세먼지와 코로나 바이러스 등으로 관심이 집중되고 있는 학교 교실의 실내공기질 관리에 기초자료를 제공하고자 하였다.

II. 연구 방법

1. 조사 대상학교의 특성

본 연구는 D광역시에 위치한 학교를 대상으로 2019년 7월부터 2019년 12월까지 약 6개월 동안 교실 내 CO₂와 온도를 측정하였다. 측정한 학교는 총 15 곳으로 초등학교, 중학교, 고등학교 각각 5개의 학교를 선정하였다. 초등학교는 모두 남녀공학 교실, 중학교는 남녀공학 교실 3곳, 여학생 교실 2곳, 고등학교는 남녀공학 교실 2곳, 남학생 교실 3곳으로 선정하였다. 학교의 학급에는 교실의 층수, 규모, 재실인원, 관리상태 등 다양한 특성들이 존재한다. 이러한 교실내의 여러 특성들을 파악하기 위하여 모든 학교를 방문하여 체크리스트(check-list)를 작성하였고 체크리스트 항목에는 교실의 체적, 학생 수, 남녀비율, 창문의 유형 및 개수를 체크하였다. 본 연구는 대구가톨릭대학교의 IRB (CUIRB-2019-0044) 승인을 받았다.

2. 실내·외 이산화탄소 농도

본 연구는 6개월간의 장기간 연속측정을 위하여 센서 기반의 측정기(IAQ Station-T2 LTE, K-weather)를 이용하였다. 측정기기의 CO₂ 센서모듈은 S-300-3V로서 측정방식은 비분산적외선방식(NDIR)이었고, 측정범위는 0~10,000 ppm이었다. 1분 단위로 CO₂를 측정하였으며, 교실의 앞쪽 또는 뒤쪽 중앙 벽면에 설치하였다. 교실의 측정기 설치 위치는 천장 아래 30~50 cm이었다.

학생들의 실제 재실 시간을 고려하기 위하여 해당 학교의 방학 기간, 교내 시정표를 참고하여 학생들이 머무르지 않은 빈 교실의 측정값을 제외하였고,

주말을 포함한 공휴일의 농도 값은 모두 제외하였다. 각 교실당 재실하는 학생 수는 학교에 방문하여 직접 조사하였다. 학생들의 호흡량을 추정하기 위하여 필요한 체표면적은 해당 교실의 담당 선생님들에게 협조를 구하여 온라인으로 비대면 조사를 진행하여 수집하였다. 학생들의 교실 내 재실 시간의 여부는 학교별 시간표를 참고하였다. 초등학교는 등교 오전 8시부터 오후 3시까지의 데이터를, 중학교는 8시부터 5시까지의 데이터를 그리고 고등학교는 오전 7시 30분부터 오후 7시 30분까지의 데이터를 이용하였다. 실외의 CO₂ 농도는 기상청에서 제공하는 CO₂ 평균농도인 407 ppm을 적용하였다.¹¹⁾

3. 물질수지식을 이용한 환기량 산출

교실 내 재실하는 학생들의 CO₂ 발생량을 구하기 위해 먼저 학생들의 체표면적을 계산하였다. 체표면적 계산식은 여러 모델 중에서 Lee(2008) 모델을 이용하였다.¹²⁾ Lee(2008) 모델은 한국 성인들을 대상으로 한 모델이지만, 다른 모델에 비해 어린이 모델에서 최대 오차 값이 더 작고 한국 어린이 예측 모델에도 이용하기에 적절하다.¹³⁾ 따라서, 체표면적 계산식은 Lee(2008) 모델 식을 이용하여 계산하였고 추정식은 다음과 같다.

$$BSA = 0.007331 * Wt^{0.425} * Ht^{0.725} \quad (1)$$

여기서,

BSA: Body surface area (m²), Wt: Weight (kg),

Ht: Height (cm)

학생들의 CO₂ 발생량을 예측하기 위하여 학생들의 신장과 몸무게를 이용하였다. 학생들의 CO₂ 발생량 추정식은 David(2002)의 남학생과 여학생의 호흡량을 구하는 계산식을 이용하여 예측하였으며 추정식은 다음과 같다.¹⁴⁾ 식 (2)는 남학생이며 식 (3)은 여학생의 이산화탄소 발생량을 구하는 식이다.

