

공기청정기의 위치와 풍량에 따른 교실 내 재실자 위치에서의 미세먼지 저감 효과에 대한 해석적 연구

An Analytical Study on The Effect of Reducing Particulate Matter Located Occupants' Position in a Classroom by Locations and Air Flow-Rate of Air Purifier

우상무* · 송해은* · 강울호** · 안영철*†

Sang-Moo Woo*, Hea-Eun Song*, Yul-Ho Kang** and Young-Chull Ahn*†

(Received 03 January 2023, Revision received 09 February 2023, Accepted 09 February 2023)

초록 : 교실 내 미세먼지 저감을 위한 공기청정기의 위치 및 풍량에 따른 효과에 관한 연구이다. 본 연구에서는 스탠드형 공기청정기를 설치한 것으로 가정하여 공기청정기의 작동 위치와 풍량에 따른 교실 내 미세먼지 저감효과를 분석하였다. 교실 체적에 대한 순환횟수 ACH 1, 2, 3, 4를 기준으로 산정된 풍량으로 CFD 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 공기청정기를 3,600초 동안 가동시킨 경우에 대한 해석 결과, 161.4 m³/h와 Case 3의 위치 조건에서 공기청정기를 작동시켰을 때 미세먼지 저감 성능은 다른 두 경우보다 23.6%, 43.2% 높았다. 645.5 m³/h 조건에서 공기청정기를 작동시켰을 때 미세먼지 저감 성능은 Case 1 조건에서 다른 조건보다 36.6% 높게 나타났다.

키워드 : 공기청정기, 전산유체역학, 교실, 입자농도, 미세먼지

Abstract : It is a study on the influence of locations and air flowrate of air purifier for reduced particulate matter in classrooms. It was analyzed that the effect of reducing particulate matter in the classroom according to the operating locations and air flowrate of air purifier. CFD simulation was used with calculated air flowrate base on ACH 1, 2, 3 and 4 of the volume of the classroom. it was assumed that air purifier was operated for 3,600 seconds in all cases. The result shows that when air purifier was operated in 161.4 m³/h condition and was positioned in Case 3, performance of reducing particulate matter was 23.6% and 43.2% higher than other two cases. When air purifier was operated in 645.5 m³/h condition and was positioned in Case 1, performance of reducing particulate matter was 36.6% higher than other cases.

Key Words : Air Purifier, CFD, Classroom, Particle Concentration, Particulate Matter

*† 안영철(<https://orcid.org/0000-0003-0377-8101>) : 교수, 부산대학교 건축공학과

E-mail : ycahn@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-7604

*우상무(<https://orcid.org/0000-0001-7892-2126>), *송해은(<https://orcid.org/0000-0002-3779-6618>) : 대학원생, 부산대학교 건축공학과

**강울호(<https://orcid.org/0000-0003-0462-9626>) : 연구교수, 부산대학교 풍력발전미래기술연구센터

*† Young-Chull Ahn(<https://orcid.org/0000-0003-0377-8101>) : Professor, Department of Architectural Engineering, Pusan National University.

E-mail : ycahn@pusan.ac.kr, Tel : 051-510-7604

*Sang-Moo Woo(<https://orcid.org/0000-0001-7892-2126>), *Hea-Eun Song(<https://orcid.org/0000-0002-3779-6618>) : Graduate student, Department of Architectural Engineering, Pusan National University.

**Yul-Ho Kang(<https://orcid.org/0000-0003-0462-9626>) : Research Professor, Research Institute for Future Wind Energy Technology, Pusan National University.

1. 서 론

최근 국내에서도 미세먼지 발생의 빈도가 증가하고 농도가 높아짐에 따라 실내 공기 질 개선에 대한 수요와 관심이 증대되고 있다. 이와 함께 환기장치를 통한 미세먼지 저감 기술에 대한 기술적 요구가 높아지고 있고, 미세먼지의 집진 기능과 실내 환기의 기능을 모두 탑재한 형태의 장치도 출시되고 있다. 실내 미세먼지 제거를 위해 공기청정기가 널리 보급되어 적용되고 있으나 공기청정기는 CO₂ 등의 가스상 물질에 대한 대응에 한계가 있어 환기장치와의 병용을 통한 실내 공기 질 확보전략이 필요하다. 국내의 교실에 설치되고 있는 공기 정화 장치는 유지 보수가 편리한 공기청정기 위주로 설치되고 있으며, 학생들의 편의와 공간을 고려하여 천장형 또는 스탠드형으로 설치된 곳이 대부분이다. 교육부에서는 2019년 학교보건법을 통해 고농도 미세먼지 대책으로 교실에 환기설비 또는 공기정화장치를 설치하도록 의무화하였고,¹⁾ 외기 미세먼지의 증가로 인해 실내에 머무르는 시간이 많은 학교와 같이 재실자가 다수 존재하는 건물의 공기 질 관리가 매우 중요함을 확인하였다. 교실 실내 공기 질에 관한 연구에는 계측을 통한 실험적 연구방법과 해석 시뮬레이션을 이용한 연구방법이 있다. 실험적 연구방법으로 Han 등¹⁾은 서울 소재 초등학교 교실의 미세먼지를 광산란 측정기를 이용하여 측정하면서 공기청정기 효과에 관한 연구를 수행하였는데 기밀도가 높을수록 공기청정 효과가 높으며 기준면적에 대한 공기 청정화 능력을 나타내는 CADR(Clean Air Delivery Rate) 성능이 높은 풍량 조건으로 지속해서 운전시키는 것이 필요하다는 결론이 나타났다. CFD 해석적 연구방법으로 Eom 등²⁾의 연구에서는 해석 결과 농도(concentration)를 비교하여 공기청정기 위치에 따라 최대 3.06배의 성능 차이가 나타남을 보였으며, Lee 등³⁾의 연구에서는 공기령(age of air)에 대한 해석적 결과를 도출하여 자연 환기 조건에서 공기청정기의 위치에 따라 특정 Case에서 평균 공기령이 50% 수준까지 낮아질 수 있음을 나타냈다. Ekren 등⁴⁾은 열

