

학교 실내공기질 관리 현황 및 제어 동향 분석

Status of Indoor Air Quality Management and Control Trends of School IAQ

조지현(Ji Hyeon Cho)¹, 박보랑(Bo Rang Park)¹, 최은지(Eun Ji Choi)¹,
최영재(Young Jae Choi)¹, 조혜운(Hye Un Cho)¹, 문진우(Jin Woo Moon)^{1†}

¹ 중앙대학교 건축학부

School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, Seoul, South Korea

Abstract The purpose of this study is to identify the standards and control strategies of the school IAQ to develop an optimal control method. Domestic criteria of Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5}) and CO₂ concentrations were 1.5, 2.33 and 1.43 times higher than those of U.S. EPA criteria, respectively. In addition, the minimum ventilation rate was just 85% of the U.S. standard. Control strategies of IAQ and ventilation are presented in the international standards. Whereas the domestic standard only refers to the installation methods as well as performance of the ventilation and air purification facilities. To identify the trends of school IAQ and ventilation control technologies, analysis of the existing researches were conducted. As a result, most studies focused on CO₂ reduction and energy savings. For the studies of IAQ and ventilation control, the control targets were mostly CO₂ while not considering PM simultaneously. Thus, an optimal control method for school IAQ is essential which reflects comprehensive IAQ pollutants and features of school including occupancy and space information.

Key words School(학교), Indoor Air Quality(실내공기질), Indoor Air Quality Control(실내공기질 제어)

† Corresponding author, E-mail: gilerbert73@cau.ac.kr

1. 서론

현대인들의 실내거주 비율은 약 90%로 증가하는 추세이며 재실자 건강과 직결된 실내공기질에 대한 관심이 증가하고 있다^{(1), (2)}. 실내공기 오염물질은 성인보다 취약계층인 어린이·청소년에게 더 큰 피해를 끼치는 것으로 조사되었다^{(3), (4)}. 이에 따라 학교 및 교육시설의 실내공기질 관리 필요성 증가로 교육부와 환경부는 '학교보건법', '실내공기질 관리법' 등의 법규시행 및 관리기준을 단계적으로 강화하고 있다⁽²⁾.

교육부는 학교 고농도 미세먼지 대책발표를 통해 환기설비 및 공기정화장치 설치 의무화를 시행하였으나 대부분 공기청정기 설치로 그쳤으며 학교시설 특성이 반영된 설비 및 제어 관련 기준은 배포되지 않은 실정이다^{(5), (6), (7)}. 또한, 교육부는 고농도 오염물질 발생 시 외기도입차단과 공기청정기 가동을 권고하고 있지만 밀폐된 공간 내 공기청정기 가동은 미세먼지 저감에 효과가 있을 뿐 실내 이산화탄소(CO₂) 농도는 2,000 ppm 이상으로 증가할 수 있다^{(5), (8)}. 이에 따라 학교 특성에 적합한 재실자 스케줄, 재실 밀도, 다양한 기후 요인 및 오염원 등이 종합적으로 고려된 학교시설 실내공기질 최적 제어법 개발이 필요한 실정이다. 따라서, 본 논문의 목적은 국내외 관련 법규·기준 및 선행연구 분석을 통해 제어 수준·전략 및 연구동향을 파악하는 것으로 추후 개발예정인 실내공기질 최적 제어법을 위한 기초자료로써 의의가 있다.

2. 국내외 학교시설 실내공기질 관리 기준 및 제어 전략

국내 학교보건법은 실내공기질 오염물질을 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ 등 17가지로 정의하고 있으며 특히 미세먼지 및 CO₂ 농도는 실내공기질 오염의 주된 지표로써 활용되고 있다. PM₁₀ 농도 기준은 75 µg/m³로 이는

2018년도 기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 강화된 수치이다⁽⁹⁾. $\text{PM}_{2.5}$ 는 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 제시하고 있으며 CO_2 농도는 실내 기준농도 1,000 ppm 이하로 제한하고 있다.