$$V_{CO_2} = \frac{-0.78(a-5) + 53}{40} k \quad (2)$$

$$V_{CO_2} = \frac{-1.1(a-5) + 51.6}{40} k \quad (3)$$

여기서,

V_{CO₂}=carbon dioxide generation (L/hr),

a=pupil age (years),

m=metabolic rate (W/m²) of the standard adult,

k 값은 아래의 식 (4)와 같다.

$$k = 0.148BSAm \left(\frac{273 + t_r}{273} \right) \quad (4)$$

체표면적과 CO₂ 발생량을 계산한 후 물질수지(mass balance) 모델식을 이용하여 시간당 공기 교환횟수(Air Change per Hour, ACH)를 산출하였다. 물질수 지식은 완전 혼합된 하나의 공간으로 공기의 유입 및 유출 사이의 관계를 기술하며 실내 공기질을 설명하기 위해 이용한다.¹⁵⁾ 물질수지식은 실내공기 오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이다.¹⁶⁾ 교실 실내를 하나의 공간으로 가정하고 실내공기질의 물질수지식을 적용하였다.¹⁷⁾

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_o + S - IC_i - \frac{R}{V} \quad (5)$$

여기서,

C_i=indoor concentration (ppm),

C_o=outdoor concentration (ppm),

I=air exchange rate (hr⁻¹),

S=source strength (cm³/hr·m³),

R=removal rate (cm³/hr),

V=volume of the space (m³)

III. 결 과

1. 조사 대상학교의 특성

대상 초·중·고등학교 교실의 평균 체적은 각각 168.9, 167.6, 167.0 m³이었고, 전체 평균 교실의 체적은 167.85 m³이었다. 대상 학교들의 재실 학생 수는 최소 15명에서 최대 34명이었으며, 평균 25명이었다. 남녀 성비는 초등학교는 모두 남녀공학 교실이었으며, 중학교에서는 여학생 교실이 2곳, 남녀공학 교실이 3곳, 고등학교에서는 남학생 교실 3곳, 남녀공학 교실이 2곳이었다. 창문의 개수 및 유형은 실외 측 4개의 창문, 복도 측 2개의 창문이 대부분이었다. 교실에 대한 기본적인 조사 항목을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of each school classroom and the number of students in the classroom

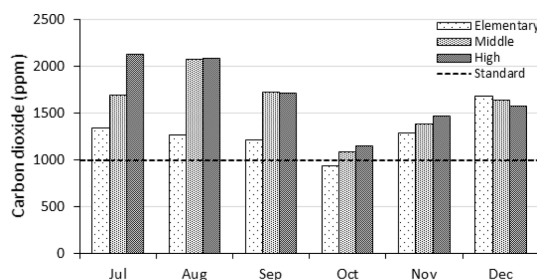
School	Grade	Volume (m ³)	No.* of student	Sex		No. of window	No. of floors
				Male	Female		
A	Elementary	171.6	26	11	15	8	3
B	Elementary	175.2	15	9	6	6	4
C	Elementary	178.9	26	15	11	6	4
D	Elementary	164.6	23	13	10	10	4
E	Elementary	154.2	23	11	12	6	4
F	Middle	168.6	25	6	19	6	3
G	Middle	175.6	27	14	13	8	3
H	Middle	173.2	21	13	9	6	2
I	Middle	164.1	19	-	19	6	3
J	Middle	156.4	34	-	34	6	3
K	High	163.6	25	25	-	8	1
L	High	161.6	23	23	-	6	3
M	High	158.7	32	14	18	6	3
N	High	180.5	29	29	-	6	1
O	High	170.9	26	8	18	6	2

*Number

2. 실내·외 이산화탄소 농도

월별에 따른 학급별 CO₂ 농도를 비교하여 보았을 때 대부분의 학교 교실의 CO₂ 농도는 학교보건법 기준농도인 1,000 ppm을 초과하는 경향을 보였다. 초등학교의 월별 평균 CO₂ 값은 10월을 제외한 모든 월에서 1,000 ppm을 초과하였고, 12월에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 초등학교는 중, 고등학교에 비해 비교적 낮은 농도를 나타내었다. 중, 고등학교는 6개월 모두 기준농도를 초과하였으며 7~8월에서 농도가 가장 높게 나타났다. 10월의 경우 CO₂ 농도가 1,000 ppm에 근접할 정도로 크게 떨어졌다. 월별 교실 내 CO₂ 평균농도를 Fig. 1에 나타내었다.

