



중복도식 어린이집에서 환기조건에 따른 입자성 유해물질 전파양상 해석

Simulation Analysis of Particulate Hazardous Substance Transmission Patterns According to Ventilation Conditions in a Mid-Corridor Type Daycare Center

유정연* · 배상환**

Jungyeon Yu* · Sanghwan Bae**

* Main author, Postdoctoral Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (starry1005@kict.re.kr)

** Corresponding author, Senior Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, South Korea (sanghwan@kict.re.kr)

ABSTRACT

Purpose: Ventilation in buildings is an important factor for discharging harmful substances indoors and introducing fresh air. Recently, respiratory infectious diseases such as COVID-19 have occurred on a large scale in daycare centers, and problems caused by air propagation of respiratory viruses have emerged seriously. **Method:** Therefore, in this study, the real-time propagation characteristics of particulate harmful substances during natural ventilation in mid-corridor type daycare center was evaluated through CFD simulations. In addition, a proposal to improve natural ventilation and an application plan for mechanical ventilation was proposed, and the improvement effect were evaluated. **Result:** In mid-corridor type buildings, simulations results on natural ventilation conditions through window opening and through window and door opening showed that indoor particulate harmful substances can be spread to other rooms depending on external wind and wind conditions during natural ventilation. Therefore, the need for stable indoor air quality management was confirmed through sufficient mechanical ventilation in mid-corridor type buildings.

KEYWORD

중복도형
어린이집
입자성 유해물질
전파양상
환기

Mid-Corridor Type
Daycare Center
Particulate Hazardous Substance
Transmission Pattern
Ventilation

ACCEPTANCE INFO

Received Apr. 18, 2024
Final revision received Jul. 12, 2024
Accepted Jul. 18, 2024

© 2024. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

환기는 건물에서 실내 유해물질 배출 및 신선외기의 도입을 위한 중요한 요소이다. 환기방식은 자연환기와 기계환기로 구분되며, 기계환기 설비가 없는 건물에서는 창을 통해 자연환기를 한다. 바닥면적 대비 창 면적이 충분히 넓고 맞통풍이 원활한 건물에서는 창문 또는 외기에 면한 출입문을 통해 충분한 자연환기가 가능하다. 그러나, 바닥 면적 대비 창 면적이 작은 중복도식 건물에서는 각 실의 출입문이 외부가 아닌 실내측 복도에 위치하기 때문에 환기를 위해 창문과 복도측 출입문을 동시에 개방할 경우, 복도를 통해 맞은편에 위치한 실로 유해물질이 흘러들어가 빠져나가지 못하는 등의 환기 장애 문제가 발생하기 쉽다. 상당수 어린이집에서는 소수 인원을 연령별로 구분하여 보육하기 때문에 다수의 작은 면적의 보육실로 구성된 중복도식 건물로 설계된다. 국토부(2021)[1]에서는 「영유아보육법」 제2조 제3호에 따라 연면적 430m² 이상인 어린이집에 대하여 기계환기설비를 설치하도록 규정하고 있으며, 필요환기량은 인당 36 이상(m³/h)이다. 그러나 연면적 430m² 미만 소규모 어린이집은 기계환기설비 설치의무가 없어 대부분 창을 통해 자연환기를 한다.

어린이집이나 실내공기질 관련 기존연구를 살펴보면, 건축자재

및 유아용품에서 사용되는 휘발성 유기화합물이나 외부에서 유입되는 미세먼지에 대한 문제제기 및 대책 관련 연구가 주요하다[2-4]. 박상민(2017)은 어린이집 실태조사를 통해 실내 미세먼지, 이산화탄소, 휘발성유기화합물질 농도변화에 영향을 미치는 인자를 밝혀내었다. 미세먼지는 실내 활동량이 커질 때, 이산화탄소 및 휘발성유기화합물은 조리시간에 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. 조사대상인 어린이집은 모두 소형 환풍기 및 공기청정기만이 설치되어 있고 환기장치는 설치되어 있지 않았다[2]. 안태경(2020)은 주거 공간에서 측정을 통해 층계 및 하계 기간 동안 외부 황사 및 미세먼지 발생시 실내 미세먼지 농도가 영향을 받음을 밝혀내었다[3]. 박승환(2021)은 시뮬레이션을 통해 어린이집에서 기계환기시스템과 공기청정기 적용시 미세먼지 저감효과를 분석하였다[4]. 김상철(2014)은 어린이집에서 실측을 통해 실내공기 중 오염물질 농도 변화가 어린이집의 구조에 영향을 받으며 벽면적 대비 창문의 면적이 클수록 환기가 잘 되는 것을 밝혀내었다. 따라서, 중복도식의 창문 면적이 작은 어린이집은 자연환기가 원활하지 않을 것을 추정가능하나 구체적인 연구사례는 부족하며[5], 특히 낮은 풍속조건에서 창문 및 주출입문의 개방을 통한 자연환기가 실내에서 발생하는 입자성 유해물질의 실간 전파에 미치는 영향을 상세하게 분석한 연구는 부족한 상황이다.

