



학교시설 최적 실내공기질 제공을 위한 환기시스템 및 제어 방법 분석

Analysis of Ventilation Systems and Control Methods for Optimal Indoor Air Quality in School Buildings

최영재* · 박보람** · 송용우*** · 최은지**** · 문진우*****

Young Jae Choi* · Bo Rang Park** · Yong Woo Song*** · Eun Ji Choi**** · Jin Woo Moon*****

* Main author, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (chlyoungwo@gmail.com)

** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (pbr_1123@naver.com)

*** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (yongma0930@naver.com)

**** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (ejchl77@gmail.com)

***** Corresponding author, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang Univ., South Korea (gilerbert73@cau.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: Recently, as the interest in particulate matter increased, standards for indoor air quality (IAQ) in schools have been strengthened. Among indoor air pollutants, the main issue for school IAQ is carbon dioxide (CO₂) and particulate matter (PM). To satisfy CO₂ and PM concentration standard, the mechanical ventilation is essential. However, most systems are operating without the optimal control methods which result in inefficient system operation. Thus, the purpose of this study is to analyze ventilation regulations, system and control methods to establish the theoretical basis for developing the optimal control algorithm. **Method:** Regulations and researches of school ventilation were compared by cases to identify deficiencies of ventilation systems. **Result:** Domestic regulations were insufficient for properly operating ventilation systems and for managing the indoor air quality compared to other countries. Most researches focused on reducing the energy consumption of the system and CO₂ concentration. Therefore, the optimal control algorithm for school ventilation system is required which considers various indoor air pollutant elements and supplies comfortable indoor air quality conditions.

KEYWORD

학교 실내공기질
환기시스템
최적 제어알고리즘

School Indoor Air Quality
Ventilation System
Optimal Control Algorithm

ACCEPTANCE INFO

Received Mar. 20, 2020

Final revision received Apr. 7, 2020

Accepted Apr. 13, 2020

© 2020 KIEAE Journal

1. 서론

세계보건기구(World Health Organization, WHO) 산하 국제암연구소(IARC)에서 2013년 미세먼지를 1군 발암물질로 분류하였다. 이후 미세먼지에 대한 관심이 세계적으로 증가하였으며 이에 따라 국내에서도 2018년 교육부가 ‘학교 고농도 미세먼지 대책’을 발표하여 학교 실내공기질에 대한 관리기준을 강화하였다[1]. 국내 교육시설 관련 부처 및 지방단체에서도 학교 실내공기질 관리를 위해 다양한 기준을 마련하고 있으며, 공기정화장치 설치 확대 및 실내 체육시설 확충 등 미세먼지 관리 정책을 확대하고 있다[2].

교육부의 ‘학교보건법’에서는 실내공기질 오염원으로 미세먼지, 이산화탄소, 폼알데하이드, 라돈 등 총 17개의 항목을 정의하고 있으며, 각 오염원은 최소 농도 기준을 만족하도록 권고되고 있다[3]. 실내공기질 관리 방법은 자연환기, 환기시설을 통한 환기, 청소를 통한 오염원 제거, 공기정화설비 가동, 스쿨존 관리, 실내공기질 교육에 대한 내용을 포함한다[4]. 오염원의 경우 공장, 도로 등의 주변 시설, 건축자재, 교육용품 등이 포함되며 건축자재, 교육용품 등은 안전 등급을 받은 제품을 사용하여 오염원을 감소시킬 수 있다. 그러나 주변 시설의 경우 오염원 감소가 어려운 실정이며 이에 실내 오염물질을 희석, 배출하기 위한 환기계획이 필수적이다.

교육부의 기준에 따르면 신축학교는 기계환기설비를 의무적으로 설치하여야 하며 기존학교 또한 여건을 고려하여 기계환기설비를 우선으로 고려하되 부득이한 경우 공기청정기를 설치하여야 한다[2]. 경기도교육청의 2020년 3월 보도자료에 의하면 도내 모든 학교 교실에 공기정화장치 설치를 완료하였다. 총 68,975개의 학급에 설치를 실시하였으나 이중 기계환기설비 설치는 14,483(21.0%) 건에 그쳤으며 아직 유지·관리 매뉴얼은 배포되지 않은 실정이다[5]. 기존에 일반적으로 설치되는 공기청정기는 공기정화의 역할만 수행할 뿐 환기의 기능은 수행하지 못하며 창문을 닫고 일반 공기청정기만 가동했을 경우 오히려 환기량 감소로 인해 교실 내 이산화탄소 농도가 2,300 ppm 까지 증가하는 등의 부작용이 발생할 수 있다[6]. J.H. Park(2020)에 의하면 학교 실내의 미세먼지 농도 중 실내 미세먼지 농도가 약 72% 가량 높았으며 공기청정기의 사용은 미세먼지 농도를 35% 감소시켰다. PM₁₀보다 PM_{2.5}의 감소폭이 더 컸으며 잔여 미세먼지의 경우 바닥청소를 실시하는 대안을 제시하였다[7]. 이는 단순한 공기청정기 설치만으로는 CO₂와 미세먼지를 동시에 고려하기 어려움을 의미하며 시스템 제어 측면에서의 접근 필요성을 시사한다. 그러나 학교 미세먼지에 대한 전 세계 연구 동향은 미세먼지 농도 측정 및 화학적 특징 분석, 오염원과의 관계 등 주로 모니터링에 기반한 분석에 집중되어 있으며 실질적인 감소방안에 대한 내용은 미비한 실정이다. 학교 시설의 특성상 재실자 활동은 정해진 스케줄에 맞춰 이루어지나 학년 및 학급별 활동 내용이 다르고 각 실별

용도가 상이해 실내 쾌적도 측면에서는 실별 개별제어가 유리하다. 그러나 현재 학교 시설에서의 실내공기질 관리를 위한 개별제어 및 최적제어에 대한 연구 또한 시의성 대비 현저히 부족한 실정이다.