세계 각국은 세계보건기구(World Health Organization, WHO)의 기준을 토대로 학교시설 실내공기질 기준을 제시하고 있다. 미국 연방환경보호국(United States Environmental Protection Agency, EPA)은 교실 내 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 및 CO_2 기준농도를 각각 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 700 ppm 이하로 규정하고 있다⁽¹⁰⁾. 유럽연합은 회원국 중 12국만 PM_{10} 기준이 있고, CO_2 는 각 국가마다 독자적 기준을 제시하고 있으며 대표적으로 독일은 1,000 ppm 초과 시 환기를 권고하고 있다⁽¹¹⁾, ⁽¹²⁾. 영국은 실내 PM_{10} 와 $\text{PM}_{2.5}$ 를 각각 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 제한하며 CO_2 의 경우 호흡선 기준 1,500 ppm 이하를 제시하고 있다⁽¹³⁾. 일본은 학교시설 PM_{10} 과 CO_2 농도를 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1,500 ppm 이하로 제한하고 있으며 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 기준농도는 수립되지 않았다⁽¹⁴⁾.

교실 내 1인당 환기량의 경우 국내는 21.6 m^3/hr 이상을 만족하도록 권고하고 있다⁽⁹⁾. 미국은 최소 15 cfm을 제시하고 있으며 이는 국내에 비해 엄격한 기준이다⁽¹⁰⁾. 유럽냉난방공조학회(Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, REHVA)는 교실 면적 50 m^2 , 학생 수 25명 조건으로 각국의 최소환기량을 1/s로 환산하여 제공하며 핀란드, 영국, 헝가리, 독일, 네덜란드가 상위 4개국으로 200 1/s 이상의 최소환기량을 기준으로 명시하고 있다⁽¹¹⁾, ⁽¹⁵⁾. 일본은 CO_2 농도가 1,500 ppm 이상일 때 시간당 2.1회에서 4.6회까지 환기하도록 명시하고 있다⁽¹⁴⁾. 국내외 학교 실내공기질 기준의 자세한 내용은 Table 1과 같다.

국내외 학교시설의 실내공기질 제어기준의 경우 국내는 현재 제어전략 및 권고사항이 명시되어 있지 않고 공기정화장치 및 환기설비 설치 시 고려사항만 제시하고 있다⁽⁷⁾, ⁽⁸⁾. 반면 국외의 대표적 사례로써 독일은 환기 유형을 자연환기, 기계환기, 하이브리드 환기로 분류하고 유형별 적합한 제어전략을 제시하며 실내환경 및 재실자 감지 센서 기반의 자동제어, 수요제어환기(Demand-Control Ventilation, DCV), 환경변화를 반영한 통합적 피드백 제어를 권고하고 있다⁽¹²⁾.

Table 1 Standards for PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ and CO_2 concentrations of school facilities

Countries	Pollutants			Ventilation Rate
	PM_{10}	$\text{PM}_{2.5}$	CO_2	
S. Korea	$\leq 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq 1,000 \text{ ppm}$	21.6 $\text{m}^3/\text{hr}\cdot\text{person}$
USA	$\leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq 700 \text{ ppm}$	15 cfm/person (when crowded 20 cfm)
UK	$\leq 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\leq 1,500 \text{ ppm}$	8 l/s·person
EU	Vary from each country (Only 12 countries have)		$\leq 1,000 \text{ ppm}$ (Germany)	7.27 l/s·person (mean value from 16 countries)
Japan	$\leq 0.15 \text{ mg}/\text{m}^3$	-	$\leq 1,500 \text{ ppm}$	2.1 - 4.6 ach

3. 국내외 학교시설 실내공기질 제어 연구동향

학교시설 실내공기질 제어에 대한 연구동향 및 기술 적용 파악을 위하여 '학교', '실내공기질', '환기제어'를 키워드로 최근 10년간(2010~2019년)의 국내 선행연구를 조사하였으며 총 19건의 연구논문이 검색되었다. 이 중 실내공기질 분석 및 에너지 효율 관련 연구가 10건, 환기제어 관련 연구는 4건으로 조사되었다. 국외의 경우 총 47건의 연구논문이 조사되었으며 이중 실내공기질 분석 및 에너지 효율이 25건, 환기제어는 4건을 차지하였다. 국내외 모두 환기제어에 대한 연구는 미비하였으며 실내공기질 분석 및 에너지 효율에 관한 연구가 주를 이루고 있었다. 국내외 환기제어 관련 연구의 내용은 같다.