시간대별 CO₂ 농도를 보기 위하여 학생들이 재실하는 시간 동안의 CO₂ 농도를 계절별로 비교하였다. 계절의 구분은 기상청의 기상연보에서 제시한 데이터를 이용하여 D광역시 지역의 평균 실외온도가 25°C를 초과하는 기간을 여름, 15~25°C 사이의 기간을 가을, 그리고 평균 실외온도가 15°C 미만으로 유지되는 기간을 겨울이라 판정 후 구분하였다.¹⁸⁾ CO₂ 농도는 학생들이 등교하는 시간인 8시부터 CO₂가 증가하였고 휴식시간과 점심시간에 걸쳐 조금씩 감소하는 경향을 보였다. 특히 학생들이 점심을 먹으며

**Fig. 1.** Comparison of average carbon dioxide concentrations in classrooms by month

휴식시간을 오래가지는 12~1시에서 CO₂ 농도가 크게 떨어짐을 보였다. 초등학교, 중학교, 고등학교로 갈수록 교실 내 CO₂ 평균농도가 높게 나타났으며 학교 시간이 길어짐에 따라 CO₂의 농도의 감소량도 줄어들었다. 계절적인 특성으로는 초등학교, 중학교, 고등학교 모두 여름에서 CO₂ 농도가 가장 높게 나타났으며, 다음으로 겨울이 높았고 가을이 가장 낮은 농도를 보였다. 초등학교의 경우 가을에서 CO₂ 기준농도인 1,000 ppm과 비슷한 농도를 보였으며 점심시간 동안 1,000 ppm보다 낮은 농도를 보였다. 그러나 중학교, 고등학교의 경우 학생들이 재실하는 시

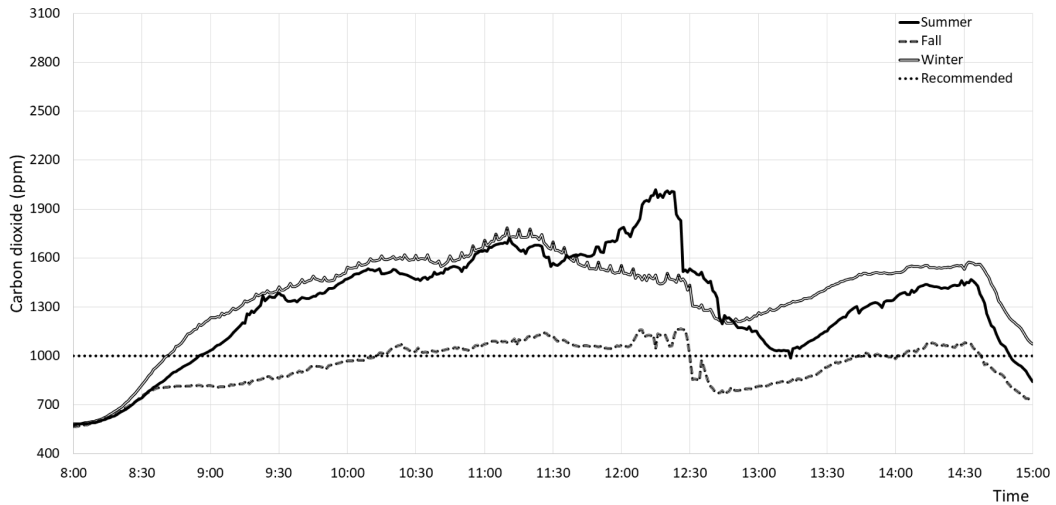


Fig. 2. Variation of the concentrations of carbon dioxide in elementary school according to season