국내 건축물에 적용된 대부분의 변풍량 공조시스템은 최대 부하 계산법에 의해 설계되어 비효율적으로 운영되고 있다[8]. 현재 적용되는 수요제어환기(Demand Control Ventilation, DCV) 시스템은 재실자 스케줄, 재실자 감지 센서, CO₂ 농도 측정 센서 등을 기반으로 환기 제어를 실시하나 실내공기질 관리보다는 에너지 절약 측면에 초점이 맞추어져 있으며 학교 시설에 적용된 사례는 미비한 실정이다[9]. 또한 김성은 (2020)의 학교 미세먼지 및 CO₂ 농도 분석에 따르면 학생 성비(性比) 차이에 의해서도 실내공기질에 차이가 생기며 그 외에 인체적 요인 등 학교 시설 특성이 반영된 다양한 변수를 고려하여 환기제어를 실시하여야 한다[10].

따라서 본 연구의 목적은 학교 시설의 실내공기질 개선을 위한 최적 제어알고리즘 개발을 위한 기초연구로써 법규·기준 및 선행연구를 조사하여 제어알고리즘 개발 가능성 및 적용성을 확인하는데 있다. 기존 학교에 적용되고 있는 환기시스템의 종류·기준·제어 방법 및 선행연구 분석을 실시하고, 반영 가능한 기술 및 권고기준을 수집하여 기존 학교 시설 환기 제어시스템의 한계를 파악하고 실내공기질 최적 제어알고리즘 개발 방향성 및 가능성을 확인하고자 한다.

2. 학교 시설 환기시스템

2.1. 환기시스템 유형

환기 방식은 자연환기와 강제환기로 구분할 수 있다. 학교 건축은 외피에서 개방 가능한 창문의 면적이 넓으며 이로 인해 자연환기를 실시하기 용이하다. 하지만 실내공기질의 관점에서는 외기가 직접 도입되는 것이기 때문에 외부 미세먼지 등의 오염물질이 도입될 수 있으며 재실자의 활동에 따라 실내공기질이 악화되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 학교 환기시스템은 반드시 자연환기와 강제환기가 병행되어야 한다[11].

자연환기는 문·창의 개폐 및 공간풍에 의한 환기를, 강제환기는 기계환기설비에 의한 환기를 의미한다. 그 외에 병행환기(하이브리드환기) 방식이 있으며 이는 자연환기와 기계환기를 병행하여 운영하는 시스템이다. 신축학교는 ‘학교보건법’에 따라 2006년 1월 이후로 환기시스템 설치가 필수적이다[12]. 기계환기설비는 필터 청소 등의 관리가 지속적으로 이루어져야 하므로 원칙적으로는 자연환기 방식을 채택하게 되어 있으나, 소음, 오염원 위치 등을 고려하여 기계환기설비를 병행하여 운용해야 한다. 환기 방식의 분류 및 특징은 Table 1.과 같다.

기계환기는 설치 유형에 따라 3가지로 구분된다. 기계환기 1종은 공급구와 배출구에 모두 설비가 설치되어 급배기 모두를 강제적으로 실시한다. 2종, 3종은 각각 급기구, 배기구에 설비가 설치된다. 2종은 건물의 기밀성능에 따라 실내 습도가 벽체 내부에 영향을 줄 위험성이 있으며, 3종은 실외 습도 및 공기질에 영향을 받기 쉽다[13]. 병행환기는 자연·기계환기가 일체화되어 구성된 시스템으로써 실

내외 환경 모니터링을 통해 외기도입이 유리할 시 자연환기를 실시하고 그 외에는 기계환기로 자동 전환한다. 에너지를 효율적으로 사용할 수 있으며 재실자 만족도가 높다는 장점이 있으나 초기 투자 비용이 상대적으로 높다[13].

학교에 설치되는 기계환기설비는 설치 위치에 따라 바닥설치형, 벽 또는 창문 설치형, 천장설치형으로 분류되며 고성능 기계환기설비의 경우 열교환장치를 포함한다. 열교환장치는 배기부에 설치되며 급기와 배기의 열교환을 통해 냉방·난방부하를 감소시켜 에너지 절감효과를 얻을 수 있다. 환기설비에 필터를 장착함으로써 실외 미세먼지 및 오염물질에 대한 대응이 가능하나 고성능 필터 사용 시 환기 성능이 감소할 수 있으며 저성능 필터의 경우 정확의 기능이 부족할 수 있다[11].

Table 1. Types of Ventilation

Type		Feature
Natural Ventilation		<ul style="list-style-type: none"> • Ventilation method by temperature and pressure difference • Easy to control air flow and suitable for most of building types
Mechanical Ventilation	Type 1	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical ventilation for both supply exhaust • Easy to control air flow • Most reliable ventilation
	Type 2	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical ventilation for supply and natural ventilation for exhaust • Depending on the airtight performance, indoor humidity may penetrate inside the structure
	Type 3	<ul style="list-style-type: none"> • Mechanical ventilation for exhaust and natural ventilation for supply • Advantageous for high-density airtight
Hybrid Ventilation		<ul style="list-style-type: none"> • Take priority over natural ventilation and operate mechanical ventilation if necessary • natural and mechanical ventilation operate as integrated system • Energy efficiency • High initial installation cost

2.2. 국내외 학교 환기설비 기준 및 법규

어린이 및 노약자가 일반 성인에 비해 대기 오염물질에 취약한 만큼 각국의 교육시설에 대한 환기 및 환기설비 관련 법규는 엄격하게 관리되고 있다. 국내외 환기설비 관련 기준은 다음과 같다.

1) 국내

국내의 경우 학교시설 환기설비 관련 기준 및 법규는 교육부, 한국교육환경보호원, 환경부에서 제공한다. 교육부는 학교보건법, 공기정화장치의 설치 및 유지관리 내용을 다루고 있으며 한국교육환경보호원, 환경부는 공기정화장치 설치 및 운영, 교육시설에 대한 실내공기질 관리 매뉴얼을 제시하고 있다.

