

Research Paper

학교 교실 공기질 관리를 위한 건강영향 기반 실내공기질지수 개발

김도윤* · 권지유* · 이태정* · 박영구** · 조영민*

경희대학교 환경응용과학과*, 강원대학교 지구환경시스템공학과**

Indoor Air Quality Index for School Classrooms Based on Health Effects

Do Yun Kim* · Ji You Kwon* · Tae Jung Lee* · Young Koo Park** · Young Min Jo*

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University*

Department of Earth and Environmental Engineering, Kangwon National University**

요약: 어린 학생들에 대한 HQ (Hazard Quotient) 기반으로 학교교실 실내 공기질 지수 (IAQI-S)를 개발하였다. IAQI-S는 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂를 포함하며, IAQI-S의 기준농도는 지정된 HQ값을 통해 산출하였다. 본 연구에서 개발한 IAQI-S를 이용하여 2017년 11월부터 2020년 12월까지 실시간으로 측정된 전국 46개 학교 123개 학급을 평가해보았다. 종합지수 평가 결과, PM₁₀의 93.1%, PM_{2.5}의 94%가 ' 좋음'과 '보통' 등급에 포함되었다. 8시간 예측 이동 평균을 기반으로 한 IAQI-S는 CAI(Comprehensive Air-quality Index) 및 외국에서 발표되었던 IAQI와 비교하였다. IAQI-S는 CO₂를 포함하며 대기질지수 (CAI)에 비해 더 엄격한 수준으로 구성되어 있음을 알 수 있었다.

주요어: 학교공기질, 실내공기질지수, 미세먼지, 이산화탄소

Abstract: An indoor air quality index for school classrooms based on the Hazard Quotient (HQ) was developed in this study. The current index (IAQI-S) covered PM₁₀, PM_{2.5}, and CO₂, and breakpoints of IAQI-S were calculated using each HQ value. IAQI-S was applied to the real-time data obtained from 123 classrooms of 46 schools during November 2017 to December 2020. As a result of the comprehensive assessment, 93.1% of PM₁₀ and 94% of PM_{2.5} belonged to 'good' and 'moderate', respectively. The IAQI-S based on an 8-hour predicted moving average was compared with Comprehensive Air-quality Index (CAI) and with the IAQI of a foreign reference. The IAQI-S includes CO₂ and consists of more stringent levels comparing to outdoor index (CAI).

Keywords: School Air Quality, Indoor Air quality Index, PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂

First Author: Do Yun Kim, Tel: +82-31-201-2860, E-mail: kdy8938@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0001-6029-5267

Corresponding Author: Young Min Jo, Tel: +82-31-201-2485, E-mail: ymjo@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-2882-0321

Co-Authors: Ji You Kwon, Tel: +82-31-201-2860, E-mail: yerim9704@naver.com, ORCID: 0000-0001-6887-2911

Tae Jung Lee, Tel: +82-31-201-2466, E-mail: envi@khu.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4175-770X

Young Koo Park, Tel: +82-33-570-6575, E-mail: ygpark@kangwon.ac.kr, ORCID: 0000-0002-4956-3352

Received: 8 November, 2021. Revised: 30 November, 2021. Accepted: 3 December, 2021.

I. 서론

국립환경과학원에서 발표한 '한국 어린이의 노출계수 핸드북'에 따르면 18세 이하의 성장기 어린이들이 하루 중 평균 22시간 이상을 실내에서 활동하는 것으로 조사되었으며, 학교는 5시간 이상 소비하여 하루 중 집(11시간 이상)을 제외하고 가장 오래 머무는 공간으로 나타났다. 어린 학생들은 성인보다 몸무게에 따른 호흡률이 높고, 신장이 낮아 공기보다 무거운 오염물질에 노출될 위험이 더 높다(Landrigan 1998; Choe et al, 2020).

12세 이하 어린이의 경우, 발암물질로 규정되어 있는 미세먼지에 장기간 노출되면 폐와 폐기능 성장에 영향을 유발하는 것으로 알려져 있다(Sacks et al, 2011; Brauer et al, 2012; Yoo et al, 2017; Yang 2019). 실내 이산화탄소(CO₂)는 농도가 증가함에 따라 졸음, 두통, 현기증 등을 유발하며, 학습수행능력과 집중력 저하를 유발한다(Myhrvold et al, 1996; Kim et al, 2007).

환경부에서는 통합대기환경지수(CAI, Comprehensive Air-quality Index)를 개발하여 에어코리아(AirKorea)를 통해 실시간으로 대기질을 국민들이 인식하기 쉽게 지수화하여 전달하고 있다(<https://www.airkorea.or.kr>). 그러나 실내공기질의 경우 실내 공간에 적합한 지수체계가 없으므로 재실자들이나 관리자들에게 공기질의 정도를 간편하게 전달하는 도구가 없는 실정이다. 그러나 최근 Lee et al, (2018)과 Jeon et al, (2020)은 각각 실내 정원용 지수와 시내버스용 지수를 제시하기도 하였다. 다중이용시설에 대한 실내환경기준은 한국과 대만, 싱가포르 등 일부 국가에서만 지정하여 관리하고 있으며(Yang et al, 2011; Yang et al, 2019), 세계보건기구(WHO, World Health Organization)에서는 2005년 발표한 대기환경기준(AQG, Air Quality Guideline)을 실내 환경기준과 동일하게 지정하고 있다(WHO, 2010).

