



RESEARCH ARTICLE

초등학교 체육시설내 실측을 반영한 미세먼지 저감방안 연구

차대오¹ · 황정하^{2*}

¹경북대학교 건축공학과 석사과정, ²경북대학교 건축학부 교수

A Study on PM10 Reduction Reflecting Actual Measurement in Elementary School Sports Facility

Cha, Dae-O¹ · Hwang, Jung-Ha^{2*}

¹Master's Course, School of Architectural Civil, Environmental and Energy, Kyungpook National University, Daegu, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

*Corresponding author: Hwang, Jung-Ha, Tel: +82-53-950-8544, E-mail: peter@knu.ac.kr

ABSTRACT

This study targeted school sports facilities with general area and ventilation system and measured the changes in PM10 concentration according to students' activities, analyzed the amount of fine dust generated, and simulated the efficiency of fine dust reduction according to the ventilation method. According to the study, the PM10 reduction efficiency compared to without ventilation[C-1] was 34% in operating EHP[C-2] when PM10 alarm is good, 24% in [C-2] when PM10 alarm is normal, 16% in [C-2] when PM10 alarm is bad, 26% in opening window[C-3] when PM10 alarm is good, and 0% in [C-3] when PM10 alarm is normal, bad. In case of installed HEPA filter in EHP[C-4] reduction efficiency was 34% when PM10 alarm is good, 28% when PM10 alarm is normal, 22% when PM10 alarm is bad. In sided ventilation[C-5], the PM10 reduction efficiency was 53% when PM10 alarm is good, 48% when PM10 alarm is normal, and 41% when PM10 alarm is bad. As a result, Sided ventilation[C-5] installed close to generate factor was the most suitable ventilation system.

주요어 : 체육시설, 실내 미세먼지, 실측 실험, 환기시뮬레이션, 저감방안

Keywords: School sports facility, Indoor particle matter, Measurement experiment, Ventilation simulation, Reduction method

서론

미세먼지는 2013년 국제보건기구(WHO) 산하 연구기관 국제암연구소(IARC)에 의해 발암물질 1등급으로 분류된 이후 범국민적 관심을 받고 있다. 연구를 통해 인체에 유해한 것으로 밝혀진 미세먼지(Park, 2007)는 적절하게 환기되지 못했을 경우, 실내에 머물면서 장시간 건강에 영향을 미칠 수 있다. 실내 미세먼지의 주요 발생원인은 활동으로, 특히 어린 학생에게 더 유해할 수 있어 초등학교를 대상으로 한 미세먼지 저감연구가 요구된다.

OPEN ACCESS

Journal of KIAEBS 2021 October, 15(5): 443-458
<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20210038>

pISSN : 1976-6483
eISSN : 2586-0666

Received: August 19, 2021
Revised: September 26, 2021
Accepted: October 3, 2021

© 2021 Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이에 환경부는 공기 질 등의 유지·관리기준(ME, 2019)을 통해 미세먼지 농도를 활동이 많은 학교내 체육시설에서 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 유지하도록 규정하고 있다. 또한, 학교내 미세먼지 저감에 관한 연구로 교실내 환기설비 적용방안(Lee and Kim, 2018), 학교 교실 환기시스템 운전제어 방안(Jeong, 2018), 창호부착형 환기설비(Kim, 2020) 등에 관한 연구가 진행되었으나, 체육시설내 학생들의 체육수업 활동에 의한 미세먼지의 발생과 저감방안에 관한 연구는 미흡한 것으로 나타났다.

따라서 본 연구는 실측을 통하여 학생들의 활동에 의한 미세먼지 변화량을 입력값으로 시뮬레이션한 연구로서 체육시설내 미세먼지 저감에 적합한 방안을 제시하였다.

활동에 따른 미세먼지 농도 실측 분석

대상건축물의 선정

대상건축물을 선정하기 위하여 정보공개서비스를 통해 조사된 대구내 40개 초등학교의 체육시설을 미세먼지 환기에 영향을 줄 수 있는 요소인 면적과 설치된 환기장치 현황에 따라 분류하여 Figure 1에 나타냈다. 체육시설의 면적이 중형(450~900 m^2)이며, 일반적인 스탠드형 Electric Heat Pump(이하 EHP)가 설치된 초등학교를 대상건축물로 선정하였다. 대상건축물의 체육시설은 천장이 아치형으로 높고, 2층은 창문이 설치되어 있으나 닫힌 상태를 유지하였고, 그 개요는 Table 1과 같다.

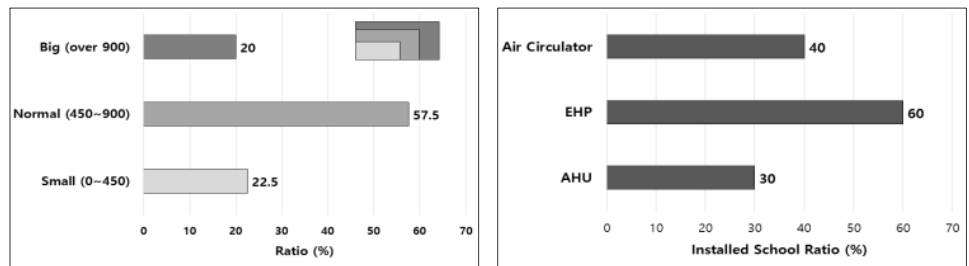


Figure 1. Status of area of sports facility and installed ventilation system

Table 1. Overview of the target building

Item	Specification
Number of students	556
Number of participants in physical education class	22 (1 Class)
Area of sports facility (m^2)	462
Height of sports facility (m)	Up to 9 (Arch type)
Installed ventilation system	6 ea, Floor type EHP, Size: $1050 \times 1880 \times 495 \text{ mm}$ (W×L×D) 2 ea, Floor type EHP, Size : $800 \times 1880 \times 440 \text{ mm}$ (W×L×D)

미세먼지 실측 개요

대상건축물내 미세먼지 농도를 실측하기 위하여 학생들의 체육수업 현황을 조사하였다. 교육부에서 제시한 교육지침에 따르면, 주중 권장되는 체육수업 시간은 3시간이며 COVID-19 사태에 따라 초등학교는 체육수업을 1개반 단일 수업으로 진행하는 것으로 나타났다. 체육수업은 오전 1~4교시동안 실시되었고, 실측 시 체육수업 시간표는 Table 2와 같다.