공기질 등의 유지 관리 기준(제3조제1항제3호의2관련)은 Table 2.와 같이 오염물질의 항목별 기준과 개교 후 기간 및 대상 시설에 따른 관리기준을 제시한다. 오염물질 항목은 10가지가 있으나 일반적으로 평가 지표가 되는 실내 미세먼지 농도 기준은 PM₁₀ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

이하, PM_{2.5} 35 µg/m³ 이하이며 이산화탄소의 경우 1,000 ppm 이하 (기계환기가 주 환기요소일 경우 1,500 ppm 이하)를 유지하도록 권장하고 있다[12]. 환기 조절기준은 1인당 환기량이 시간당 21.6m³ 이상을 만족시켜야 하며 환기설비의 구조 및 설치기준은 충분한 용량의 설비 선택을 통해 교사 안에서의 공기 질이 유지기준을 충족할 수 있도록 하여야 한다[14]. 또한 신축 및 기존 건물은 에너지 소비량, 1인당 환기량 총족 용량, 소음, 인중 등의 환기설비 기준을 고려하여 환기설비 및 공기정화장치의 설치를 실시해야한다[12].

Table 2. Standard for School Ventilation, South Korea

Source		Standard	Applied Facilities
Particulate Matter	PM _{2.5}	≤ 35 µg/m ³	For all classroom
	PM ₁₀	≤ 75 µg/m ³	
Carbon Dioxide (CO ₂)	Usual	≤ 1,000 ppm	For all classroom
	Mechanical Vent. (Main)	≤ 1,500 ppm	
Minimum Ventilation Rate		21.6 m ³ /hr per person	For all classroom

2) 국외

국제적으로 통용되는 실내공기질 기준은 정해져있지 않으나 세계보건기구(World Health Organization, WHO)에서는 실내공기질을 실외에 준하는 수준으로 관리하도록 권고하고 있다. 각 국가는 교육시설에 대한 실내공기질의 자체 법규를 제정하고 있으며 미국은 연방환경보호국(United States Environmental Protection Agency, US EPA), 유럽은 유럽냉난방공조학회(Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, REHVA)를 통해 회원국의 환기기준을 통합하여 제시하고 있다. 주요 국가의 환기기준 현황은 다음과 같다.

미국 EPA는 실내공기질 관리 가이드(Indoor Air Quality Tools)를 통해 학교시설의 관리 및 활용 방안에 대한 가이드라인을 제공하며 ASHRAE Standard 62-2001의 Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality에서 환기량 산정 방법 및 실 용도별 최소 환기 권장량 등의 내용을 차용하고 있다. 실 용도별 최소 환기 도입량은 Table 3.과 같다[15].

Table 3. Minimum Ventilation Rate for School, United States

Room Types	Minimum Ventilation Rate per Person (cfm)
Classroom	15
Music Rooms	15
Libraries	15
Auditoriums	15
Spectator Sport Areas	15
Playing Floors	20
Office Space	20
Conference Rooms	20
Smoking Lounges	60
Cafeteria	50
Kitchen (cooking)	15

교실, 음악실, 도서관, 강당, 운동시설의 경우 1인당 최소 환기량은 15 cfm이며 활동량이 많거나 재실자 밀도가 높은 실은 20 cfm으로 제시되고 있다. 실내공기질 오염원은 석면, 라돈, 병충해, 납, 수은, 폴리염화 바이페닐(PCBs), 각종 유해 화학물질, 교통수단으로 정의되고 있으며 실내공기질 개선 방안을 통해 이를 관리하고 있다.

독일은 BINE-Themeninfo I/2015를 통해 교육시설의 환기기준 및 환기설비 운영 가이드라인을 제시한다. CO₂ 농도 1,000 ppm 미만을 권장하며 1,000~2,000 ppm은 적극적 외기 도입을, 2,000 ppm 이상일 시에는 환기를 강화할 수 있는 수단을 도입하도록 한다. 또한 European Standard EN 15251에 따라 신축 학교에서의 1인당 최소 환기량은 30 m³/hr, 기존 학교는 17 m³/hr를 만족시켜야 한다[16].

영국은 BB 101: Ventilation, thermal comfort and indoor air quality를 통해 학교시설의 환기, 열환경, 실내공기질에 대한 전반적인 가이드라인을 제공한다. 모든 재실 공간은 환기에 대한 제어가 가능하여야 하며 만실 기준 1인당 최소 3 l/s, 하루 평균 5 l/s, 재실기간에는 8 l/s의 환기량이 요구된다. 양호실 및 기숙사 등은 8 l/s, 화장실은 최소 6 ACH로 관리된다. 또한 영국 건축물 규제인 Approved Document F (ADF)에 따라 CO₂는 머리 위치에서 측정했을 시 일과 시간 평균이 1,500 ppm을 초과하지 못하도록 규제하고 있다[17].

그 외에 REHVA에서는 국가별 환기 규정, 시설 용도별 환기 요구량, 실내 오염원 농도, 열환경, 음환경 등을 제시하고 있으며 국가별 교실의 최소 환기량은 Fig. 1.과 같다[18]. Fig. 1.은 각 국가별 교실 최소 환기량에 대해 교실 면적 50m², 재실자수 25명을 기준으로 하여 l/s 단위로 통일해 제시한 것이다. 핀란드가 300 l/s으로 가장 엄격한 기준을 제시하고 있었으며 영국, 헝가리, 독일, 네덜란드, 노르웨이, 포르투갈은 200 l/s 이상, 그 외 국가는 100~150 l/s의 최소 환기량을 권장한다[18].