한편, 환경부(2020)[6]에서는 어린이집의 실내공기질에 대하여 초미세먼지(PM-2.5)농도 35 μ g/m³ 이하, 미세먼지(PM-10)농도

75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, CO₂농도 1000ppm 이하, 총부유세균 800CFU/m³ 이하 등으로 유해물질 농도 기준으로 관리하고 있다. 그러나, 최근 코로나19 등 호흡기 감염병이 어린이집에서 대규모로 발생하는 등 호흡기 바이러스의 공기전파로 인한 문제가 심각하게 대두되고 있다[7]. 호흡기 바이러스는 직접 접촉을 통한 감염, 커다란 침방울인 비말을 통한 감염, 그리고 비말핵인 에어로졸 입자의 공기전파를 통한 감염으로 구분된다[8]. 이 중 직경 5 μm 이하의 미세 에어로졸 입자를 통한 바이러스의 공기전파는 매우 심각하다. 이러한 입자성 유해물질은 실내에 장시간 부유하며 기류의 흐름을 따라 이동하여 바이러스를 전파한다. 공기전파를 막는 가장 효과적인 대책은 마스크의 착용이다. 그러나, [영유아 대상 코로나-19 감염병 관리][9]에 의하면 주기적인 환기, 마스크 착용, 소독 등의 다양한 대응지침이 제시되고 있으나 대응지침 적용의 현실적 어려움의 한계가 있었다. 또한, 어린이집에서 영유아 마스크 착용의 불편함이 영유아 스트레스한 원인으로 제시되고 있었다[10]. 이와 같이, 어린이집에서 생활하는 영유아는 상시 마스크 착용의 어려움과 함께, 간식시간이나 점심시간 등에는 20~30여분 이상 음식을 섭취하며 불가피하게 마스크를 벗고 바이러스를 다량 배출하는 상황이 발생하게 된다.

또한, CDC 보고서(아동보육시설과 관련된 COVID-19 발병의 전파 역학-솔트레이크시티)에 따르면 보육시설 3곳에서 코로나19에 감염된 12명의 어린이들(무증상 또는 경증)로부터 46명의 시설 외 접촉자 중 12명에게 코로나19가 전파되었음을 나타내고 있다. 이와 같이, 어린이집에서의 코로나 전파는 다시 가정 내 전파를 통해 지역사회로 전파될 수 있음을 의미한다[11].

이에 본 연구에서는 코로나19가 대규모로 발생했던 중복도식 어린이집을 대상으로 시뮬레이션을 통해 자연환기를 통한 입자성 유해물질의 전파 양상을 평가하고, 이에 대한 문제점을 제시하였다. 또한, 이에 대한 환기 개선방안을 제안하고 개선 효과를 평가하여 어린이집의 입자성 유해물질 공기전파 대응방안을 제안코자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 먼저, 기존 어린이집의 자연환기 조건에 대하여 시뮬레이션을 통해 풍속별 입자성 유해물질의 전파양상을 평가하였다. 추가로, 용이하게 현장적용이 가능한 자연환기 개선 방안인 주 출입문 추가 개방을 통한 맞통풍 방안을 제안하였고, 최종적으로는 전외기 방식의 소형환기장치인 열회수환기시스템(전열교환기)을 적용하는 방안을 제안하였다. 기존 조건 및 개선안에 대하여 실내 기류속도 분포 및 각 조건별 입자성 유해물질의 전파양상을 입자개수 농도 분포를 통해 평가하였다.

2. 중복도식 어린이집 환기 조건별 시뮬레이션

2.1. 대상 어린이집 시설 개요

대상 어린이집은 Table 1. 및 Fig. 1.과 같이 연면적 243m²의 소규모 어린이집으로 법적 환기설비 설치의무 대상 시설(연면적 430m² 이상)에 해당하지 않는다. 보육원생은 총 79명이며 0세 6명, 1세 20명, 2세 41명, 3세 12명이다. 보육교사는 총 27명이다. 보육실은 총

Table 1. Daycare center overview

Description	Description
• Year of establishment: 2013	• Number of children: 79
• Total floor area: 243m ²	• Number of child care teachers: 27
• Room height: 2.5m	• Number of nursery rooms: 7
• Building size: 29.7m×21.8m×4m	• Ventilation system: exhaust fans in rest rooms and kitchen
• Hallway width: 1.5~3.4m	• Windows: Awning windows
• Hallway length: 15.6m, 27.3m	

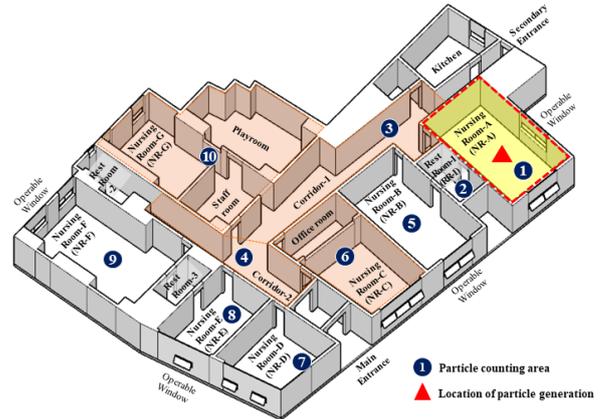


Fig. 1. Analysis target daycare center plane and particle count measurement location