미세먼지 실측은 2021년 4월 22일~23일(2일간) 진행하였고, 외기 측정점 1곳, 실내 측정점 2곳의 총 3곳에서 진행하였으며, 실측점의 위치는 Figure 2와 같다. 실측점의 위치는 외벽을 기준으로 각각 실내측과 실외측 벽면 부근에 설치하여 외기에 의한 영향을 평균적으로 나타낼 수 있도록 하였고, 실측점은 학생들이 활동하는 지점과 가깝게 설치하되, 학생들의 활동을 방해하지 않는 위치에 설치하였다. 실측점의 높이는 교육부의 학생건강검사 보고서(MOE, 2018)를 참고하여 바닥에서 1.4 m 높이 지점으로 설정하였으며, 실측 장비는 광산란방식의 TSI 9306 2대와 TSI 8530 1대를 사용하였다. 실측 장비는 실측 전 장비간의 오차를 보정하기 위하여 Figure 3과 같이 동일한 환경에서 20분간 미세먼지 농도를 측정 후, 미세먼지 농도가 약간 낮게 측정된 TSI 8530만 보정치(+0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 적용하였으며, 실측 장비의 제원은 Table 3과 같다. 실측 시 외부 환경조건은 Table 4에 나타냈으며, 실측 시 환기는 실내에서 발생하는 미세먼지 농도를 확인하기 위하여 실시하지 않았다.

Table 2. Class schedule

Item	Preparing to class	1 st class	Break time	2 nd class	Break time	3 rd class	Break time	4 th class
Time	20 min	40 min	10 min	40 min	10 min	40 min	10 min	40 min

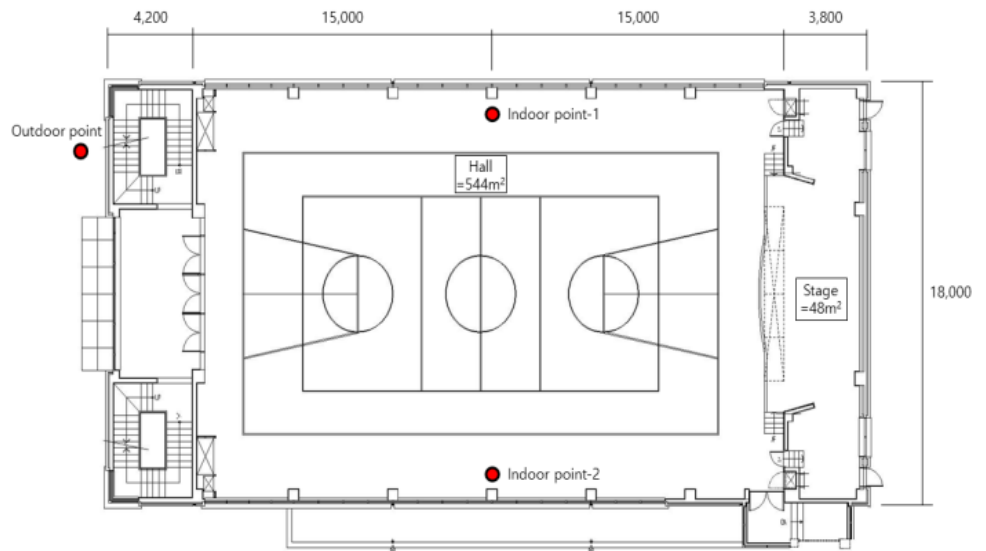


Figure 2. Floor plan and measurement point of target building

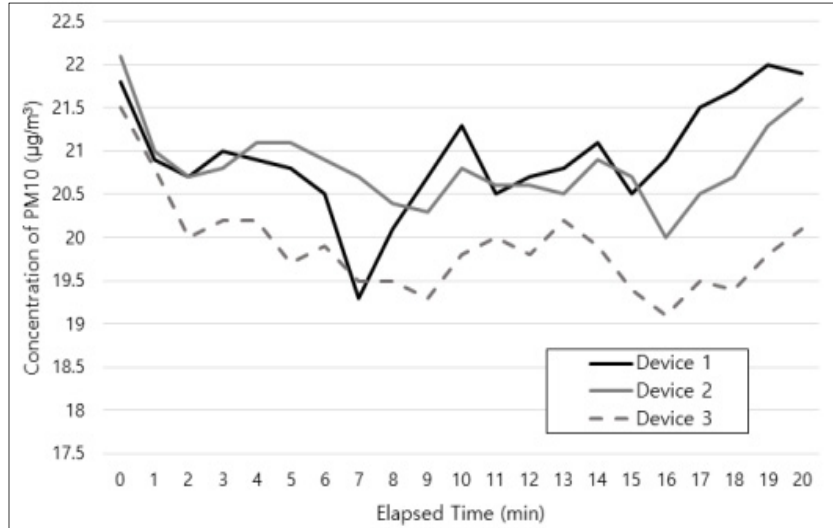


Figure 3. Concentration of PM10 for device calibration (20 min)

Table 3. Specifications of measuring equipment



Outfit	Model	Specification	Contents	location
	TSI 9306	Sensor type	Light scattering	2 ea, Indoor
		Range of measuring particle	0.3 ~ 10 µm	
		Range of measuring time	1 second ~ 99 hour	
		Size	117 × 297 × 124 mm	
		Weight	1,012 g	
	TSI 8530	Sensor type	Light scattering	1 ea, Outdoor
		Range of measuring particle	0.1 ~ 10 µm	
		Range of measuring time	1 second ~ 6 hour	
		Size	216 × 224 × 135 mm	
		Weight	2,000 g	

Table 4. Outdoor environment of measurement day

Date	Weather	PM10 alert level	Average wind speed (m/s)	Relative Humidity (%)
Day 1	Cloudy	Normal (30 ~ 80 µg/m³)	2, East wind	30
Day 2	Rain	Good (0 ~ 30 µg/m³)	3, East wind	60

미세먼지 실측 분석과 발생량 산출

2일간 진행된 미세먼지 농도 실측값을 Figure 4와 Table 5에 나타냈다. 실내 미세먼지 농도는 측정기 2곳의 값을 평균화하여 나타냈고, 1일차에 실시된 실측값을 Indoor-1, Outdoor-1, 2일차에 실시된 실측값을 Indoor-2, Outdoor-2로 각각 표기했다.