회수 환기시설 설치 전후의 초등학교 실내 미세먼지 농도가 개선되는 최적 모델을 해석적 방법을 통해 도출하였고, Park 등⁵⁾은 공기청정 환기시스템의 조건에 따른 실내 미세먼지 농도 분포를 예측하였으며, SA(Supply Air) 위치 영향이 실내 환기에 영향이 큰 것으로 나타났다. 초등학교 교실에 대한 실내 공기 질 개선을 위해 Pirouz 등⁶⁾은 실내의 공기 흐름을 분석하여 시간당 환기횟수를 나타내는 ACH(Air Change per Hour)의 크기도 중요하지만, 기류의 경로도 중요하고 공기가 정제되는 데드존을 개선하기 위해 해석적 방법으로 최적화를 수행하였다. Li 등⁷⁾은 교실 내 열환경에 대한 해석적 연구를 통해 실내 기류에 따라 온도의 편차가 발생하며 편차가 적은 최적의 온열환경을 도출하였다. 이처럼 교실 실내 공기 질에 관한 연구는 다양한 방법으로 수행되고 있으며, 공기청정기의 위치에 따라 기류에 의한 편차가 발생하고 미세먼지 저감 성능이 달라질 수 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 스탠드형 공기청정기의 위치와 환기횟수에 따라 실내 전반적인 공간에서 기류의 흐름과 함께 미세먼지 저감 성능에 대한 특성을 도출하고자 해석적 방법을 통해 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 교실 형상 모델

본 연구에 사용된 모델은 실제 시공되고 있는 표준 교실의 형상을 모델링 하였으며, 8.21 m (W) × 7.56 m (D) × 2.6 m (H) 규모의 유동 영역으로 구성되었다. 공기청정기의 위치에 따른 미세먼지 저감 성능을 비교하기 위하여 교실 뒤편의 모서리 공간에서 정면을 바라보도록 설치된 공기청정기 운전 Case, 동일 위치에서 공기청정기를 45도 회전한 Case, 교실 중앙에 공기청정기를 위치시킨 Case를 대표적으로 선정하였다. 각각의 Case는 실내 공간에서 대칭성을 고려한다면 대표성을 보이는 것으로 판단하였다. 각 Case의 형상은 Fig. 1과 같으며 공기청정기를 기준으로 상단의 푸른색 부분은 송풍구, 하단의 빨간색 부분은 흡입구이다.

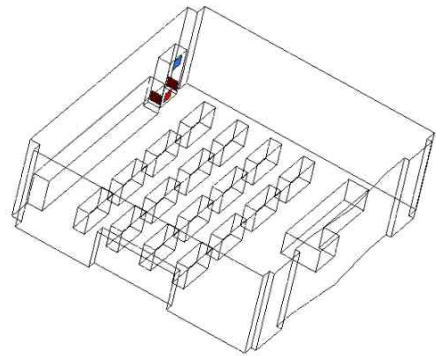
2.2 다상유동 모델 및 해석 방법론

공기에 포함된 미세먼지 입자의 거동에 대한 해석을 위해 다상유동 모델을 적용하는 방법에는 오일러리안 모델(eulerian method)과 라그랑지안 모델(lagrangian method)이 있다. Kim 등⁸⁾에 따르면, 오일러리안 모델은 유동장 내 공기 흐름을 운동량과 난류 방정식을 통해 구하고 이를 바탕으로 미세먼지 농도만을 별도로 계산하는 방법으로 농도 방정식이 유체방정식의 일반 형태와 일치하기 때문에 상대적으로 쉽고 해석 시간이 빠르다. 그러나 입자 크기 분류 및 입자와 벽 표면의 상호작용되는 반응에 대한 직접적인 해석이 어렵다.

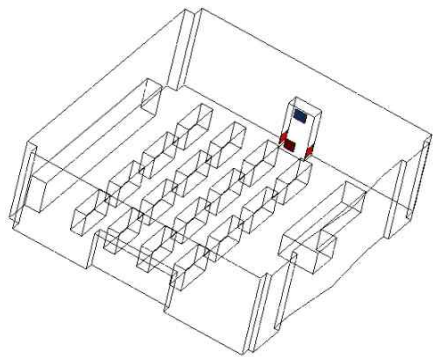
반면 라그랑지안 모델은 각각의 입자에 대한 유동해석 방법으로 전체 유동장을 오일러리안 좌표계 기준으로 지배방정식을 계산 후 개별 유체 입자에 대해 시간의 함수로 속도를 계산하므로 개별 입자에 대한 상세한 정보를 얻을 수 있으나 낮은 농도의 입자에 대한 해석에 한계점이 있으며 해석 시간 및 부하가 높은 단점이 있다.