7개소이며, 그 외 놀이실, 주방, 교사사무실, 원장실, 3개의 화장실이 있다. 해당 시설에 환기설비는 주방 및 화장실의 배기팬이 유일하며, 보육실에 별도의 환기장치는 설치되어 있지 않다. 주방 및 화장실의 배기팬은 사용시에만 가동된다. 각 실에는 자연환기를 위해 작은 차양식 창이 있으나 창면적이 매우 협소하고 창문의 높이가 바닥에서 1m 정도로 낮게 위치하고 있다. 또한, 복도의 길이가 매우 길어 주 출입문 두 곳이 닫힌 경우에는 환기가 원활히 이루어지기 힘든 중복도식 평면 구조를 갖고 있다. 창면적이 작은 중복도형 건물은 실내 기류 정체로 바이러스를 포함한 비말(핵)이 실내에 오래 부유하고 장시간 생존하여 공기전파 감염을 일으키기 쉬운 환경조건이 된다. 코로나-19 감염증의 최초 증상을 나타낸 영유아 확진자는 Fig. 1.의 보육실 A에 위치하고 있었다. 대상 어린이집에서는 1일 3회 이상 간식, 점심식사 등으로 복도측 보육실 출입문이 전체적으로 동시에 빈번하게 개방된 상태에서 전체 어린이집 원아들이 식사를 위해 동시에 마스크를 벗는 상황이 발생하여 바이러스 전파가 크게 확산되기 쉬운 환경으로 판단되었다. 또한, 바이러스 전파 기간에 보육실 A의 창문을 통해 바람이 유입되는 풍향조건(동풍, 동남동풍)이 장시간 유지되어 보육실 A에서 발생한 비말(핵) 입자가 기류를 타고 중복도를 통해 어린이집 전체로 전파되었을 것으로 추정되었다.

2.2. 입자성 유해물질 전파양상 시뮬레이션 조건

실내 입자성 유해물질 발생시 환기조건에 따른 전파양상평가를 위하여 다음과 같이 분석 조건을 설정하였다. 어린이집의 운영조건

Table 2. Detailed conditions for each case

Cases	Description
Case 1	Windows* : open, Nursing room doors : open Main and secondary entrance doors : closed Exhaust fans in Kitchen and rest room : off
Case 2	Windows* : open, Nursing room doors : open Main and secondary entrance doors : open Exhaust fans in Kitchen and rest room : off
Case 3	Windows* : closed, Nursing room doors : open Main and secondary entrance doors : closed Room and corridor ventilation system(600m ³ /h, 7EA) : on - The diameter of the circular diffusers is 195mm, the airflow velocity is 1.396m/s and supply air volume is 150m ³ /h. The ventilation systems supply and exhaust air to each room, kitchen and corridor. Kitchen exhaust fan(375m ³ /h, 2EA) : on - The diameter of the circular diffusers in kitchen is 395mm and the airflow velocity is 0.931m/s. Rest room exhaust fan(100m ³ /h, 3EA) : on - The diameter of the circular diffuser is 195mm and the airflow velocity is 0.85m/s.

* Normally, the opening angle of the external window is 30° and windows of nursing room-G and rest room-2 are closed.

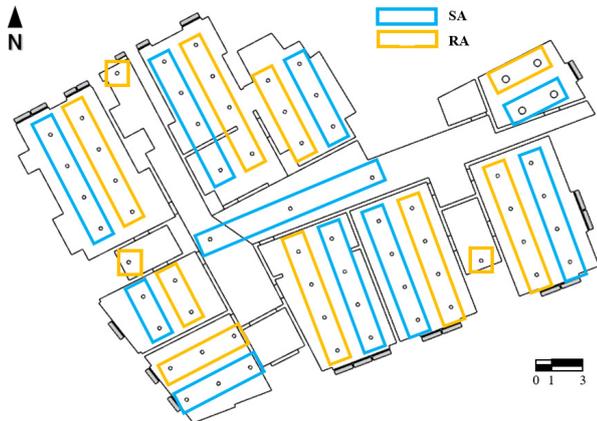


Fig. 2. Location of air supply and exhaust diffuser for ventilation system

은 마스크 착용을 안 하며, 음식물의 반출입을 위해 보육실 출입시간으로 가정하였다.

환기 조건은 Table 2.와 같이 총 3가지로 구성하였다. Case 1은 해당 어린이집의 평상시 점심시간 자연환기 조건이다. 자연환기창 및 보육실 출입문이 열려 있고, 주출입문과 부출입문은 닫혀 있으며, 주방 및 화장실 배기팬들은 꺼져 있다. 자연환기창 중 보육실-G 및 화장실-2의 창문은 평상시 닫혀 있어 닫은 조건으로 설정하였다. Case 2는 Case 1의 자연환기 조건에서 자연환기량을 늘리는 방안으로 주출입문과 부출입문을 추가로 개방하여 중복도를 전후면을 통한 맞통풍이 추가로 이루어지도록 하였다.