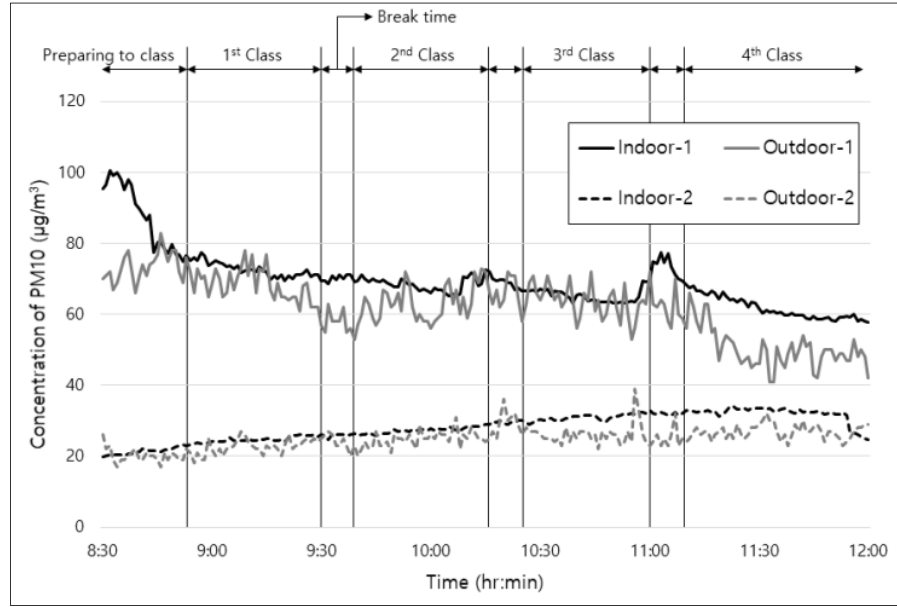


Figure 4. PM10 concentration changes in sports facility and outdoor

Table 5. Average PM10 concentration during measurement day ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Date	Location	Schedule				
		Preparing to class	1 st class	2 nd class	3 rd class	4 th class
Day 1	Indoor-1	89	73	69	67	60
	Outdoor-1	74	68	64	63	48
Day 2	Indoor-2	21	25	28	31	32
	Outdoor-2	20	22	25	26	27

1일차(21년 4월 22일)에 실시된 실측은 수업 준비 시간에서 이동하는 학생과 수업을 준비하는 교사의 활동으로 높아진 미세먼지 농도가 시간이 흐르며 점차 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 본 연구에서는 전 구간에 걸쳐 실내 미세먼지 농도가 실외보다 높은 것으로 나타났는데 이는 동일 대상으로 수행된 기존 연구에서 체육시설을 사용하지 않는 동안 측정된 I/O ratio가 0.3으로 분석된 점에 비추어볼 때, 학생들의 활동으로 인해 미세먼지가 재비산, 재부유하여 실내 미세먼지 농도 상승에 기여했기 때문으로 판단된다.

2일차(21년 4월 23일)에 실시된 실측은 외부 미세먼지 농도가 낮아 실내 미세먼지 농도도 1일차에 비해 낮은 것으로 나타났다. 그러나 실내 미세먼지 농도는 외부 미세먼지 농도보다 높고, 꾸준히 증가하는 양상을 보여주어 미세먼지 저감방안이 필요한 것으로 판단된다.

본 논문은 실내·외 미세먼지 농도비를 반영한 미세먼지 변화량 추정식 (1)을 이용하여 단위체적당 미세먼지 변화량을 계산하였으며, 해당 값을 시뮬레이션의 경계조건으로 사용하였다.

$$\Delta C_i = (C_{i2} - I/O_{ratio} \times C_{O2}) - (C_{i1} - I/O_{ratio} \times C_{O1}) \quad (1)$$

여기서, C_{i2} 는 현재 실내 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_{o2} 는 현재 외부 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), I/O ratio는 실내·외 미세먼지 농도비(-), C_{i1} 은 이전 실내 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_{o1} 은 이전 외부 미세먼지 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 의미한다. 식에 의해 미세먼지 발생량을 계산할 시, 음의 값은 무시하였고, 실내·외 미세먼지 농도비는 미사용 시간에 대상건축물에서 측정된 값에 근거하여 0.3을 적용하였다. 식에 의해 계산된 학생들의 활동에 따른 단위체적당 평균 미세먼지 발생량은 $96 \mu\text{g}/\text{h}$ 이다.

미세먼지 제거가 고려되지 않았을 때, 미세먼지 변화량은 외부 미세먼지에 의해 형성되는 값과 학생들의 활동으로 비산된 미세먼지에 의해 형성되는 값으로, 실내·외 미세먼지 농도비를 반영하여 학생들의 활동에 의한 미세먼지 변화량을 입력값으로 사용하였다.

미세먼지 저감방안에 따른 농도 분포 분석

미세먼지 저감방안 제시

본 연구는 시뮬레이션을 통해 환기시스템의 변화에 따른 초등학교내 체육시설의 미세먼지 농도를 분석하는 것으로 미세먼지 저감방안을 제시하였으며, Case 조건은 Table 6과 같다. 환기장치는 경우[C-1]를 설정하여 미세먼지의 확산과 환기시스템에 따른 각 Case별 미세먼지 저감 효율을 확인할 수 있도록 하였다. [C-2]는 실제 체육시설에 설치된 EHP가 가동하는 조건이며, [C-3]은 창문을 통한 자연환기가 실내 미세먼지 저감에 미치는 영향을 분석하기 위해 설정되었다. 또한, 환기장치가 아닌 단순 필터의 교체에 따른 미세먼지 농도 저감성능을 분석하고자 기존 EHP에 장착된 Pre-filter(효율 20%)를 고효율 필터인 HEPA filter(효율 90%)로 교체한 [C-4]를 설정하였으며, [C-5]는 최근 개발된 Fan Coil Unit(이하 FCU)에 덕트를 혼용하여 환기하는 측면환기 방식으로 미세먼지 발생원 부근에 여러 대를 설치하여 가동하는 조건이다.

Table 6. Overview of simulation case

Case number	Case name	Note
C-1	With no ventilation	Only PM10 generation exists
C-2	EHP operating	6 ea, Floor type EHP, Air volume : 2,512 CMM 2 ea, Floor type EHP, Air volume : 835 CMM
C-3	Window opening	Open all windows on the ground floor (21 ea, Size : 1050 × 400)
C-4	Filter Improved EHP	Replace pre-filter with HEPA filter
C-5	Sided ventilation	16 ea, Fancoil unit, Air volume : 1,008 CMM

시뮬레이션 개요

미세먼지 농도 분포 시뮬레이션은 STAR-CCM+(ver.11.06)을 이용하여 진행하였으며, Eulerian multiphase를 사용하여 미세먼지를 가스상 오염물질로 가정하였다. 난류모델은 $k-\omega$

난류모델이나 레이놀즈 응력 모델이 있으나, $k-\omega$ 난류모델은 많은 리소스를 필요로 하고, 레이놀즈 응력 모델은 정확한 해석을 위해 실측값이 필요하여 가장 일반적인 $k-\epsilon$ standard 난류모델로 설정하였다. PM10은 지름 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 먼지를 총칭하지만 본연구에서는 미세먼지의 대표 입자 크기를 $10\ \mu\text{m}$ 로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였으며, 경계조건은 Table 7과 같다.