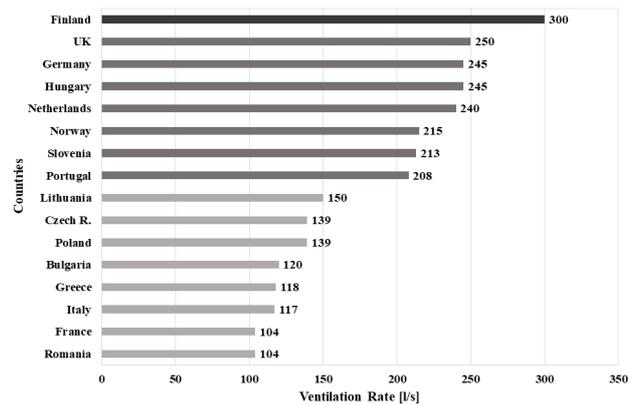


Fig. 1. Minimum Ventilation Rate for Classroom, EU Countries

미국 일반 교실 최소 환기량은 15 cfm으로 국내 기준 변환 값인 12.7 cfm보다 엄격하게 관리되고 있었다. 또한 유럽 기준으로 변환 시 약 150 l/s으로 리투아니아와 동일하였으며 핀란드, 영국, 독일 등의 국가보다는 요구되는 최소 환기량이 적었다. 최소 환기량 수준은 정량적인 비교는 가능하나 각 국가의 상황 및 여건에 따라 오염원의 정의, 환기전략 등이 상이하기 때문에 절대적인 평가를 내릴 수 없다.

국내 환기 기준의 경우 미세먼지와 이산화탄소 감소에 중점을 두고 있으며 각 실에 대한 명확한 기준이 제시되고 있지 않다. 과학실, 주방, 체육관 등 실의 구조 및 용도가 정해져 있는 경우 환기 요구량 산출을 통한 추가적인 기준이 필요할 것으로 사료되며 항시 재실인원이 사용하지 않는 만큼 각 실에 적합한 환기전략이 동반되어야 할 것으로 판단된다.

2.3. 학교 환기시스템 운영 방안

환기설비는 상황에 맞는 제어 및 설비 운영이 병행되지 않으면 비효율적인 에너지 소비를 야기시킨다. 대부분의 환기기준은 설비 설치 시 고려사항, 유지·관리, 운영 방법에 대한 내용을 포함하고 있다.

국내의 경우 학교 환기설비의 운영 방안에 대해서는 구체적으로 제시되고 있지 않으며 설치 시 고려사항 및 공기청정기 설치에 대한 기준이 명시되어 있다. 반면 국외의 경우 환기기준, 설비 운영 및 제어전략에 대한 내용을 통합적으로 제시한다.

대표적으로 독일의 환기 기준은 참고사항으로써 자동제어에 대한 내용을 포함하고 있다[16]. 환기방식은 자연환기와 강제환기로 구분되며 기계환기는 설비 설치 위치에 따라 창문형, 수직형, 벽 부착형, 천장형으로 분류된다. 각 시스템 별 제어 전략은 Table 4.와 같다. 자연환기와 강제환기 모두 센서 기반의 실내외 환경 모니터링을 통해 자동제어를 실시한다. 실내공기질, 재실자 유무 파악 센서가 활용되었으며 교육시설의 특성상 재실자 스케줄을 포함한다. 전열교환 기능이 포함된 경우 열환경, 쾌적도, 에너지 소비량을 함께 고려하며 최적 열환경 제공을 위해 바이패스와 전열교환 환기를 병행한다.

Table 4. Strategies for Ventilation Systems, Germany

System Types	Features
Natural Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> Ventilation via windows Operate according to a schedule or air quality sensors signal Temperature and air quality sensors control the air quality via automatically adjustable windows
Exhaust Air Systems	<ul style="list-style-type: none"> Exhaust air systems controlled by adjustable vent openings or overflow valves Schedule, presence detectors, air quality sensors are required
Centralized Ventilation Systems	<ul style="list-style-type: none"> AHU ventilates several classrooms Rooms are controlled based on air quality sensors, presence detectors and schedule
Under-sill & Sill & Vertical & Wall & Ceiling Units	<ul style="list-style-type: none"> Installed as decentralized, room-based ventilation unit Different according to installed location Automatically controlled by air quality sensors, presence detectors and schedule
Hybrid Ventilation	<ul style="list-style-type: none"> Combination of automatic controlled window and mechanical ventilation system Thermal control is included as well as air quality, presence detectors and schedule

해당 기준은 수요제어환기(DCV)에 대해서도 언급한다. 신선한 공기의 수요를 대상으로 페루프를 형성하여 제어를 실시하며 팬, 루

버, 디퓨저, 모터로 구동되는 외피적 요소를 작동대상으로 한다. 재실자 유무 판단 센서와 이산화탄소 농도 감지 센서를 기반으로 피드백을 실시하며 재실자의 수동 제어를 반영하여 설정값을 변경할 수 있다. 또한 비재실 기간에는 해당 시스템을 비구동모드로 운영 하는 것을 권장하며 스케줄에 따라 재실자 입실 전에 미리 시스템을 가동 시키도록 설정한다. 이 외에도 수동적 제어로 인한 오류를 최소화 하기 위해 건물 자동화 시스템에 대해 언급하고 있으며 과학적 사실에 근거한 센서의 활용 방안 등을 제시하여 자동제어를 적극 권장하고 있다.