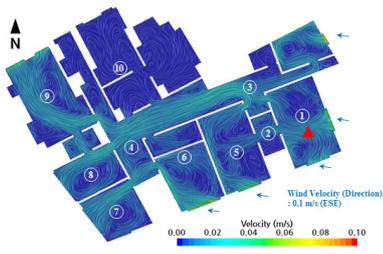
Case 3은 환기성능의 적극적인 개선을 위하여 기계식 환기장치를 적용한 방안으로, Fig. 2.와 같이 각 실 및 복도의 천정에서 원형 디퓨

Table 3. CFD simulation modeling configuration

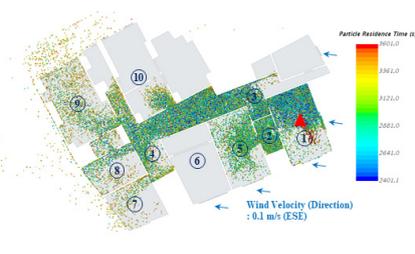
	Description
Boundary Condition	Outdoor size : 500m×500m×150m Wind Velocity(direction):0.1m/s(ESE), 0.25m/s(ESE) Wind Temperature : 17°C Indoor Temperature : 20°C
Physics Settings	Realizable K-Epsilon High y+ Wall Treatment Implicit Unsteady (Particles are generated from 1s to 1200s/(20min) and analyzed for a total of 1h) Lagrangian Multiphase(One-Way)
Particle Settings	Particle Generator Pressure : 10 Psi Particle Size and Rate: 4um(Aerosol) 60,000set in 20min Particle Shape : Spherical Particles Particle Type : Liquid(Bis sebacate (C26H50O4))[12] Viscosity : ca 23 mPa s at 20°C / Density : 900kg/m ³

저를 통해 기계환기설비의 급기와 배기가 이루어지도록 하였다. 기존에 설치되어 있는 주방 및 화장실 배기팬 또한 가동되는 조건으로 설정하였다. 주방 배기팬은 375m³/h 풍량의 팬 2개, 화장실 배기팬은 3곳의 화장실에 각각 100m³/h 풍량의 배기팬이 한 개씩 설치되어 있다. 이때, 각실의 창문, 주출입문 및 부출입문은 닫아 자연환기는 이루어지지 않도록 설정하였다. 보육실의복도측 출입문만이 열려 있는 조건이다. 추가로 적용되는 기계환기장치는 600m³/h 용량의 환기장치 7대이며 인당 환기량은 39.6m³/h으로 국토부 기계환기설비 설치 기준[1]을 충족하도록 설계하였다. 상세 시뮬레이션 설정조건은 Table 3.과 같다. 외기조건은 해당 어린이집에서 코로나19가 확산되었던 시기의 기상데이터를 적용하였다. 입자발생압력은 실제 입자발생기의 취출압력으로 적용하였다. 총 1시간의 점심시간 중 20분 동안은 식사를 위해 마스크 미착용 상태에서 호흡기 바이러스 감염 유아로부터 비말이 발생하는 조건으로 가정하였다. 이 때, 시뮬레이션에서 발생입자개수는 20분 동안 총 6만개의 입자를 발생시켰다. 입자개수는 조건별 시뮬레이션 결과의 가시화가 용이한 수준으로 가정하였다. 이후 40분간 입자 미발생 상태에서 입자 전파 양상을 해석하여 최종적으로 1시간 경과 후 어린이집 전체에 분포된 입자수를 각 실별로 산출하여 분석하였다. 분석 결과는 Fig. 3~7., Table 4. 및 5.와 같다.

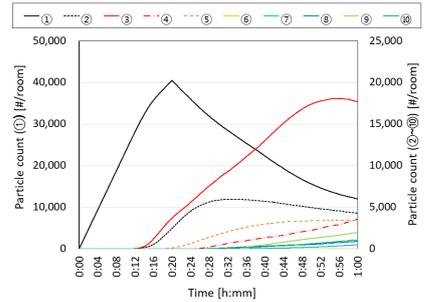
환기 조건은 크게 자연환기 조건 두 가지와 기계환기 조건으로 구성된다. 자연환기 조건은 기존 자연환기조건인 Case 1과 여기에 주출입문을 통한 맞통풍을 통해 자연환기 성능을 향상시킨 Case 2로 구성된다. 기계환기 조건은 각 실에 환기장치의 급배기구가 적용되고 화장실배기 및 주방배기가 가동되는 조건인 Case 3이다. 자연환기 조건 두 Case에서 외기온은 17°C, 풍속(풍향)은 0.1m/s(ESE), 0.25m/s(ESE)로 설정하였다. 해당 외기 조건은 대상 어린이집에서 코로나 19 발생으로 다수의 확진자가 발생한 시기(21년 5월 초)의 오전 간식시간 및 점심시간의 실제 외기온 및 풍속 조건을 반영한 것이다. 기류속도가 0.1~0.25m/s일 때, 풍향은 동남동(ESE)이었다. 실내온도는 당시 실내온도 수준인 20°C로 설정하였다. 입자 발생 위치인 ①은 해당 어린이집에서 최초 코로나 19 증상을 나타냈던 원생이 있었던 보육실_A(NR_A)이다.