실내 미세먼지의 CFD 해석을 위한 다상유동 모델의 선정에 있어 해석적 방법론을 검증한 선행 연구를 참고하였다. Zhaoa 등⁹⁾과 Yu 등¹⁰⁾은 입자농도 해석에 사용되는 오일러리안 기반의 Drift-Flux 모델과 라그랑지안 기반의 Particle Tracking 방식의 해석적 방법론의 타당성을 검증하기 위해 Chen 등¹¹⁾의 선행연구를 기반으로 하여 모델 간의 비교 연구를 수행하였다. Chen 등¹¹⁾은 소형 챔버($0.8 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$) 내에서 측정 위치($x=0.2 \text{ m}, 0.4 \text{ m}, 0.6 \text{ m}$)에서의 미세먼지 측정 실험 데이터와 CFD 해석 모델 간의 비교를 하였는데, 14% 수준의 평균 오차 내에서 측정지점에서의 수직 방향의 미세먼지 분포 경향성은 유사하게 나타남을 보였다. Zhaoa 등⁹⁾과 Yu 등¹⁰⁾은 이 결과를 바탕으로 두 개의 다상유동 모델을 비교하였는데, 오일러리안 모델은 실제보다 비교적 낮게 예측하고 라그랑지안 모델은 실제보다 비교적 높게 예측하지만 수직 분포에 대한 경향성은 두 모델이 모두 유사한 패턴으로 나타나므로 해석적 방법으로 적합함을 보였다.

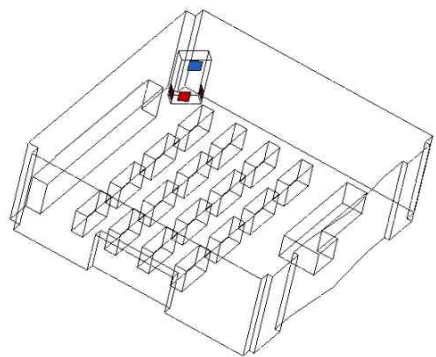
따라서 본 연구에서는 오일러리안 방법의 다상



(a) Case 1 (back wall / right side / direction 0)



(b) Case 2 (side wall / center / direction 0)



(c) Case 3 (back wall / right side / direction 45)

Fig. 1 Locations of the air purifier for each case

유동 해석 모델을 채택하였으며, 대기환경보전법 시행령 제1조의2 제3항의 ‘대기오염도 예측·발표의 기준과 내용에 따라 PM10의 나쁨 등급인 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준에서 공기청정기의 미세먼지 저감 성능에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위해 교실 내부

분진의 초기 농도는 PM10 크기의 분진 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 실내에 존재하는 것으로 가정하고, 공기청정기를 거치면서 필터 효율 99.9%의 필터를 통과한 잔여 분진이 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 재유입되는 것으로 가정하였다. 공기와 미세먼지의 유동해석을 위해 Eulerian Multiphase Model을 사용하였고, 미세먼지의 밀도는 Shin 등¹²⁾의 광학입자계수기로 관측한 에어로졸 물리특성에 관한 연구에서, 에어로졸 크기별 질량농도 계산에 반영된 밀도 $1,500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 으로 적용하였다. 미세먼지의 밀도에 대한 Kim 등¹³⁾의 연구와 같이 입자상 물질을 측정하여 계절에 따른 PM10의 밀도 및 입경분포 추정에 관한 연구들이 수행되고 있다. 그러나 미세먼지의 밀도 변화에 대한 저감효과 특성에 관한 해석적 연구는 아직 없으며, 향후 관련 연구의 필요성이 있다고 판단된다.

2.3 해석 조건

해석을 수행하기 위한 Solver는 상용 프로그램인 Ansys Fluent 2019를 이용하였으며, Chen 등¹¹⁾의 실내 입자 해석 선행연구에 따라 RNG k- ϵ 난류 모델을 적용하였다. 교실의 체적은 161.38 m^3 이며, 공기청정기의 풍량은 환기횟수(ACH) 기준으로 하여 1, 2, 3, 4회가 되도록 설정하였다. 공기청정기의 송풍구 면적에 따른 송풍량을 Velocity Inlet 조건의 유속으로 반영하였다.

교실의 면적인 62.1 m^2 인 경우 필요한 CADR은 $8.0 \text{ m}^3/\text{min}$ 이다. 본 연구에서의 풍량 조건이 161.4, 322.8, 484.1, 645.5 m^3/h 에서의 CADR은 각각 2.4, 4.8, 7.3, 9.7 m^3/min 이다. 최대 풍량에서의 CADR인 9.7 m^3/min 조건은 해석 대상 교실의 적정 수준 공기청정기 용량 대비 20% 정도 큰 수준이다. 공기청정기의 충분한 효과를 도출하기 위하여 해석상의 시간은 3,600 s로 선정하여 미세먼지 농도 데이터를 수집하였다. 본 연구방법에 적용된 주요 해석 조건은 Table 1에 나타내었고, 전체 해석 모델에 동일하게 적용하였다. 해석 모델의 격자는 Auto Mesh 방법을 이용하여 Tetra Mesh로 약 546,000개 수준의 Elements를 생성하였다.

Table 1 Information of CFD simulation

Parameter	Value	Unit
Air flowrate	161.4 / 322.8 / 484.1 / 645.5	m^3/h
Air flow speed	0.43 / 0.85 / 1.28 / 1.71	m/s
Density	1,500	kg/m^3
Particulate matter size	10	μm
Initial concentration	150	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Operating time	3,600	s
Filtration efficiency	99.9	%

3. 해석 결과

재실자 위치에 따른 특성을 도출하기 위해 Fig. 2와 같이 재실자가 위치할 것으로 예상되는 위치의 16개 지점을 선정하였으며 $[4 \times 4]$ 행렬 좌표로 나타내었다. 각 위치의 지면에서부터 1.2 m 높이의 미세먼지 농도에 관한 분석을 하였다.