시뮬레이션은 자연환기에 의한 효과를 포함하고 있어 외부 미세먼지 농도 수준을 경보 좋음($30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), 경보 보통($80\ \mu\text{g}/\text{m}^3$), 경보 나쁨($150\ \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 각각 구분하여 설정하였으며, 창문을 통한 환기는 외기와 실내의 미세먼지 농도차에 의해 이동하도록 개구부에 별도의 유속조건을 설정하지 않았다. 스탠드형 EHP는 실제 설치 조건으로 모델링 하였으며, 필터 효율은 Pre-filter 20%, HEPA filter 90%로 각각 설정하여 시뮬레이션하였다. 활동량 변화에 따른 미세먼지 농도 변화를 확인하기 위하여 활동량을 시간에 따라 변화시켜 Table 8과 같이 적용하였다. [C-5]에서 설치된 측면환기는 FCU로 체육시설 양옆에 설치하였으며, 측면에서 흡입되고, 상부에서 토출되는 방식이다.

분석점은 총 14곳으로 미세먼지 발생원에 가까운 4개소(중앙에서 2 m 지점), 미세먼지 발생원에서 조금 떨어진 6개소(중앙에서 7 m 지점), 미세먼지 발생원에서 먼 4개소(중앙에서 11 m 지점)이다. 미세먼지 농도는 분석점 14곳의 평균값을 사용해 나타냈으며, 시뮬레이션 모델링과 분석점은 Figure 5와 같다.

Table 7. Simulation input condition

		Setting	
Basic	Basic physics	Eulerian multiphase, Standard $k-\epsilon$ turbulent	
	Mesh type	Trimmer	
	Number of mesh	around 550,000	
	Turbulent length scale (m)	0.1	
	Maximum physical time (s)	12,000	
	Inlet/Outlet type	Mass flow Inlet, Velocity inlet, Pressure outlet	
	Inlet/Outlet air velocity (m/s)	1.4	
	Analysis height (m)	1.4	
PM10 concentration setting (alarm)	Good ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Outdoor Air	30
		Indoor Air	9
	Normal ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Outdoor Air	80
		Indoor Air	24
	Bad ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Outdoor Air	150
		Indoor Air	45

Table 8. Control of PM generation and air volume

Time	1 st Class (0~50 min)	2 nd , 3 rd Class (50~150 min)	4 th Class (150~200 min)
PM Generation	$76.8\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (20% ↓)	$96\ \mu\text{g}/\text{m}^3$	$115.2\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (20% ↑)

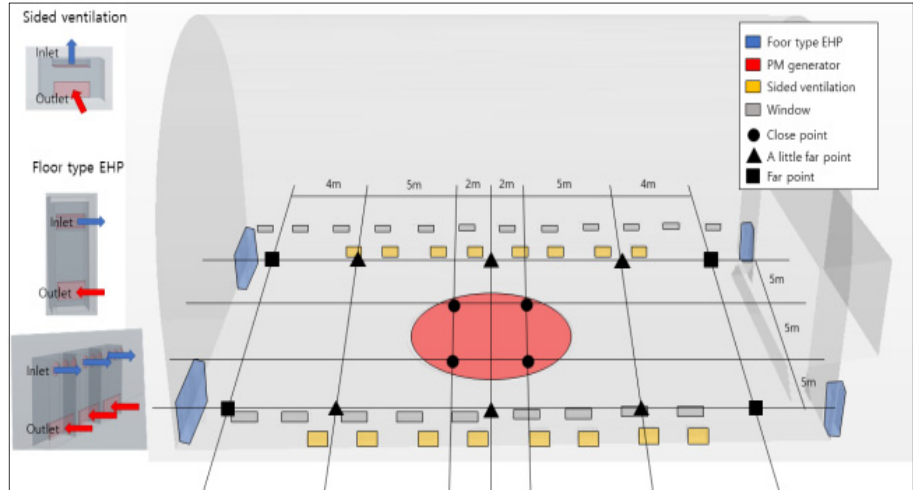


Figure 5. Simulation modeling and analysis points

시뮬레이션의 타당성을 입증하기 위하여 실측과 동일한 조건으로 시뮬레이션을 진행하였으며, 그 결과는 Figure 6과 같다. 실측을 통한 미세먼지 농도값 중 활동량에 따라 미세먼지 농도가 증가하는 2일차(21년 4월 23일)의 데이터를 기준으로 비교 분석하였다.

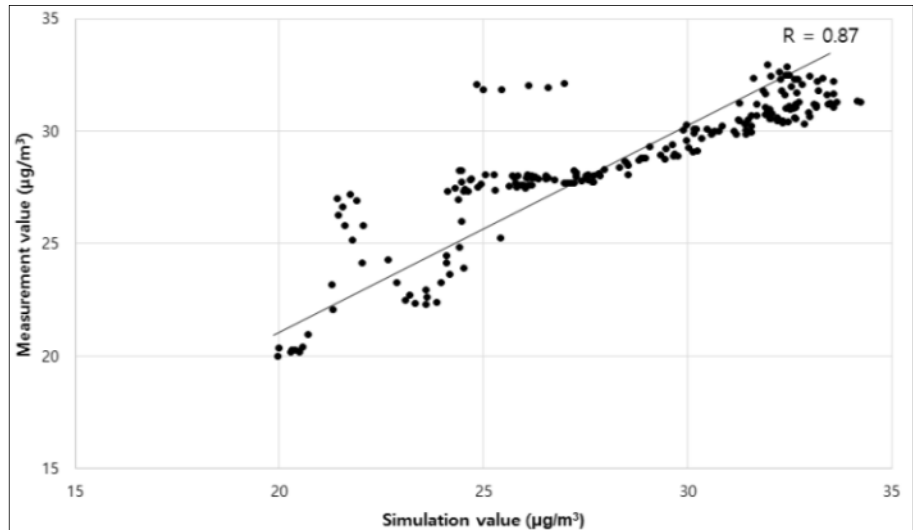


Figure 6. Distribution of measurement and simulation value

실측값과 시뮬레이션값을 비교 분석한 결과, 농도차는 최대 $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 다소 높게 나타났지만 미세먼지 농도의 변화 양상은 유사하였다. 두 농도값 사이의 상관성을 피어슨 적률 상관계수(R)를 통해 분석한 결과, 그 값이 0.87로 강한 양의 상관관계($R \geq 0.7$)를 가진 것으로 나타났다. 피어슨 적률 상관계수에 의한 상관관계 판정(양의 경우)은 Table 9와 같다. 이는 실측값과 시뮬레이션값 간에 높은 상관관계가 있음을 시사하는 결과로, 시뮬레이션이 이상적으로 현실을 반영하였다면 상관계수는 1의 값을 가진다. 이 결과는 두 변수간 관계를 완벽하게

설명하는 절대적인 값이라고 할 수는 없으나, 시뮬레이션의 타당성을 입증하기 위한 하나의 지표로 고려될 수 있다.