(a) Velocity (height 1.5m)

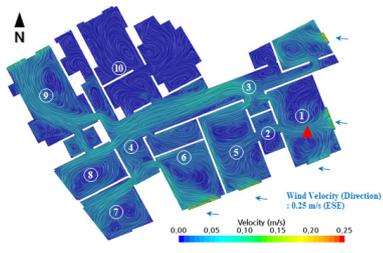


(b) Particle distribution at 60min elapsed

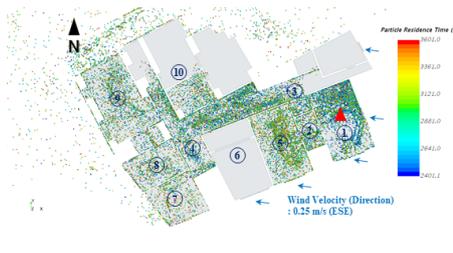


(c) Particle number distribution

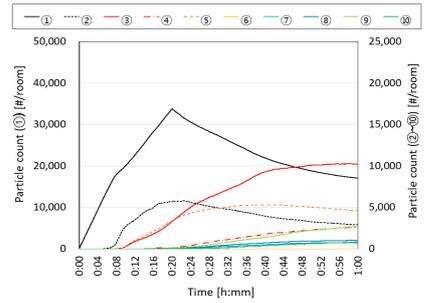
Fig. 3. Case 1-0.1 (Wind Velocity 0.1m/s(ESE))



(a) Velocity (height 1.5m)

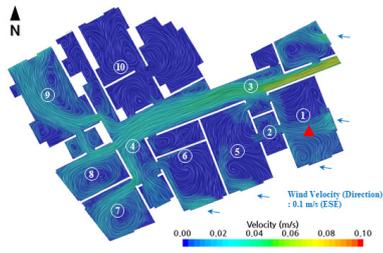


(b) Particle distribution at 60min elapsed

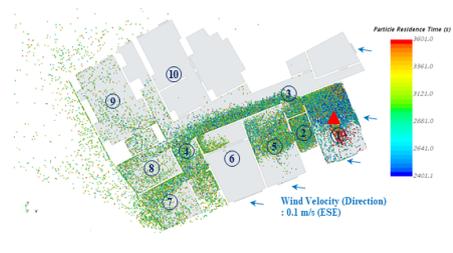


(c) Particle number distribution

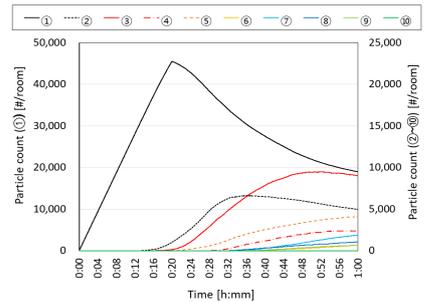
Fig. 4. Case 2-0.1 (Wind Velocity 0.1m/s(ESE))



(a) Velocity (height 1.5m)

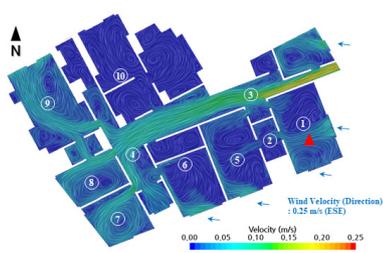


(b) Particle distribution at 60min elapsed

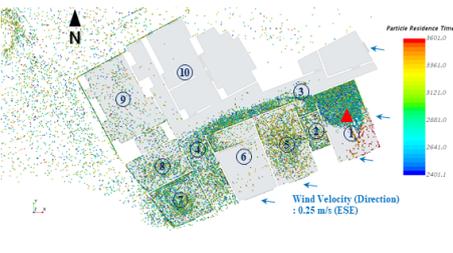


(c) Particle number distribution

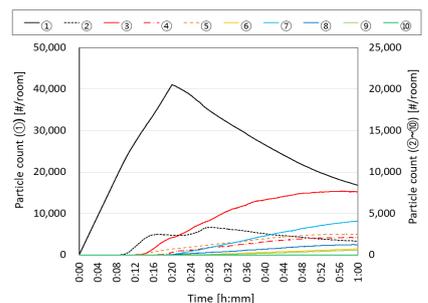
Fig. 5. Case 1-0.25 (Wind Velocity 0.25m/s(ESE))



(a) Velocity (height 1.5m)

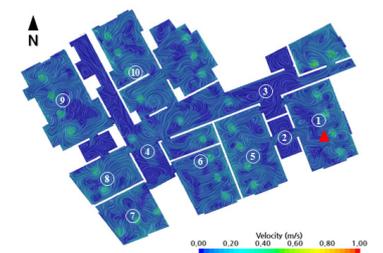


(b) Particle distribution at 60min elapsed



(c) Particle number distribution

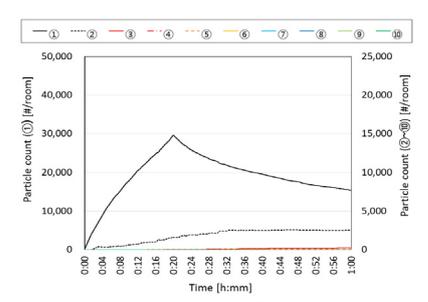
Fig. 6. Case 2-0.25 (Wind Velocity 0.25m/s(ESE))