한편, 위해성 평가를 바탕으로 실내공기질지수 개발 연구가 진행된 적이 있는데, 대만에서 Wang et al, (2008)은 오염물질별 발암성, 비발암성 평가를 통해 계산된 Cancer risk와 HQ값을 이용하여 설정한

실내공기질지수를 제시하였다. 발암성 평가를 위해서는 미국 환경청(EPA, Environmental Protection Agency)의 IRIS (Integrated Risk Information System)에서 제공하는 Unit risk factor (URF)가 필요하다(Wang et al., 2008; Kim et al., 2010). 그러나 미세먼지는 ion, carbon, metal 등 여러 성분들로 구성되어 있고, 실내와 실외 발생원에 따라 나타나는 성분 차이가 크다(Heo, 2021). 이로 인해 EPA에서는 PM₁₀과 PM_{2.5}에 대한 URF를 제공하지 않고 있으며, Wang et al, (2008)은 위험성 지수(HQ, Hazard Quotient) 계산을 통해 미세먼지에 대한 비발암성 평가를 실시하였다.

따라서 본 연구에서는 기존에 사용 중인 대기질지수를 참고하여 위험성 지수(HQ, Hazard Quotient)를 기반으로 건강 영향에 초점을 맞춰 학교 교실에 대한 실내공기질지수(IAQI-S, Indoor Air Quality Index-School)를 개발하여 현장관리 지침서를 작성할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다. 또한, 지수 등급별 건강 영향을 제시하여 학교 내 학생들을 비롯한 재실자와 관리자들이 실내공기질 수준을 신속하게 판단하고, 대처할 수 있도록 하였다.

II. 연구방법

1. 학교 실내공기질지수 개발

본 연구에서 사용한 위험성 지수(HQ)는 오염물질에 대한 잠재적 노출과 건강 영향이 예상되지 않는 수준의 상대적인 비율로서 HQ가 1 이하이면 유해한 건강 영향이 무시될 수 있는 것으로 간주할 수 있다(EPA, 2005). Wang et al, (2008)과 Kim et al, (2010)은 식 (1)의 HQ 계산식을 사용하였는데, 기존 계산과정은 오염물질 농도(C_A)를 등급별 기준농도(breakpoint)로 대입하고 호흡률, 몸무게, 노출빈도 등 노출계수(Exposure factor)를 대입하여 최종적으로 HQ를 산출한다. 그러나 본 연구에서는 지정된 HQ를 지정하고나서, 시설이용자의 노출계수를 대입하여 최종적으로 C_A를 산출하는 역계산법을 시도하였다. 이때, 오염물질에 대한 노출량이 많은 경우를

포함하기 위해 HQ 계산에 필요한 노출계수를 worst case로 설정하여 계산하였다. 최종적으로 산출되는 C_A 는 노출되는 오염물질 농도이므로 IAQI-S의 등급별 기준농도로서 사용하였다. 즉, 오염물질별 특정 농도에 노출될 경우, 그에 대응하는 등급이 산출될 수 있도록 설정하였다.

$$HQ = \frac{C_A \times \frac{CET \times EF \times ED}{BW \times AT}}{\frac{RfC \times IR_s}{BW_s}} \quad (1)$$

식 (1)에서 HQ는 위험성 지수이고, C_A 는 노출되는 오염물질 농도 (mg/m^3)이다. RfC는 Reference Concentration으로서 본 연구에서는 학교보건법 공기질 등의 유지 및 관리기준(PM_{10} $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, CO_2 1,000 ppm)을 적용하였다. IRs (Standard Inhalation Rate)와 BWs (Standard Body Weight)는 표준 호흡량과 표준 몸무게로 각각 $20 \text{ m}^3/\text{day}$, 70 kg 으로 정의하고 있다(US EPA 2011; Du et al. 2014). 아래 인자들은 모두 노출계수로서 본 연구에서는 2019년 국립환경과학원에서 발표한 '한국 어린이의 노출계수 핸드북'을 참고하여 대입하였다. IR (Inhalation Rate)은 호흡률(m^3/day), BW (Body weight)는 몸무게, ET (Exposure Time)은 노출시간(hr/day), EF (Exposure Frequency)는 노출빈도(day/yr), ED (Exposure Durations)는 노출기간(yr), AT (Averaging Time)는 노출기간(ED)과 365일을 곱한 수치이며 노출을 포함하는 전체기간(day)이다(Kim et al., 2010).

2. 개발지수의 현장적용

본 연구를 통하여 개발한 지수를 실제 학교에 적용하여 개발지수를 평가하기 위하여 국내 초등학교 40개교, 중학교 4개교, 고등학교 2개교를 대상으로 2017년 11월부터 2020년 12월까지 방학을 제외한 기간동안 교실에서 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$, CO_2 농도를 측정하였다. PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 는 측정범위 $0 \sim 1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 광산란법 측정기(1.109/11-A/11-D, Grimm, Germany)를 통해 실시간으로 측정하였으며, CO_2 농도는 측정범위 $1 \sim 5,000 \text{ ppm}$ 의 NDIR (Non-Dispersive Infrared) 방식의 센서(TR-76Ui, T&D Co., Japan)를 이용하였다. 초등학교의 경우 07:30부터 15:30까지, 중·고등학교는 07:30부터 18:00 이전까지 각 대상학교마다 1개 또는 2개 교실을 선정하여 광산란법 측정기와 CO_2 측정기를 동시 가동하였다. 학생들이 교실에서 생활하는 동안 실제로 노출되는 공기질을 측정하기 위하여 측정 시 창문 개폐, 출입문 개폐, 청정기 가동 등의 교실 상태나 학생들의 활동에 대한 통제를 실시하지 않았다. 현장에서의 미세먼지와 CO_2 측정에 관한 상세한 방법은 이전 논문에 기술하였다(Heo et al. 2021).