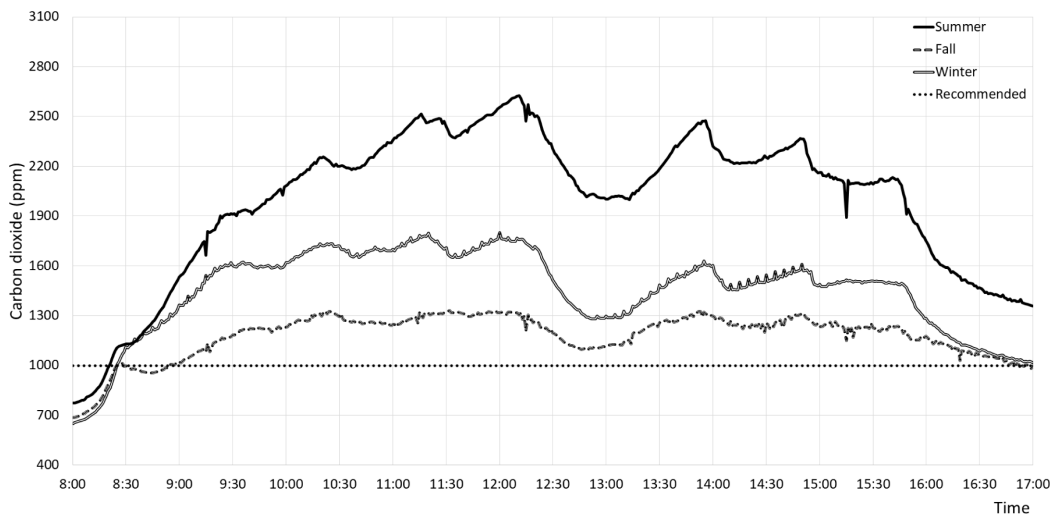


Fig. 3. Variation of the concentration of carbon dioxide in middle school according to season

간 동안 CO₂ 기준농도인 1,000 ppm 보다 높은 농도를 계속해서 유지함을 보였다. 학급별 계절에 따른 CO₂ 농도 변화를 Fig. 2~4에 나타내었다.

3. 물질수지식을 이용한 ACH 산출

CO₂ 농도 차이의 원인으로는 여러 요인이 있다. 그 중 학생들의 체표면적에 따른 발생량, 성별에 의한 차이, 교실의 체적, 재실자 수 등이 있다. 각 교실의 재실하는 학생들의 체표면적과 교실의 체적, 온도, CO₂ 농도를 이용하여 발생량(G)을 추정하였다. 교실

의 온도는 비교적 적정온도를 유지하였으며 여름과 겨울의 교실의 온도 차이도 냉·난방 시설로 인하여 크게 나지 않았다. 교실의 온도가 24.1°C임을 가정한 평균 발생량을 계산하였다. 15개 전체학교의 평균 발생량은 135.2 cm³/sec이었으며, 초등학교의 평균 발생량은 117 cm³/sec, 중학교의 평균 발생량은 134.3 cm³/sec, 고등학교의 평균 발생량은 154.2 cm³/sec이었다. 월별에 따른 환기횟수를 비교하기 위하여 ACH를 분석하였다. 가장 낮은 환기횟수를 보인 곳은 7월과 11월의 1.2 ACH, 가장 활발한 환기횟수