(a) Velocity solution height 1.5m



(b) Particle distribution at 60min elapsed



(c) Particle count distribution

Fig. 7. Case 3 (Simulation results in conditions with ventilation system installed)

Table 4. The number of particles in each location at 60min elapsed [#room]

Case No.	Wind Speed (m/s)	①	②	③	④	⑤	⑥ ¹⁾	⑦	⑧	⑨	⑩ ²⁾
		NR-A	RR-1	C-1	C-2	NR-B	NR-C, etc	NR-D	NR-E	NR-F	NR-G, etc
CASE-1	0.1	11,985	4,267	17,675	3,568	3,480	0	469	919	1,986	1,092
CASE-1	0.25	17,078	2,905	10,248	2,674	4,607	0	845	1,047	2,687	741
CASE-2	0.1	19,029	4,981	9,032	2,402	4,122	671	1,905	1,065	696	4
CASE-2	0.25	16,813	1,674	7,622	2,135	2,513	770	4,103	1,240	596	0
CASE-3	-	15,422	2,534	247	0	96	0	0	0	0	0

- 1) There is an opening on the upper part of the wall between NR-C and the office room, so airflow moves, so the particle data in NR-3 and the office room was combined and analyzed.
- 2) There are several openings on the upper part of the walls between NR-G, playroom and staff room, so airflow moves, so the particle data in NR-7, playroom and staff room was combined and analyzed.

Table 5. Total number of particles per room at 60min elapsed [#room]

Case No.	Wind Speed (m/s)	Sum of ⑥~⑩	Change ratio (%)	Sum of ⑤~⑩	Change ratio (%)	Sum of ①~⑩	Change ratio (%)
CASE 1	0.1	4,466	-	7,946	-	45,441	-
CASE 1	0.25	5,320	19.2	9,927	24.9	42,832	-5.7
CASE 2	0.1	4,341	-2.8	8,463	6.5	43,907	-3.4
CASE 2	0.25	6,709	50.2	9,222	16.1	37,466	-17.6
CASE 3	-	0	-100.0	96	-98.8	18,299	-59.7

3. 시뮬레이션을 통한 환기 개선안 평가

3.1. 자연환기 환기 조건에서의 실내 기류속도 분포 및 입자농도 분포 분석 결과

먼저, 외부 풍속이 매우 낮은 0.1m/s의 동남동풍이 불 때, 기존 자연환기장 개방 조건인 Case 1에서 중복도를 통해 전체 보육실로의 유해입자 전파 양상을 분석하였고, 이 조건을 기본 조건으로 주출입문 추가 개방에 따른 자연환기 개선조건인 Case 2에 대하여 입자 전파 양상 및 입자 제거 효과를 비교·분석하였다. 또한, 풍속이 0.25m/s로 증가한 경우에 대해서도 입자 전파 양상 및 입자제거 효과를 비교·분석하였다.

Fig. 3., Table 4. 및 5.와 같이, 기존 자연환기 조건인 Case 1에 대하여 기류속도 분포 및 1시간 경과 후 입자 확산 분포 평가 결과, 입자발생 보육실 ①의 창문으로부터 바람이 유입되어 인접 화장실인 ②를 통해 인접보육실인 ⑤로 기류가 유입되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 보육실 ①에서 빠져나간 기류는 복도인 ③, ④를 통해 보육실 ⑦, ⑧, ⑨로 유입된 후 해당 실의 창을 통해 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. 그로 인해 화장실인 ②, 인접보육실 ⑤, 복도 ③, ④ 및 보육실 ⑦, ⑧, ⑨의 입자농도가 모두 높아진 것을 확인할 수 있었다. 보육실 ⑥의 경우, 창을 통해 깨끗한 바람이 유입되어 복도로부터 입자가 유입되지 않았고, 보육실 ⑩의 경우 외부 창문이 닫혀 있어 복도로부터 기류 및 입자 유입이 원활하게 이루어지지 않은 것으로 분석되었다. 발생시킨 6만개의 입자 중 1시간 경과후 45,441개의 입자가 실내에 남아 모든 Case 중 가장 많은 입자가 실내에 남아 있었다. 최종적으로, 자연환기로 제거된 것은 24%에 불과하였다.

그러나, Fig. 4., Table 4. 및 5.와 같이, 풍속 0.1m/s의 동남동풍이 불 때, 주출입문을 통한 맞통풍이 추가된 Case 2에서 기류속도 분포 및 1시간 경과 후 입자 확산 분포 평가 결과, 개방된 부출입구로 유입되는 바람이 주출입구로 빠져나가는 기류흐름으로 인하여 보육실 ①에서 복도 ③으로 빠져나온 입자들이 Case 1에서 보다 상대적으로 보육실 ⑨, ⑩으로 덜 유입된 반면, 보육실 ⑥, ⑦, ⑧로는 더 많이 유입되었다.