III. 결과 및 고찰

1. 학교공기질 현황 고찰

본 연구에서는 대부분의 학교에서 학생들이 재실하고 있는 시간이 8시간 내외임을 고려하여 학교에 설치된 측정기로부터 1분 간격으로 측정된 PM_{10} ,

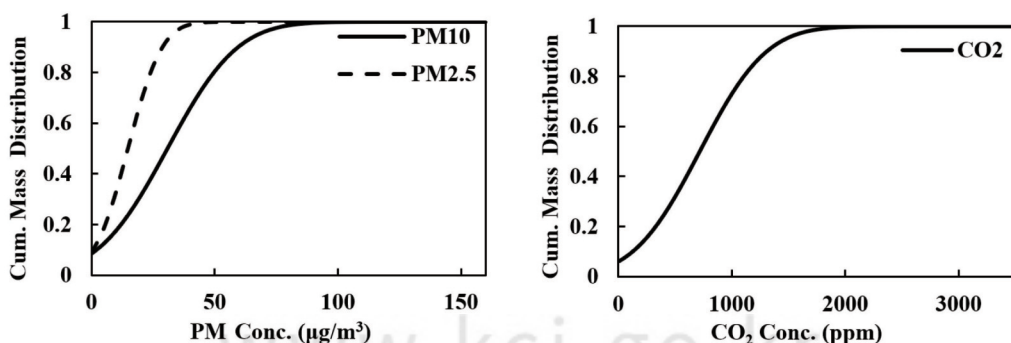


Figure 1. Cumulative concentration distributions of average PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ (left), CO_2 (right) in classrooms.

Table 2. Concentrations (C_A) obtained by inverse calculation based on Equation (1)

	Good (50)	Moderate (100)	Caution (200)	Unhealthy (300)	Very Unhealthy (400)	Hazardous (500)
PM ₁₀ (mg/m ³)	0.022	0.075	0.154	0.234	0.313	0.393
PM _{2.5} (mg/m ³)	0.010	0.035	0.072	0.109	0.146	0.183
CO ₂ (ppm)	294	1,000	2,059	3,118	4,177	5,236

‘보통(Moderate)’, ‘위험(Hazardous)’ 등급 수준으로 설정하였다. 또한, ‘좋음(Good)’, ‘보통(Moderate)’, ‘위험(Hazardous)’ 등급은 통합대기환경지수(CAI)와 EPA AQI를 참고하여 각각 지수값 50, 100, 500으로 설정하였고, 최종적으로 등급의 상승에 따른 HQ값의 완만한 증가를 위해 ‘0.340’와 ‘0.100’의 차이를 1.5배, 3배, 4.5배하여 각각 ‘0.700’, ‘1.060’, ‘1.421’을 ‘주의(Caution)’, ‘나쁨(Unhealthy)’, ‘매우 나쁨(Very Unhealthy)’ 등급 수준으로 설정하였고, 각각 지수값 200, 300, 400으로 설정하였다. 따라서 식 (1)을 통해 각 지정된 HQ값(‘0.100’, ‘0.340’, ‘0.700’, ‘1.060’, ‘1.421’, ‘1.781’)을 대입하여 오염물질의 농도(C_A)를 산출하였다(Table 2).

3. 학교실내공기질지수(IAQI-S) 설정

Table 2에 나타난 오염물질의 농도를 바탕으로 기준에 제시되었던 지수들을 참고하여 학교실내공기질지수(IAQI-S, Indoor Air Quality Index - School)

를 설정하였으며, 개발된 지수와 등급별 건강 영향은 Table 3에 요약하였다. 통합대기환경지수(CAI)와 EPA AQI 등을 참고하여 0부터 500까지의 지수값이 높을수록 해당 공기질은 건강에 유해한 영향을 유발하는 것으로 설정하였다. 또한, 학교보건법 공기질 등의 유지 및 관리기준(PM₁₀ 75 µg/m³, PM_{2.5} 35 µg/m³, CO₂ 1,000 ppm)을 ‘보통(Moderate)’ 등급의 기준농도로 설정하여 유지 및 관리기준의 준수 여부를 학교 실내 거주자 및 관리자가 모니터링할 수 있도록 설정하였다.

각 등급에 대한 건강 영향은 IAQI-S의 기준농도를 식 (1)에 대입하여 도출된 HQ값을 바탕으로 참고 문헌 및 지수에서 제시하는 동일한 수준의 정의들을 재구성하였다. ‘좋음(Good)’ 등급과 ‘보통(Moderate)’ 등급은 건강에 대한 심각한 영향이 없는 수준; ‘주의(Caution)’ 등급은 건강 영향이 나타날 가능성이 적고, 대기오염물질에 민감한 경우 건강 영향이 나타날 수 있는 수준; ‘나쁨(Unhealthy)’ 등급은 건강 영

Table 3. Summary of indoor air quality index for school classrooms (IAQI-S) proposed in this study.

