



실내공기질 관리 및 제어를 위한 학교 특성별 오염물질 현황 조사

Survey on Pollutants Status by School Characteristics for Indoor Air Quality Management and Control

김성은* · 양영권** · 김민영*** · 최성호**** · 박진철***** · 문진우*****

Seong Eun Kim* · Young Kwon Yang** · Min Young Kim*** · Sung Ho Choi**** · Jin Chul Park***** · Jin Woo Moon*****

* Main author, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, South Korea (asteria03@naver.com)

** Coauthor, Postdoctoral researcher, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, South Korea (dora84@naver.com)

*** Coauthor, Researcher, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, South Korea (kmyhg@naver.com)

**** Coauthor, Graduate Student, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, South Korea (c_sh0601@naver.com)

***** Coauthor, Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-Ang University, South Korea (jincpark@cau.ac.kr)

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

ABSTRACT

Purpose: The purpose of this study is to develop a control technology for air-clearing ventilation system considering the characteristics of school facilities, and to investigate, classify, compare, and analyze data that can consider general environment and school characteristics. **Method:** The current and characteristic of school facilities and the status of management of pollutants were investigated using government public data and the resulting environment variables were derived. The concentration of fine dust and carbon dioxide, which are the main causes of human activity and breathing, was selected as the main factors to analyze the correlation with general school facilities, such as locality, establishment date and coeducation status. **Result:** First, the standard classrooms in Korea are located in Seoul and Gyeonggi-do, with a total of 23 students or less. Second, the survey on the concentration of fine dust by age of school facility showed no significant difference, but in the case of carbon dioxide, the average concentration decreased as the age of school facility grew older. Since the age of school facility is related to the building's confidential performance, it is considered that the building's airtight performance is highly correlated with the concentration of carbon dioxide. Third, according to the analysis of indoor air quality according to the sex ratio of students, this ratio is also a major factor for indoor air quality, and it was deemed necessary to consider this when applying the air-cleaning ventilation system.

KEYWORD

학교시설
실내공기질
환기시스템
미세먼지

School Facility
Indoor Air Quality
Ventilation System
Particulate Matter

ACCEPTANCE INFO

Received Feb. 4, 2020

Final revision received Feb. 14, 2020

Accepted Feb. 19, 2020

© 2020 KIEAE Journal

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

실내 공기 오염물질에 장시간 인체가 노출될 경우 건강유해성은 매우 높아지기 때문에[1-4], 쾌적한 실내공기질의 유지 및 관리는 매우 중요하다. 특히, 어린이나 노약자의 경우 노출에 따른 건강유해성이 더욱 높아지기 때문에 면밀한 관리가 필요하다[5-7].

학교시설은 상대적으로 건강상의 위험에 취약한 계층인 미성년 이 일평균 6시간 이상 거주하는 특성을 가지고 있어 학교 실내공기 질의 유지 및 관리가 특히 중요하다고 할 수 있다.

이에 따라 국내·외에서 실내공기질 개선을 위하여 가이드라인 및 정책 마련 등 다양한 노력이 증가하고 있으며[8, 9], 국내의 학교 시설의 실내공기질 개선을 위해 교육부에서는 학교 미세먼지 기준 강화, 신축학교에 대한 기계환기 시스템 의무설치, 전 학교 공기정화장치의 단계적 설치를 포함하는 '학교 고농도 미세먼지 대책(2018.04.06.)'을 발표하여 관리하고 있다[10].

학교시설 중 교실은 수업방식 및 내용에 따라 다양한 용도로 활용

가능하기 때문에 일반적인 사무공간과 건물 스케줄 및 제어방법이 상이할 수 있다. 따라서 용도에 적절한 환기시스템 제어 기술이 필요하다. 과거에는 실의 용도에 따른 세밀한 개별제어가 쉽지 않았지만 최근 4차 산업혁명에 도래하며 인공지능(AI), 사물인터넷(IoT), 스마트빌딩(Smart building) 등 다양한 융·복합 기술이 개발 및 발전 되어 상대적으로 보다 수월해지는 실정이며 다양한 연구 및 개발이 시도되고 있다[11].

하지만 아직까지 학교시설의 특성에 맞게 적용할 수 있는 공기청정 및 환기 시스템 개별제어 기술은 개발되어 있지 않다. 이를 실현 하기 위해서는 우선적으로 학교시설의 다양하고 복잡한 변수를 고려하여 학교의 사용 용도에 최적화된 실내공기질 모니터링 및 제어 기술 개발이 필요하다.

실내공기질 제어 기술 개발을 위해서는 실내·외 온도, 습도, 기류의 방향과 속도 등 실내공기질에 영향을 줄 수 있는 일반적인 환경 요소 뿐 아니라 학교의 재실인원 및 시간, 활동량, 성비(性比), 수업 일정, 실의 용도, 건축연한 등 학교의 특성을 반영할 수 있는 요소들의 면밀한 조사와 분석 및 고려가 수반되어야 한다. 하지만 실내공기 질 제어 기술 개발을 위한 학교의 특성 및 상관성 분석에 대한 기초 자료는 전무하다.

따라서 본 연구에서는 학교시설의 특성을 고려할 수 있는 공기청정 환기 시스템의 제어 기술 개발을 위한 기초연구로서 일반적인 환경 및 학교 특성을 고려할 수 있는 데이터를 조사·분류하여 비교·분석하였다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 학교시설의 공기청정 환기 시스템 도입 시 고려해야 할 환경변수를 도출하기 위한 기초연구이다. 환경 변수 도출을 위해서는 학교시설의 현황, 특성, 오염물질 관리 현황 등이 필요하며, 데이터는 교육부의 '학교알리미'에서 제공되는 자료를 활용하였다[12]. '학교알리미'에서 제공되는 정보는 학교 시설 정보(지역, 설립일, 남녀공학여부 등)와 학교장이 '학교 고농도 미세먼지 대책'에 따라 매년 의무적으로 실측 조사한 오염물질 자료(미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소, 폼알데하이드, 총휘발성유기화합물 등)이다.