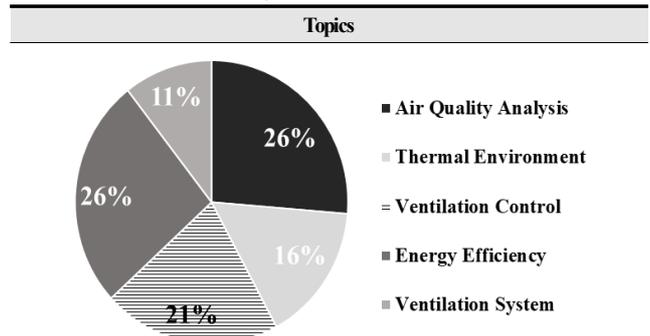
국내 초·중·고등학교는 신설 학교 외에도 기계환기설비가 도입되고 있으나 예산 부족 및 시공의 난해함 등으로 인해 설치비율이 낮은 편이며, 설치 학교 또한 유지관리 매뉴얼의 부재로 인해 다양한 요소를 고려한 제어가 이루어지지 않고 있는 실정이다[5]. 미세먼지 및 이산화탄소의 농도는 교실 내의 위치에 따라 상이하며 재실자의 활동에 따라 변화한다. 따라서 쾌적한 실내공기질 제공을 위해서는 실시간 감지 기반 환기 제어시스템이 필수적이며 운영 방안이 구체적인 가동 원리 및 방법이 포함되어야 할 것으로 사료된다.

3. 학교 시설 환기 제어시스템 선행연구 분석

학교시설의 환기 제어시스템 연구 동향 파악을 위하여 관련 분야의 문헌조사를 실시하였다. 학술연구 정보서비스를 활용하여 최근 10년(2010~2019년)간 국내외 연구 논문에 대한 조사를 실시하였으며 대상 건물은 학교로 한정하였다.

환기 유형과 세부 주제에 따른 국내 연구 동향은 Table 5.와 같다. 조사된 총 논문의 수는 19건이며 연구 주제에 따라 공기질분석, 실내내열환경, 환기 제어법, 환기 및 에너지성능, 환기 시스템 및 설계로 분류하였다. 공기질분석과 환기 및 에너지성능에 관한 연구가 각각 26%로 가장 많았으며 환기 제어법에 대한 연구가 21%로 세 번째로 많은 비율을 나타냈다.

Table 5. Research Trends of School Ventilation, South Korea



Vent. Type	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Natural	0	1	0	0	0	0	0	1	2	1
Mechanical	0	0	3	0	0	1	2	3	4	1

기계환기에 대한 연구는 총 14건으로 자연환기 보다 많은 연구가 진행되고 있었으며 이중 기계환기의 제어와 관련된 연구는 총 3건, 자연환기는 1건으로 자세한 내용은 Table 6.과 같다.

Table 6. Strategies for Ventilation Systems, South Korea

Researcher	Summary
Yoon-Young Choi, et al. (2018)[21]	[Natural Ventilation] • A automatic window opening control algorithm was suggested • Algorithm was operated by sensing indoor CO ₂ concentration • A simulation was conducted to confirm that algorithm operates well
Su-Yeon Kim, et al. (2016)[19] & Jae-Hyung Kim, et al. (2016)[20]	[Mechanical Ventilation] • A night purge system was suggested to reduce cooling load at summer period • A simulation was conducted by changing operation mode of Energy Recovery Ventilator (ERV) • Heat exchange and bypass mode was compared • Bypass mode presented best performance when operating for 2 hours
Tae-Ho Kim, et al. (2012)[18]	[Mechanical Ventilation] • Development of ventilation control method based on outdoor heating & cooling load and air quality • Two control methods were developed by using ON/OFF control and fuzzy control • Both control method saved outdoor heating & cooling load approximately 14% but CO ₂ concentration was over 1,600 ppm

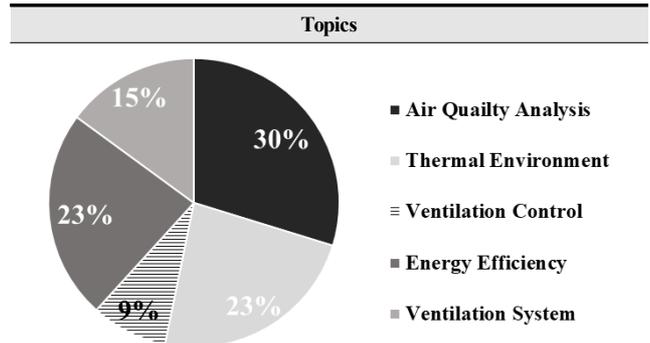
김태호(2012)는 CO₂-DCV 기반의 환기 제어시스템에 외기부하를 추가적으로 고려하여 에너지 절약 방법을 제시하였다[19]. CO₂ 농도 조절을 위하여 두 가지 제어시스템을 개발하였으며 각각 ON/OFF 제어와 Fuzzy 제어를 사용한다. ON/OFF 제어는 외기부하에 따라 실내기준 CO₂ 농도를 조정하는 제어이며 Fuzzy 제어는 CO₂ 농도와 외기부하에 따라 팬의 풍량을 조절한다. 두 제어 방법은 외기부하를 각각 14.3%, 14% 감소시켰으나 기준 CO₂ 대비 높은 CO₂ 농도를 나타냈다. 때문에 고등학교와 같이 밀도가 높은 공간에는 적합하지 않으나 침기에 의한 자연환기 및 쉬는 시간에 의한 환기를 고려하면 적용 가능성이 있을 것으로 판단한다. 해당 연구는 기존 연구와 달리 시간대별 CO₂ 기준 농도를 달리함으로써 실내공기질 기준과 에너지 절감을 달성하려 하였지만 주 목적이 에너지 절감이며 학교 실내공기질 오염원 중 CO₂ 농도만을 고려하였다는 한계점이 있다.

김수연(2016), 김재형(2016)은 동일 연구로 학교건물에 전열교환형 환기시스템(Energy Recovery Ventilation, ERV)을 적용하여 냉방에너지 절감을 위한 나이트 퍼지 제어의 최적 가동 시간에 대한 연구를 실시하였다[20-21]. 각 가동 시간 별로 에어컨 가동, ERV의 전열교환 가동, ERV의 바이패스 모드에 대해 시뮬레이션하여 에너지 절감효과를 비교하였다. 그 결과 바이패스 모드로 2시간을 가동하는 경우가 가장 큰 에너지 절감효과를 나타냈다. 해당 연구는 학교건축에 적용되는 환기시스템의 최적 운영 방안 제시에 의의가 있으나 냉방 에너지 절감에 초점이 맞추어져 있고 실내공기질과는 무관하다.