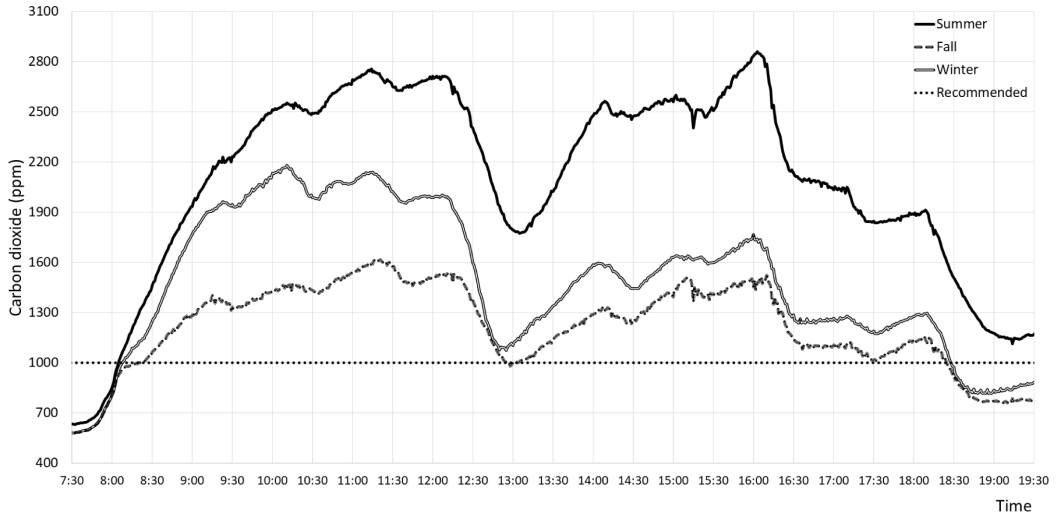


Fig. 4. Variation of the concentration of carbon dioxide in high school according to season

는 7.5 ACH로 나타났다. 8월에서 환기횟수가 가장 낮게 나타났으며 10월에서 가장 활발한 환기횟수를 보였다. 1,000 ppm을 유지하기 위해서 필요한 ACH 값은 전체학교 평균 4.9 ACH이었으며 초등학교는 4.2 ACH, 중학교는 4.9 ACH, 고등학교는 5.6 ACH 이었다. 학급별 기준 CO₂ 농도인 1,000 ppm보다 낮

은 농도로 유지하기 위하여 필요한 권장 ACH와 월 별 ACH 값을 Tabel 2에 나타내었다.

초·중·고등학교의 CO₂ 농도와 ACH를 학급별로 비교하였다. 초등학교는 CO₂ 농도값이 1,288 ppm, 3.21 ACH이었으며 중학교는 1,600 ppm, 2.84 ACH, 그리고 고등학교에서 1,686 ppm, 3.10 ACH를 보였

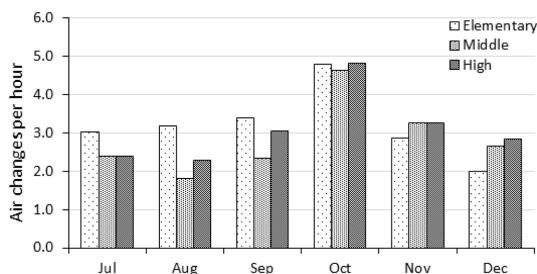
Table 2. Air change per hour (ACH) calculated in schools per month

School	Volume per person (m ³)	G (cm ³ /sec)	ACH (hr ⁻¹)							Recommended
			Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
A	6.6	133.5	2.1	2.9	2.7	4.1	3.5	2.8	4.7	
B	11.7	75.2	1.9	3.0	3.6	4.6	2.5	1.6	2.6	
C	6.9	137.7	2.2	1.9	2.3	5.4	3.5	2.3	4.7	
D	7.2	118.9	3.9	4.4	4.6	5.5	2.4	1.6	4.4	
E	6.7	120.4	5.1	3.9	3.8	4.3	2.4	1.6	4.7	
F	6.7	128.9	2.4	1.9	3.1	5.3	4.0	3.1	4.6	
G	6.5	119.3	3.0	1.4	1.9	7.5	4.4	3.8	5.2	
H	8.2	150.0	3.0	2.1	2.9	3.5	3.2	2.9	4.2	
I	8.6	102.6	1.6	1.3	1.7	2.7	1.4	1.2	3.8	
J	4.6	170.7	2.0	2.3	2.1	4.0	3.4	2.2	6.6	
K	6.5	164.7	1.5	1.8	2.7	5.9	3.9	2.8	6.1	
L	7.0	151.0	4.4	3.8	5.5	7.0	4.3	3.1	5.7	
M	5.0	177.3	1.8	1.7	2.3	3.5	2.4	2.3	6.8	
N	6.2	139.5	1.2	1.3	1.4	3.6	2.7	2.7	4.6	
O	6.6	138.6	3.0	2.7	3.4	4.0	3.0	3.3	4.9	
Total	7.0	135.2	2.6	2.4	2.9	4.7	3.1	2.5	4.9	