폼알데하이드 및 총휘발성유기화합물의 경우 가구구매, 리모델링 등 교실의 세부적인 환경에 따라 다양한 발생원이 있기 때문에 실태조사를 배제한 데이터 분석만으로는 공기청정 환기 시스템의 기초 데이터로 일반화하여 활용하기 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 인체의 활동 및 호흡이 유발생원인 미세먼지와 이산화탄소의 농도를 주요 인자로 선정하여 지역, 설립일, 남녀공학여부 등 일반적인 학교 시설과의 상관성을 분석하였다.

2. 선행연구 고찰

국내의 학교시설 실내공기질 관련 주요 연구는 교육시설의 환경실측을 통한 실태조사 중심 연구가 가장 높은 비율을 나타냈다. 특히, 이정재 외(2005)의 연구에서는 부산지역 신축학교를 대상으로 이산화탄소, 이산화탄소, 미세먼지, 폼알데하이드에 대한 실측조사를 수행하였다[13]. 정민희 외(2007)의 연구에서도 겨울철 서울 및 경기지역 학교를 대상으로 동일한 실내공기질 오염물질에 대한 실측조사를 수행하였다[14].

최근 대기의 고농도 미세먼지 발생으로 인한 건강상의 우려와 학교 및 실내공기질에 대한 관리기준 강화에 따라 실내 미세먼지관련 연구가 주를 이루고 있다. 조성민 외(2017)는 공기청정기와 기계환기 시스템의 가동유무에 따른 실내 미세먼지 제거성능을 검토하였으며, 정승민 외(2018)는 외부의 풍속에 따른 미세먼지의 유입 특성에 대한 연구를 수행하였다[15, 16]. 엄예슬 외(2019)는 초등학교 교실을 대상으로 실외 미세먼지 침입특성을 분석하였고, 이윤규 외(2018)는 교실의 미세먼지 저감을 위해 환기시설의 적용방안을 제안하였다[17, 18]. 이와 같이 최근에는 과거보다 미세먼지의 저감을 목적으로 미세먼지의 유입특성, 제거 방법 등에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

그러나 아직까지 학교시설에 환기 및 공기청정 시설의 설치 시 인공지능을 통한 예측 기술 및 사물인터넷 기술 등을 이용한 시스템 최적제어를 위한 변수 설정 시 필요한 종합적인 학교시설 분석 및 미세먼지 등 오염물질 현황에 대한 자료가 필요한 실정이다. 또한 일부 지역에만 국한된 것이 아니라, 전지역 범위의 초·중·고 실태 분석을 통해 대표성을 갖출 필요가 있다.

3. 국내 학교 관련 실내공기질 기준 현황

국내 실내공기질 관리기준은 건축물 및 공간의 용도에 따라 환경부, 고용노동부, 교육부의 3개 부처에서 각각 관리하고 있다. 유치원, 초·중·고의 학교 시설의 경우, 교육부의 '학교보건법'에 따르며, 현재 관리대상인 실내공기질 오염물질은 '학교보건법 시행규칙, [별표 4의2] 공기 질 등의 유지·관리기준 (시행 2019. 10. 24.)'에 따라 미세먼지, 이산화탄소, 폼알데하이드 등 총 17개 항목이다 [19]. 대상 오염물질은 교실, 급식시설, 기숙사, 체육관, 교무실 등 공간 특성에 따라 항목별로 관리된다.

학생들의 주 거주역인 교실, 급식시설, 체육관 및 강당 등에 대한 실내공기질 유지 및 관리 항목은 초미세먼지(PM_{2.5}), 미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소 (CO₂), 폼알데하이드(HCHO), 총부유세균(Free-floating bacteria), 낙하세균(Falling bacteria), 일산화탄소(CO), 이산화질소(NO₂), 라돈(Radon), 총휘발성유기화합물(TVOC)으로 항목별 기준치는 Table 1.과 같다.

Table 1. Indoor air quality maintenance criteria for school facilities

Pollutants	Location	Criteria by effective date			
		06.01.01.	18.03.27.	19.07.03.	19.10.24.
PM _{2.5}	Classroom, Cafeteria	-	35 µg/m ³	35 µg/m ³	35 µg/m ³
PM ₁₀	Classroom, Cafeteria	100 µg/m ³	100 µg/m ³	75 µg/m ³	75 µg/m ³
	Gym, Auditorium	-	-	-	150 µg/m ³
CO ₂	Classroom, Cafeteria	1,000 ppm (1,500 ppm, when using mechanical ventilation)			
HCHO	Classroom (less than 3 years after construction) Cafeteria	100 µg/m ³		80 µg/m ³	
Free-floating bacteria	Classroom, Cafeteria	800 CFU/m ³			
Falling bacteria	Cafeteria, Nurse's office	10 CFU/Room			
CO	Classroom (Individual heating or roadside)	10 ppm			
NO ₂		0.05 ppm			
Radon	Classroom (1st floor or underground)	148 Bq/m ³			
TVOC	classroom (less than 3 years after construction)	400 µg/m ³			

초미세먼지(PM_{2.5})는 2018년 3월 27일 추가되어 35 µg/m³의 기준으로 관리되고 있다. 미세먼지(PM₁₀)의 기준치는 기존의 100 µg/m³이었으나, 환경부가 '실내공기질 관리법 시행규칙'의 '실내공기질 유지기준(시행 2018.10.18.)'을 통해 유해물질에 대한 민감 계층이 사용하는 다중이용시설인 어린이집의 PM₁₀ 기준을 75 µg/m³로 강화시키면서, 학교시설 또한 75 µg/m³으로 강화되었으며, 폼알데하이드는 기존의 100 µg/m³에서 80 µg/m³으로 강화되었다(2019. 07.01.)[20, 21].

또한 교육부는 교실의 미세먼지를 관리하기 위해 ‘공기정화장치 설치 및 관리기준’을 마련하고, 기계환기설비를 신축 학교건물에 의무적으로 설치하고 기존 학교도 우선적으로 고려하되 부득이한 경우 공기청정기를 설치하도록 하였다[22]. 교육부는 2019년 12월 기준으로 모든 초·중·고 교실의 88.1%에 공기청정기를 보급하였으며, 2020년 1월까지 100% 보급 추진하였다[23].