Table 9. Pearson's momentum correlation coefficient

R value	-0.1 < R ≤ 0.1	0.1 < R ≤ 0.3	0.3 < R ≤ 0.7	0.7 < R ≤ 1
Correlation	No correlation	Weak positive(+) correlation	Strong positive(+) correlation	Very strong positive(+) correlation

환기장치가 없을 시[C-1] 미세먼지 농도 분포

환기장치의 작동이 없을 시[C-1] 경보 수준에 따른 미세먼지 농도 변화를 Figure 7에 나타냈으며, 시뮬레이션 종료 후, 높이 1.4 m에서의 미세먼지 농도 분포도는 Figure 8과 같다.

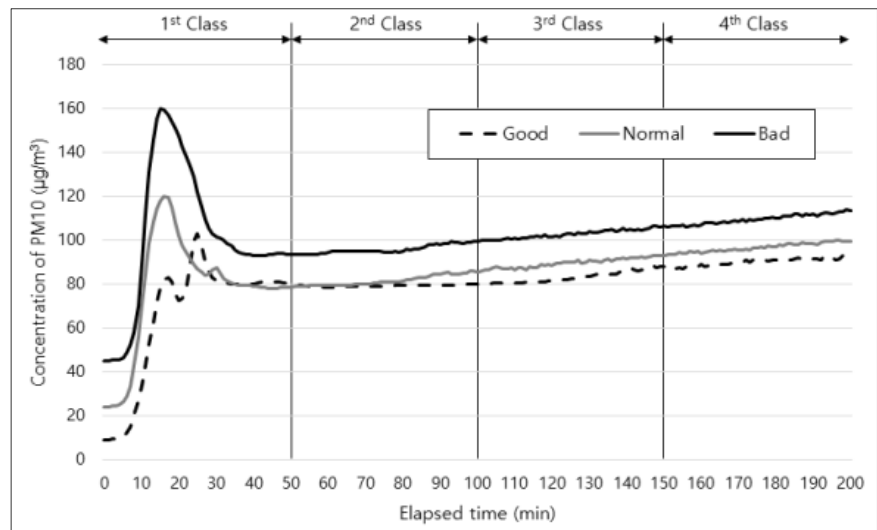


Figure 7. PM10 concentration changes over time in case of with no ventilation[C-1]

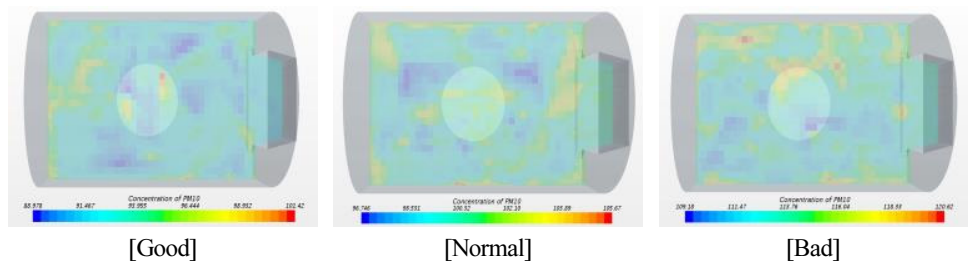


Figure 8. Distribution of PM10 concentration at 200 minutes by PM10 alarm[C-1]

환기장치가 없을 시[C-1] 미세먼지 농도는 20분동안 확산하지 않고, 농도만 크게 증가하다가 점차 체육시설내로 확산되며 안정되는 양상을 나타냈다. 경과시간 20분에서 30분 사이에는 미세먼지 농도는 감소하는 양상을 보이지만, 이는 미세먼지 저감 요인에 의한 제거가 아닌

확산에 의한 것으로 분석되었다. 활동량 변화에 따른 미세먼지 농도 변화는 2, 3교시에서 미세먼지 증가폭이 약간 상승한 것을 확인할 수 있지만, 그 차이가 미미하여 활동량 변화로 인한 영향은 적게 나타났다. 또한, 미세먼지 농도 분포도를 통해 환기장치가 없더라도 미세먼지가 체육시설 곳곳으로 확산됨에 따라 국부적으로 농도가 높은 영역이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

기존 EHP 작동 시[C-2] 미세먼지 농도 분포

기존 EHP 작동 시[C-2] 미세먼지 농도 변화를 Figure 9에 나타냈으며, 미세먼지 농도 분포도는 Figure 10과 같다.

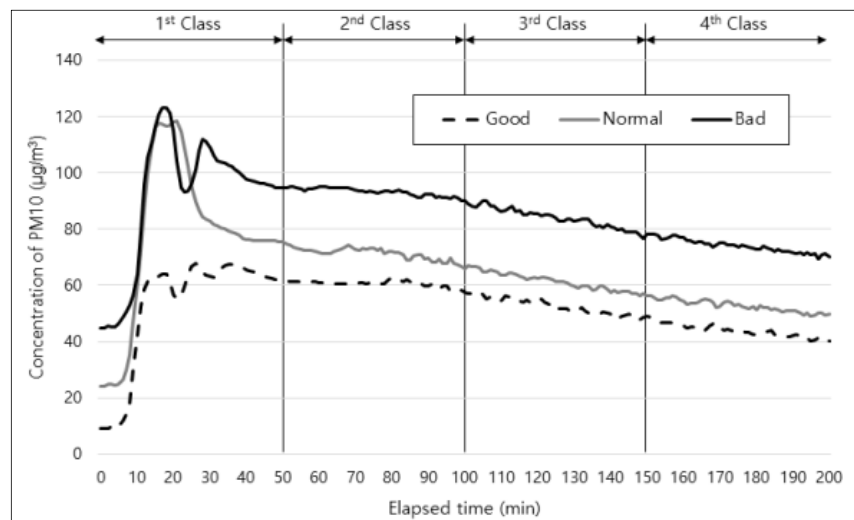


Figure 9. PM10 concentration changes over time in case of EHP operating[C-2]

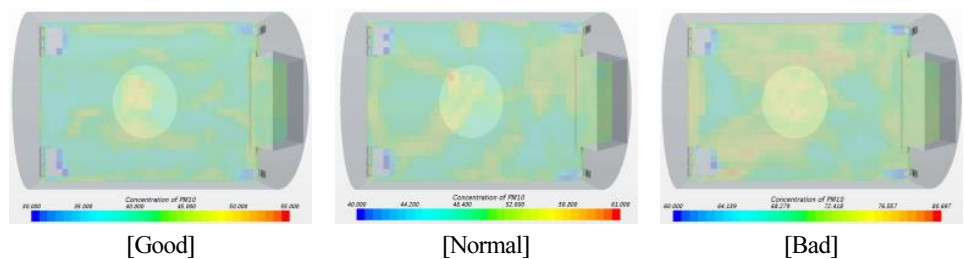


Figure 10. Distribution of PM10 concentration at 200 minutes by PM10 alarm[C-2]