3.1 실내 재실자 위치에 따른 미세먼지 저감 특성

우선 전체적인 결과를 분석하기 위해 16개 지점의 농도 값을 식 (1)의 평균과 식 (2)의 표준편차로 계산하여 Table 2에 나타내었고 저감효과의 특성에 대하여 분석하였다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S_x = \sqrt{S_x^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

재실자 위치에 따른 미세먼지 농도의 Contour를 Fig. 3에 나타내었다. Case 1의 경우 재실자 위치의 주변에서 나타나는 주유동의 흐름에 따라 미세먼지 농도가 낮아지는 현상을 볼 수 있으며, Case 2의 경우 교실의 중앙을 통과하는 주유동의 흐름이 나타났다.

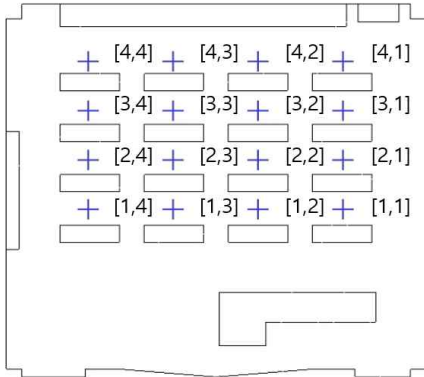


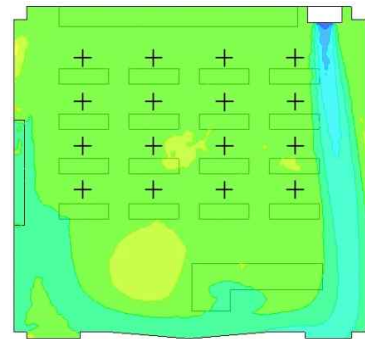
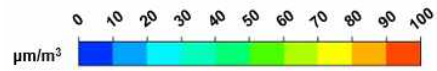
Fig. 2 Position number for post-processing.

Table 2 Comparison of average concentration and standard deviation (3,600s)

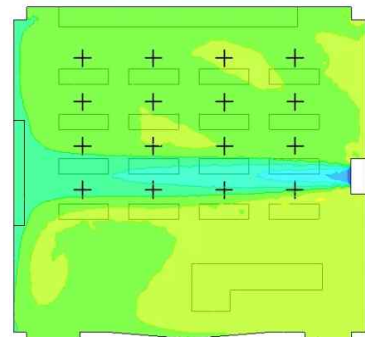
Case	Air flowrate [m ³ /h]	Total volume [μg/m ³]	16 Point Average [μg/m ³]	16 Point Standard Deviation
Case 1	161.4	87.2	92.1	4.06
	322.8	52.8	56.1	2.79
	484.1	14.7	15.7	0.94
	645.5	7.1	7.5	0.41
Case 2	161.4	90.2	80.2	8.36
	322.8	32.6	28.9	3.24
	484.1	15.5	14.7	1.59
	645.5	7.5	7.1	0.75
Case 3	161.4	73.0	64.3	15.12
	322.8	37.0	32.0	7.13
	484.1	18.8	16.7	3.65
	645.5	9.7	8.8	1.93

Case 3 조건에서는 재실자 위치에서의 미세먼지 저감효과가 나타난 영역이 넓게 분포하였고, 재실자 위치가 아닌 곳에서는 미세먼지 저감효과가 상대적으로 낮게 나타났다.

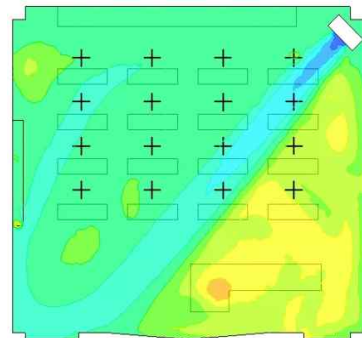
공기청정기의 풍량 조건에 따라 최대 유속과 유속의 분포는 변화하지만 주유동의 Stream Line은 모든 풍량 조건에서 거의 유사하게 나타났으며, 풍량이 161.4 m³/h인 조건에서의 Stream Line을 Fig. 4에 나타내었다.



(a) Case 1 (161.4 m³/h)



(b) Case 2 (161.4 m³/h)



(c) Case 3 (161.4 m³/h)

Fig. 3 Contour of particle concentration

해석 결과에서 Case 1, Case 3의 경우에 복잡한 유선을 형성하고 있어 실내 공기의 순환이 Case 2의 경우 대비 상대적으로 효과적인 방법으로 나타났다. 각각의 경우에서 공기청정기의 위치를 대칭성을 가지도록 이동시키는 경우는 유사한 기류

의 흐름이 형성된다. 공기청정기의 풍량이 161.4 m^3/h (환기횟수 기준 1)이고, 1시간 동안 가동한 조건에서 교실 전체의 미세먼지 농도 평균값은 Case 1 위치에서 87.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Case 2 위치에서 90.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Case 3 위치에서 73.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 16개 지점의 평균 미세먼지 농도는 Case 1 위치에서 92.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Case 2 위치에서 80.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Case 3 위치에서 64.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 교실 전체의 농도와 재실자가 위치할 것으로 예상되는 지점 모두 Case 3 위치에서 공기청정기가 운전되는 경우에 미세먼지 저감 성능이 높게 나타났다.

공기청정기의 풍량이 322.8 m^3/h (환기횟수 기준 2)이고, 1시간 동안 가동한 조건에서는 교실 전체의 미세먼지 농도 평균값과 재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점의 평균값 모두 Case 2 위치에서 가장 높은 성능을 나타내고 있다.

공기청정기의 풍량이 484.1 m^3/h (환기횟수 기준 3)이고, 1시간 동안 가동한 조건에서는 교실 전체의 미세먼지 농도 평균값은 Case 1 위치에서 가장 낮게 나타났으며, 재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점의 평균값은 Case 2 위치에서 가장 높은 성능을 나타내고 있다.