4. 학교 시설 및 특성별 오염물질 현황 조사

4.1 조사 개요

학교 교실의 미세먼지 및 이산화탄소 등 실내공기질의 주요 영향 인자는 환경적, 건축적, 인체적 요인으로 분류 가능하다. 환경적 요인은 실내 온·습도, 실외 환경 등이 있으며, 건축적 요인은 기밀성능, 건축연환, 리모델링(Remodeling) 여부, 환기장치 등이 있다. 인체적 요인으로는 재실자수, 성비(性比, sex ratio), 활동량 등이 있다.

본 논문에서는 교육부의 공개 데이터를 이용해 재실자(학생) 수, 환기시스템 설치유무, 건축연환에 따른 미세먼지(PM₁₀) 및 이산화탄소(CO₂) 농도를 분석하였다. 공개 데이터는 교육부의 ‘학교보건법 시행규칙 제3조(환경위생 및 식품위생의 유지관리)’의 하위 행정규칙인 ‘학교 환경위생 및 식품위생 점검기준’에 따라 측정 및 수집된 결과이다. 각 학교별 대표 교실 2개소 이상, 학생이 거주하는 수업시간대에 측정된 일평균 결과이다. 미세먼지 측정 장비는 광산란법 또는 광투과법이 적용된 분진측정기기, 이산화탄소 측정장비는 비분산적외선분석법이 적용된 측정기기를 이용한다[24].

해당 데이터의 조사기간은 2016년(2015.3.1.~2016.2.29.), 2017년(2016.3.1.~2017.2.28.), 2018년(2017.3.1.~2018.2.28.), 2019년(2018.3.1.~2019.2.28.)이다.

4.2 일반현황조사

특수학교를 제외한 일반 학교 수는 Table 2.와 같이 2019년 기준 11,870개로, 초등학교 6,279개(52.9%), 중학교 3,236개(27.3%), 고등학교 2,355개(19.8%)이다. 각 지역별로는 경기도 2,419개, 서울 1,307개로 전체의 31.4%가 서울 및 경기지역에 위치하고 있다.

Table 2. Status of elementary, middle and high schools(as of 2019)

Region	Elementary school	Middle school	High school	Subtotal
Gangwon-do	377 (6.0%)	162 (5.0%)	116 (4.9%)	655 (5.5%)
Gyeonggi-do	1,309 (20.8%)	635 (19.6%)	475 (20.2%)	2,419 (20.4%)
Gyeongsangnam-do	519 (8.3%)	266 (8.2%)	190 (8.1%)	975 (8.2%)
Gyeongsangbuk-do	508 (8.1%)	269 (8.3%)	184 (7.8%)	961 (8.1%)
Gwangju	156 (2.5%)	90 (2.8%)	67 (2.8%)	313 (2.6%)
Daegu	229 (3.6%)	125 (3.9%)	93 (3.9%)	447 (3.8%)
Daejeon	150 (2.4%)	88 (2.7%)	62 (2.6%)	300 (2.5%)
Busan	304 (4.8%)	172 (5.3%)	142 (6.0%)	618 (5.2%)
Seoul	602 (9.6%)	385 (11.9%)	320 (13.6%)	1,307 (11.0%)
Sejong	49 (0.8%)	24 (0.7%)	18 (0.8%)	91 (0.8%)
Ulsan	122 (1.9%)	63 (1.9%)	57 (2.4%)	242 (2.0%)

Region	Elementary school	Middle school	High school	Subtotal
Incheon	260 (4.1%)	135 (4.2%)	125 (5.3%)	520 (4.4%)
Jeollanam-do	465 (7.4%)	254 (7.8%)	142 (6.0%)	861 (7.3%)
Jeollabuk-do	423 (6.7%)	209 (6.5%)	133 (5.6%)	765 (6.4%)
Jeju	118 (1.9%)	45 (1.4%)	30 (1.3%)	193 (1.6%)
Chungcheongnam-do	420 (6.7%)	188 (5.8%)	117 (5.0%)	725 (6.1%)
Chungcheongbuk-do	268 (4.3%)	126 (3.9%)	84 (3.6%)	478 (4.0%)
Total	6279	3236	2355	11870

Table 3.은 전국 초·중·고의 학급수 및 학급당 평균 학생 수이며, 초등학교 123,752개, 중학교 51,717개, 고등학교 58,016개 학급이 운영 중 이다. 학급당 평균 학생 수는 초등학교 21.4명, 중학교 24.0명, 고등학교 24.3명이다.

Table 3. Number of general classes and students of elementary, middle and high schools(as of 2019)

Region	Elementary school		Middle school		High school	
	Class	Student*	Class	Student*	Class	Student*
Gangwon-do	4,283	17.66	1,736	22.15	1,902	22.81
Gyeonggi-do	31,148	24.71	12,345	28.67	14,384	25.43
Gyeongsangnam-do	9,161	21.24	3,598	24.77	3,916	24.12
Gyeongsangbuk-do	6,433	20.42	2,880	15.44	3,240	22.19
Gwangju	4,071	21.86	1,798	24.10	1,832	27.10
Daegu	5,458	23.11	2,617	24.05	2,892	24.73
Daejeon	3,888	21.28	1,584	25.82	1,859	24.42
Busan	6,905	22.53	2,963	24.82	3,535	23.24
Seoul	18,690	22.59	8,786	23.64	9,549	24.96
Sejong	1,328	21.00	496	22.58	417	22.72
Ulsan	2,983	22.97	1,233	25.20	1,405	24.24
Incheon	6,995	23.00	2,892	25.80	3,283	24.00
Jeollanam-do	5,151	18.43	2,067	22.23	2,431	21.85
Jeollabuk-do	5,147	18.99	2,073	23.59	2,426	23.54
Jeju	1,805	22.75	721	26.38	717	27.96
Chungcheongnam-do	6,007	20.38	2,235	25.15	2,454	24.83
Chungcheongbuk-do	4,299	20.17	1,693	24.18	1,774	25.07
Total	123,752	21.4	51,717	24.0	58,016	24.3

* the average number of students per class

환기설비(기계) 설치 비율은 Table 4.와 같이 초등학교 58.1%, 중학교 57.8%, 고등학교 56.8%로 평균 57.5%의 설치 비율을 나타낸다.