Kim et al. (2012)은 외기부하를 반영한 CO_2 -DCV 제어의 에너지 소비 절감효과를 밝혔다⁽¹⁶⁾. 제어 유형을 On/Off System, Fuzzy Logic으로 나누어 평가하였으나 모두 CO_2 기준을 충족하지 못하였으며 이는 초점이 에너지소비절감에 맞추어진 것에서 기인 되었다고 판단된다. Kim et al. (2016)은 교실 내 전열교환형 환기시스템 적용에 따른 나이트 퍼지 제어의 최적 가동시간에 대한 연구를 실시하였다⁽¹⁷⁾. 그 결과 바이패스 모드를 2시간으로 설정했을 때 최적 에너지사용량을 나타냈다. 해당 연구는 학교 환기 시스템의 최적 운영모드를 제시하는데에 의의가 있으나 실내공기질과는 무관하다. Choi et al. (2018)은 시뮬레이션을 통해

교실 내 CO₂ 농도 최소화를 위한 창호개폐 시스템에 대한 최적 제어알고리즘을 제시하였다⁽¹⁸⁾. 창호 시스템은 CO₂ 농도를 기반으로 개폐 상태가 결정되나 실내외 온도차가 큰 경우 작동되지 않았으며 분석결과는 명시되지 않아 알고리즘 적용에 따른 성능은 판단할 수 없었다.

A. Cablé et al. (2016)은 DCV 기법을 Constant-CO₂ Control과 Temperature-CO₂ Control로 나누어 CO₂ 저감 및 온열쾌적감 개선 효과를 비교하였으며 Temperature-CO₂ Control을 통한 CO₂ 저감 및 재실자 쾌적감 증진 효과가 우수함을 보였다⁽¹⁹⁾. 해당 연구는 실내환경변수를 고려한 DCV를 제안하였으나 미세먼지와 각종 재실자 정보에 대한 고려가 미흡하다는 한계가 있다. F. Stazi et al. (2017)은 실내공기질 및 온열쾌적감 최적화를 위한 창문개폐 자동제어 시스템을 개발하였다⁽²⁰⁾. 적용 결과 CO₂ 농도 감소와 재실자 온열쾌적감을 충족하였으나 재실자의 활동과 실외환경에 따른 미세먼지 발생은 고려되지 않았다. R. Duarte et al. (2018)은 칼만 필터(Kalman Filter)를 통해 자연환기 시 필요 환기량 산정법을 제시하였다⁽²¹⁾. 추정 환기량의 불확실성은 호흡에 따른 CO₂ 발생량으로 결정하였으며 적용 결과 기준 환기량을 만족하였으나 실내외 고농도 미세먼지 발생에 대한 고려는 반영되지 않았다. 국내외 선행연구 내용은 다음 Table 2와 같다.

Table 2 Ventilation Control Standard & Research Trends

Country	Researcher	Contents	Limits
Domestic	Choi et al. (2018)	• Window automatic open&close control system for CO ₂ minimizing	• Not operating when in&out temperature difference is great
	Kim et al. (2016)	• Heat Recovery Ventilation and Night-Fuzzy Control to reduce cooling energy consumption	• Only focusing on optimal control operation period for energy saving
	Kim et al. (2012)	• CO ₂ -DCV considering outdoor air load for energy saving	• Both Fuzzy & On/Off not effective to IAQ improvement
International	R. Duarte et al. (2018)	• Ventilation rate estimation using Kalman Filter for reducing uncertainty of breathing	• Not considering any other pollutants and their uncertainty
	F. Stazi et al. (2017)	• Window automatic open&close control for CO ₂ reduction and thermal comfort improvement	• No consideration for occupants, indoor and outdoor environment changes, particulate matter
	A. Cablé et al. (2016)	• Evaluating the effect of Temp.-CO ₂ DCV for CO ₂ reduction and indoor thermal comfort	• Not considering any other indoor air pollutant

4. 결론

본 연구는 학교시설 실내공기질의 최적 제어법 개발을 위한 기초연구로써 국내외 법규, 기준, 관련 기술 연구동향을 조사 및 분석하였다. 분석 결과는 다음과 같다.

첫째, 국내외 법규와 기준은 다양한 실내공기질 오염원 기준농도와 교실 내 1인당 최소환기량을 제시하고 있다. 국내 학교시설 실내공기질의 PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ 기준농도는 미국의 EPA 기준보다 각각 1.5배, 2.33배, 1.43배 높은 것으로 나타났으며 1인당 최소환기량 또한 미국 기준의 85%로 미흡했다.