기존 대상 체육시설에 설치된 EHP를 작동한 [C-2]에서 미세먼지 농도는 [C-1]과 유사한 것으로 나타났다. 그러나 미세먼지 농도가 확산되어 2교시부터 점차 증가했던 [C-1]과 달리 [C-2]의 미세먼지 농도는 설치된 8대의 EHP가 가동되어 미세먼지를 제거함에 따라 점차 감소하였다. 미세먼지 농도 평균값은 외부 미세먼지 농도 경보 수준과 관계없이 법적 기준을 만족하였으며, [C-1]보다 경보 좋음에서 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 보통에서 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮아 EHP 가동이 미세먼지를 제거하는데 효과가 있는 것으로 나타났다. 미세먼지 농

도 분포도에서 EHP 토출구 부근은 필터를 거친 신선한 공기의 확산으로 미세먼지 농도가 낮은 것으로 나타났고, EHP에 의해 형성된 기류의 흐름으로 체육시설내 미세먼지가 고르게 분포되었다.

자연환기 시[C-3] 미세먼지 농도 분포

자연환기 시[C-3] 미세먼지 농도 변화를 Figure 11 나타냈으며, 미세먼지 농도 분포도는 Figure 12와 같다.

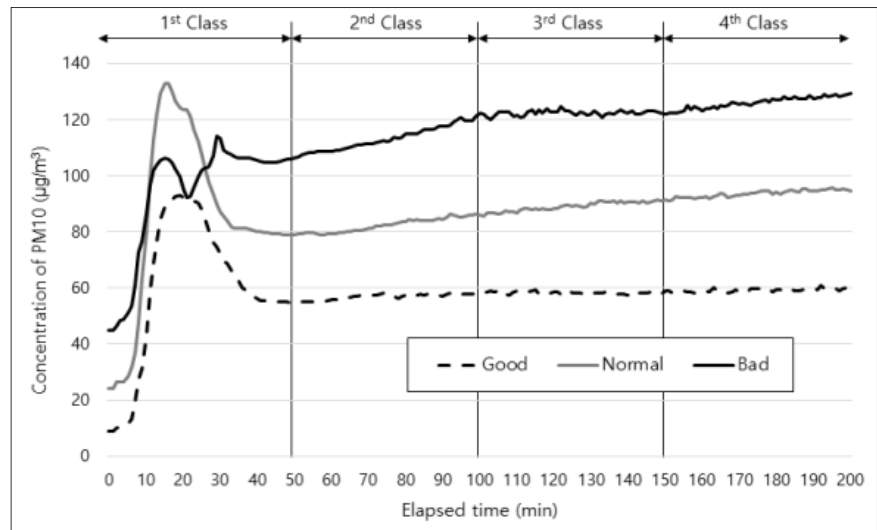


Figure 11. PM10 concentration changes over time in case of window opening[C-3]

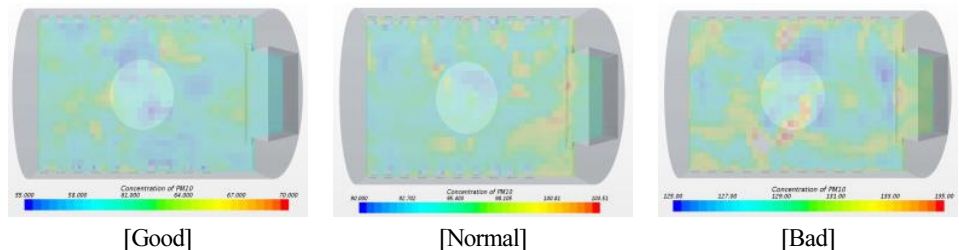


Figure 12. Distribution of PM10 concentration at 200 minutes by PM10 alarm[C-3]

제어가 자유로운 1층의 창문을 모두 개방한 [C-3]에서 미세먼지 농도는 [C-1], [C-2]와 유사한 양상을 나타냈다. 창문 개방에 의한 미세먼지 제거 성능은 외부 미세먼지 농도에 크게 영향을 받아 미세먼지 경보 좋음에서 미세먼지 농도가 꾸준히 증가하던 [C-1]과 달리 일정하게 유지되어 미세먼지 증가를 억제하는 효과가 있었다. 그러나 미세먼지 경보 보통, 나쁨에서는 오히려 미세먼지 농도가 증가하여 미세먼지 저감 효율은 떨어지는 것으로 확인되었다. 따라서, 실외 미세먼지 농도가 높은 경우에는 창문을 통해 실외 공기가 유입하여 오히려 실내 미세먼지 농도가 높아질 수 있음을 고려하여야 한다. 미세먼지 농도 평균값 분석에서 [C-1]보

다 경보 좋음에서 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 낮게 나타나 미세먼지 제거 효과가 있었으나, 경보 보통과 나쁨에서는 각각 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하여 미세먼지 제거 효과가 없는 것으로 나타났다. 미세먼지 농도 분포도에서 시뮬레이션이 종료되었을 때, 미세먼지 경보 좋음, 보통에서 창문 부근은 미세먼지 농도가 낮은 것을 확인할 수 있었지만, 미세먼지 경보 나쁨에서는 반대로 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타났다.

EHP에 HEPA filter 설치 시[C-4] 미세먼지 농도 분포

EHP에 HEPA filter 설치 시[C-4] 미세먼지 농도 변화를 Figure 13에 나타냈으며, 미세먼지 농도 분포도는 Figure 14와 같다.

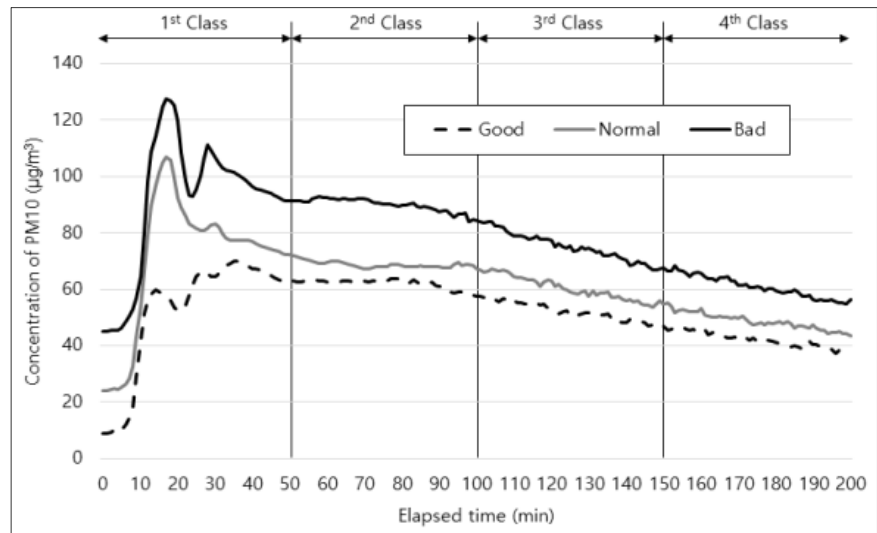


Figure 13. PM10 concentration changes over time in case of Filter Improved EHP[C-4]