학교시설의 건축연환의 경우 준공일자가 표기되어 있지 않은 학교가 상당수 존재하여 학교 개교일 기준으로 건축연환을 추정하였으며, 리모델링은 고려하지 않았다.

Table 4. Installation ratio of mechanical ventilation(as of 2019)

School	Elementary school	Middle school	High school
Install	3,637 (58.1%)	1,866 (57.8%)	1,337 (56.8%)
Uninstall	2,627 (41.9%)	1,365 (42.2%)	1,018 (43.2%)
Total	6,264 (100%)	3,231 (100%)	2,355 (100%)

건축연한은 Fig. 1.~3.과 같다. 초등학교의 경우 30년 이상(1989년 이전)인 학교가 전체의 68.8%, 30년 미만 20년 이상(1990~1999년)은 11.7%, 20년 미만 10년 이상(2000~2009년)은 12.9%, 10년 미만(2010년 이후)은 6.6%로 나타났다. 중학교의 경우 30년 이상인 학교가 전체의 66.9%, 30년 미만 20년 이상은 11.3%, 20년 미만 10년 이상은 14.1%, 10년 미만은 7.7%로 나타났다. 고등학교의 경우 30년 이상인 학교가 전체의 68.2%, 30년 미만 20년 이상은 10.9%, 20년 미만 10년 이상은 13.2%, 10년 미만은 7.7%로 나타났다. 이와 같이 초·중·고 모두 30년 이상의 학교가 65% 이상이고, 20년 이상으로 보면, 약 80%에 육박한다.

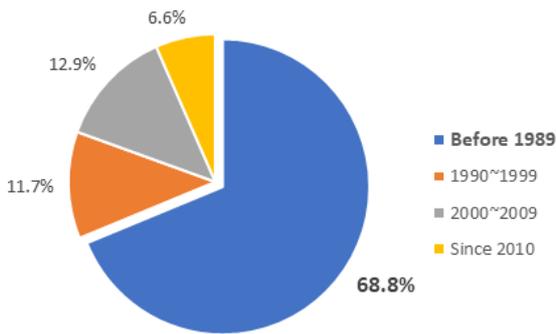


Fig. 1. Construction year of elementary school

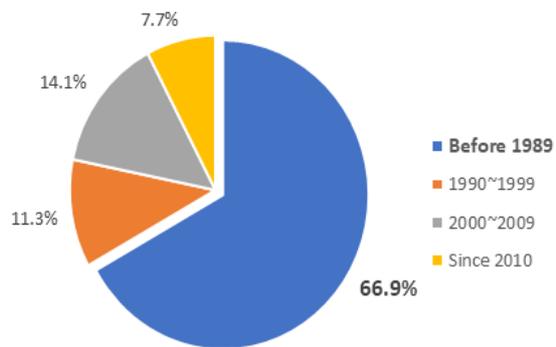


Fig. 2. Construction year of middle school

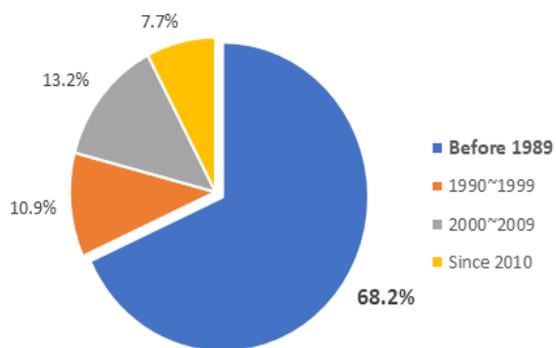


Fig. 3. Construction year of high school

4.3 학교 유형별 PM₁₀ 및 CO₂ 현황

초·중·고의 학교 유형별 PM₁₀ 및 CO₂ 현황은 Table 5., Fig. 4.~5.와 같다.

Table 5. Status of PM₁₀ and CO₂ in schools by year

Classification		PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		CO ₂ (ppm)	
		Average concentration	Excess number*	Average concentration	Excess number*
Elementary school	2016	48.1	752	650.7	105
	2017	48.7	940	672.0	104
	2018	52.8	1,343	703.6	110
	2019	49.8	1,216	713.7	90
	Avg.	49.9	1,062.8	685.0	102.3
Middle school	2016	48.4	370	664.4	4
	2017	49.0	471	684.2	5
	2018	52.7	648	712.0	7
	2019	49.1	594	730.5	5
	Avg.	49.8	520.8	697.8	5.3
High school	2016	47.8	272	695.0	2
	2017	48.6	344	722.7	1
	2018	50.8	447	729.6	1
	2019	47.4	404	743.7	0
	Avg.	48.7	366.8	722.8	1.0
Average of school		49.5	-	701.9	-

* Number of schools exceeding the standard(PM₁₀ 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, CO₂ 1,000ppm)