공기청정기의 풍량이 645.5 m^3/h (환기횟수 기준 4)이고, 1시간 동안 가동한 조건에서도 교실 전체의 미세먼지 농도 평균값은 Case 1 위치에서 가장 낮게 나타났으며, 재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점의 평균값은 Case 2 위치에서 가장 높은 성능을 나타내고 있다. 공기청정기의 풍량이 아주 낮은 수준에서는 공기청정기가 Case 3의 위치에 있는 경우에 교실 전체의 미세먼지 농도 평균값과 재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점의 평균값 모두 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

공기청정기의 풍량이 증가할수록 공기청정기가 Case 1의 위치에 있는 경우에 교실 전체의 미세먼지 농도 평균값이 가장 낮은 수준을 유지하고 있고, 재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점에서의 미세먼지 농도 편차도 가장 낮은 수준으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

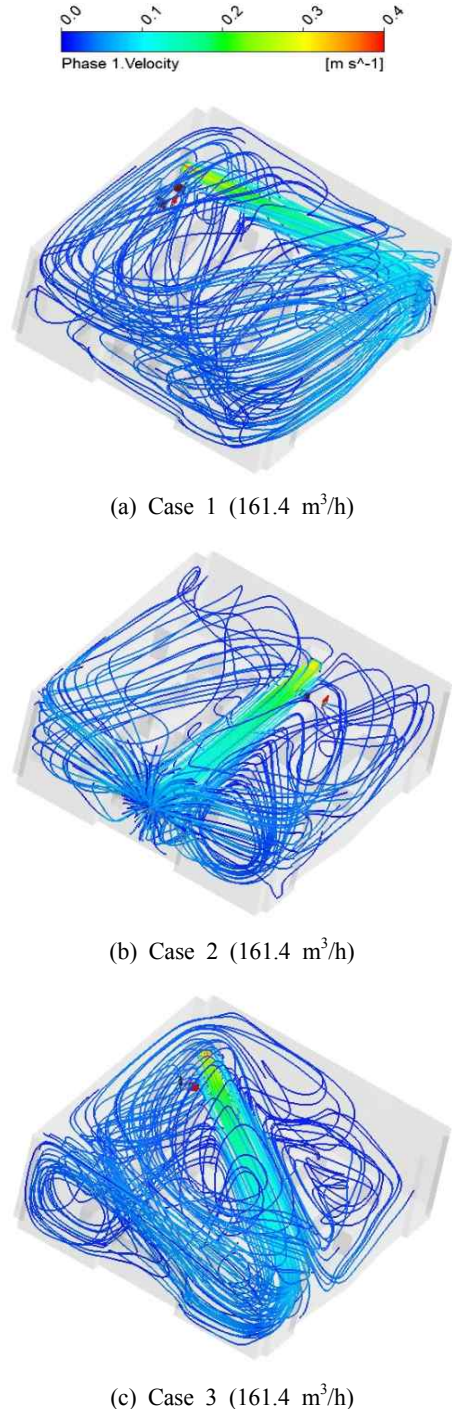


Fig. 4 Stream Line for each case and the number of position

재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점에서의 미세먼지 농도 평균값의 측면에서는 공기청정기 풍량이 322.8 m³/h(환기횟수 기준 2) 이상일 때, 공기청정기가 Case 2에 위치할 때 가장 낮은 미세먼지 농도 값을 나타낸다.

공기청정기의 풍량이 484.1 m³/h(환기횟수 기준 3)와 645.5 m³/h(환기횟수 기준 4)의 조건에서의 미세먼지 농도는 3,600 s 시점의 모든 Case에서 15 µg/m³, 8 µg/m³ 수준으로 수렴하는 경향성이 나타났으며, 초기 농도 150 µg/m³ 대비 약 90% 이상 감소하였다.

Case 1 위치에서는 풍량이 161.4 m³/h(환기횟수 기준 1)와 322.8 m³/h(환기횟수 기준 2)인 조건에서는 상당히 낮은 미세먼지 저감 성능을 나타내었지만 풍량이 증가할수록 높은 미세먼지 저감

성능을 나타내었으며, 재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 지점의 표준편차는 가장 낮게 나타났다. Fig. 4(a)에서 살펴볼 수 있듯이 Case 2, Case 3 위치의 경우에서 재실자 위치에 직접적으로 송풍을 하는 것과 달리 Case 1 위치는 재실자 위치가 아닌 벽면 근처에 송풍함으로써 간접적인 순환을 일으키기 때문에 환기횟수가 낮은 조건에서는 미세먼지 저감 성능이 낮게 나타난다. 그러나 기류 순환의 복잡도가 높아 정체되는 영역이 상대적으로 적어 재실자의 위치에 따른 미세먼지 농도 저감의 편차는 가장 낮게 나타나므로 균일하게 저감 되는 효과를 얻을 수 있었다.

Case 2 위치에서는 풍량이 322.8 m³/h(환기횟수 기준 2) 이상인 조건에서부터 평균 농도에서 가장 좋은 성능을 나타내고 있는데, 이는 직접적으로

Table 3 Particle concentration in local position

Case	Position	1	2	3	4
Case 1	1	88.1	85.2	93.3	86.1
Case 2		69.4	63.5	65.3	67.6
Case 3		101.6	44.2	80.4	63.6
Case 1	2	92.7	94.5	96.5	88.8
Case 2		85.5	86.6	86.9	81.2
Case 3		88.5	55.3	67.1	57.2
Case 1	3	98.7	97.6	95.1	89.6
Case 2		88	85.1	83.6	80.5
Case 3		36.7	65.3	62.7	57.2
Case 1	4	95.7	93	91.6	87.2
Case 2		84.9	89.9	84.2	80.6
Case 3		62.7	60.8	58.3	67.6