Index Category	Index Value	PM ₁₀ (µg/m ³) (8hr-avg)	PM _{2.5} (µg/m ³) (8hr-avg)	CO ₂ (ppm) (8hr-avg)	Composite index description
Good (Blue)	0-50	0-20	0-10	300-700	A level with no health effects.
Moderate (Green)	51-100	21-75	11-35	701-1,000	A level with no health effects.
Caution (Yellow)	101-200	76-150	36-70	1,001-2,000	A level at which health effects are unlikely to occur, and at which health effects may occur if sensitive to air pollutants.
Unhealthy (Orange)	201-300	151-220	71-100	2,001-3,000	A level at which health effects may be present and, if sensitive to air pollutants, a high probability of health effects.
Very Unhealthy (Red)	301-400	221-300	101-140	3,000-4,000	A level at which a health effect is likely to occur and at which an adverse health effect would be caused if sensitive to an air pollutant.
Hazardous (Purple)	401-500	301-380	141-180	4,001-5,000	A level that would cause adverse health effects and, if sensitive to air pollutants, a level at which acute exposure could cause serious effects.

향이 나타날 수 있고, 대기오염물질에 민감한 경우 건강 영향이 나타날 가능성이 높은 수준; ‘매우 나쁨 (Very Unhealthy)’ 등급은 건강 영향이 나타날 가능성이 높은 수준으로 대기오염물질에 민감한 경우 유해한 건강 영향이 유발되는 수준; ‘위험(Hazardous)’ 등급은 유해한 건강 영향이 유발되는 수준으로 대기오염물질에 민감한 경우 급성노출 시 심각한 영향이 유발될 수 있는 수준으로 설정하였다.

$$I_P = \frac{I_{HI} - I_{LO}}{BP_{HI} - BP_{LO}} \times (C_P - BP_{LO}) + I_{LO} \quad (4)$$

지수 계산식은 식 (4)의 선형보간법을 이용하였으며, 통합대기환경지수와 US EPA의 AQI를 비롯해 대부분의 지수에서 사용하고 있다. 여기서 I_P 는 대상 오염물질의 대기지수 점수, C_P 는 대상오염물질의 대기중 농도 BP_{HI} 와 BP_{LO} 는 각각 대상 오염물질의 오염도 해당 구간에 대한 최고와 최저 오염도, I_{HI} 와 I_{LO} 는 각각 BP_{HI} 와 BP_{LO} 에 해당하는 지수값을 의미한다

(<https://www.airkorea.or.kr>).

1) PM₁₀ 기준농도 및 설정근거

PM₁₀의 기준농도와 설정근거를 Table 4에 설명하였다. ‘좋음(Good)’ 등급의 기준농도는 ‘WHO 연평균 권고기준(AQG, Air Quality Guideline)’과 같은 수준(20 µg/m³)으로 설정하였으며, 이는 폐암 사망률이 증가하는 최저 수준에 해당한다(WHO 2005). ‘보통(Moderate)’ 등급의 기준농도는 ‘학교보건법 공기질 등의 유지 및 관리기준’에서 지정하고 있는 수준(75 µg/m³)으로 설정하였고, ‘주의(Caution)’ 등급은 체육관 및 강당에 적용하는 ‘학교보건법 공기질 등의 유지 및 관리기준’과 같은 농도(150 µg/m³)로 설정하였다. ‘매우 나쁨(Very Unhealthy)’ 등급의 기준농도는 ‘미세먼지 경보’가 발령되는 수준(300 µg/m³)으로 설정하였다. ‘나쁨(Unhealthy)’과 ‘위험(Hazardous)’ 등급은 오염물질 농도 계산 결과(Table 2)보다 약간 낮은 수준으로 기준농도를 설정하였다.

Table 4. References for breakpoints of PM₁₀

Index Category	Index Value	PM ₁₀ (µg/m ³) (8hr-avg)	Reference
Good	0-50	0-20	WHO (2005) Saad et al. (2017) IAQMG ^a (2019) Jeon et al. (2020)
Moderate	51-100	21-75	UK AQI - Moderate (2011) Zhu and Li (2017) School Health Law in Korea (2021) Indoor Air Quality Management Act in Korea (2021)
Caution	101-200	76-150	SIAQG ^b (1996) US EPA (2006) CAI - Unhealthy (2006) Wang et al. (2008) DOSH ^c (2010) Saad et al. (2017) Zhu and Li (2017) US EPA (2020) School Health Law in Korea (2021) Air Environment Conservation Act in Korea (2021)
Unhealthy	201-300	151-220	-
Very Unhealthy	301-400	221-300	Air Environment Conservation Act in Korea (2021)
Hazardous	401-500	301-380	-

^aIndoor Air Quality Management Group in Hong Kong.

^bSingapore Indoor Air Quality Guideline.

^cDepartment of Occupational Safety and Health in Malaysia.

Table 5. References for breakpoints of PM_{2.5}

Index Category	Index Value	PM _{2.5} (µg/m ³) (8hr-avg)	Reference
Good	0-50	0-10	WHO (2005) Wang et al. (2008) Jeon et al. (2020)
Moderate	51-100	11-35	WHO (2005) US EPA (2006) CAI - Moderate (2006) EPA AQI - Moderate (2011) UK AQI - Low (2011) Lee et al. (2018) Jeon et al. (2020) School Health Law in Korea (2021) Indoor Air Quality Management Act in Korea (2021)
Caution	101-200	36-70	-
Unhealthy	201-300	71-100	-
Very Unhealthy	301-400	101-140	-
Hazardous	401-500	141-180	-

2) PM_{2.5} 기준농도 및 설정근거

PM_{2.5}의 기준농도와 설정근거는 Table 5에 요약하였다. ‘좋음(Good)’ 등급의 기준농도는 PM₁₀과 같이 WHO의 ‘연평균 권고기준(AQG)’과 같은 수준(10 µg/m³)으로 설정하였고, ‘보통(Moderate)’ 등급은 WHO의 ‘연평균 잠정목표-2(Interim target-2)’, ‘학교보건법 공기질 등의 유지 및 관리기준’과 같은 수준(35 µg/m³)으로 설정하였다. ‘주의(Caution)’, ‘나쁨(Unhealthy)’, ‘매우 나쁨(Very Unhealthy)’, ‘위험(Hazardous)’ 등급의 기준농도는 오염물질 농도 계산 결과(Table 2)보다 약간 낮은 수준으로 설정하였다.