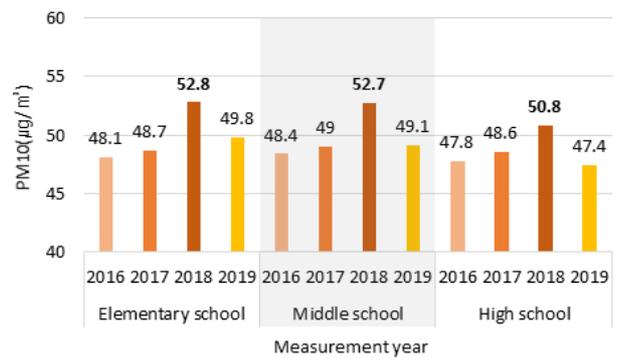


Fig. 4. Particulate matter (PM₁₀) concentration by year

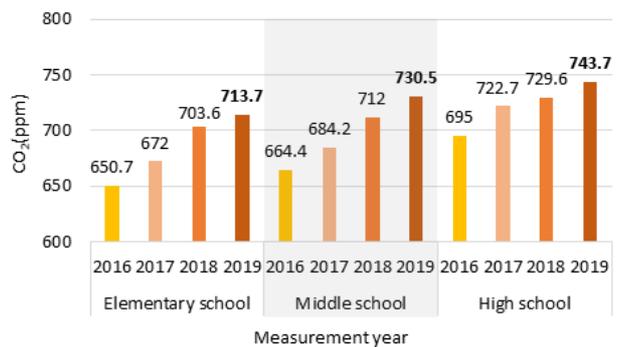


Fig. 5. Carbone dioxide (CO₂) concentration by year

초·중·고의 실내 평균 PM₁₀ 농도는 학교보건법에서 지정한 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하고 있었다. 연도별 분석 결과 2017년 미세먼지의 농도는 전년대비 1.4%, 2018년은 6.8% 증가하였으나, 2019년은 6.4% 감소를 나타냈다. 2018년은 미세먼지 저감 대책 및 관리기준이 강화되고, 공기청정기의 보급이 활성화되기 시작한 시기이다.

기준치를 초과한 비율은 초등학교 17%, 중학교 16.1%, 고등학교 15.6%로 나타났다.

평균 CO₂ 농도의 경우 일부 학교를 제외하고 초·중·고 대부분이 학교보건법 기준인 1,000ppm 미만의 농도를 만족하는 것으로 나타났다. 연도별 분석결과 2017년 미세먼지의 농도는 전년대비 3.4%, 2018년은 3.2%, 2019년은 2.0% 증가하였다. 기준치를 초과한 비율은 초등학교 1.6%, 중학교 0.2%, 고등학교 0.04%로 나타났다.

4개년도 합산 평균 농도를 비교하면, PM₁₀은 초등학교 49.9 μg/m³, 중학교 49.8 μg/m³, 고등학교 48.7 μg/m³로 나타났으며, CO₂의 경우 초등학교 685.0 ppm, 중학교 697.8 ppm, 고등학교 722.8 ppm로 나타났다.

4.4 건축연한별 PM₁₀ 및 CO₂ 현황

학교시설의 건축연한에 따른 초·중·고의 PM₁₀ 및 CO₂ 현황은 Table 6.과 같다. PM₁₀의 경우 학교 건축연한에 따른 평균 농도 차이는 미미하였으며, 기준치인 75 μg/m³ 초과하는 학교 수는 Table 7.과 같이 20년 이상과 20년 미만의 학교시설 간 큰 차이를 보이고 있었다.

CO₂의 경우 건축연한이 오래된 학교일수록 대체적으로 평균 CO₂의 농도가 감소하는 것으로 나타났으며, 기준치인 1000ppm을 초과하는 학교 수는 30년 이상인 학교가 대부분으로 나타났다.

Table 6. Concentration of PM₁₀ and CO₂ according to the age of school facilities

Classification		PM ₁₀ (μg/m ³)					CO ₂ (ppm)				
		2016	2017	2018	2019	Avg.	2016	2017	2018	2019	Avg.
Elementary school	More than 30 years	47.8	47.9	52.0	48.6	49.1	641.7	662.9	693.9	700.0	674.6
	29~20 years	48.4	50.0	53.1	50.7	50.6	663.2	678.8	713.9	744.2	700.0
	19~10 years	49.2	50.7	56.1	52.2	52.1	676.2	703.5	730.3	740.8	712.7
	Less than 10 years	49.8	51.9	55.6	56.4	53.4	682.3	701.7	740.2	750.1	718.6
	Avg.	48.8	50.1	54.2	52.0	51.3	665.9	686.7	719.6	733.8	701.5
Middle school	More than 30 years	47.8	47.6	51.8	47.8	48.8	656.4	672.7	704.8	723.6	689.4
	29~20 years	49.8	51.8	54.2	51.4	51.8	687.7	690.2	715.3	739.6	708.2
	19~10 years	50.6	52.9	55.2	51.6	52.6	672.5	717.7	727.1	743.1	715.1
	Less than 10 years	46.0	50.4	54.1	52.9	50.9	702.2	728.9	752.1	757.6	735.2
	Avg.	48.6	50.7	53.8	50.9	51.0	679.7	702.4	724.8	741.0	712.0
High school	More than 30 years	46.6	47.5	49.5	46.8	51.0	685.2	716.0	723.8	733.9	714.7
	29~20 years	49.5	48.4	54.5	48.1	47.6	717.8	740.3	752.9	771.0	745.5
	19~10 years	51.0	51.7	53.9	48.3	50.1	718.7	736.4	734.9	758.1	737.0
	Less than 10 years	52.0	53.9	51.9	50.1	50.2	712.3	735.0	739.6	767.2	738.5
	Avg.	49.8	50.4	52.5	48.3	50.2	708.5	731.9	737.8	757.6	733.9

Table 7. Number of schools exceeding standard of PM₁₀ and CO₂ according to age of school facilities

Classification		PM ₁₀ (μg/m ³)				CO ₂ (ppm)			
		2016	2017	2018	2019	2016	2017	2018	2019
Elementary school	More than 30 years	544	644	922	771	86	87	91	72
	29~20 years	621	760	1071	927	10	9	10	10
	19~10 years	96	131	182	186	9	8	8	8
	Less than 10 years	35	49	90	103	0	0	1	0
Middle school	More than 30 years	269	312	433	373	4	5	7	4
	29~20 years	304	367	513	454	0	0	0	0
	19~10 years	52	80	92	93	0	0	0	0
	Less than 10 years	14	24	43	47	0	0	0	1
High school	More than 30 years	186	232	292	267	2	1	0	0
	29~20 years	219	271	357	317	0	0	0	0
	19~10 years	34	47	66	52	0	0	0	0
	Less than 10 years	19	26	24	35	0	0	1	0

4.5 학생 성비(性比)에 따른 PM₁₀ 및 CO₂ 현황

성비에 따른 실내공기질 현황분석은 남학교, 여학교, 남녀공학으로 분류하여 중, 고등학교를 대상으로 하였다.