최윤영(2018)은 창호 자동개폐 시스템에 대한 최적 알고리즘을 제시하였다[22]. 교실 내 최적 실내공기질을 위하여 CO₂ 측정을 기반으로한 알고리즘을 개발하였으며 시뮬레이션을 통해 구동을 확인하였으나 구동 확인을 위한 시뮬레이션이며 실질적인 성능 평가에 대한 결론은 추후 연구로써 언급되어 있다.

국외 연구는 School, Classroom, Ventilation, Control의 키워드를 통해 총 47건의 연구 논문이 검색되었다. 조사 결과 Table 7.의 주제별 분류와 같이 공기질 분석이 30%로 주를 이루고 있었으며 실내 온열환경과 환기 및 에너지 성능에 대한 연구 또한 각각 23%로 활발히 진행되고 있었다. 환기 제어법에 대한 연구는 9%로 가장 낮은 비율을 차지했다. 관련 연구는 지속적으로 증가하는 추세이며 환기 제어법 관련 연구 4건 중 기계환기와 자연환기가 각각 2건으로 조사되었다.

Table 7. Research Trends of School Ventilation, World



Ventilation Type	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Natural	0	1	3	0	2	3	2	4	3	4
Mechanical	0	0	0	0	2	3	2	0	5	8
Hybrid	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0

환기 제어법에 대한 연구 내용은 Table 8.과 같다. A. Cable(2016)은 2가지의 DCV 시스템운영 방법을 비교함으로써 우수한 성능의 제어 방법을 제안한다[23]. 두 시스템 모두 CO₂ 농도를 800 ppm 이하로 유지하기 위해 가동된다. 기존 시스템은 단순히 환기량을 변경시켜 실내공기질을 유지하며 제안 시스템은 입력 변수로 CO₂ 농도와 온도를 함께 고려하여 제어를 실시한다. 그 결과 제안 시스템 또한 기준 CO₂ 농도를 만족하였으며 온도 또한 쾌적범위 내로 제어함으로써 재실자 쾌적도를 향상시켰다. 해당 연구는 DCV 시스템의 제어 방법을 기존과 달리함으로써 다양한 실내환경변수의 제어를 가능하게 하였으나 실내공기질 오염원에 대한 고려가 미흡하다는 한계가 있다.

F. Flourentzou(2016)은 학교 체육관 시설에 자동 자연환기 시스템을 적용하여 에너지 절감을 달성하는 연구를 실시하였다[24]. 자연환기, 기계환기, 병행환기에 대해 시뮬레이션을 진행하였으며 자연환기의 경우 연돌 효과를 활용한 창문 자동 개폐 시스템을 적용하여 CO₂ 농도와 온도를 제어했다. 그 결과 자연환기 자동제어가 가장 우수한 에너지 절감효과를 나타냈다. 해당 연구는 일반적으로 시행하는 교실에 대한 환경 분석이 아닌 체육관 시설에 현재 사용되는 시스템을 적용하여 비교 분석을 실시한 부분에 의의가 있으나 에너지 절감에 초점을 맞추어 새로운 제어 방안의 도입이 없다는 한계가 있다.

L. Stabile(2017)은 스케줄 기반의 창문 개폐 조절에 대해 CO₂ 농도와 미세먼지 농도의 현황을 분석하는 연구 진행을 통해 자연환기로는 CO₂와 미세먼지 농도를 기준치에 맞추기 어렵다는 사실을 증명하였다[25]. B. Merema (2018)는 DCV와 정풍량 시스템(Constant

Air Volume, CAV)의 비교를 통하여 교실의 실내공기질 및 에너지 사용량을 평가하였다[26]. 풍량 측정을 통해 팬 가동률을 판단하였으며 DCV를 적용하였을 때 더 적은 풍량을 나타냈다. 이와 동시에 설정 CO₂ 농도 기준인 1,000 ppm 이하를 만족시켰으며 CAV보다 50~55%의 팬 에너지 사용량과 34~47%의 열손실을 방지할 수 있었다. 해당 연구는 기존 시스템과의 비교를 통해 환기 제어시스템을 도입하였을 시 실내공기질 기준을 만족시키며 시스템 사용 에너지를 절감할 수 있음을 증명하였으나 CO₂를 제외한 다른 오염원은 고려하지 않았다.

이와 같이 학교 환기시스템과 관련된 연구는 국내외로 다양하게 진행되고 있으나 환기 제어법에 대한 연구는 미비한 실정이다. 현재 국내 학교의 주요 관심사는 CO₂와 미세먼지의 농도이다. 그러나 대부분의 연구는 CO₂ 농도만을 제어 대상으로 하고 있으며 이 또한 다양한 상황에 대한 실시간 대응 보다는 에너지 소비량 감소에 초점이 맞추어져 있다. 학교 건축물의 특성상 전체적인 스케줄 안에서도 재실자 활동에 따라 변수가 존재하며 이는 실내공기질에 대해 불규칙적인 패턴을 형성한다. 따라서 실시간 대응에 대한 연구가 필요하며 수동 제어로 인한 비효율적인 시스템 운영 방지 및 다양한 환경변수의 변화에 대응하기 위해 모니터링과 제어가 통합된 시스템 구축이 필수적이다.

시스템 측면에서는 환기 시스템의 효율과 필터의 성능은 비례하지 않는다. 이는 일체형 공기정화장치에 대해 CO₂와 미세먼지 농도의 제어가 동시에 이루어지기 어려움을 의미한다. 이에 시스템 성능 및 기준마련에 대한 연구가 진행되고 있으나 운영방식에 따라 실내 공기질 및 에너지 사용량이 상이하므로 반드시 최적 제어시스템에 대한 연구가 병행되어야 한다.