3) CO₂ 기준농도 및 설정근거

일반적인 실내공간에서 발견되는 이산화탄소의 농도범위가 인체에 치명적으로 작용하지는 않지만 학교의 경우, 학생들의 집중력 약화에 기여한다. 또한, 선행 연구(Shendell et al. 2004; Choe et al. 2020)에 따르면 이산화탄소 농도가 1,000 ppm 증가 시 학생들의 결석률이 10~20% 증가하였다. 학교 공간에 있어서 집중력 약화, 결석률 증가 등은 중요한 부분임을 고려하여 이산화탄소를 본 연구의 공기질지표 산정에 활용하였다.

CO₂의 기준농도와 설정근거는 Table 6에 요약하

였다. ‘좋음(Good)’ 등급의 기준농도는 연평균 이산화탄소 배경농도(420.4 ppm)를 고려하였는데(MA 2020), 개발지수를 적용하였을 때 8시간 예측이동평균을 이용하여 배경농도보다 낮은 농도가 측정될 수 있으므로 300 ppm에서 시작하여 예민한 사람이 불편함을 느낄 수 있는 수준(700 ppm)까지로 설정하였다(Zhu & Li 2017). ‘보통(Moderate)’ 등급의 기준농도는 ‘학교보건법 공기질 등의 유지 및 관리기준’과 동일한 수준(1,000 ppm)을 적용하였다. ‘주의(Caution)’ 등급의 기준농도는 Lahrz et al. (2008)과 Twardella et al. (2012)에서 제시한 ‘hygienically unacceptable’ 수준으로 설정하였다. 해당 수준은 집중력 저하, 주의력 상실, 심박수 증가 및 약간의 메스꺼움도 나타날 수 있는 수준으로 알려져 있다(<https://www.dhs.wisconsin.gov>). ‘나쁨(Unhealthy)’ 등급과 ‘매우 나쁨(Very Unhealthy)’ 등급의 기준농도는 오염물질 농도 계산 결과(Table 2)보다 약간 낮은 수준으로 설정하였다. ‘위험(Hazardous)’ 등급은 미국의 국립직업안전위생연구소(NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health), 직업안전건강관리청(OSHA, Occupational Safety and Health Administration) 등에서 제시하는 8시간 기준의 일일작업환경에서의 시간가중평균 노출허용기준

Table 6. References for breakpoints of CO₂

Index Category	Index Value	CO ₂ (ppm) (8hr-avg)	Reference
Good	0-50	300-700	Zhu and Li (2017) Lee et al. (2018) Jeon et al. (2020) Wu et al. (2021)
Moderate	51-100	701-1,000	SIAQG ^b (1996) DOSH ^c (2010) Zhu and Li (2017) Lee et al. (2018) IAQMG ^a (2019) US EPA (2020) Jeon et al. (2020) School Health Law in Korea (2021) Indoor air quality maintenance standards in Korea (2021)
Caution	101-200	1,001-2,000	Lahrz et al. (2008) Twardella et al. (2012) Zhu and Li (2017)
Unhealthy	201-300	2,001-3,000	–
Very Unhealthy	301-400	3,000-4,000	–
Hazardous	401-500	4,001-5,000	HSE (2005) Wang et al. (2008) Saad et al. (2017) NIOSH (2019) OSHA (2019) ACGIH (2019)

^aIndoor Air Quality Management Group in Hong Kong.

^bSingapore Indoor Air Quality Guideline.

^cDepartment of Occupational Safety and Health in Malaysia.

(TWA, Time Weight Average)으로서 독성 또는 산소 결핍이 발생할 수 있는 수준을 적용하였다 (https://www.dhs.wisconsin.gov).

4. IAQI-S 종합지수 설정

종합지수는 PM₁₀과 PM_{2.5}, CO₂를 통합한 지수로서 오염물질들의 개별 등급을 확인하지 않더라도 현재의 공기질을 단일 수치로 쉽게 파악할 수 있도록 설정하였다. IAQI-S의 종합지수는 0부터 500까지의 점수를 6개 등급으로 구분하였고, Table 3의 등급과 건강 영향을 따른다. 종합지수의 계산식은 통합대기환경지수(CAI)의 통합지수 계산식을 참고하였고, 추가적으로 오염물질의 등급에 따른 가산점을 더해 계산한다. 계산과정은 PM₁₀과 PM_{2.5}, CO₂의 개별 지수값

중 최대값(IAQI-S(C)₁)에 '주의(Caution)' 이상 등급의 개수에 따른 가산점(EP₁)을 더한다(식 5, 식 6). EP₁을 더한 IAQI-S(C)₂에 개별 오염물질의 지수 등급에 따른 가산점(EP₂)을 더해 종합지수(IAQI-S(Composite index))를 계산한다(식 7).

$$IAQI - S(C)_1 = \text{Maximum of } (PM_{10}, PM_{2.5} \text{ and } CO_2) \quad (5)$$

$$IAQI - S(C)_2 = IAQI - S(C)_1 + EP_1 \quad (6)$$

$$IAQI - S(C) = IAQI - S(C)_2 + EP_2 \quad (7)$$

여기서 EP₁은 '주의(Caution)' 이상의 등급이 2개일 경우 50점, 3개일 경우 75점이다. EP₂는 '주의(Caution)', '나쁨(Unhealthy)', '매우 나쁨(Very Unhealthy)', '위험(Hazardous)' 등급 각각 5, 10, 20, 40을 각 등급의 개수(n)와 곱한 값이다.