(a) Particle concentration (161.4 m³/h)

Case	Position	1	2	3	4
Case 1	1	15.5	14.7	16.7	14.5
Case 2		12.2	11.3	12.5	14.3
Case 3		24.4	12.6	19.3	15.7
Case 1	2	15.3	16.7	16.4	14.8
Case 2		15.5	15.2	14.4	13.2
Case 3		25.2	15	17.2	15.1
Case 1	3	17.4	17.1	16.5	15
Case 2		15.5	16	16.8	15.7
Case 3		10	16.5	16.1	15.2
Case 1	4	16.4	15.4	15.1	14.4
Case 2		14.4	15.5	15.6	17
Case 3		16.5	16.1	15.6	16

(c) Particle concentration (484.1 m³/h)

Case	Position	1	2	3	4
Case 1	1	53.9	52.7	59.3	52.3
Case 2		23.7	22.3	23.4	25.1
Case 3		47.8	23.2	36.4	29.9
Case 1	2	57.1	58.3	57.9	53.3
Case 2		30.9	32.6	32.3	28.9
Case 3		47.9	29.1	33.4	28.4
Case 1	3	59.9	60.3	58.1	54
Case 2		31	30.4	30.8	29.4
Case 3		18.9	31.9	31.5	29.0
Case 1	4	59.1	55.4	54.4	52.3
Case 2		29.2	31.2	31.2	30.4
Case 3		31.6	30.8	29.6	31.9

(b) Particle concentration (322.8 m³/h)

Case	Position	1	2	3	4
Case 1	1	7.5	7.3	7.9	6.9
Case 2		6.1	5.6	5.9	6.6
Case 3		13.5	6.4	10.2	8.1
Case 1	2	7	7.7	7.6	7.1
Case 2		7.7	7.4	6.9	6.4
Case 3		12.4	7.8	9.3	8.1
Case 1	3	7.4	8	8	7.3
Case 2		7.5	7.8	8.2	7.6
Case 3		5	8.8	8.8	8.2
Case 1	4	8.3	7.8	7.3	7
Case 2		7.1	7.6	7.6	7.6
Case 3		8.8	8.7	8.6	8.5

(d) Particle concentration (645.5 m³/h)

재실자 위치 방향으로 송풍하는 위치이면서 교실 중간을 가로지르는 기류의 흐름이 반대편 벽에서 나눠질 때 대칭성이 있어 Case 1 위치보다 평균 농도 저감이 빠르며, Case 3 위치보다 편차가 낮아 322.8 m³/h(환기횟수 기준 2) 이상 조건에서 적합한 위치로 나타났다. Case 3 위치는 풍량이 161.4 m³/h(환기횟수 기준 1) 조건에서는 평균 농도의 저감효과가 좋으나 Fig. 4(c)에서 공기청정기의 Inlet과 Outlet의 기류 사이와 아래쪽의 급격히 방향이 바뀌는 구간에서 재순환(recirculation) 영역이 발생하기 때문에 기류가 정체되는 영역이 발생하는 것으로 판단되었다.

재실자가 위치할 것으로 예상되는 16개 위치에서의 미세먼지 농도 데이터를 Table 3에 나타내었다. 공기청정기의 위치와 공기청정기 풍량에 따른

각 지점의 미세먼지 농도의 특징을 살펴보면, Case 1 위치에서는 [3,1], [3,2] 지점에서 가장 높은 농도가 나타나는데, Fig. 4(a)에서 보면 주 유동의 중심위치로서 다른 영역에 비해 정체되는 영역이다. Case 2 위치에서는 송풍 기류가 직접 통과하는 [2,1] ~ [2,4] 지점에서 농도 저감이 높았다. Case 3 위치에서는 [1,1] 지점에서 전체 조건의 결과 중에 가장 높은 농도가 나타났으며, Fig. 4(c)에서 재순환 영역에 의해 순환이 어려움을 볼 수 있다.