Table 3. The average concentration of carbon dioxide and ACH according to school grade

School	CO ₂ (ppm)		ACH (hr ⁻¹)	
	Average	SD [†]	Average	SD
Elementary	1288	240	3.21	1.17
Middle	1600	334	2.84	1.33
High	1686	375	3.10	1.37

[†]Standard deviation

**Fig. 5.** Comparison of average air changes per hour in classrooms according to month

다. 중학교보다 고등학교에서 더 높은 ACH를 보였지만 CO₂ 농도는 더 높게 나타났다. 학급에 따른 ACH의 평균값은 초등학교가 3.21 ACH, 중학교가 2.84 ACH, 고등학교가 3.10 ACH를 표준편차는 각각 1.17, 1.33, 1.37를 나타내었다(Table 3).

월별에 따른 ACH를 비교한 결과 초등학교의 경우 중, 고등학교에 비하여 ACH가 비교적 높게 나타났으나 11월과 12월에서 비교적 부족한 환기횟수를 보였다. 반면 중, 고등학교의 경우 7월과 8월에서 낮은 ACH 값을 보였다. 10월의 경우 초, 중, 고등학교 모두 높은 ACH를 보였으며 권장 ACH 값에 근접하는 학교도 보였다. 월별 학급에 따른 ACH의 평균값을 Fig. 5에 나타내었다.

IV. 고 찰

본 연구는 6개월의 기간 동안 15개의 학교의 CO₂ 농도를 측정하였다. 교실별 ACH 값을 산출하기 위하여 설문조사를 함께 진행하였고 수집한 학생들의 체표면적을 토대로 CO₂ 발생량을 추정하였다. 측정된 CO₂ 농도와 실측한 교실의 체적으로 환기량을 추정하였다. 그리고 교실 특성에 따라 필요 환기횟수를 제시하였다.

일반적으로 사람에게 불쾌감을 느끼게 하는 CO₂의 농도는 1,000~2,000 ppm이며, 5,000 ppm이 초과할 경우 호흡중추를 자극하여 호흡의 깊이, 호흡의 횟수를 증가시키며 호흡 시간이 길어지면 위험할 수 있다. 본 연구에서 측정된 교실에서는 학생들이 재실하는 시간 동안 CO₂ 평균농도는 2,000 ppm을 초과하였으며 3,000 ppm을 초과하는 경우도 있었다. 일부 학교에서는 일시적인 CO₂ 농도가 두통을 유발할 수 있는 농도인 5,000 ppm을 초과하는 학교도 보였으며 학생들이 재실하고 있는 동안의 평균농도가 3,000 ppm에 근접하는 학교도 보였다. 그리고 CO₂ 농도가 크게 상승하고 난 뒤 학생들이 하교한 후에도 CO₂ 농도는 쉽게 떨어지지 않는 경향을 보였다. 국내의 선행연구에서도 무용 연습공간을 측정된 결과, CO₂ 농도 값이 최대 5,500 ppm을 초과하였고, 평균 2,700 ppm을 초과하는 결과를 보였다.¹⁹⁾ 이는 교실과 같은 시설에서 CO₂ 관리가 부족하며, 개선되어야 함을 알 수 있다.

환기량 역시 학교보건법의 기준인 1,000 ppm 이하로 유지하기 위한 권장 ACH 값에 부족함을 나타내었다. 15개 학교의 평균 ACH는 대략 3 ACH로 나타났으며, 초등학교를 대상으로 한 선행연구에서도 초등학교 교실의 ACH는 대략 3 ACH로 나타났다.²⁰⁾ 학교 교실의 CO₂ 농도를 낮추고 쾌적한 공기를 만들기 위해서는 평균 4.9 ACH 이상의 환기가 필요하다. 이러한 교실 상황을 고려할 때 체계적인 관리가 필요한 것으로 생각한다.