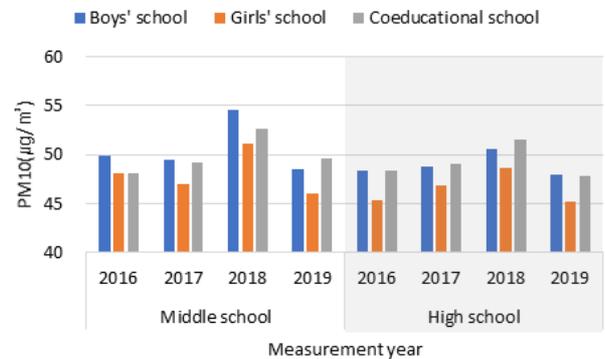


Fig. 5. Particulate matter(PM₁₀) concentration by type of school

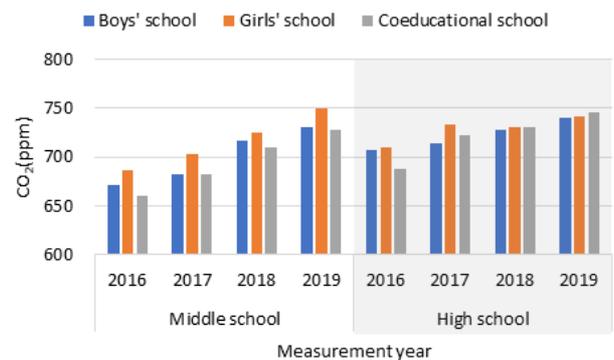


Fig. 6. Carbone dioxide(CO₂) concentration by type of school

분석결과 중학교와 고등학교 모두 PM₁₀ 농도는 남학교 > 남녀공학 > 여학교 순으로 높게 나타났다. 그러나 CO₂ 농도는 중학교의 경우 여학교 > 남학교 > 남녀공학 순으로 나타났으며, 고등학교의 경우 여학교의 CO₂ 농도가 대체적으로 높았으나, 2018년, 2019년에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 학급당 평균 학생수는 남학교 25.6명, 여학교 25.3명, 남녀공학 22.9명으로, 남학교와 여학교의 학생수는 유사한 수준이었으나 남녀공학은 재실인원의 2명 이상 차이가 있었다. 따라서 재실인원이 유사한 남학교와 여학교만 비교하면, 4개년 평균 PM₁₀은 남학교 49.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 여학교 47.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 남학교의 농도가 높았으며, CO₂는 남학교 711.2 ppm, 여학교 722.2 ppm으로 여학교의 농도가 높았다.

5. 분석결과

국내 학교시설에 대한 일반적인 현황 조사 및 특성에 따른 미세먼지(PM₁₀), 이산화탄소(CO₂) 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

2019년 기준으로 일반 학교수는 총 11,870개로, 이 중 초·중·고의 비율은 각각 52.9%, 27.3%, 19.8%이다. 지역별로는 전체의 31.4%가 서울 및 경기지역에 위치하고 있었다. 나머지 지역에 위치한 학교수는 전체의 10% 미만이다.

학급당 평균 학생수는 초등학교 21.4명, 중학교 24.0명, 고등학교 24.3명으로 전체 학급당 재실인원은 평균은 23.2명인 것으로 나타났다. 환기설비(기계)는 57.5%의 학교시설에 설치되어있었고, 건축연한이 30년 이상인 초·중·고의 비율은 각각 68.8%, 66.9%, 68.2%로 매우 높은 비율을 차지했으나, 10년 미만의 비율은 각각 6.6%, 7.7%, 7.7%로 조사되었다.

PM₁₀ 및 CO₂ 현황은 학교 유형, 건축연한, 학생 성비 특성에 따른 분석결과이다. 초·중·고 유형별 구분에 따른 실내 평균 PM₁₀, CO₂ 농도는 기준인 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1,000ppm을 모두 만족하고 있었다. 그러나 기준을 초과하는 학교 수가 일부 발생했다.

연도별 PM₁₀은 매년 증가하다 2018년 기간 동안 감소하는 모습을 보였다. 2018년은 미세먼지 저감 대책 실시 및 관리기준 강화가 시행된 해이다. CO₂은 PM₁₀과 반대로 매년 증가하고 있었다.

4개년도 합산 평균 농도를 비교하면, PM₁₀은 초등학교 49.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중학교 49.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 고등학교 48.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 초등학교와 중학교는 유사하였고, 고등학교가 제일 낮았다. 그러나 농도값이 가장 큰 초등학교 49.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 고등학교 48.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과의 차이는 1.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. CO₂의 경우 초등학교는 상급 학교일수록 농도가 증가하였다. PM₁₀과는 반대되는 양상을 보였다.

학교시설의 건축연한에 따른 결과, 초·중·고를 합산한 4개년 평균 PM₁₀ 농도는 30년 이상 48.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 20년 이상 30년 미만 50.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10년 이상 20년 미만 52.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10년 미만 52.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. CO₂ 농도는 30년 이상 692.9 ppm, 20년 이상 30년 미만 717.9 ppm, 10년 이상 20년 미만 721.6 ppm, 10년 미만 730.8 ppm이며, 연한이 증가할수록 PM₁₀과 CO₂ 모두 증가하고 있었다.

중학교와 고등학교를 대상으로 성비에 따른 분석결과, 남학교와 여학교의 4개년 평균 PM₁₀은 각각 49.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 47.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 남학교

의 농도가 높았으며, CO₂는 각각 711.2 ppm, 722.2 ppm으로 여학교의 농도가 높아 남학교와 여학교 서로 상반되는 결과가 나타났다. 이 중 PM₁₀은 신은상 외(2002)의 연구에서 남학교의 PM₁₀ 농도가 여학교보다 높았다고 한 연구와 유사한 결과를 보였다[25]. 이 결과는 PM₁₀의 농도가 교실 내 활동량과 관계가 있다는 최상준(2008)의 연구와 학교에서 남학생의 활동량이 여학생보다 4.54% 더 많다는 강형길 외(2015)의 연구를 종합하여 남녀의 활동량에 따라 이러한 결과가 나타났다고 유추할 수 있다[26, 27].