5. 학교 실내공기질지수(AQI-S)를 이용한 교실 공기질평가

학교 실내공기질지수(AQI-S)를 검증하기 위해 46개 학교에서 측정된 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂의 8시간 예측이동평균 농도 데이터에 개별지수 및 종합지수를 적용하였으며, 대상오염물질과 종합지수의 지수값의 통계와 데이터 분포를 각각 Table 7과 Table 8에 요약하였다.

학교에서 측정된 데이터를 식 (4)에 대입하여 계산한 결과, 대상오염물질의 지수값 중 PM₁₀은 평균 55.3 점, PM_{2.5}는 평균 54.5점, CO₂는 평균 52.7점으로 나타나 모두 '보통(Moderate)' 등급에 해당하였다. 식 (5)와 식 (6), 식 (7)을 통해 종합지수를 계산한 결과, 평균 79.4점으로 '보통(Moderate)' 등급에 해당하였다. 최대값의 경우 PM₁₀은 '나쁨(Unhealthy)', PM_{2.5}는 '주의(Caution)', CO₂와 종합지수는 '매우 나쁨(Very Unhealthy)' 등급에 해당하였다. 특히 종합지수가 '위험(Hazardous)' 등급에 근접한 것을 통해 해

당 등급의 필요성을 확인하였다.

데이터 분포 분석 결과, Table 8에서 합계(Total)는 PM₁₀과 PM_{2.5}, CO₂의 등급별 데이터 수를 합산하여 백분율로 나타낸 것으로서, '좋음(Good)' 등급부터 '매우 나쁨(Very Unhealthy)' 등급까지 전체 데이터가 48.1%, 41.6%, 9.4%, 0.8%, 0.1%로 분포되었다. 반면, 종합지수(Composite Index)의 경우, '좋음(Good)' 등급부터 '매우 나쁨(Very Unhealthy)' 등급까지 27.6%, 47.8%, 21.5%, 2.8%, 0.3%로 분포되었다. 합계와 종합지수를 비교했을 때, 종합지수는 오염물질별 지수값 중 최대값에 가산점을 부여하여 합계보다 '좋음(Good)' 등급에서 10.5%가 감소하였고, '보통(Moderate)' 등급에서 6.2%, '주의(Caution)' 등급에서 12.1%, '나쁨(Unhealthy)' 등급에서 2%, '매우 나쁨(Very Unhealthy)' 등급에서 0.2%가 증가함으로써 혼합된 개별 오염물질들의 건강 영향을 반영하였다.

Table 7. Index value distribution of IAQI-S

IAQI-S	Mean	Min	Median	Max	S. D
PM ₁₀	55.3	2.6	55.9	224.5	27.4
PM _{2.5}	54.5	4.4	55.4	179.1	29.4
CO ₂	52.7	0.0	27.3	379.9	56.0
Composite Index	79.4	12.0	65.3	399.9	50.9

Table 8. Classification of indoor air quality grade in school classrooms by IAQI-S

IAQI-S		Good	Moderate	Caution	Unhealthy	Very Unhealthy	Hazardous
PM ₁₀	n	41,760	63,007	5,291	131	0	0
	%	37.9%	57.2%	4.8%	0.1%	0.0%	0.0%
PM _{2.5}	n	43,788	59,827	6,574	0	0	0
	%	39.7%	54.3%	6.0%	0.0%	0.0%	0.0%
CO ₂	n	73,583	14,540	19,289	2,526	251	0
	%	66.8%	13.2%	17.5%	2.3%	0.2%	0.0%
Total*	n	159,131	137,374	31,154	2,657	251	0
	%	48.1%	41.6%	9.4%	0.8%	0.1%	0.0%
Composite Index	n	30,429	52,642	23,716	3,123	279	0
	%	27.6%	47.8%	21.5%	2.8%	0.3%	0.0%

*Summed data for each grade of PM₁₀, PM_{2.5} and CO₂.

IV. 결론

본 연구에서는 학교 내 공기질을 재실자 및 관리자가 쉽게 파악하고 대처할 수 있도록 건강영향을 기반으로 실내공기질지수(IAQI-S)를 개발하였고, 46개 학교의 교실에서 실제 학생들이 노출되는 실내공기질을 측정하여 IAQI-S와 통합대기환경지수(CAI)에 적용하여 평가 및 비교하였다. IAQI-S는 위해성 평가 방법 중 비발암성 평가 방법인 위험성 지수(HQ) 계산을 통해 개발되었다. 지정된 HQ값으로부터 계산된 오염물질 농도를 바탕으로 문헌 고찰을 통해 기준농도(breakpoints)를 산정하였으며, 산정된 기준농도로부터 계산된 HQ값을 바탕으로 문헌 고찰을 통해 IAQI-S의 각 등급의 의미를 설정하였다. 본 연구에서 개발한 IAQI-S를 적용한 결과, 전체 데이터($n=110,189$) 중 PM_{10} 은 95.1%, $PM_{2.5}$ 는 94.0%, CO_2 는 80.0%가 '좋음(Good)'과 '보통(Moderate)' 등급에 포함되었으며, 이를 통해 학교보건법 유지 및 관리기준(PM_{10} 75 $\mu g/m^3$, $PM_{2.5}$ 35 $\mu g/m^3$, CO_2 1,000 ppm)의 준수 여부를 쉽게 파악할 수 있었다.