Table 8. Strategies for Ventilation Systems, World

Researcher	Summary
B. Merema, et al. (2018)[26]	[Mechanical Ventilation] • IAQ assessment by adjusting DCV system to classroom comparing with CAV system • CO ₂ concentration was controlled • Fan energy and ventilation heat loss were reduced by 50-55% and 34-47% respectively compared to CAV system
L. Stabile, et al. (2017)[25]	[Natural Ventilation] • Strategy for manual airing of classroom was presented • A number of cases by changing opening period were tested • The strategy was effective to reducing CO ₂ concentration but could not get rid of particulate matter
F. Flourentzou, et al. (2016)[24]	[Natural Ventilation] • Suggests a design concept of controlled natural ventilation • Windows were automatically controlled by temperature and CO ₂ concentration • The method turned out energy efficient
A. Cable, et al. (2016)[23]	[Mechanical Ventilation] • Two strategies of DCV were compared to maintain under 800 ppm of CO ₂ concentration • Existing strategy varies the ventilation rate • New strategy combines CO ₂ and temperature control • As a result, the new strategy increased occupant comfort by variations of the indoor temperature with meeting CO ₂ demand

4. 결론

본 연구는 학교 건축물의 최적 실내공기질을 위한 환기시스템 및 제어 방법에 대한 기초연구로서 관련 법규·기준 및 선행연구 분석을 실시하였다. 분석 내용에 대한 결론은 다음과 같다.

첫째, 국내외 법규 및 기준은 학교 건축물에 대한 최소환기량을 제시하고 있다. 국내 기준은 17가지 오염원을 정의하고 각각의 농도 기준을 명시한다. 대표적 실내공기질 평가 지표인 CO₂ 농도는 1,000 ppm, 기계환기가 추가 될 시에는 1,500 ppm 이하로 유지하여야 하며 1인당 최소환기량은 21.6 m³/hr을 만족시켜야 한다. 또한 미세먼지의 경우 PM_{2.5}가 35 µg/m³, PM₁₀은 75 µg/m³ 이하로 관리되어야 한다. 기준 CO₂ 농도는 전 세계적으로 비슷하며 최소환기량의 경우 미국에 비해 엄격하게 관리되나, 유럽 국가에서는 평균적인 수치를 나타낸다. 그러나 학교 내 실별로 세분화되어 관리되는 국외 기준에 비해 국내의 경우 각 실에 대한 최소환기량이 세분화되어 있지 않고 모든 교실에 동일하게 적용되고 있다. 반면 미세먼지의 경우 그 기준이 다른 국가에 비해 명확하게 제시되어 있다.

둘째, 미국, 독일, 영국 등의 국가는 법규에서 환기시스템의 유지 관리 및 운영 방안에 대해 통합적으로 명시하고 있지만 국내의 경우 운영 방안에 대한 기준은 아직 배포되지 않았다. 가이드라인의 부재는 비효율적인 시스템 운영을 야기시킬 수 있으며 재실자의 수동 제어 및 실내환경 인지 미흡으로 인한 실내공기질의 저하를 불러일으킬 수 있다. 독일의 경우 환기 기준에서 자동제어에 대한 내용 및 구체적인 기술을 제시하고 있으며 미국 및 영국은 자동제어 사용을 적극 권장하고 있다.

셋째, 선행연구 분석 결과 국내외 모두 환기 제어법에 대한 연구는 미비한 실정이다. 대부분의 연구는 환기시스템 운영 시의 에너지 소비량 혹은 CO₂ 농도 제어에 초점이 맞추어져 있다. 또한 수요제어 환기(DCV) 시스템에 대한 연구가 진행되고 있으나 마찬가지로 에너지 효율에 초점이 맞추어져 있다. 특히 국내의 경우 실내공기질 관리 시 CO₂와 미세먼지의 농도를 동시에 고려해야 함에도 불구하고 두 요소를 함께 고려한 제어 방법 연구는 부족한 실정이다.

본 연구를 토대로 학교시설 실내공기질 관리 한계점 및 최적 제어 알고리즘 개발의 필요성을 확인하였다. 추후 최적 제어알고리즘 개발은 단순 환기시스템 방식과는 달리 학교 시설의 특성이 충분히 고려되어야 한다. 재실자 스케줄, 온열 쾌적도 및 실내공기질 오염원들에 대한 종합적인 판단이 이루어 져야 하며 환기시스템의 지속적인 실시간 대응을 위해 실내외 환경 정보 감지를 위한 IoT 및 빅데이터 기반 실시간 모니터링이 수행되어야 한다. 또한 데이터를 기반으로 제어 대상의 범위를 설정하고 각 요소에 대한 영향성을 분석하여 실시간 공기질 예측을 통해 최적제어를 수행해야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M3E7A1113095 & 2019M3E7A1113097).

Reference

[1] 송창근, 미세먼지 현황 및 대책, 한국방재학회지, Vol.66, 2016, pp. 44-49. // (C.G. Song, Trends and Strategies of Particulate Matter, The Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol.66, 2016, pp.44-49.)

[2] 교육부, 학교 고농도 미세먼지 대책 발표, 2018.04.06. // (Ministry of Education, Announcement of Measures for Particulate Matter at School, 2018.04.06.)

[3] 학교보건법 시행규칙(교육부령 제194호, 시행 2019.10.24.): [별표 4의 2] 공기 질 등의 유지·관리기준. // (Enforcement Rules of the School Health(Ministry of Education Command No.194, Effective Date: 2019. 10.24.): [Appendix 4-2] Maintenance and Management Standards for Air Quality, etc.)

[4] 서울특별시교육청, 학교 실내공기질 개선을 위한 관리 목표 및 저감 방안, 2018.02. // (Seoul Metropolitan Office of Education, Management Goals and Reduction Methods to Improve Indoor Air Quality in Schools, 2018.02.)