6. 결론

본 연구의 목적은 학교시설의 특성을 고려할 수 있는 공기청정 환기 시스템의 제어 기술 개발을 위한 기초연구로서 일반적인 환경 및 학교 특성을 고려할 수 있는 데이터를 조사·분류하여 비교·분석하였다. 실내공기질 대상 오염물질은 미세먼지 및 이산화탄소 농도이며, 연구의 결과는 다음과 같다.

첫째, 2019년 기준 일반 학교 시설은 11,870개로 초등학교 52.9%, 중학교 27.3%, 고등학교 19.8%의 분포를 보이고, 전체의 31.4%가 서울 및 경기지역에 위치하였다. 또한 학급당 평균 학생 수는 약 21~25명이다. 또한 학교시설의 건축연한은 초·중·고 모두 30년 이상인 학교가 절반이상으로, 10년 미만의 학교는 전체의 10%미만이다. 이를 통해 서울·경기 지역에 위치하고 있는 교실 당 23명 내외의 교실을 표준교실로 정할 수 있다.

건축연한은 건축물의 기밀성능에 영향을 미치고, 기밀성능은 다시 실내외 오염물질의 유출입, 환기성능 등에 영향을 주기 때문에 공기청정 환기시스템 적용 시 이에 대한 고려가 필요하다고 사료된다.

둘째, 학교시설의 건축연한별 미세먼지와 이산화탄소의 농도 조사 결과, 미세먼지 농도의 경우 연한별로 큰 차이를 발견할 수 없었으나 이산화탄소의 경우 건축연한이 오래될수록 평균 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 이를 통해 건물기밀성능과 이산화탄소의 농도 상관관계가 높은 것으로 사료된다.

셋째, 학생 성비(性比)에 따른 실내공기질 분석 결과, 미세먼지 농도는 남학교 > 남녀공학 > 여학교 순으로 높았으며, 이산화탄소는 남학교, 남녀공학에 비해 여학교의 농도가 높았다. 이를 통해 남녀의 재실비율 또한 실내공기질에 대한 주요한 요소이며, 공기청정 환기 시스템 적용 시 이에 대한 고려가 필요하다고 사료된다.

본 연구는 학교시설의 기초적인 현황분석을 통해 고려해야 할 공기청정 환기시스템 적용 시 이에 대한 고려해야 할 사항을 확인하였다.

공기청정 환기시스템 개발 및 적용을 위해서는 폼알데하이드 및 휘발성 유기화합물 등 기타 실내공기오염물질에 대한 발생 및 거동 분석, 실내외 온·습도, 대기환경, 리모델링, 재실자의 활동량, 건물 스케줄 등의 실태조사가 추가로 필요하다. 따라서 본 연구 결과 자료를 바탕으로 실태조사 대상 학교 및 교실을 선정하고, 추가 연구를 통해 실내공기질 영향인자 도출이 가능하다.