둘째, 국외의 경우 센싱 기반 자동제어, DCV, 피드백 제어 등 환기시스템 제어전략이 기준에 포함되어 있으나 국내 기준의 경우 환기설비, 공기정화장치 설치 및 성능 조건만을 언급하고 있다.

셋째, 학교 실내공기질 제어 전략에 대한 연구는 국내외 모두 미비한 것으로 나타났다. 대부분의 연구는 센싱 기반 제어, CO₂ 저감, 에너지 소비 절감효과, 온열쾌적감에 초점을 맞추고 있으며, 특히 실내공기질 제어 시에 CO₂와 미세먼지는 동시에 고려되어야 할 변수임에도 불구하고 두 변수 모두를 고려한 연구 사례는 조사되지 않았다.

분석 내용을 종합한 결과 학교 실내공기질 최적 제어법 개발의 필요성을 확인하였다. 추후 최적 제어법 개발 시 다양한 실내공기질 오염원 발생에 대한 종합적인 분석을 위해 IoT 모니터링 시스템 기반의 빅데이터가 구축되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 공간적 특성, 재실자 정보에 대한 실시간 대처가 가능하도록 실내공기질 예측모델이 포함된 학교 실내공기질 최적 제어법 개발이 필요할 것으로 사료된다.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2019M3E7A1113095).

References

1. WJ Fisk, 2002, "How IEQ affects health, productivity", ASHARE Journal, 44(5), pp. 56-60
2. 송창근, 2016, 미세먼지 현황 및 대책, 한국방재학회지, Vol. 66, pp. 44-49
3. 양원호, 2019, 기후변화에 따른 대기오염물질 농도 변화 및 미세먼지 노출에 의한 건강 영향, 269, pp.20-31
4. 양원호, 2014, 학생들의 시간활동 양상 및 학교 실내공기질. 교육시설, 21(6), pp. 17-22
5. 성백진, 2018, 기계환기설비 전국 학교 보급률 33%에 그쳐, 월간공조냉동저널
<http://www.hvacrj.co.kr/news/articleView.html?idxno=10012>
6. 교육부, 2018, 학교 고농도 미세먼지 대책 발표
7. 교육부, 2019, 학교 공기정화장치 설치 및 유지관리 업무 안내서(안), pp. 1-17
8. 교육부, 2019, 학교 공기정화장치 설치 및 관리 지침
9. 교육부, 2019, 학교보건법 시행규칙(교육부령 제185호, 시행 2019.07.03.)
10. EPA, 2009, Indoor Air Quality Tools for Schools Reference Guide
11. World Health Organization Regional Office for Europe, 2015, School Environment: Policies and current status
12. FIZ Karlsruhe, 2015, BINE Information Service Themeninfo I/2015 Ventilation in schools
13. Education & Skills Funding Agency, 2018, Building Bulletin 101 Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools, Version 1
14. 文部科學省, 2018, 學校環境衛生管理マニュアル「學校環境衛生基準」の理論と實踐
15. REHVA, 2012, Deliverable 5 Summary of European ventilation standards, their implementation and ventilation systems used in European building
16. 김태호, 유성연, 한규현, 윤홍익, 강형철, 2012, 외기부하와 연동한 환기장치의 제어에 관한 연구, 대한기계학회 춘추학술대회, pp. 847-852
17. 김수연, 원정관, 김재형, 송두삼, 2016, 전열교환형 환기시스템을 이용한 학교건물의 나이트 퍼지 적용 효과 분석. 설비공학논문집, 28(11), pp. 421-427
18. 최윤영, 이현수, 2018, 중등학교 교실의 이산화탄소 관리를 위한 지능형 창호개폐 작동 프로세스, 한국교육시설학회논문집, 25(4) pp. 19-30
19. Axel Cablé et al., 2016, Comparison of Two Ventilation Control Strategies in the First Passive House Standard Norwegian School, International Journal of Ventilation, 14, pp. 371-382
20. Francesca Stazi et al., 2017, Indoor air quality and thermal comfort optimization in classrooms developing and automatic system for windows opening and closing, Energy and Buildings, 137, pp. 732-746
21. Rogério Duarte et al, 2018, Estimating ventilation rates in a window-aired room using Kalman filtering and considering uncertain measurements of occupancy and CO₂ concentration, Building and Environment, 143, pp. 691-700