Table 5.와 같이, 풍속 0.1m/s일 때, Case 1에서 복도를 통해 유해 입자가 전파된 보육실 ⑥~⑩의 입자수 합은 4,466개였고, Case 2에서는 4,341개로 산출되어 2.8% 감소하는 데 그쳤다. 입자발생실인 보육실 ①과 인접한 보육실 ⑤를 포함한 보육실 ⑤~⑩의 입자수 합은 Case 1에서는 7,946개였으나 Case 2에서는 8,463개로 산출되어 오히려 6.5%가 증가하였다. 전체 입자수에서는 Case 1보다 Case 2가 3.4% 감소하여 큰 개선효과를 나타내지 못하였다. 이는 0.1m/s의 기류속도는 너무 작아 주출입문을 통한 맞통풍이 추가되어도 복도를 통해 타 보육실로 유입된 입자를 해당 실의 창을 통해 외부로 충분히 배출되지 못하는 것으로 분석되었다.

Fig. 5., Table 4. 및 5.와 같이, 풍속이 다소 증가한 0.25m/s의 동남동풍이 부는 경우를 살펴보았다. Case 1에서 풍속이 0.1m/s인 경우보다 타 보육실로 전파된 입자수가 더 증가하였다. Case 1에서 풍속이 0.1m/s인 경우보다 0.25m/s일 때, 복도를 통해 전파되는 보육실 ⑥~⑩의 입자수 합계는 19.2% 증가하였고, 보육실 ⑤~⑩의 입자수 합계는 24.9% 증가하였다. 전체 입자수만이 5.7% 감소하여 입자 제거 효과가 크게 개선되지 못하였다.

Fig. 6., Table 4. 및 5.와 같이, 주출입문이 추가로 개방된 Case 2에서는 풍속이 0.25m/s일 때, Case 1에서 풍속이 0.1m/s인 경우보다 보육실 ⑥~⑩의 입자수 합계는 오히려 50.2% 증가하였고, 보육실 ⑤~⑩의 입자수 합계 또한 16.1% 증가하였다. 이는, 기류속도가 너무 낮은 0.1m/s일 때보다 0.25m/s일 때, 복도에서 타보육실로 유입되는 기류 속도가 증가하여 이를 타고 복도에 도달한 입자들이 타 보육실로 더 많이 전파된 것으로 분석된다. 또한, 해당 보육실로 유입된 입자들은 기류속도 0.1m/s일 때보다는 창을 통해 외부로 더 많이 빠져나갔으나 보육실로 유입된 입자수가 더 많아 결국은 증가하게 된 것으로 분석된다. 전체 입자수는 17.6% 감소하였는데 주출입문을 통해 입자가 배출되어 일부 개선효과를 나타낸 것으로 분석된다.

3.2. 환기설비 개선 후 개선효과 평가 결과

기존 자연환기 조건(Case 1)에서 풍속이 매우 낮은 0.1m/s(동남 동풍) 조건을 기준으로, 창문을 모두 닫고 각 실에 기계환기설비를 적용하여 급배기를 공급하고, 주방 및 화장실 배기팬을 가동하여 환기를 최대로 수행한 Case 3에 대하여 입자 전파 양상 및 입자 제거 효과를 비교·분석한 결과는 다음과 같다.

Fig. 7., Table 4. 및 5.와 같이, 자연환기 없이 기계환기만 가동되는 Case 3에서는 풍속이 0.1m/s일 때의 Case 1의 경우와 비교 시, 보육실 ⑥~⑩의 입자수 합계는 0개로 가장 크게 개선되었고, 보육실 ⑤~⑩의 입자수 합계 또한 98.8% 감소하여 가장 크게 개선되었다. 전체 입자수 또한 59.7% 크게 감소하였다. 이는 외부 창문이 닫혀 있어 보육실 ①에서 발생한 입자가 해당실의 창을 통해 유입된 바람을 타고 복도를 통해 타 보육실로 전파되는 현상이 발생하지 않고, 해당실에서 발생한 입자는 대부분 해당실에 설치된 환기장치를 통해 배출되기 때문인 것으로 분석된다. 인접실로의 입자 전파는 화장실 배기팬 가동으로 음압이 발생하는 인접 화장실②로만 많이 전파되었고 인접 보육실⑤ 및 복도③으로는 아주 적게 전파되었다.