3.2 환기 횟수와 운전 시간에 따른 실내 전체의 미세먼지 저감 특성

교실 실내 전체의 미세먼지 농도에 대하여, 공기청정기 위치와 운전 시간에 따른 미세먼지 저

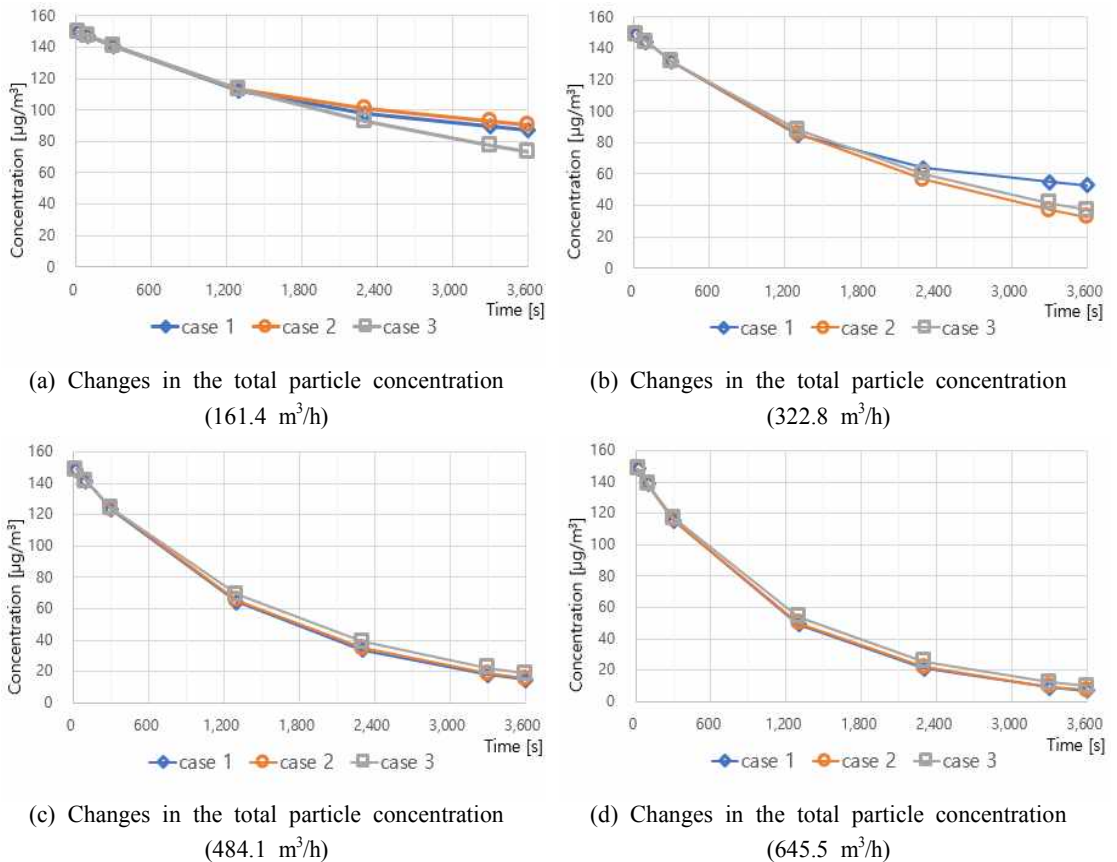


Fig. 5 Changes in the total particle concentration in the classroom depending on the location of the air purifier and the number of air changes per hour

감효과를 환기횟수에 따라 Fig. 5와 같이 정리하였다. 본 연구 결과에서 3,600 s 후 미세먼지 감소는 풍량이 161.4 m³/h(환기횟수 기준 1) 증가할 때 마다 50% 수준으로 감소하는 것으로 나타났으며, 공기청정기의 풍량 증가에 따라 미세먼지 저감 성능이 향상하였다. Fig. 5(a)의 풍량이 161.4 m³/h(환기횟수 기준 1)인 조건에서는 1,300 s 이후에 Case 3의 미세먼지 저감률이 증가하는데 이는 Fig. 4(c)에 따라 주 유동의 기류가 재실자 위치하는 영역에서 대부분 형성되어 있어, 낮은 풍량 조건에서 상대적으로 좋은 효과를 보인다. Fig. 5(b)의 풍량이 322.8 m³/h(환기횟수 기준 2)인 조건에서는 1,300 s 이후에 Case 1의 미세먼지 저감률이 상대적으로 낮게 나타나는데, 이는 재실자 위치가 아닌 벽면 근처에서부터 주 유동이 형성되므로 풍량이 161.4 m³/h와 322.8 m³/h인 조건에서 미세먼지 저감 성능이 상대적으로 낮게 나타났다. Case 2의 풍량이 161.4 m³/h인 조건에서는 저감 성능이 낮으나, 풍량이 322.8 m³/h 이상에서는 가장 좋은 성능을 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFD 해석적 방법을 이용하여 공기청정기의 운전 위치와 공기청정기의 풍량에 따른 교실 내 재실자 위치와 교실 전체의 미세먼지 저감 성능에 대하여 검토하였고, 스탠드형 공기청정기를 3,600 s 동안 가동한 조건으로 미세먼지 저감 성능을 분석한 결과는 다음과 같다.

공기청정기가 낮은 풍량에서 가동되는 경우에는 재실자 위치에 직접적인 송풍을 하는 Case 2 위치와 Case 3 위치에서 미세먼지 저감효과가 높게 나타나고 단시간의 공기 정화에 상대적으로 효과적이다. 반면 Case 1 위치의 경우에는 풍량이 높아질수록 재실자 위치마다 미세먼지 농도를 균일하게 저감시키기에 유리하고, 재실자 위치 간의 미세먼지 저감 성능의 편차를 고려하는 경우 효과적이다.

1) 재실자 위치에 따른 미세먼지 농도의 표준편차를 분석한 결과로, 공기청정기의 풍량이 증가할

수록 재실자 위치 간의 표준편차는 감소하였다. 공기청정기의 풍량이 645.5 m³/h(환기횟수 기준 4)인 조건에서 16개 지점에서의 최소 표준편차가 Case 1에서 0.41을 나타내었다. 최소 표준편차를 가지는 Case 1과 최대 표준편차를 가지는 Case 3 사이에는 위치별로 1.5배~3.7배의 차이가 나타났다. 공기청정기의 송풍 기류 특성에 따라 국부적으로 미세먼지 저감 성능이 저하되는 영역이 존재하기 때문에 재실자 위치 간의 미세먼지 저감 성능에 큰 차이가 발생했다.

2) 미세먼지 저감효과에서 재실자 위치간의 편차 발생 이유를 Stream Line으로 살펴본 결과 공기청정기의 위치에 따라 기류의 재순환 영역이 발생하거나 기류가 정체하는 영역이 나타났다. 재실자 위치하는 공간을 대각선으로 가로질러 송풍을 하는 Case 3 위치는 낮은 풍량에서는 재실자 위치로의 직접적인 송풍으로 인하여 상대적으로 미세먼지 농도 저감에는 효과적이지만 기류의 재순환 정체 영역이 발생하여 풍량이 높아질수록 상대적으로 낮은 미세먼지 저감효과가 나타났다.