Acknowledgement

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

Reference

- [1] 차동원, 실내공기오염, 기문당, 2010, pp.72-210. // (D.W. Cha, Indoor Air Pollution, Kimoondang, 2010, pp.72-210.)
- [2] 김진옥 외 1인, 자연기반 야외활동 참여자의 가치가 미세먼지위험지각과 책임귀인을 통해 환경정책지지에 미치는 영향: VBN(Value-Belief-Norm)이론을 적용, 관광연구저널, 제33권 제3호, 2019.03, pp.5-20. // (J.S. Kim et al., The Effect of Values of Nature-Based Outdoor Recreation on Environmental Policy Support through Particulate Matter Risk Perception and Ascription of Responsibility: An Application of VBN(Value-Belief-Norm), International Journal of Tourism and Hospitality Research, 33(3), 2019.03, pp.5-20.)
- [3] 박동윤 외 1인, 상호일체형 환기시스템 및 중앙냉방시스템 연계 운영에 대한 수치해석적 연구, 한국대기환경학회지, 제31권 제4호, 2015.08, pp.385-395. // (D.Y. Park et al., Numerical Analysis on the Coupled Operation of Ventilation Window System and Central Cooling System, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 31(4), 2015.08, pp.385-395.)
- [4] 대한건축학회, 건축환경계획(건축학전서 9), 기문당, 2003, pp.176-184. // (The Architectural Institute of Korea, Architectural Environment Planning(Architecture 9), Kimoondang, 2003, pp.176-184.)
- [5] 양원호, 학생들의 시간활동 양상 및 학교 실내공기질, 교육시설, 제21권 제6호, 2014.11, pp.17-22. // (W.H. Yang, Time-activity Pattern of Students and Indoor Air Quality of School, Educational facilities, 21(6), 2014.11, pp.17-22.)
- [6] 정지원 외 1인, 초등학교 교실에서 학생활동에 따른 먼지 농도 구성의 변화, 한국대기환경학회 학술대회논문집, 2004.04, pp.253-254. // (J.W. Jung et al., Korean Society for Atmospheric Environment Proceedings, 2004.04, pp.253-254.)
- [7] 양원호, 기후변화에 따른 대기오염물질 농도 변화 및 미세먼지 노출에 의한 건강 영향, 보건복지포럼, 제269호, 2019.03, pp.20-31. // (W.H. Yang, Changes in Air Pollutant Concentrations Due to Climate Change and the Health Effect of Exposure to Particulate Matter, Health and Welfare Policy Forum, 269, 2019.03, pp.20-31.)
- [8] 김은수 외 1인, 서울시 미세먼지오존 통합관리 전략, 서울연구원 정책과제연구보고서, 2018.12. // (W.S. Kim et al., A Study for Developing an Integrated Air Quality(Ozone and PM_{2.5}) Management Framework in Seoul, The Seoul Institute Policy Research Report, 2018.12.)
- [9] 이병희, 미세먼지의 입경에 따른 특성 및 실내 영향, 건축환경설비, 제12권 제2호, 2018.04, pp.6-15. // (B.H. Lee, Characteristics and Room Effect According to Particle Size of Particulate Matter, Building Environment Facility, 12(2), 2018.04, pp.6-15.)
- [10] 교육부, 학교 고농도 미세먼지 대책 발표, 2018.04.06. // (Ministry of Education, Announcement of Measures for Particulate Matter at School, 2018.04.06.)
- [11] 박철수, 건축환경설비 분야의 인공지능 관련 최신 기술 및 연구동향, 건축환경설비, 제11권 14호, 2017.12, p.4. // (C.S. Park, Latest Technology and Research Trends Related to Artificial Intelligence in Building Environment Equipment, Construction Environment Equipment, 11(4), 2017.12, p.4.)
- [12] 학교알리미 홈페이지, <https://www.schoolinfo.go.kr>.
- [13] 이정재 외 2인, 부산지역의 신축학교 실내공기질 현장측정, 대한건축학회논문집 계획계, 제21권 제6호, 2005.06, pp.175-182. // (J.J. Yee et al., A Field Survey on the Indoor Air Quality of Newly Built Schools in Busan, Journal of Architectural Institute of Korea, 21(6), 2005.06, pp.175-182.)
- [14] 정민희 외 4인, 환경친화적 학교시설 계획을 위한 환경성능 실태조사 한국생태환경건축학회 학술발표대회 논문집, 통권12호, 2007.06, pp.233-238. // (M.H. Jeong et al., A Study on Survey of Indoor Environmental Performances to Develop the Sustainable Education Facilities, Proceedings of Korea Institute Of Ecological Architecture And Environment, 12, 2007.06, pp.233-238.)
- [15] 조성민 외 5인, 초등학교의 실내공기 오염물질 제거 성능 분석, 대한설비공학회 동계학술발표회 논문집, 2017.11. // (S.M. Cho et al, Analysis of Indoor Air Pollutants Removal Performance at Elementary Schools, 2017 SAREK Fall Annual Conference, 2017.11.)
- [16] 정승민 외 3인, 외부 풍속에 따른 학교건물의 미세먼지 유입량 변화에 관한 연구, 한국건축친환경설비학회 2018 추계학술발표대회, 2018.11. // (S.M. Jeong et al., A Study on the Inflow of Particulate Matter Concentration Variation due to External Wind Speed into School Buildings, 2019 Fall Conference of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 2018.11.)
- [17] 임예슬 외 1인, 현장실험을 통한 초등학교 교실의 실외 미세먼지 침입특성 분석, 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제39권 제2호, 2019.10, p.356. // (Y.S. Eom et al., On-site Experiment on Outdoor Particle Infiltration Characteristics in a Elementary School Classroom, Annual Conference of AIK, 39(2), 2019.10, p.356.)
- [18] 이윤규 외, 교실 미세먼지 저감을 위한 환기설비 적용방안, 대한설비공학회 2018년도 하계학술발표대회, 2018.06. // (Y.G. Lee, A Study on the Application of Ventilation Equipment to Reduce Particulate Matter in School Classroom, 2018 SAREK Summer Annual Conference, 2018.06.)
- [19] 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.)
- [20] 실내공기질 관리법 시행규칙(환경부령 제773호, 시행 2018.10.18.) // (Enforcement Rules of the Indoor Air Quality Control Act(Department of the Environment Command No.773, Effective Date: 2018.10.18.))
- [21] 학교보건법 시행규칙(교육부령 제185호, 시행 2019.07.03.) // (Enforcement Rules of the School Health(Ministry of Education Command No.185, Effective Date: 2019.07.03.))
- [22] 교육부 공고 제2019-203호, ‘(가칭)학교 공기정화장치 등 설치 및 운영에 관한 고시’ 제정안 행정예고, 2019.06.17. // (Ministry of Education Notice No. 2019-203, Public Notice on ‘Installation and Operation of School Air Purification System’, 2019.06.17.)
- [23] 교육부 동정자료(유은혜 부총리), 학교미세먼지 대응상황 점검 및 현장의견 청취, 2019.12.20. // (News of the Ministry of Education(Deputy Prime Minister Yoo Eun-hye), Check School Particulate Matter Response and Listen to Field Opinions, 2019.12.20.)
- [24] 학교 환경위생 및 식품위생 점검기준(교육부 고시 제2017-113호, 시행 2017.02.16.) // (School Environmental Hygiene And Food Hygiene Inspection Criteria (Ministry of Education Notice No. 2017-113, Enforcement 2017.02.16.)
- [25] 신은상 외 1인, 수원지역 초·중·고등학교 교실의 실내 공기오염도에 관한 연구, 환경위생공학, 제17권 제1호, 2002.03, pp.20-27. // (E.S. Shin et al., A Study on the Indoor Air Pollution Levels in the Classrooms at Public Schools in Suwon, Journal of Environmental and Sanitary Engineering, 17(1), 2002.03, pp.20-27.)
- [26] 최상준, 대기오염과 실내 거주자의 활동도가 교실 내부의 입자 크기별 먼지 농도에 미치는 영향, 한국환경보건학회지, 제34권 제2호, 2008, pp.137-147. // (S.J. Choi, The Effect of Outdoor Air and Indoor Human Activity on Mass Concentrations of Size-Selective Particulate in Classrooms, Journal of Environmental Health Sciences, 34(1), 2008, pp.137-147.)
- [27] 강형길 외 1인, 중학생 신체활동의 영역별·강도별 수준 및 신체적 자기효능감과의 관계, 체육과학연구, 제26권 제4호, 2015, pp.904-916. // (H.K. Kang et al., Levels and Areas of Physically Active Lifestyle among Korean Middle School Students and Relationships to Physical Self-Efficacy, Korean Journal of Sport Science, 26(4), 2015, pp.904-916.)