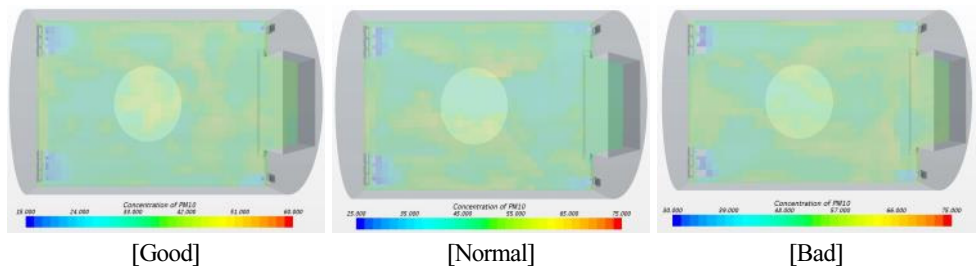


Figure 14. Distribution of PM10 concentration at 200 minutes by PM10 alarm[C-4]

기존 대상 체육시설의 EHP에 설치된 필터를 교체하여 미세먼지 제거 성능을 향상시킨 [C-4]의 미세먼지 농도는 [C-2]와 유사한 것으로 나타났다. 그러나 미세먼지 농도가 확산되어 2교시부터 점차 감소하는 양상에서 [C-4]는 [C-2]보다 미세먼지가 감소하는 속도가 급증하여 필터에 의한 미세먼지 농도 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 평균 미세먼지 농도가 [C-2]보다 경보 좋음에서 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 보통에서 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만

큼 감소한 것에서 확인할 수 있다. 미세먼지 농도 분포도에서 [C-2]와 유사하게 EHP 토출구 부근은 필터에 의해 미세먼지가 제거된 신선한 공기의 확산으로 미세먼지 농도가 낮은 것을 확인할 수 있었고, EHP에 의해 형성된 기류 흐름으로 체육시설내 미세먼지 농도가 고르게 분포되었다.

측면환기 시[C-5] 미세먼지 농도 분포

측면환기 시[C-5] 미세먼지 농도 변화를 Figure 15에 나타냈으며, 미세먼지 농도 분포도는 Figure 16과 같다.

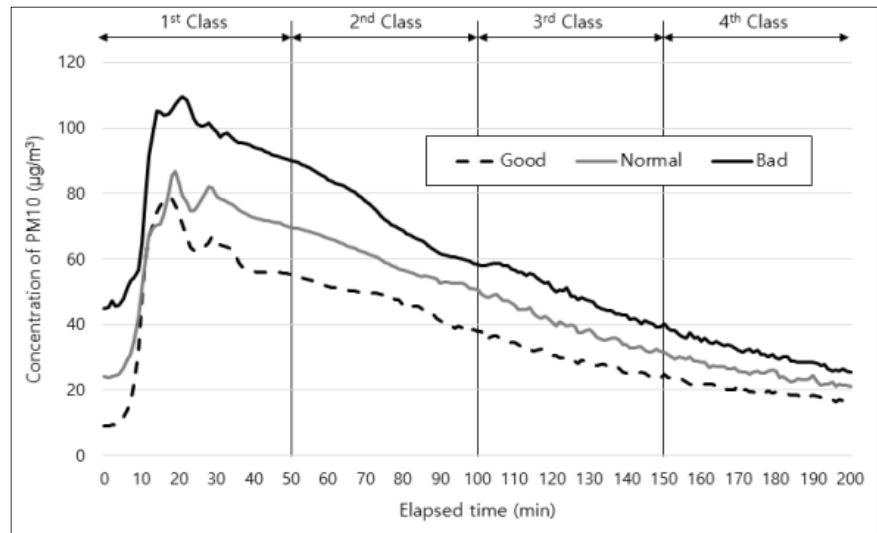


Figure 15. PM10 concentration changes over time in case of sided ventilation[C-5]

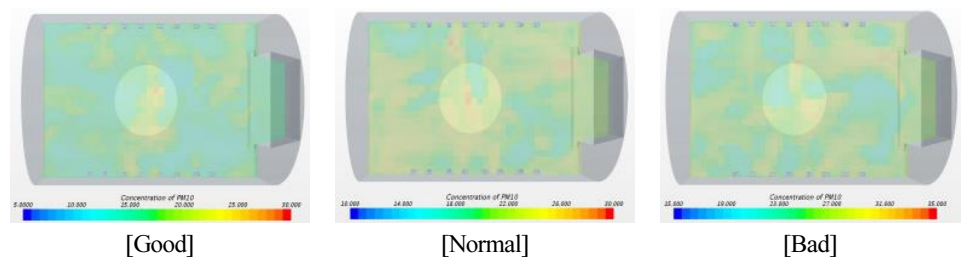


Figure 16. Distribution of PM10 concentration at 200 minutes by PM10 alarm[C-5]

체육시설 측면 벽에 덕트 혼용 FCU를 설치한 [C-5]에서 미세먼지 농도는 [C-2], [C-4]와 유사한 것으로 나타났다. 미세먼지 농도 평균값은 경보 수준과 관계없이 $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 매우 양호한 수준이며, 법적 기준 또한 만족한 것으로 나타났다. [C-1]과 비교해 경보 좋음에서 $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 보통에서 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 낮은 것으로 나타나 미세먼지 제거에도 효과적이었다. 또한, 미세먼지 농도 최소값도 모두 초기 실내 미세먼지 농도 이하로 양호한 수준이었으며, 미세먼지 농도 분포도에서 측벽에 설치된 FCU 부근은 신선 공기

의 취출에 의해 미세먼지 농도가 낮아진 것을 확인할 수 있었으나 미세먼지가 전반적으로 체육시설로 확산되는 것으로 나타났다.

Figure 17은 경보 수준에 따른 미세먼지 총량과 환기장치가 없을 시[C-1]의 미세먼지 농도 평균값을 기준으로 한 각 Case별 미세먼지 저감 효율을 나타낸다. 단, 미세먼지의 총량이 [C-1]보다 높거나 같은 경우에는 저감 효과가 없는 것으로 간주하고 0으로 표기하였다.