또한, 학교 내 공기질의 구간별 수준을 단일 지수값으로 나타내어 재실자들이 현재 공기질을 쉽게 파악할 수 있도록 종합지수를 개발하였다. 개발된 종합지수는 대상오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2) 중 가장 건강에 유해한 영향을 유발하는 오염물질의 지수값을 대표 지수값으로 가산점을 더해 계산하였다. 종합지수를 적용한 결과, 전체 데이터 중 75.4%가 '좋음(Good)'과 '보통(Moderate)' 등급에 포함되었다. 이는 개별 오염물질을 모두 더한 합계(Total)의 데이터 분포보다 낮은 수치로서 최대 지수값에 가산점을 더해 실내공기질의 혼합된 오염물질의 건강영향을 반영하였다.

사사

이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M3E7A1113077).

References

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2019. TLVs® and BEIs®. 19. Available at https://riesgosygestion.com/wp-content/uploads/2019/06/tlv2019_entire-book.pdf.
- Brauer M, Amann M, Burnett R, Cohen A, Dentener F, Ezzati M, Henderson S, Krzyzanowski M, Martin R, Van Dingenen R, Van Donkelaar A, Thurston G. 2012. Exposure assessment for estimation of the global burden of disease attributable to outdoor air pollution. *Environmental Science Technology* 46: 652-660. <https://doi.org/10.1021/es2025752>.
- Choe Y, Heo J, Park J, Kim E, Ryu H, Kim D, Cho M, Lee C, Lee J, Yang W. 2020. Evaluation of Carbon Dioxide Concentrations and Ventilation Rates in Elementary, Middle, and High Schools. *Journal of Environmental Health Sciences* 46(3): 344-352. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2020.46.3.344>. [Korean Literature]
- Department of Occupational Safety and Health in Malaysia (DOSH). 2010. Industry code of practice on indoor air quality. 11. Available at <https://www.dosh.gov.my/index.php/legislation/codes-of-practice/chemical-management/594-02-industry-code-of-practice-on-indoor-air-quality-2010/file>.
- Du Z, Mo J, Zhang Y. 2014. Risk assessment of population inhalation exposure to volatile organic compounds and carbonyls in urban China. *Environment International* 73: 33-45. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.06.014>.
- Health and Safety Executive in U.K. (HSE). 2005. EH40 Workplace exposure limits. 11. Available at <https://www.hse.gov.uk/>

- pubns/books/eh40.htm.
- Heo S, Kwon J, Lee S, Kim D, Lee T, Jo Y. 2021. Spatial Concentration of Carbon Components in Indoor PM_{2.5} of School Classrooms in a Large City of Korea. *Applied Sciences* 11(6): 7328. <https://doi.org/10.3390/app11167328>.
- Institute of Environmental Epidemiology Ministry of the Environment in Singapore (SIAQG). 1996. Guidelines for Good Indoor Air Quality in Office Premises. 40-44. Available at https://www.bca.gov.sg/greenmark/others/NEA_Office_IAQ_Guidelines.pdf.
- Jeon BI, Kwak MJ, Kang SH, Kim JC, Yun HJ, Kim HH. 2020. Development of IAQ Index for Indoor Air Quality in City Buses. *Korean Society of Environmental Health* 46(4): 444-456. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2020.46.4.444>. [Korean Literature]
- Kim HH, Lim YW, Lee CS, Kim TH, Park JH, Jeon JM, Shin DC, Yang JY. 2011. Health risk assessment of VOCs in the activities space of children: Focused on elementary-schools and academies. *Journal of the Korean Society for Indoor Environment* 8(4): 263-274. <https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/94987>. [Korean Literature]
- Kim HH, Yang JY, Lee CS, Kim SD, Yang SH, Shin DC, Lim YW. 2010. Health Risk and Exposure Assessment of Aldehydes in Children's Facilities. *Journal of the Korean Society for Indoor Environment* 7(2): 89-100. <https://ir.ymlib.yonsei.ac.kr/handle/22282913/102241>. [Korean Literature]
- Lahrz T, Bischof W, Sagunski H. 2008. Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsbl - Gesundheitsforsch - Gesundheitsschutz*, 51; 1358-1369. <https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2>.
- Landrigan P. 1998. Environmental hazards for children in USA. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 11(2): 189-194.
- Lee JH, An SM, Kwak MJ, Kim KJ, Kim HH. 2018. Development of an IAQ Index for Indoor Garden Based IoT Applications for Residents' Health Management. *Korean Society of Environmental Health* 44(5): 421-432. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2018.44.5.421>. [Korean Literature]
- Lim WC. 2015. Literature Review of the Effect of the Carbon Dioxide Concentration in Classroom Air on the Students' Learning Performance. *Journal of Environmental Education* 28(2): 134-145. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE06387039>. [Korean Literature]
- Meteorological Agency. 2020. Change in annual CO₂ concentration. Available at https://www.index.go.kr/potal/stts/idxMain/selectPoSttsIdxMainPrint.do?idx_cd=1399&board_cd=INDX_001.
- Ministry of Education. 2020. Education Basic Statistics. Available at <https://kess.kedi.re.kr/post/6706365?#>. [Korean Literature]
- Ministry of Health and Welfare (MHW). 2020. Daycare Center Operation Guide. Available at http://www.mohw.go.kr/upload/content_data/2020/guide_08_03.pdf.
- Myhrvold AN, Olsen E, Lauridsen O. 1996. Indoor performance in schools - pupils' health and performance in regard to CO₂ concentrations. *Indoor Air*, 4; 369-374. Available at http://www.aretas.ca/sites/default/files/imce_images/Indoor%20Environment%20in%20Schools%20%E2%80%