4. 결론

본 연구에서는 코로나19 집단감염이 발생한 중복도형 어린이집을 대상으로 집단감염 발생시 환경조건에 따라 입자성 유해물질의 실간 전파 특성을 시뮬레이션을 통해 평가하였으며, 자연환기 조건 및 기계환기 조건에서의 개선효과를 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 각 실에 작은 창을 갖고 있는 중복도형 어린이집에서 코로나19 집단감염이 발생한 당시의 환경조건과 유사하게 환기창만을 개방하여 자연환기를 실시하되, 외부풍속을 0.1, 0.25m/s 수준으로 크지 않게 설정하고 각실의 출입문이 개방된 조건에서 입자성 유해물질을 20분간 발생시키고 1시간 경과 후의 입자분포 시뮬레이션 결과, 건물 대부분의 실로 입자성 유해물질이 전파되었고 발생시킨 6만개의 입자 중 45,441개가 실내에 잔존하여, 자연환기로 제거된 것은 24%에 불과하였다.
- 2) 기존 자연환기 조건에 추가로 건물 주출입문 두 곳을 개방한 자연환기 개선조건(풍속 0.1~0.25m/s)에서는 주출입문 개방 전보다 오히려 다른 실로의 입자 전파 개수가 증가하였는데, 이는 기류속도가 낮고 실내외 온도차가 크지 않은 환경조건으로 인해 주출입문을 통한 맞통풍이 추가되어도 복도로 유입된 입자를 타 보육실을 거쳐 외부로 충분히 빠져나가도록 하지 못하는 것으로 분석되었다.
- 3) 각 실에 대해 기계환기를 적용한 개선안에서는 다른 실로의 전파 및 발생공간의 입자수 농도가 가장 크게 감소하였다. 기존 자연환기 조건에서 풍속 0.1m/s의 경우와 비교시, 복도를 통한 인접실로 전파된 입자수는 0으로 크게 감소하였고, 전체 입자수도 59.7% 감소하여 개선효과가 큰 것으로 평가되었다.
- 4) 이와 같이, 자연환기시 외부풍속 및 실내외 온도차 조건에 따라 실내환기량이 충분하지 않을 수 있을 뿐만 아니라 특히 중

복도형 건물에서는 오히려 실내 입자성 유해물질을 다른 실로 전파시키는 양상이 발생할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 중복도형 건물에서는 기계환기를 통해 안정적인 실내공기질 관리 필요성을 확인하였다.

본 연구에서는 코로나19 집단감염이 발생한 시설을 대상으로 집단감염 발생조건에 한정된 풍속, 풍향 조건에서 자연환기 효과 분석을 수행하였다. 유해물질 전파특성 및 입자수 증감 비율은 풍향, 풍속 및 실내외 온도차 등에 따라 달라질 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KE-TEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20202020800360).

References

- [1] 국토교통부, 건축물의 설비기준 등에 관한 규칙, 2021. // (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Rules regarding facility standards for buildings, 2021.)
- [2] 박성민 외 4인, 어린이집 실내공기질 실태 조사, 한국생활환경학회지, 제24권 제6호, 2017.12, pp.733-743. // (S.M. Park et al., A survey of the indoor air quality in the child care center, The Korean Society of Living Environmental System, 24(6), 2017.12, pp.733-743.)
- [3] 안태경, 현장측정을 통한 실생활에 따른 미세먼지 비교분석 -춘계, 하계 기간을 중심으로-, 대한건축학회연합논문집, 제22권 제5호, 2020.10, pp.63-69. // (T.K. Ahn, Comparative analysis of fine dust depending actual life by field measurement - Focusing on the spring and summer periods, Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea, 22(5), 2020.10, pp.63-69.)
- [4] 박승환, 박소우, 송두삼, 시뮬레이션을 통한 어린이집의 환기시스템 및 공기정정기 설치에 따른 미세먼지 저감 효과 분석, 설비공학 논문집, 제33권 제7호, 2021.07, pp.359-368. // (S.H. Park, S.W. Park, D.S. Song, Effect of installation of ventilation systems and air cleaning units in daycare center on particulate matter reduction using simulation, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 33(7), 2021.07, pp.359-368.)
- [5] 김상철 외 5인, 어린이집 실내공기 중 주요 오염물질의 특성 및 환기에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 제30권 제3호, 2014.06, pp. 245-250. // (S.C. Kim et al., A study on characteristics of main indoor air pollutants and ventilation in nursery facilities, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 30(3), 2014.06, pp. 245-250.)
- [6] 환경부, 실내공기질 관리법 시행규칙, 2020. // (Ministry of Environment, Indoor air quality management act enforcement rules, 2020.)
- [7] CDC (Centers for Disease Control and Prevention), Science brief: Transmission of SARS-CoV-2 in K-12 schools and early care and education programs, 2021.
- [8] WHO (World Health Organization), Transmission of SARS-CoV-2: Implications for infection prevention precautions, 2020.
- [9] 박영아, 조미현, 어린이집의 코로나-19 대응 현황과 어려움에 관한 연구, 한국영유아보육학, 제125권, 2020.11, pp.145-172. // (Y.A. Park, M.H. Cho, A study on the response status and difficulties of COVID-19 in childcare centers, Korea Journal of Child Care and Education, 125, 2020.11, pp.145-172.)
- [10] 김영희, 주현정, 코로나19 상황에서 어린이집 영유아의 스트레스와 보육교사의 지원, 학습자중심교과교육연구, 제21권 제20호, 2021.10, pp.167-189. // (Y.H. Kim, H.J. Ju, Young children's stress due to COVID-19 and supporting methods for childcare teachers, The Journal of Learner-Centered Curriculum and Instruction, 21(20), 2021.10, pp.167-189.)
- [11] A.S. Lopez et al., Transmission dynamics of COVID-19 outbreaks associated with child care facilities - Salt Lake City, Utah, April-July 2020, Morbidity and Mortality Weekly Report, 69(37), 2020.09, pp.1319-1323.
- [12] Thermo Fisher Scientific, Safety data sheet, 2010.