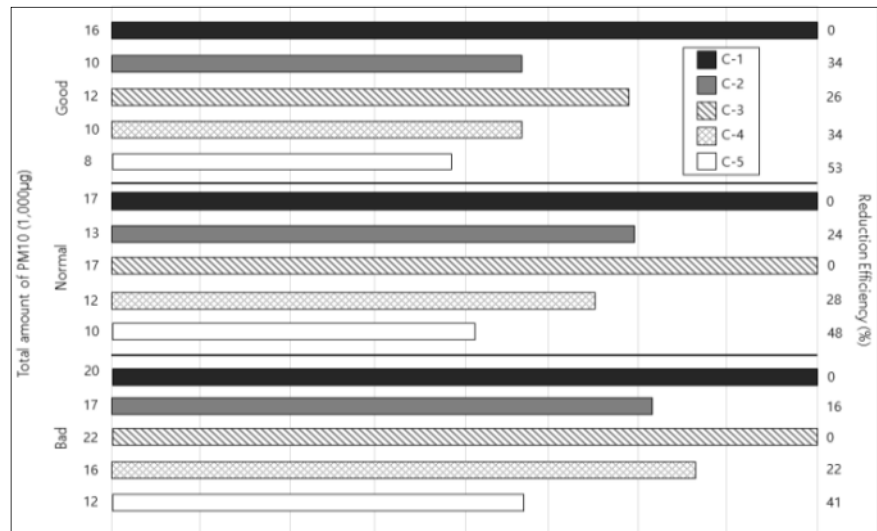


Figure 17. Total amount of PM10 and reduction efficiency by case and PM10 alarm

[C-1]과 비교한 결과, 모든 Case는 외부 미세먼지 농도가 낮을수록 저감 효율이 높은 것으로 나타났다. 특히, 자연환기 시[C-3] 미세먼지 저감 효율은 외부 미세먼지 농도에 크게 영향을 받아 경보 좋음에서 저감 효율이 26%로 양호하였으나, 경보 보통, 나쁨에서 저감 효율이 없는 것으로 나타났다. 또한, 기존 EHP 작동 시[C-2]의 저감 효율은 최대 34%, 최소 16%로 양호하였고, EHP에 HEPA filter 설치 시[C-4] 미세먼지 저감 효율은 최대 34%, 최소 22%로 EHP의 필터를 개선하지 않은 [C-2]보다 효율적이었다. 발생원과 가까운 곳에 환기장치를 설치한 측면환기 시[C-5] 미세먼지 저감 효율은 최대 53%, 최소 41%로 매우 양호하여 가장 적합한 환기방식인 것으로 확인되었다.

결론

본 논문은 학생들의 활동에 따른 미세먼지 농도 변화를 실측하고, 미세먼지 발생량을 입력값으로 미세먼지 저감 효율을 시뮬레이션하여 분석한 연구로써 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 미세먼지 실측 결과, 실내 미세먼지가 쉽게 환기되지 않아 미세먼지를 저감할 방안이 필요한 것으로 나타났으며, 실내·외 미세먼지 농도비를 이용한 미세먼지 발생량 추정식을 통해 산출된 단위체적당 평균 미세먼지 발생량은 96 µg/h로 나타났다.

- (2) 환기장치가 없을 시[C-1]에서 미세먼지 농도는 20분동안 크게 증가하다가 30분까지 확산되며 감소하는 양상을 보이지만, 미세먼지 제거 요인이 없어 이후 지속적으로 증가하였다.
- (3) 기존 EHP 작동 시[C-2]에서 미세먼지 농도는 설치된 8대의 EHP가 미세먼지를 제거하여 미세먼지 농도가 2교시 이후 점차 감소하였다. 미세먼지 농도 평균값이 [C-1]보다 경보 좋음에서 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 보통에서 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮게 나타나 미세먼지 저감 효과가 있었다.
- (4) 자연환기 시[C-3]에서 실내 미세먼지 농도는 외부 미세먼지 농도에 크게 영향을 받아 미세먼지 평균값이 [C-1]보다 경보 좋음에서 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 낮게 나타나 제거 효과가 있었으나, 경보 보통에서 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 평균값이 증가하여 제거하는 효과가 없는 것으로 나타났다.
- (5) EHP에 HEPA filter 설치 시[C-4]에서 미세먼지 농도 평균값이 필터를 개선하지 않은 [C-2]보다 경보 좋음에서 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 보통에서 $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 감소하여 저감 효율이 [C-2]보다 높게 나타났지만 큰 차이가 없었다.
- (6) 측면환기 시[C-5]에서 미세먼지 농도는 평균값을 기준으로 [C-1]과 비교해 경보 좋음에서 $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 보통에서 $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경보 나쁨에서 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 만큼 낮은 것으로 나타나 미세먼지 제거에 효과적이었다.
- (7) 미세먼지 저감 효율을 [C-1]과 비교하여 분석한 결과, [C-6]의 저감 효율이 경보 좋음에서 53%, 경보 보통에서 48%, 경보 나쁨에서 41%로 가장 높았고, [C-3]의 저감 효율은 외부 미세먼지 농도에 크게 영향을 받아 경보 좋음에서 26%로 저감 효과가 있었지만 경보 보통, 나쁨에서 저감 효율이 0%로 저감 효과가 없었다. [C-2]의 저감 효율은 최대 34%, 최소 16%로 효과가 있었고, [C-4]의 저감 효율은 최대 34%, 최소 22%로 [C-2]보다 저감 효율이 큰 것으로 나타났다.

최근 개발된 다양한 환기장치의 적용과 COVID-19 사태 이후, 정상적인 체육수업 진행에 따른 미세먼지 저감방안 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후기

이 논문(저서)은 2020학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

References

1. Kim, H.G. (2020). Particle Solution in School Classroom Using Window Attached Type Ventilation System. *Review of Architecture and Building Science*, 26-29.
2. Jeong, S.M. (2018). A Study on the Operation Control Method of Ventilation Equipment to Reduce Fine Dust in School Classroom. *Proceedings of the SAREK 2018 Winter Annual Conference*, 597-600.

3. Lee, Y.G., Kim, K.C. (2018). A Study on the Application of Ventilation Equipment to Reduce Fine Dust in School Classroom. Proceedings of the SAREK 2018 Summer Annual Conference, 597-600.
4. Park, E.J. (2007). Health Risk Assessment of Fine Particles and Their Hazardous Chemicals. Doctor's course. Department of Division of Preventive Pharmacy and Environmental Toxicology Graduate School, Dongduk Women's University, Korea.
5. Ministry of Education (MOE). (2018). Student Health Examination Report in 2018.
6. Ministry of Environment (ME). (2019). School Health Act. article 2.