[5] 경기도교육청, 도교육청, 도내 모든 학교 교실에 공기정화장치 설치 끝내, 2020.03.11. // (Gyeonggido Office of Education, Gyeonggido Office of Education Completed to Install Air Cleaning Devices to all School Classes, 2020.03.11.)

[6] 성백진, 기계환기설비 전국 학교 보급률 33%에 그쳐, <http://www.hvacrj.co.kr/news/articleView.html?idxno=10012>, 2020.03.13. // (B.J. Sung, Mechanical Ventilation Distributed only 33% of Entire School, <http://www.hvacrj.co.kr/news/articleView.html?idxno=10012>, 2020.03.13.)

[7] J.H. Park, et al., Effects of air cleaners and school characteristics on classroom concentrations of particulate matter in 34 elementary schools in Korea, *Building and Environment*, Vol.167, 2020.02.)

[8] 이재희, 정덕수, 정재원, 변풍량 공조시스템의 환기량 제어 및 이코노마이저 운전 에 따른 학교건물의 환기 기준 별 에너지 소비량 분석, 대한설비공학회 설비공학논문집, 31(5), 2019.05, pp.227-235. // (Jae-Hee Lee, Deok-Soo Jung, Jae-Weon Jeong, Energy Consumption Analysis According to Ventilation Standard Variation of School Building in VAV System Operation Methods, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 31(5), 2019.05, pp.227- 235.)

[9] 한국환경산업기술원, Eco-energy 기반 건축물 실내환경 관리기술 동향, 환경기술동향, 2012-86, 2012. // (Korea Environmental Industry & Technology Institute, Trends of Eco-energy Based Architecture Indoor Environment Management Technology, 2012-86, 2012.)

[10] 김성은 외 5인, 실내공기질 관리 및 제어를 위한 학교 특성별 오염물질 현황 조사, 한국생태환경건축학회 논문집, 20(1), 2020.02, pp.143-149. // (Seong Eun Kim, et al., Survey on Pollutants Status by School Characteristics for Indoor Air Quality Management and Control, *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, 20(1), 2020.02, pp.143-149.)

[11] 서울특별시교육청, 학교 미세먼지 관리목표 및 저감방안 마련을 위한 연구, 2019.01.26. // (Seoul Metropolitan Office of Education, Research for School Particulate Matter Management and Reduction, 2019.01.26.)

[12] 학교보건법 시행규칙, (제3조 제1항 제3호의 2관련, 시행 2019.10.24.) // (Enforcement Rules of the School Health (Article3, Paragraph 1, Subparagraph 3-2, Enforcement: 2019.10.24.))

[13] 국토교통부, 건축물의 환기설비 유지관리 매뉴얼, 2019.09. // (Ministry of land, Infrastructure and Transport, Ventilation Facility Management Guideline for Architecture, 2019.09.)

[14] 학교보건법 시행규칙, (제3조 제1항 제1호 관련, 시행 2019.10.24.) // (Enforcement Rules of the School Health (Article3, Paragraph 1, Subparagraph 1, Enforcement: 2019.10.24.))

[15] EPA, Indoor Air Quality Tools for Schools Coordinator's Guide, 2009.01.

[16] BINE, Themeninfo I/2015: Ventilation in schools, 2015.

[17] Education & Skills Funding Agency, Building Bulletin 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools, 2018. 08.

[18] REHVA, HealtVent: Health-Based Ventilation Guidelines for Europe, 2009.12.

[19] 김태호 외 4인, 외기부하와 연동한 환기장치의 제어에 관한 연구, 대한기계학회 춘추학술대회, 2012.11, pp.847-852. // (Tae-Ho Kim, et al., A Study on Control of Ventilation System Interworking with Outdoor Loads, *The Korean Society of Mechanical Engineers 2012 Spring Conference*, 2012.11, pp.847-852.)

[20] 김수연 외 3인, 전열교환형 환기시스템을 이용한 학교건물의 나이트 퍼지 적용 효과 분석, 대한설비공학회 설비공학논문집, 28(11), 2016. 11, pp.421-427. // (Su-Yeon Kim, Energy Saving Effect of the Night Purge Control using ERV in a School Building, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 28(11), 2016.11, pp. 421-427.)

[21] 김재형, 원정관, 송두삼, 전열교환 환기시스템을 이용한 학교건물의 나이트 퍼지제어 효과의 분석, 한국태양에너지학회 학술대회논문집, 2016.03, pp.56-56. // (J.H. Kim, J.K. Won, K.S. Song, An Analysis of the Night Purge Control with ERV in School Building, *The Korean Solar Energy Society*, 2016.03, pp.56-56.)

[22] 최윤영, 이현수, 중등학교 교실의 이산화탄소(CO₂) 관리를 위한 지능형 창호개폐 작동 프로세스, 교육시설 논문지, 25(4), 2018.07, pp.19-30. // (Y.Y. Choi, H.S. Lee, Intelligent and Responsive Window Opening-Closing Operation Process for Carbon Dioxide(CO) Management of Secondary School Classroom, *Korean Institute of Educational Facilities*, 25(4), 2018.07, pp.19-30)

[23] A. Cable, H.L. Hammer, M. Mysen, Comparison of Two Ventilation Control Strategies in the First Passive House Standard Norwegian School, *International Journal of Ventilation*, Vol.14, 2016.03, pp.371-382.

[24] F. Flourentzou, S. Pantet, K. Ritz, Design and performance of controlled natural ventilation in school gymnasiums, Vol.16, 2016.10, pp.112-123.

[25] L. Stabile, et al., The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools, *Science of the Total Environment*, Vol.595, 2017. 10, pp.894-902.

[26] B. Merema, et al., Demand controlled ventilation(DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies, *Energy and Buildings*, Vol.172, 2018.08, pp.349-360.