학교는 다수의 인원이 오랜 시간 재실하는 공간으로 일반적인 주택에 비해 CO₂의 농도도 빠르게 증가하며 필요한 환기횟수도 높다. 주택의 환기량과 CO₂ 농도를 측정된 선행연구에서는 CO₂ 농도가 대략 900 ppm이었으며, 환기횟수는 대략 0.7 ACH 이었다.²¹⁾ 이처럼, 주택과 달리 학교 교실은 비교적 적은 공간에 많은 학생들이 공부하는 곳으로 필요 환

기량이 높기 때문에 적극적인 관리가 요구된다.

계절에 따른 CO₂ 농도 차이를 보면 여름과 겨울 같은 특정 계절에서는 CO₂ 농도 값이 높고 가을에서는 낮은 농도 값을 보였다. 이것은 냉·난방 시설을 이용하여 온도를 유지하기 위하여 창문을 통한 환기를 하지 않는 것이 주된 요인으로 생각한다. 학교 교실의 냉·난방 시설은 모두 교실 천장에 설치되어 있었다. 보편적으로 특정 계절에는 실내의 온도 유지를 위해 창문을 닫고 외부의 공기 유입을 막는다. 이때 실내의 공기는 밀폐상태가 되며 CO₂가 상승하게 된다. 많은 수의 학생들이 재실하고 있는 교실의 경우 CO₂가 급격히 증가하게 된다. 15개의 학교를 대상으로 계절에 따른 CO₂ 농도를 비교한 결과 여름과 겨울 같은 특정 계절의 경우 CO₂ 농도가 다른 계절과 달리 높은 농도를 유지함을 보였다. 특히 여름은 CO₂ 농도가 다른 계절에 비하여 상당히 높게 나타났다. 반면 쾌적한 온도를 유지한 가을의 경우 환기가 활발히 이루어져 CO₂ 농도가 낮게 측정되었으며 일부 학교에서는 1,000 ppm 이하로 농도를 유지하는 곳도 보였다. 가을 중에서도 10월의 경우 비교적 환기가 활발히 이루어져 초등학교는 CO₂ 기준농도와 비슷한 농도를 보였으며, 중학교, 고등학교도 비교적 낮은 농도를 보였다.

창문을 통한 환기가 활발히 이루어진다면 교실의 실내 CO₂ 농도는 개선될 수 있지만 계속해서 창문을 열어두는 것은 외부의 오염된 공기 유입을 막을 수 없어 문제가 된다. 또한, CO₂ 농도제어를 위한 개선방안을 연구한 선행연구에서 환기횟수를 2.3배로 증가시키는 방법, 교실에 재실하는 학생 수를 줄이는 방법 등을 시도하였지만 냉·난방 시설 사용 등 환기에 영향을 주는 요소들로 인하여 CO₂ 농도제어에 적합하지 못하였다.²²⁾ 이처럼, 환기만으로는 교실의 CO₂ 농도를 제어하기에 한계가 있음을 알 수 있다. 이런 문제점을 개선하기 위해서는 외부의 공기를 내부로 순환시키는 공기순환기 및 환풍기 등 다른 대체 시스템으로 관리가 되어야 한다.

본 연구는 측정값의 신뢰도를 위하여 주말 및 공휴일을 포함한 학생들이 재실하지 않는 시간을 제외하였지만, 이동·야외수업과 단축수업 등 학생들이 재실하지 않는 추가적인 요소를 고려하지는 못하여 오분류의 가능성이 있다. 하지만, 6개월이라는 장기간 측정하였고 초·중·고 각 5개의 학급별로 권장

ACH를 제시하였다는 점에서 의미 있는 연구라고 생각한다.