- 93%20Pupils%20Health%20%26%20Performance%20in%20Regard%20to%20CO2%20Concentrations.pdf.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2019. Korean Exposure Factors Handbook for Children. Available at <https://ecolibrary.me.go.kr/nier/#/search/detail/5686029>.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). 2019. Permissible Exposure Limits - Annotated Tables. Available at <https://www.osha.gov/annotated-pels>.
- Oh GS, Jung GJ, Im YB. 2010. Impact of Indoor CO2 Concentration on Work Performance. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design* 30(1): 385-386. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01830039>. [Korean Literature]
- Pukelsheim F. 1994. The three sigma rule. *The American Statistician* 48(2): 88-91.
- Saad SM, Shakaff AYM, Saad ARM, Yusof AM, Andrew AM, Zakaria A, Adom AH. 2017. Development of Indoor Environmental Index, Air Quality Index and Thermal Comfort Index. 11th Asian Conference on Chemical Sensors, AIP Conference Proceedings, 1808; 1-11. <https://doi.org/10.1063/?1.4975276>.
- Sacks JD, Stanek LW, Luben TJ, Johns DO, Buckley BJ, Brown JS, Ross M. 2011. Particulate matter - induced health effects: who is susceptible?. *Environmental Health Perspective* 119: 446-454. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002255>.
- Shendell D, Prill R, Fisk W, Apte M, Blake D, Faulkner D. 2004. Associations between classroom CO2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 14(5): 333-341. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00251.x>.
- Son SW, Gil MS, Moon YS. 2016. Exponential Moving Average and 3-Sigma Techniques for Anomaly Detection of Log Data. *The Korean Institute of Information Scientists and Engineers* 6: 181-183. <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07018150>. [Korean Literature]
- The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). 2019. NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. Available at <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0103.html>.
- Twardella D, Matzen W, Lahrz T, Burghardt R, Spiegel H, Hendrowarsito L, Frenzel A, Fromme H. 2012. Effect of classroom air quality on students' concentration: results of a cluster-randomized cross-over experimental study. *Indoor Air* 22: 378-387. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00774.x>.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). 2005. Human Health Risk Assessment Protocol, Chapter 7: Characterizing Risk and Hazard. 7-6. Available at <https://archive.epa.gov/epawaste/hazard/tsd/td/web/pdf/05hhrap7.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). 2011. Exposure Factors Handbook: 2011 Edition, Chapter 1. 3-4. Available at https://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=522996.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). 2006. 40 CFR Part 50 - National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule. 8-11. Available at <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2019-title40-vol2/pdf/CFR-2019-title40-vol2-part50.pdf>.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA). 2020. Facilities Manual Volume 2: Architecture

- and Engineering Guidelines, Chapter 7. 6-7. Available at https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/ae_guidelines_508.pdf.
- Wang H, Tseng C, Hsieh T. 2008. Developing an indoor air quality index system based on the health risk assessment. *Indoor Air*, 17-22. Available at <https://www.isiaq.org/docs/papers/749.pdf>.
- World Health Organization (WHO). 2010. WHO Guidelines for indoor air quality - selected pollutants. 4. Available at https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf.
- World Health Organization (WHO). 2005. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide - Global update 2005. Available at <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/107823/9789289021920-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Wu J, Weng J, Xia B, Zhao Y, Song Q. 2021. The Synergistic Effect of PM2.5 and CO2 Concentrations on Occupant Satisfaction and Work Productivity in a Meeting Room. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18: 4109. Available at <https://doi.org/10.3390/ijerph18084109>.
- Yang WH. 2019. Changes in Air Pollutant Concentrations Due to Climate Change and the Health Effect of Exposure to Particulate Matter. *Health and Welfare Forum, Korea Institute for Health and Social Affairs*, 269; 20-31. Available at <http://repository.kihasa.re.kr/handle/201002/31750>. [Korean Literature]
- Yang WH, Lee KY, Yoon CS, Yu SD, Park KH, Choi WH. 2011. Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 21: 310-316. <https://doi.org/10.1038/jes.2010.23>.
- Yoo HJ, Kim JK, Shin JW, Kim YJ, Min SG, Jegal DS, Bang KI, Lee SM. 2017. Health Vulnerability Assessment for PM10 due to Climate Change in Incheon. *Journal of Environmental Health Sciences* 43(3): 240-246. <https://doi.org/10.5668/JEHS.2017.43.3.240>. [Korean Literature]
- Zhu C, Li N. 2017. Study on indoor air quality evaluation index based on comfort evaluation experiment. *Procedia Engineering* 205: 2246-2253. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.066>.