3) 실내 공간 전체에 대한 미세먼지 농도 저감의 분석 결과에서, 484.1 m³/h(환기횟수 기준 3) 이상에서는 공기청정기의 위치 조건에 무관하게 시간에 따라 유사한 형태로 수렴하는 경향을 보였으며, 초기 대비 90% 이상의 미세먼지 저감효과가 나타났다. 반대로 공기청정기의 풍량이 낮은 경우, 위치에 따라 성능 차이가 161.4 m³/h(환기횟수 기준 1)인 조건에서 43%, 풍량이 322.8 m³/h(환기횟수 기준 2)인 조건에서 75% 수준이었다.

4) 공기청정기의 풍량이 161.4 m³/h(환기횟수 기준 1)인 경우 교실 전체의 농도와 재실자 위치에서 모두 Case 3 위치에서 공기청정기가 운전되는 경우에 미세먼지 저감 성능이 다른 Case에 비하여 최대 23.6%, 43.2% 높게 나타났다. 공기청정기의 풍량이 645.5 m³/h(환기횟수 기준 4) 조건에서는 교실 전체의 농도는 Case 1 위치에서 미세먼지 저감 성능이 다른 Case에 비하여 최대 36.6% 높게 나타났고, 재실자가 위치하는 16개 지점에서의 평균 농도는 Case 2 위치에서 미세먼지 저감 성능이 최대 23.9% 높게 나타났다.

후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

Author contributions

Y. C. Ahn; Conceptualization. Y. H. Kang; Data curation. S. M. Woo; Formal analysis. Y. H. Kang; Funding acquisition. H. E. Song; Investigation. S. M. Woo; Methodology. Y. C. Ahn; Project administration. H. E. Song; Resources. Y. H. Kang; Software. Y. C. Ahn; Supervision. S. M. Woo; Validation. S. M. Woo; Visualization. S. M. Woo; Writing-original draft. Y. C. Ahn; Writing-review & editing.

References

1. B. W. Han, K. J. Hong, G. H. Lee, S. B. Kim, I. Y. Park, D. H. Park, H. J. Kim, Y. J. Kim, Y. W. Lee, J. T. Kim, S. H. Jeong and S. H. Shim, 2021, "Analysis on the Effect of an Air Cleaner in Elementary School Classrooms in Seoul, Korea for a Season of High Concentration Fine Particles in 2019", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 1. 37(5), 744-758.
(<https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.5.744>)
2. Y. S. Eom, B. R. Park, S. G. Kim and D. H. Kang, 2020, "A Case Study on Placement of Portable Air Cleaner Considering Outdoor Particle Infiltration into an Elementary School Classroom", *Journal of Korea Institute of Architectural sustainable Environment and Building Systems*, 14(2), 158-170.
(<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20200015>)
3. J. S. Lee, S. H. Park, G. B. Sung, I. H. An, K. R. Lee, S. P. Hong, S. J. Yook and H. B. Koo, 2021, "Effect of air cleaner on reducing concentration of indoor-generated viruses with or without natural ventilation", *Aerosol Science and Technology*, 55(11), 1288-1303.
(<https://doi.org/10.1080/02786826.2021.1945528>)
4. O. Ekren, Z. H. Karadeniz, I. Atmaca, U. C. Tugba, S. C. Sofuoglu and M. Toksoy, 2017, "Assessment and improvement of indoor environmental quality in a primary school", *Science and Technology for the Built Environment*, 23(2), 391-402.
(<http://dx.doi.org/10.1080/23744731.2016.1251288>)
5. H. G. Park, S. H. Park and J. H. Seo, 2019, "Study on the Indoor PM Concentration Changes by SA-RA Location of Air Cleaning Ventilation System in Residential Space", *Journal of Korea Institute of Architectural sustainable Environment and Building Systems*, 13(2), 105-115.
(<https://doi.org/10.22696/jkiaeb.20190009>)
6. B. Pirouz, S. A. Palermo, S. N. Naghib, D. Mazzeo, M. Turco and P. Piro, 2021, "The Role of HVAC Design and Windows on the Indoor Airflow Pattern and ACH", *Sustainability*, 13, 7931. (<https://doi.org/10.3390/su13147931>)
7. M. H. Li, S. K. Jeong, D. G. Kim and J. S. Kum, 2006, "Thermal Environment Analysis of a Classroom by CFD Simulation to Determine Optimal Temperature Sensor Position in Ceiling Type Air-Conditioning System", *Journal of Power System Engineering*, 10(4), 43-49.
8. T. Y. Kim and H. K. Kim, 2018, "Analysis of Particle Matters by Using CFD Method in Indoor Environment", *Korean Industrial Chemistry News*, 21(2), 9-15.
9. B. Zhaoa, C. Yang, X. Yang and S. Liu, 2008, "Particle dispersion and deposition in ventilated rooms: Testing and evaluation of different Eulerian and Lagrangian models", *Building and Environment*, 43(4), 388-397.
(<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.005>)

10. H. L. Yu and T. J. Chang, 2022, "Modeling particulate matter concentration in indoor environment with cellular automata framework", *Building and Environment*, 214, 108898. (<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108898>)
11. F. Chen, C. M. Simon and A. C. K. Lai, 2006, "Modeling particle distribution and deposition in indoor environments with a new drift-flux model", *Atmospheric Environment*, 40(2), 357-367. (<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.09.044>)
12. D. Shin, J. E. Kim, C. Y. Chung and H. J. Yoo, 2022, "Aerosol Physical Characteristics over the Yellow Sea Using Optical Particle Counter Measurement Data Onboard Gisang1 Vessel during the YES-AQ Campaign", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 203-219. (<https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.203>)
13. S. D. Kim, C. H. Kim and U. H. Hwang, 2008, "A study on the particles density estimation in Seoul metropolitan", *Journal of Environmental Health Sciences*, 34(2), 131-136.