V. 결 론

본 연구에서는 D광역시 15개 학교를 대상으로 CO₂를 측정하였고 물질수지 모델을 적용하여 환기량(ACH)을 산출하였다. 측정된 15개의 교실에서 CO₂ 농도가 학교보건법 기준농도를 모두 초과하였다. 다수의 학교에서 평균농도 2,000 ppm을 초과하였고, 6개월의 기간 동안의 농도가 대략 1,500 ppm을 초과하였다. 초등학교의 평균 ACH는 3.2 ACH 이었고, 중학교는 2.8 ACH, 고등학교에서는 3.1 ACH 이었으나, 모두 환기가 부족한 것으로 나타났다. 또한, 10월에는 비교적 환기가 원활하게 이루어졌음에도 불구하고 부족한 환기를 보였다. 교실의 CO₂ 농도를 효과적으로 관리하기 위해서 보다 적극적인 환기를 시행하여야 하며, 정화되지 않은 외기의 유입을 고려하여 기계식 환기설비나, 외부의 공기를 순환시키는 공기순환기 이용 등과 같은 개선방안이 이루어져야 할 것으로 판단한다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 생활공간환경보건기술사업의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호: 2018001350001).

References

1. Ministry of Environment. A study on indoor air pollution characterization and management. 2002.
2. Yang W, Lee K, Chung M. Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. *Indoor Air*. 2004; 14: 105-111.
3. Landrigan P. Environmental hazards for children in USA. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*. 1998; 11(2): 189-194.
4. Lee S, Chang M. Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*. 2000; 41(1-2): 109-113.
5. Yang W. Time-activity pattern of students and indoor air quality of school. *Korean Institute of Educational Facilities*. 2014; 21(6): 17-22.

6. Korea Ministry of Government Legislation. Enforcement decree of the school health act. 2018.
7. Jeon E. Jang G. Kook C. Evaluation of indoor air quality in urban school. *Korean Journal of Environmental Education*. 1999; 12(2): 73-80.
8. Camilla V. Kati J. Sander T. Kaiser A. Maria A. Raimo M, et al. Ventilation positive pressure intervention effect on indoor air quality in a school building with moisture problems. *Environmental Research and Public Health*. 2018; 15(2): 230.
9. Lim W. Literature review of the effect of the carbon dioxide concentration in classroom air on the students learning performance. *Korean Journal of Environmental Education*. 2015; 28(2): 134-145.
10. Shendell D. Prill R. Fisk W. Apte M. Blake D. Faulkner D. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*. 2004; 14: 333-341.
11. National Institute of Meteorological Sciences. Report of Global Atmosphere Watch. 2018.
12. Lee J. Choi J. Kim H. Determination of body surface area and formulas to estimate body surface area using the alginate method. *Journal of Physiological Anthropology*. 2008; 27(2): 71-82.
13. National Institute of Environmental Research. Study on the Improvement of exposure factors of korean adults on risk assessment. 2018.
14. David A. Alexander B. Carbon Dioxide Levels and Ventilation Rates in Schools. *International Journal of Ventilation*. 2002; 1:1 45-52.
15. Tichenor B, Sparks L., White J., Jackson M. Evaluating sources of indoor air pollution. *Air & Waste Management Association*. 1990; 40: 487-492.
16. Kraenzmer M. Modeling and continuous monitoring of indoor air pollutants for identification of sources and sinks. *Environmental International*. 1999; 25(5): 541-551.
17. Yang W. Characterization of indoor air quality using multiple measurements of nitrogen dioxide. [Seoul]: Seoul National University; 2001.
18. Korea Meteorological Administration. Annual climatological report. 2017.
19. Park Y, Kim Y. A study on the indoor air quality of a high school dance practice room focusing on PM₁₀ and CO₂. *The Korean Journal of Physical Education*. 2019; 58(3): 317-326.
20. Kim S. Investment of Air Change per Hour (ACH) in a Elementary School. *Korean Society for Atmospheric Environment*. 2010; 406.
21. Park J, Ryu H, Heo J, Cho M, Yang W. Estimation of ventilation rates in korean homes using Time-activity patterns and carbon dioxide concentration. *Korean Society of Environmental Health*. 2019; 45(1): 1-8.
22. Kim S, Kim J, Kim J. A study on the CO₂ concentration control in lecture room. Korea Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems. 2012; 97-100.

<저자정보>

최영태(연구원), 허 정(연구원), 박진현(석사후연구원), 김은채(연구원), 류현수(석사후연구원), 김동준(학생), 조만수(교수), 이채관(교수), 이종대(교수), 양원호(교수)